



Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V.

Bliersheimer Straße 60
47229 Duisburg

Abschlußbericht zum Projekt

**„Feldtests zur Ermittlung der Praxistauglichkeit und Optimierung
eines Verfahrens zur Minderung der Emissionen aus
Kleinf Feuerungsanlagen“**

16.11.04-31.05.05

Werkvertrag Nr.:77/04; Auftrag Nr.: 47181

Bearbeiter: Dr. E. Erich
Tel.: 02065 418 268

Feldtests zur Ermittlung der Praxistauglichkeit und Optimierung eines Verfahrens zur Minderung der Emissionen aus Kleinfeuerungsanlagen

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Verlauf der Holzverbrennung	3
2.1	Verbrennung von Holz	3
2.2	Rauchgasreinigung in Kleinfeuerungsanlagen	6
3	Forschungsziel	6
3.1	Der Spänekatalysator	6
4	Stand der bisherigen Entwicklungsarbeiten	7
4.1	Aufbau des Abgasreinigungssystems für private Haushalte	7
5	Durchführung der Feldversuche	11
5.1	Änderungsarbeiten und Praxistauglichkeit des Katalysatorsystems	12
5.2	Ergebnisse der Messungen	13
5.2.1	Ergebnisse der CO- und Kohlenwasserstoffmessungen	17
5.3	Olfaktometrische Messungen	28
5.4	Druckverluste des Katalysatorsystems	31
5.4.1	Staubabscheidung in der Katalysatorschüttung	33
5.5	Belegung der Katalysatoroberfläche mit Palladium	34
6	Optimiertes Katalysatorsystem zur Reinigung von Abgasen aus Kleinfeuerungsanlagen	35
7	Zusammenfassung	36
8	Danksagung	38
	Anhang	39
	Literaturverzeichnis	40

1 Einleitung

Im Projekt „Feldtests zur Ermittlung der Praxistauglichkeit und Optimierung eines Verfahrens zur Minderung der Emissionen aus Kleinfeuerungsanlagen“ wurden in ausgewählten Privathaushalten und Institutionen Prototypen des neuen, katalytischen Abgasreinigungssystems vom Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V. (IUTA) für Kleinfeuerungsanlagen installiert. Ziel des Vorhabens war es, das Katalysatorsystem zur Emissionsminderung von Kleinfeuerungsanlagen in der Ausführung des neuen Prototyps, der sich unter Kosten- und Wartungsgesichtspunkten prinzipiell als marktfähiges Produkt eignet, bei ausgiebigen Feldtests unter Praxisbedingungen zu prüfen. Die Ergebnisse sollen insbesondere Aufschluss über die Standzeit des entwickelten Katalysators unter realen Betriebsbedingungen und die Praxistauglichkeit des Systems geben und ggf. weiteren Entwicklungs- bzw. Optimierungsbedarf aufdecken. Die erzielten Erkenntnisse sollen dem Erreichen der Praxisreife des Katalysatorsystems und der Vorbereitung der Markteinführung dienen.

2 Verlauf der Holzverbrennung

Unter idealen Bedingungen werden bei der Verbrennung von festen, flüssigen und gasförmigen Energieträgern im Wesentlichen Kohlendioxid und Wasser freigesetzt. In Kleinfeuerungsanlagen sind die Voraussetzungen für die vollständige Oxidation des Brennstoffes allerdings nicht zu realisieren, weshalb umweltbelastende Stoffe wie Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffverbindungen, die zum Teil auch sehr geruchsintensiv sind, emittiert werden. Zur Oxidation dieser Produkte der unvollständigen Verbrennung wurde im IUTA ein Katalysator entwickelt und zur Emissionsminderung von holzbefeuerten Öfen getestet. Der robuste Aufbau und die einfache Handhabung des Katalysators machen ihn für den Einsatz in mit Holz betriebenen Kleinfeuerungsanlagen interessant, für die wirksame Emissionsminderungsmaßnahmen aufgrund der spezifischen Anforderungen bezüglich der Wartungs- und Bedienungsfreundlichkeit sowie hinsichtlich geringer Systemkosten, bisher nicht eingeführt werden konnten.

Während die Verbrennung fossiler Brennstoffe wie Öl und Gas weitgehend vollständig verläuft, werden bei der Verbrennung von Kohle und Holz neben rein mineralischen Stäuben auch Ruß, Kohlenoxid und in nicht unerheblichem Ausmaß

Kohlenwasserstoffe emittiert. Bei 14,6 Mio. (im Jahr 2000 [1]) mit festen Brennstoffen betriebenen Kleinfeuerungsanlagen tragen diese beträchtlich zu der Gesamtbelastung an Staub und Kohlenwasserstoffen bei. Im Jahr 2003 wurden ca. 3% der Endenergie der Bundesrepublik Deutschland von 9.200 PJ über feste Brennstoffe in Haushalten und Kleinverbrauchern bereitgestellt.

Aus Kleinfeuerungsanlagen, die mit festen Brennstoffen betrieben werden, resultieren ca. 65% des Staubes, 99% der PAK, darunter 100% des Benzo(a)pyrens, 89% des Benzols und 89% der VOC aller Emissionen aus Kleinfeuerungsanlagen [2]. Insbesondere die mit Holz befeuerten Kaminöfen, die als Sinnbild der Gemütlichkeit gelten, tragen im hohem Maße zur Gesamtemission der Kleinfeuerungsanlagen bei und sind oft auch Anlass für Nachbarschaftstreitigkeiten aufgrund der von ihnen ausgehenden Geruchsbelästigungen bei nicht ordnungsgemäßigem Betrieb.

In Anbetracht dieser bekannten Tatsachen dürfen beispielsweise offene Kamine die mit Holz befeuert werden, nur gelegentlich, nach der geltenden Rechtsprechung an 8 Tagen im Monat für jeweils ca. 5 Stunden und nur mit naturbelassenem, stückigem Holz im lufttrockenen Zustand oder mit Holzbriketts betrieben werden.

Der Gesetzgeber hat sich in Anbetracht der steigenden Zahl der mit Holz betriebenen Kleinfeuerungsanlagen des Problems angenommen und bereitet eine weitere Novellierung der 1.BImSchV vor. Derzeit wird der aktuelle Stand und die Entwicklung der Emissionen an kritischen Schadstoffen, wie z.B. Feinstaub und polycyklischen aromatische Kohlenwasserstoffen (PAK) aus Kleinfeuerungsanlagen ermittelt und geeignete Maßnahmen zur Emissionsminderung untersucht. Die Ergebnisse sollen in konkrete Handlungsempfehlungen zur Fortschreibung der 1.BImSchV einfließen.

2.1 Verbrennung von Holz

Da insbesondere die Verbrennung von Holz zur Emissionsbelastung beiträgt, ist die Kenntnis der Verbrennungsvorgänge und der entstehenden Verbindungen für die Integration von Abgasreinigungsmaßnahmen unumgänglich.

Die Verbrennung von Holz kann prinzipiell in 3 Phasen eingeteilt werden.

Erwärmung und Trocknung: Bei diesem endothermen Vorgang wird das Holz von außen nach innen durch Strahlung, Konvektion und Wärmeleitung auf etwas über 100°C erwärmt. Dabei wird freies, ungebundenes Wasser sowie bei höheren Temperaturen auch zellgebundenes Wasser freigesetzt.

Entgasung und thermische Zersetzung: Ab ca. 200°C beginnt die Freisetzung von flüchtigen Verbindungen wie Teeren, organischen Säuren, Kohlenwasserstoffen, Kohlenoxid und Wasserstoff aus der Zellulose und Hemizellulose sowie dem Lignin.

Verbrennung: Die flüchtigen Verbindungen, die etwa 85 Gew.-% bezogen auf die trockene Holzmenge ausmachen, verbrennen im Feuerraum mit dem Luftsauerstoff, im Idealfall vollständig zu Kohlendioxid und Wasserdampf. Die verbleibende Holzkohle verbrennt deutlich langsamer.

In der Trocknungsphase verliert Holz, je nach Feuchtegehalt 10-15 % seines Gewichtes, bei der sich anschließenden Entgasung bis zu 85 Gew.-%. Als Holzkohle verbleiben ca. 10 Gew.-% und als Asche ca. 1-2 Gew.-%. Herrscht nun im Feuerraum Luftmangel, schlechte Durchmischung oder zu niedrige Temperatur, kann eine vollständige Oxidation der organischen Verbindungen in der Gasphase nicht stattfinden. Diese Verbindungen bilden zusammen mit CO₂, H₂O, CO, NO_x und den Partikeln das Abgas, das über den Kamin abgegeben wird. Das Spektrum der so freigesetzten Verbindungen reicht von einfachen Kohlenwasserstoffen wie den Alkanen bis hin zu Polyzyklischen Aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK).

Tabelle 1: Organische Verbindungen im Abgas von kleinen Holzverbrennungsanlagen

Kohlenwasserstoffe	4800mg/MJ [3] 100-8000mg/MJ [4]
Aldehyde	30-130mg/MJ [5]
Formaldehyd	90mg/MJ [5] 20-125mg/MJ [6]
Essigsäure	360mg/MJ [7]
PAK	0,3-11mg/MJ [5]
BaP	0,5-3-0,3mg/MJ [8]

Unter den „Kohlenwasserstoffen“ in Tabelle 1 sind neben den aufgeführten Verbindungen noch eine Vielzahl von organischen Verbindungen, darunter Alkane und Alkene, Carboxylsäuren, Alkohole, Benzol, Phenole und Kresole, Polystyrole sowie Dioxine und Furane zusammengefasst. Die genannten organischen Verbindungen verursachen den typischen Geruch von Holzrauch.

2.2 Rauchgasreinigung in Kleinfeuerungsanlagen

Als einfache Lösung zur Rauchgasreinigung in Kleinfeuerungsanlagen bieten sich katalytische Systeme zur Oxidation der schädlichen Abgaskomponenten zu geruchsneutralem CO_2 und H_2O an. Diese müssen aber für Kleinemittenten wesentlich preisgünstiger und einfacher zu betreiben sein, als katalytische Systeme in industriellen Rauchgasreinigungsanlagen.

Bisherige Bemühungen eine katalytische Abgasreinigung für Kleinfeuerungsanlagen auf dem Markt zu etablieren, scheiterten an der komplizierten Handhabung, am wartungsintensiven Aufbau und nicht zuletzt am Preis, der die Kosten von Kleinfeuerungsanlagen oftmals übersteigt. Bisher ist kein katalytisches Abgasreinigungssystem für Kleinfeuerungsanlagen auf dem Markt verfügbar, das den spezifischen Anforderungen genügt.

3 Forschungsziel

In den Untersuchungen soll die generelle Eignung des von IUTA entwickelten Katalysatorsystems an Kaminöfen verschiedener Bauarten mit unterschiedlichen Kaminbauten bei variierenden Bedingungen hinsichtlich der Betriebsweise, der Betriebsdauer sowie der Wartungs- und Reinigungsintervalle nachgewiesen und der Einfluss dieser Parameter auf die Standzeit untersucht werden.

Ziel der bisherigen Entwicklungsarbeiten war die Bereitstellung eines einfachen katalytischen Abgasreinigungssystems für mit festen Brennstoffen betriebene Kleinfeuerungsanlagen. Der Katalysator weist einen sehr geringen Druckverlust auf, der es erlaubt, das Abgasreinigungssystem mit dem natürlichen Zug des Kamins zu betreiben. Das neue System soll für den Einsatz vornehmlich im privaten Bereich geeignet und kostengünstig sein sowie auch von technischen Laien problemlos betrieben werden können.

3.1 Der Spänekatalysator

Im Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V. (IUTA) wurde ein billiger und einfach aufgebauter Katalysator entwickelt, der in seinem Grundgerüst aus einem metallischen Träger besteht, auf den katalytisch aktive Substanzen aufgebracht werden.

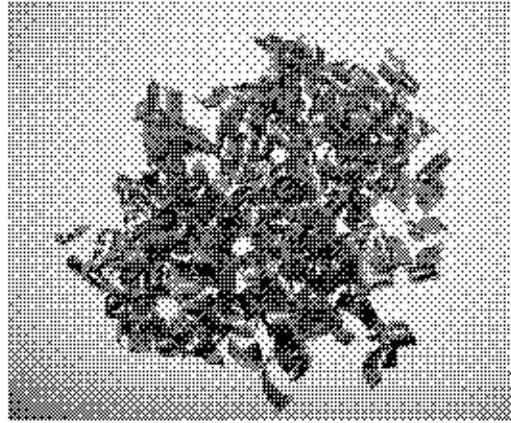


Abb. 1: Der Spänekatalysator

Als Trägermaterial zur Aufnahme der katalytisch wirksamen Komponenten kommt eine Schüttung aus gereinigten Edelstahlspänen, die bei der Produktion in Metall verarbeitenden Betrieben anfallen, zum Einsatz. Diese im Sinne des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes als Abfälle bezeichneten Stoffe, werden durch Dotierung mit verschiedenen Übergangsmetallen zu dem Oxidationskatalysator aufgebaut. Durch die Anwesenheit des Katalysators kann die gewünschte Oxidationsreaktion zum Abbau der Kohlenwasserstoffe im Rauchgas zu unschädlichem CO_2 und Wasser unter milden Reaktionsbedingungen gestartet und unterhalten werden. Mit den Metallspänen steht ein kostengünstiges und robustes Trägermaterial zum Aufbau von Katalysatoren zu Verfügung.

4 Stand der bisherigen Entwicklungsarbeiten

4.1 Aufbau des Abgasreinigungssystems für private Haushalte

Die Arbeiten zur Umsetzung eines Emissionsminderungssystems für den Einsatz in privaten Haushalten führten nach mehreren Prototypen zu dem in der Abbildung 2 wiedergegebenem System. Zur Installation wird das vorhandene, handelsübliche Abgasrohr gegen ein neues Abgasrohr mit Katalysatorkartusche ausgetauscht.

Um die Aktivität über die Standzeit des Katalysators bestimmen zu können, wurde der Prototyp mit zwei Anschlüssen für Messinstrumente versehen. Damit kann die Konzentration an Kohlenwasserstoffen, CO und CO_2 im Abgas vor und nach dem Katalysator dokumentiert werden.

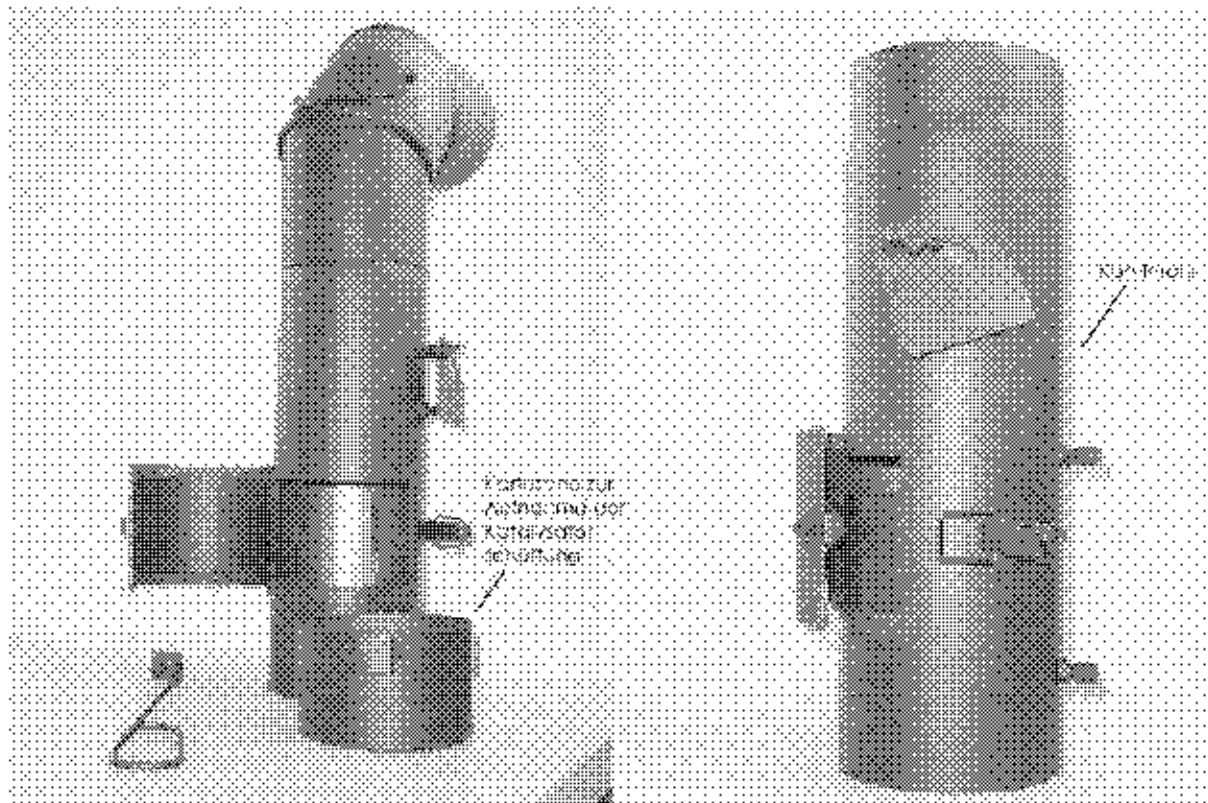


Abb. 2: Handelsübliches Kaminrohr mit Klappe, Kartusche für die Aufnahme des Katalysators und Heber

Dieses System wurde in einem Privathaushalt getestet, wobei sich zeigte, dass die Bedienung des Katalysators beim Anfeuern des Ofens zu umständlich war. Da sich der Kaminzug erst mit der Erwärmung des Kamins aufbaut, der Katalysator aber einen geringen Druckverlust von ca. 10 bis 12 Pa verursacht, war es zum Anfeuern des Ofens notwendig, die Katalysatorkartusche zu entfernen.

Um den Druckverlust des Katalysators beim Anfeuern des Ofens zu minimieren und um das System komfortabler zu gestalten, wurde eine drehbare Katalysatorkartusche entwickelt, die wie in Abbildung 3 dargestellt, im Ofenrohr installiert ist. Zum Anfeuern des Ofens wird die Katalysatorkartusche senkrecht, in den so genannten Bypassbetrieb, gestellt. Ist die notwendige Arbeitstemperatur des Katalysators von ca. 350° C erreicht, wird die Kartusche vollständig in den Abgasstrom gedreht (waagerechte Stellung).

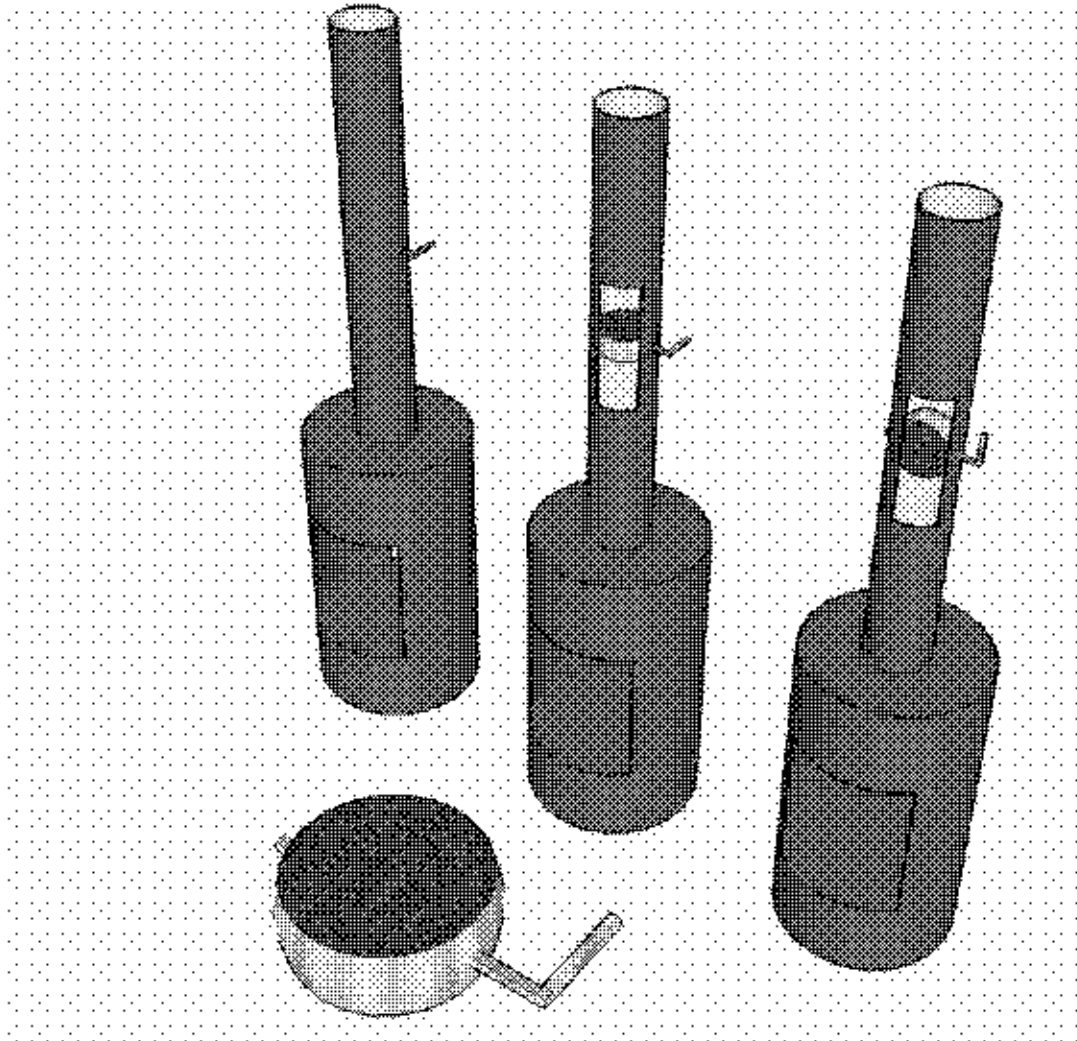


Abb.3: Betriebs- und Bypassstellung der Katalysatorlinse im Abgasrohr der Kleinf Feuerungsanlage

In den Untersuchungen soll die generelle Eignung des von IUTA entwickelten Kaminkatalysators an Kaminöfen verschiedener Fabrikate mit unterschiedlichen Kaminbauten bei variierenden Bedingungen hinsichtlich der Betriebsweise, der Betriebsdauer sowie der Wartungs- und Reinigungsintervalle nachgewiesen und der Einfluss dieser Parameter auf die Standzeit untersucht werden. Um eine einfache Handhabung zu gewährleisten sowie reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen, sind die für die Feldtests hergestellten Katalysatorsysteme mit Zeigerthermometern ausgestattet, mit deren Hilfe ein temperaturgesteuertes Einschalten des Katalysators möglich ist. Zum Anschluss der Messgeräte sind zudem zwei Messstutzen am Ofenrohr installiert.

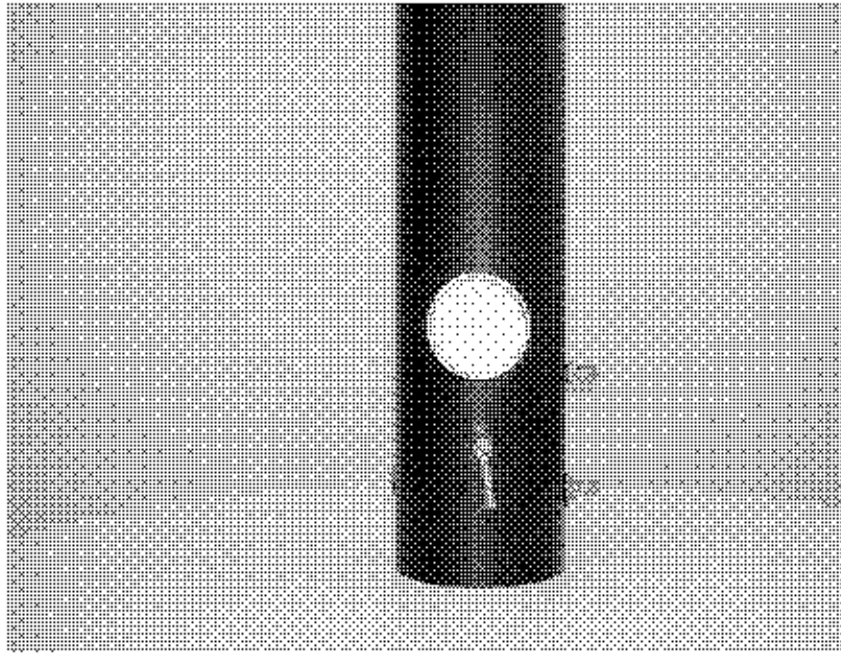


Abb. 4: Ofenrohr mit eingebautem Katalysator, Temperaturmessgerät und Messstutzen

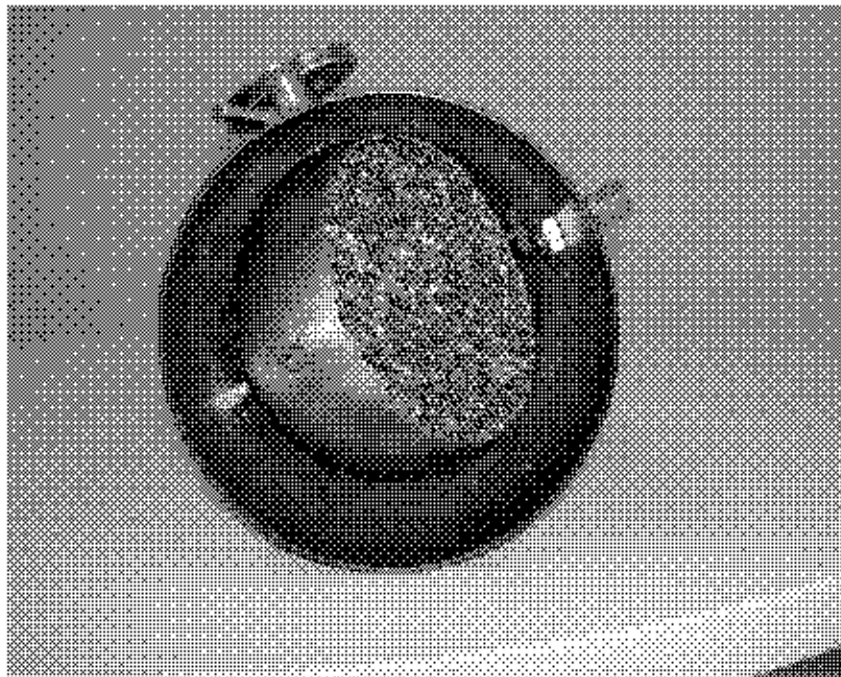


Abb. 5: Ofenrohr mit Katalysatorkartusche

Die Feldtests wurden mit 13 einzeln angefertigten Prototypen des beschriebenen Katalysatorsystems durchgeführt. Einer dieser Prototypen diente zur Durchführung ergänzender Untersuchungen im IUTA - Technikum, insbesondere zur Ermittlung des

Druckverlustes sowie des Umsatzes von organischem Kohlenstoff mit dem realisierten Katalysatorsystem. Zusätzlich wurden olfaktometrische Messungen des Rein- und Rohgasstromes durchgeführt, um mit den jeweilig ermittelten Geruchseinheiten auch Aussagen über die erzielte Geruchsminderung treffen zu können. 10 Prototypen wurden über den Zeitraum der Heizperiode 2005 von fachkundigen Betreibern in Privathaushalten getestet. Diese Installationen umfassen den Einbau an Kaminöfen mit waagrecht oder senkrecht angebrachten Kaminrohren mit verschiedenen Rohrdurchmessern. Zwei weitere Katalysatorsysteme kamen an Kaminöfen der Berufsbildungsstätte des Schornsteinfegerhandwerks in Dülmen zum Einsatz.

Das Untersuchungsprogramm umfasste die Messung der Abgaskomponenten Gesamtkohlenwasserstoffe und Kohlenmonoxid sowie den Druckverlust zu Beginn und am Ende der Heizperiode. Bei den in der Schornsteinfegerschule installierten Systemen wurden mehrmals im Februar, März und April die entsprechenden Werte ermittelt. Zusätzliche Messungen und Störungsbeseitigungen wurden bei außerplanmäßigen Betriebsstörungen durchgeführt.

Zum Abschluss des Untersuchungsprogramms wurde das Staubrückhaltevermögen des Katalysators bestimmt sowie die Charakterisierung der Pd-Oberflächenbelegung des Katalysatormaterials durchgeführt.

5 Durchführung der Feldversuche

Zur Durchführung der Feldversuche wurden bei den Betreibern der verschiedenen Ofensysteme telefonisch die Einbausituation und die Bemaßung des auszuwechselnden Ofenrohrsegmentes abgefragt bzw. persönlich vor Ort die Abmessungen aufgenommen. Aufgrund der individuellen Einbausituationen konnte insgesamt nur ein standardisiertes System mit genomten Ofenrohrängen von 1m bzw. 0,5m bei 150mm (180mm) Innendurchmesser vorbereitet werden. Die anderen Systeme mussten jeweils in der IUTA - eigenen Werkstatt bzw. beim Lieferanten des Katalysatorsystems oder vor Ort angepasst werden.

5.1 Änderungsarbeiten und Praxistauglichkeit des Katalysatorsystems

Die einzelnen Katalysatorsysteme wurden wie in den Abbildungen 3 und 28 zu sehen, auf den Ofen aufgesetzt, aber teilweise auch in waagerechte Abgasrohre installiert (siehe Abbildung 20).

Eine erste Befragung und auch selbst durchgeführte Messung ca. 3 Wochen nach der Erstinbetriebnahme ergab zunächst überraschende Aussagen der Betreiber, die auch durch eigene Nachmessungen bestätigt und entsprechende Nacharbeiten teilweise behoben werden konnten.

Es zeigte sich bei einigen senkrecht angebrachten Katalysatorsystemen, dass nach wenigen Stunden Dauerbetrieb die Katalysatorlinse nicht mehr vollständig von der Bypassstellung zum Anfeuern des Ofens in die Betriebsstellung zu bringen war. Daher wird im Betrieb der Überdeckungsgrad des Ofenrohrquerschnitts durch den Katalysatorlinsenrand sehr groß und der Druckverlust des Systems zu hoch. In Folge dessen ist der Zug durch den Kamin zum Ofen eingeschränkt, wodurch die Verbrennung gestört wird, was zu einer verstärkten Russbildung führt, der sich in oder vor der Katalysatorschüttung ablagert. Durch die Siebwirkung der Katalysatorschüttung wird unverbrannter Holzstaub bzw. Flugasche abgeschieden. Aufgrund des sich ausbildenden immer größeren Druckverlustes, des sich verschlechternden Kaminzugs, der zu Sauerstoffmangel im Brennraum sowie im Katalysator führt und der daher auch geringeren Katalysatortemperaturen, oxidieren die Ablagerungen auf dem Katalysator in zu kleinem Ausmaß, was zu einem zunehmend höheren Druckverlust führt. Letztlich kann der Ofen nur noch in der Bypassstellung des Katalysators befeuert oder der Katalysator ausgebaut und gereinigt werden.

Des Weiteren wurde an einigen Systemen festgestellt, dass trotz gutem Einschwenkverhalten der Katalysatorlinse in die Betriebsstellung der Druckverlust für eine gute Verbrennung zu hoch war.

Die Gründe für dieses unerwartete Verhalten, das im extremen Gegensatz zu den bisherigen Laborversuchen stand, konnten relativ schnell festgestellt werden.

1. Die verwendeten Ofenrohre haben, um das System von Beginn an preisgünstig zu gestalten, übliche Ofenrohrqualitäten, d.h. es sind geschweißte Rohre mit 150 bzw. 180mm Innendurchmesser mit ca. 1,5mm Wandstärke. Nachfragen beim

Lieferanten ergaben, dass die Katalysatorlinsen sehr exakt auf 149mm Außendurchmesser gefertigt waren und die Rohre durch mechanisches Bearbeiten nachgerundet werden mussten. Nach dem Einbau der Linsen wurden die Ofenrohre, die eine leichte ovale Form aufweisen (wahrscheinlich durch die Lagerung bedingt), mittels eines Gummihammers bearbeitet. Durch die Temperaturbeaufschlagung des Ofenrohres beim Feuerungsbetrieb, formt das Ofenrohr wieder seine ursprüngliche, leicht ovale Form aus, was dazu führt, dass die Katalysatorlinse nicht mehr exakt in den Betriebszustand geschwenkt werden kann und sich dadurch ein erhöhter Druckverlust aufbaut.

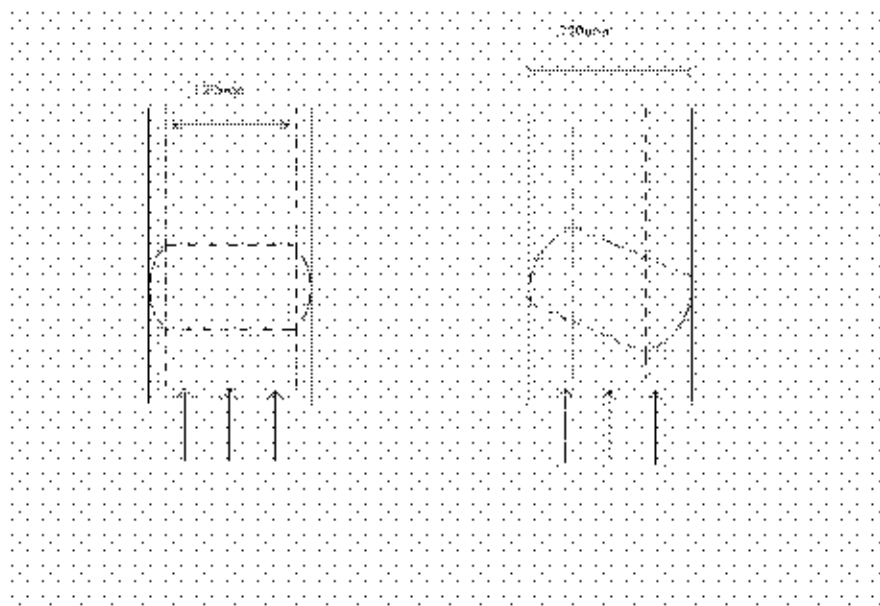


Abb. 6: Abgasströmung durch die Katalysatorkartusche

2. Ein weiterer Grund für den erhöhten Druckverlust war die Befüllung der Linse mit dem Späne katalysator. Nach den Vorgaben sollte die 150mm Linse mit 600g und die 180mm Linse mit 900g Späne katalysator als lockeres Haufwerk befüllt werden. Tatsächlich wurden bis zu 900g bzw. 1300g eingefüllt und die Gitter, zwischen denen der Katalysator lagert, noch mittels einer eingesetzten Schraube zusammengezogen. Dadurch ergab sich bei den 150mm Katalysatoren ein Druckverlust von ca. 13Pa bei einem Volumenstrom von ca. $70\text{m}^3/\text{h}$. Ein handelsüblicher Kaminofen braucht für einen ordnungsgemäßen Durchbrand von Holz einen Zug von ca. 10-15Pa. Damit müsste der Kaminzug in der Summe mindestens 30Pa betragen.

Nach der allgemeinen Formel für die Berechnung des Kaminzugs

$$\Delta P = h (d_{\text{gas}} - d_{\text{luft}}) g$$

mit d_{gas} = Dichte Abgas in kg/m^3

d_{luft} = Dichte Außenluft in kg/m^3

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$

h = Höhe des Kamins in m

beträgt die notwendige Kaminhöhe bei z.B. 10°C Außentemperatur, 250°C Abgastemperatur am Kamineintritt und einem λ (Luftzahl) von 3,5 zur Erzeugung von 30Pa Ofenzug ca. 6m ($\Delta P = h \cdot 5,023$).

Unter idealen Bedingungen müsste demnach eine Kaminhöhe von ca. 6m für eine harmonische Verbrennung im Ofen und für einen guten Zug durch den Katalysator ausreichend sein.

Bei mehreren Öfen, die mit dem Katalysatorsystem ausgerüstet wurden, beträgt die Kaminhöhe ca. 6m, d.h. nach vorstehender Berechnung wäre der Kaminzug bei idealen Witterungs- und Feuerungsbedingungen gerade ausreichend gewesen.

Tatsächlich wird aber der Druckverlust des Katalysators im Laufe des Betriebes durch Staubablagerungen in der Schüttung etwas höher. Herrscht dazu eine ungünstige Wetterlage, ist der Kaminzug nicht mehr ausreichend, um den ordnungsgemäßen Betrieb des Katalysators und des Ofens zu gewährleisten. In einem konkreten Fall war nach 2 Tagen Betrieb der Druckverlust des Katalysators in Betriebstellung so hoch, dass ein Teil der Katalysatorschüttung entfernt werden musste.

Es war vorgesehen, die 150mm Katalysatorlinsen mit max. 600g Spänekatalysator zu befüllen. Tatsächlich waren in diesem Fall über 800g befüllt. Nach der Reduzierung der Katalysatormenge auf 600g wurde zunächst der gewünschte gute Druckverlust erreicht. Der vom Betreiber gemessene CO-Abbau von 540 auf 260 ppm belegte die Aktivität des Katalysators zur Kohlenwasserstoff- und CO-Reduktion ($U_{\text{CO}} \sim 59\%$).

An diesem Ofen wurde bei der CO-Bestimmung ein Druckverlust von 16-18Pa bei Katalysator in Betriebstellung und 10-12Pa in Bypassstellung bei Temperaturen von 380°C vor und 260°C hinter Katalysator gemessen.

Allerdings brachte die Verringerung der Katalysatormenge auf Dauer nicht den gewünschten Erfolg, da sich das Gitter, auf dem die Katalysatorschüttung ruht, innerhalb weniger Tage wieder mit Ruß belegte und so der Druckverlust stark anstieg.

Ca. 2 Wochen nach Reduktion der Katalysatormenge betrug der Druckverlust 20-25Pa in Betriebstellung bei $280\text{-}300^\circ\text{C}$ vor Katalysator. Mit diesem hohen Druckverlust war

der Zug durch den Katalysator zum Brennraum nicht mehr ausreichend um eine störungsfreie Verbrennung zu gewährleisten (Abbildung 7).

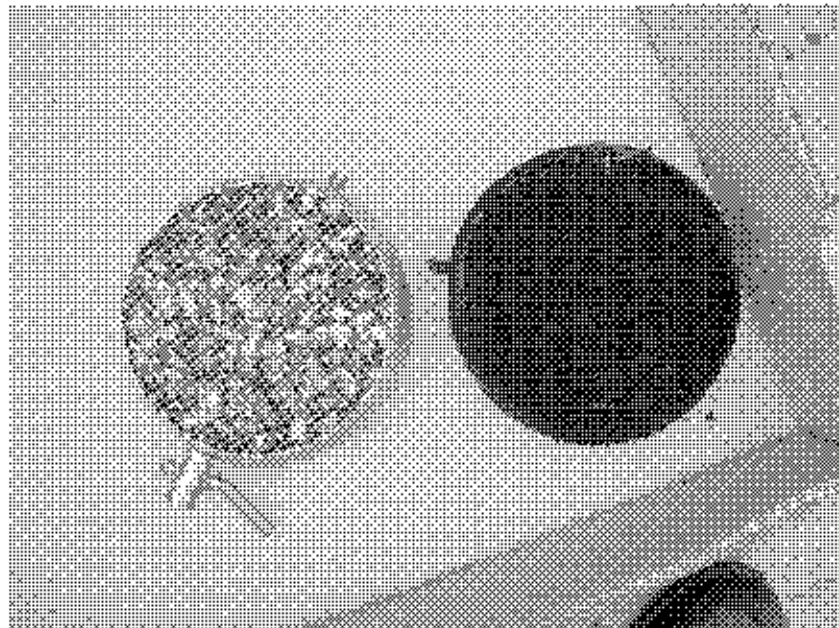


Abb. 7: Neue und mit Ruß belegte Katalysatorlinse

Erstaunlich war allerdings, dass sich der Ruß extrem leicht entfernen lies, da er nur auf dem Gitter anlagerte. Die Katalysatorschüttung war unbelegt.

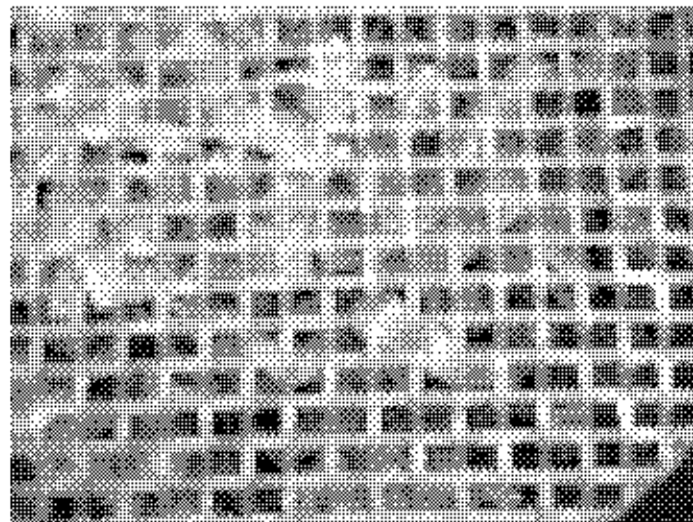


Abb. 8: Von Ruß befreite Katalysatorlinse

Bei einer weiteren Installation wurden ebenfalls sehr hohe Druckverluste von 36-38Pa in Betriebstellung des Katalysators gemessen, wobei die Temperatur vor Einschwenken des Katalysators mit 460°C ausreichend hoch war, jedoch in

Betriebstellung auf Grund des schlechter werdenden Zugs auf 380-390°C absank. Auch hier war der Druckverlust für den vorgesehenen Betrieb des Ofens und des Katalysators zu hoch.

Befragungen bei den anderen Teilnehmern des Feldversuches und eigene Messungen bestätigten das ungenügende Druckverlustverhalten bei einem Teil der ausgelieferten Katalysatorsysteme. Erfreulich war allerdings, dass der Betrieb der Katalysatoren in Bypassstellung in der Regel keine Probleme, mit Ausnahmen bei extrem ungünstigen Witterungsverhältnissen, bereitete.

Obwohl diese Feststellungen und Ergebnisse nur erste Eindrücke wiedergaben, wurde beschlossen, die Katalysatorlinsen auszubauen, die Katalysatorschüttung zu reduzieren und einen neuen, weiterentwickelten Spänekatalysator mit weniger Druckverlust einzusetzen. Lediglich bei drei Installationen, zwei Systeme in Privathaushalten und ein System im Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen der Universität Stuttgart (IVD) wurde der Katalysator nicht ausgetauscht, da die Betreiber keine größeren Probleme sahen. Die nachfolgend beschriebenen Ergebnisse beruhen auf Messungen, die nach der Neuinstallation der Katalysatorsysteme durchgeführt wurden.

5.2 Ergebnisse der Messungen

Näher betrachtet werden im Folgenden Messergebnisse, die an drei Öfen erhalten wurden. Ofen 1 hatte ein Abgasrohr von 180mm Durchmesser, die Öfen 2 und 3 jeweils 150mm Abgasrohre, wobei Ofen 3 eine waagrecht installierte Abgasführung hat.

Gemessen wurden jeweils die Kohlenmonoxidkonzentration mit einem Testo 350 Multisensorgerät und die Kohlenwasserstoffkonzentration mit einem Prozess - FID von der Firma Bmath Atomic. Auf Grund der teilweise beengten Platzverhältnisse wurde auf die zeitgleiche Bestimmung der Roh- sowie Reingaskonzentration verzichtet und stattdessen jeweils in Bypassstellung und bei Betriebsstellung des Katalysators hinter der Katalysatorkartusche gemessen. In der Regel wurde bei der Messung der einzelnen Konzentrationswerte versucht, die Temperaturen über 350°C, gemessen hinter Katalysator, konstant zu halten. Soweit möglich, wurden die Kohlenmonoxid- und Kohlenwasserstoffwerte gleichzeitig bestimmt.

Das System in der Universität Stuttgart, ausgerüstet mit dem ursprünglichen Katalysator, wurde ausführlich getestet und von Institutsangehörigen des IVD

vermessen. Erste Ergebnisse liegen vor, können aber, da die Untersuchungen in Stuttgart in Projektarbeiten eingebunden und noch nicht abgeschlossen sind, nicht veröffentlicht werden. Nach Aussage des Projektleiters ist mit dem Katalysatorsystem von IUTA eine Kohlenwasserstoffreduktion um 45-50% und eine CO-Reduktion bis zu 60%, gemittelt über einen Versuchszeitraum von mehreren Stunden, zu erreichen. Dieses gute Ergebnis wurde von IUTA, auch in vorherigen und aktuellen Technikumsuntersuchungen bei Systemen ohne Zusatzventilator nicht erzielt. Nach Aussage des Projektleiters beträgt die Kaminhöhe nur 6m. Die Messungen der Uni Stuttgart bestätigten auch Ergebnisse von IUTA, wonach bei Luftmangel der Umsatz an Kohlenwasserstoffen und CO stark absinkt.

5.2.1 Ergebnisse der CO- und Kohlenwasserstoffmessungen

Nachfolgend sind einige Ergebnisse der Untersuchungen exemplarisch dargestellt. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu beachten, dass die einzelnen Werte nur mit jeweils einem Messgerät erhalten wurden und Momentaufnahmen der Verbrennung und der katalytischen Minderung der Schadstoffe wiedergeben. Im Gegensatz zu den Technikumsversuchen von IUTA, bei denen unter idealen Bedingungen nach DIN der Ofen betrieben wurde, erfolgte nun die Befeuerung bei den Messungen gemäß der üblichen Vorgehensweise der Betreiber.

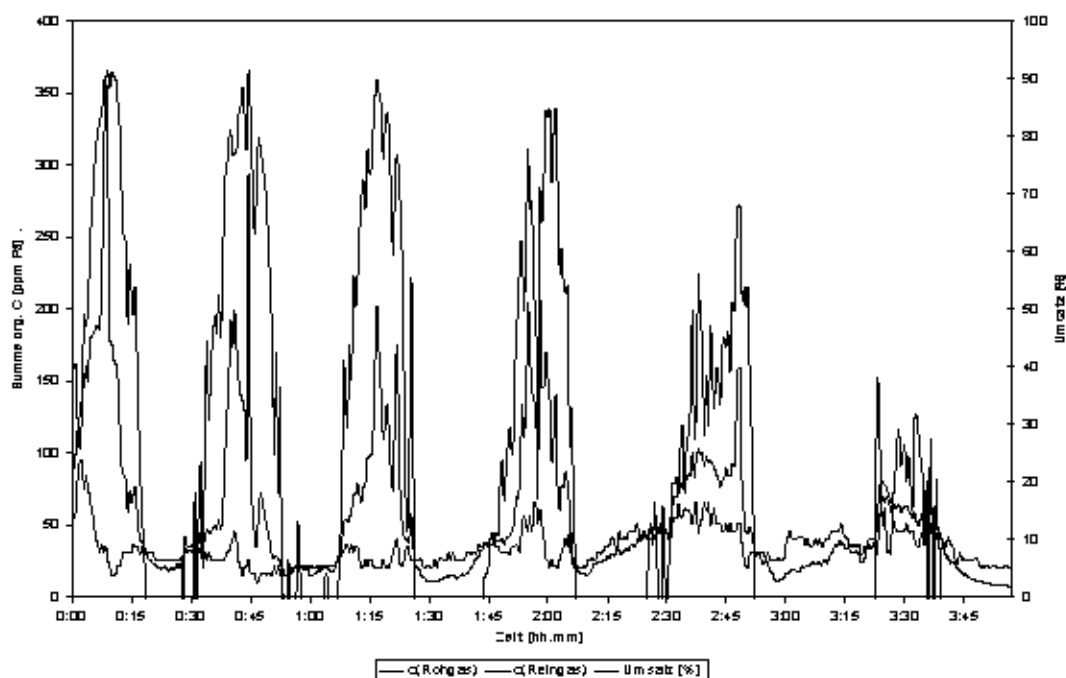


Abb. 9: Konzentrationen und Umsatz organischen Kohlenstoffs bei vertikalem Einbau des Katalysators

Abbildung 9 gibt den Konzentrationsverlauf der Kohlenwasserstoffe und den erzielten Umsatz bei einem Technikumsversuch über 4 Stunden wieder. Die nachfolgenden Darstellungen unterscheiden sich von dieser nicht nur wegen dem zwangsläufig reduzierten Messaufwand, der zu einer anderen Ergebnisdarstellung führt, sondern auch durch die individuelle Feuerungsweise der Betreiber.

Messungen an Ofen 1

Der Ofen 1, ein Modell Picollo der Fa. Olsberg mit 11kW Feuerungswärmeleistung war mit einem Abgasrohr von 180mm Durchmesser ausgestattet. Die Erstbefüllung der Katalysatorlinse betrug 1293 g und war damit für einen ausreichenden Ofenzug zu hoch. Die im Folgenden wiedergegebenen Messergebnisse wurden nach der Neubefüllung der Katalysatorlinse mit 874g Katalysatormasse erhalten.

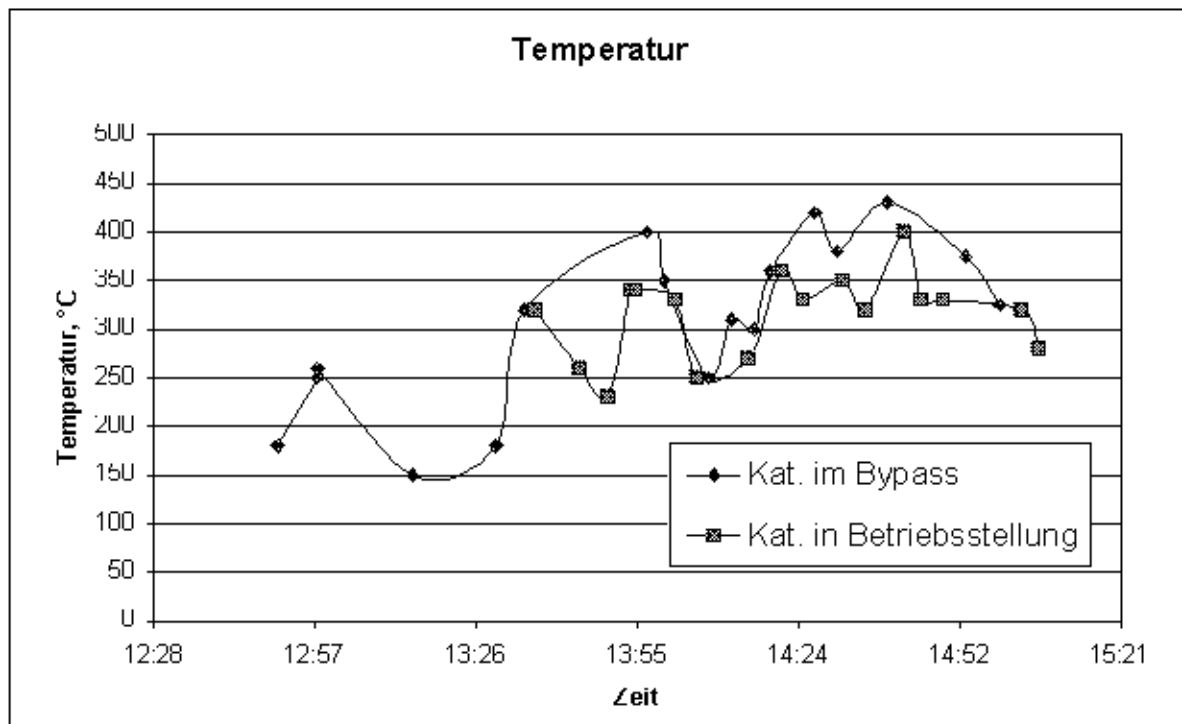


Abb. 10: Temperaturverlauf im Bypass und in der Betriebsstellung des Katalysators (Messung hinter Katalysator, Ofen 1, 19.3.05, Zweite Messreihe)

Die Abbildung zeigt, dass die für eine katalytische Umsetzung notwendige Temperatur von 350°C zwar erreicht wird, aber deutlich beim Einschwenken des Katalysators in die Betriebsstellung (waagerechte Stellung) zurückgeht. Extrem fällt die Temperatur bei 13:45 Uhr, was in der Folge die Kohlenwasserstoffemission stark ansteigen lässt. (siehe Abb. 11).

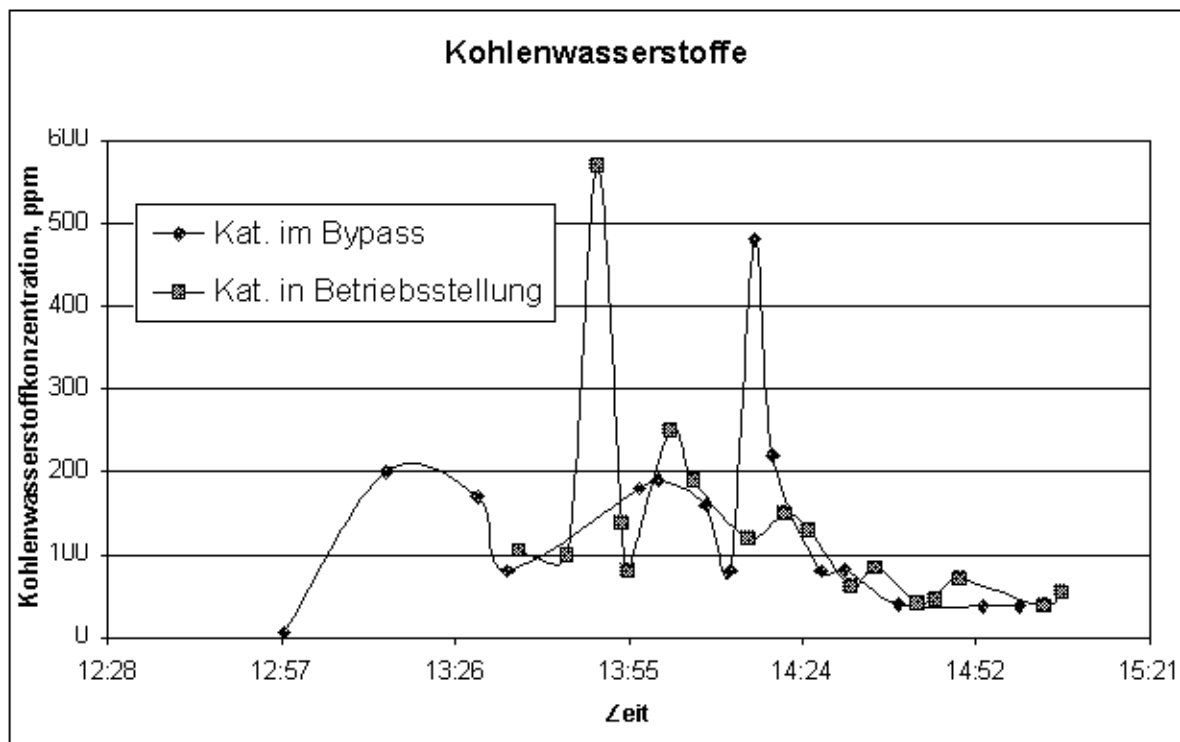


Abb.11: Verlauf der Kohlenwasserstoffkonzentration im Bypass und in der Betriebsstellung des Katalysators (Messung hinter Katalysator, Ofen 1, 19.3.05, Zweite Messreihe)

Der Umsatz an Kohlenwasserstoffen ist ebenso wie die Temperatur nach Katalysator um 14:20 Uhr mit 62 bis 75% relativ hoch. Verglichen mit vorher erhaltenen Ergebnissen mit dem Ofenkatalysator sind die Umsätze insgesamt betrachtet nicht zufriedenstellend.

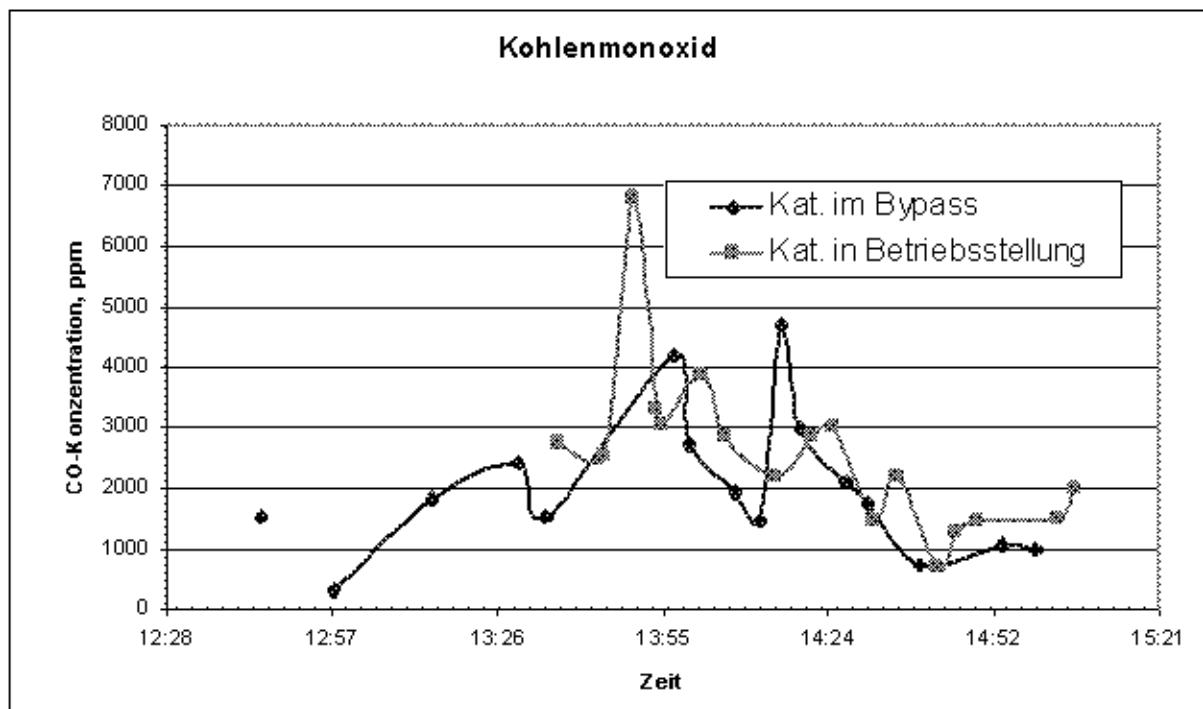


Abb. 12: Verlauf der Kohlenmonoxidkonzentration im Bypass und in der Betriebsstellung des Katalysators (Messung hinter Katalysator, Ofen 1, 19.3.05, Zweite Messreihe)

Den prinzipiell gleichen Verlauf zeigt die Auswertung der Kohlenmonoxidkonzentration. Geht die Temperatur zurück, z.B. beim Nachlegen von Holz oder bei Luftmangel, verringert sich der Umsatz an Kohlenmonoxid gleichförmig mit dem Umsatz an Kohlenwasserstoffen. Ofen1 hat eine automatische Luftregelung, in die nicht eingegriffen werden konnte. Deshalb war die gewünschte hohe Temperatur nicht zu erreichen. Diese Versuche zeigten allerdings auch, dass auf Grund der zu diesem Zeitpunkt sehr geringen Betriebszeit des Katalysators seine Aktivität zur Oxidation der Kohlenwasserstoffe und Kohlenoxid noch nicht vollständig ausgebildet war.

An dem gleichen Ofen wurden ca. einen Monat später die Versuche wiederholt. In den beiden nachfolgenden Abbildungen sind die Temperaturentwicklung und der Konzentrationsverlauf von Kohlenmonoxid wiedergegeben.

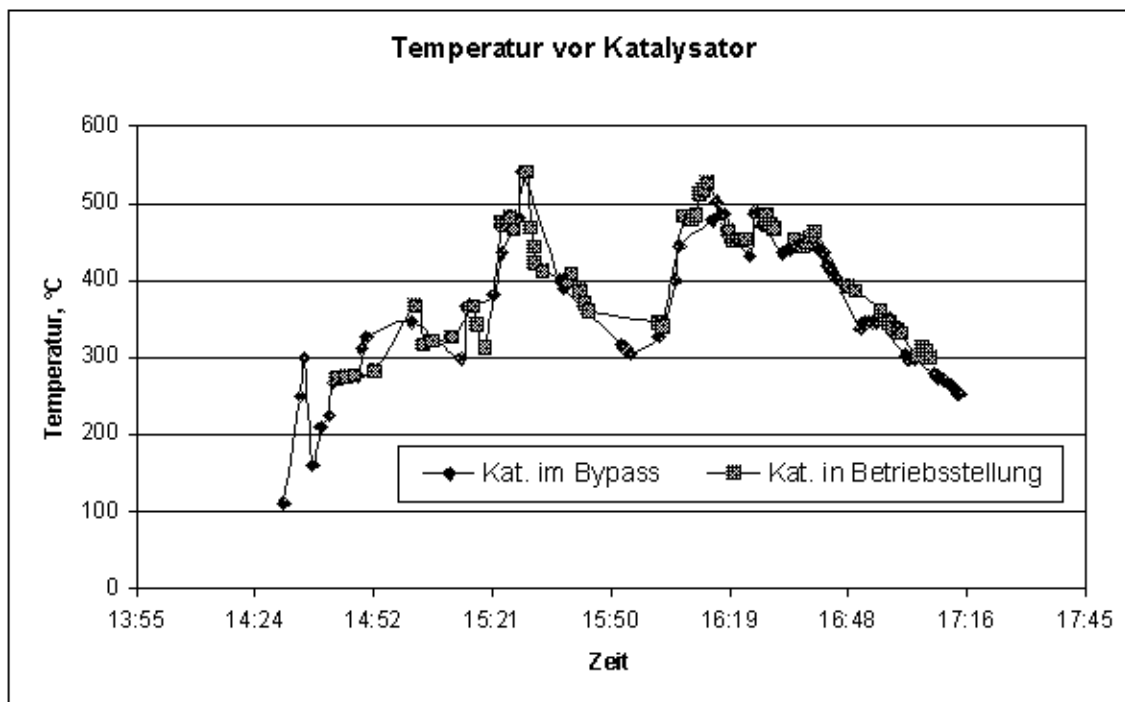


Abb. 13: Temperaturverlauf im Bypass und in der Betriebsstellung des Katalysators (Messung hinter Katalysator, Ofen 1, 16.4.05, Dritte Messreihe)

Auch bei diesen Versuchen zeigt sich wieder der bekannte Verlauf der Konzentrationsverteilungen in Abhängigkeit von der Katalysortemperatur.

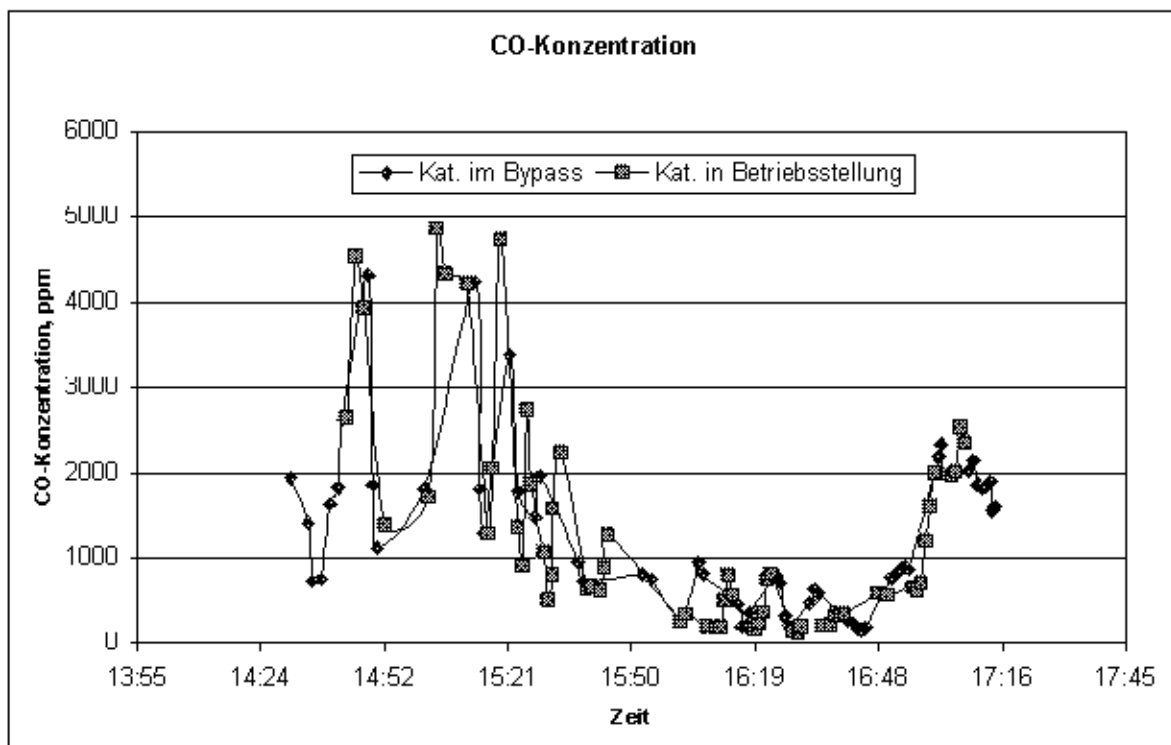


Abb. 14: Verlauf der Kohlenmonoxidkonzentration im Bypass und in der Betriebsstellung des Katalysators (Messung hinter Katalysator, Ofen 1, 16.4.05, Dritte Messreihe)

Bis ca. 15:50 ist keine exotherme Reaktion im Katalysator zu verzeichnen, wie die gleichen Temperaturwerte im Bypass- und in der Betriebsstellung des Katalysators zeigen (siehe Abb. 13). Ab 15:50 ist eine geringe Temperaturerhöhung bei der waagerechten Stellung festzustellen, verbunden mit einem merklichem Umsatz bis zu 60% von Kohlenoxid im Katalysator (gegen 16:00 Uhr, siehe Abb. 14).

Die Messung der Kohlenwasserstoffkonzentration ergibt einen zu der Kohlenmonoxidkonzentration analogen Verlauf.

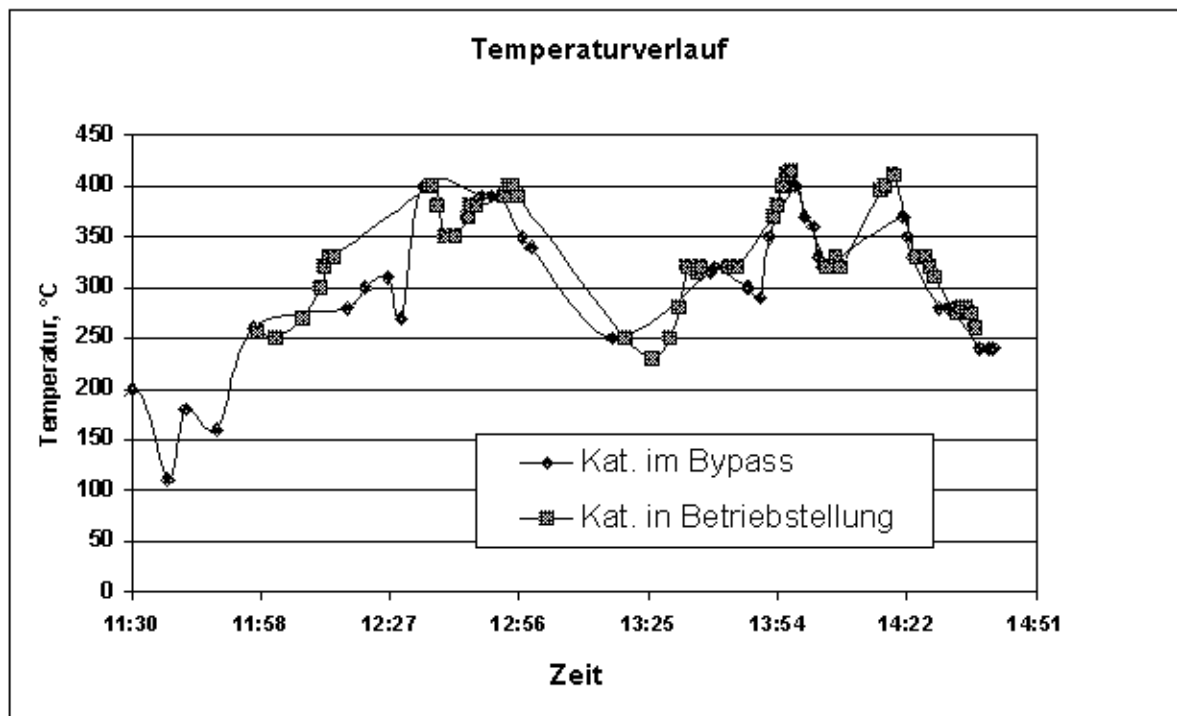


Abb. 15: Temperaturverlauf im Bypass und in der Betriebsstellung des Katalysators (Messung hinter Katalysator, Ofen 1, 14.5.05, Vierte Messreihe)

Die Messungen an Ofen 1 wurden am 14.5.05 mit einer letzten Versuchsreihe vorläufig abgeschlossen. Wiederum wurde der Temperaturverlauf und Verlauf der Kohlenmonoxidkonzentration aufgezeichnet. Die Kohlenwasserstoffoxidation verläuft analog zu der Kohlenoxidoxidation. Bei der Temperaturverteilung ist auffällig, dass ab 12:00 Uhr bei einer Temperatur von ca. 250°C die exotherme Reaktion einsetzt. Die zu diesem Zeitpunkt gemessene Kohlenmonoxidverteilung ergibt einen Umsatz von ca. 40%. Im weiteren Verlauf steigt die Temperatur nochmals kurz an, um dann beim Auflegen weiteren Brennstoffes durch die Frischluftzufuhr durch die Ofentür wieder abzufallen. Die exotherme Reaktion spiegelt sich allerdings nicht deutlich in den Umsatzwerten wieder. Erst gegen Ende der Messungen (ab ca. 14:30) werden bei exothermer Reaktion auch die entsprechenden CO-Umsätze von bis zu 60% erreicht.

Die bestimmten CO-Umsätze decken sich im Wesentlichen mit den Messungen in Stuttgart und früheren Untersuchungen von IUTA bei ungünstigen Feuerungsverhältnissen.

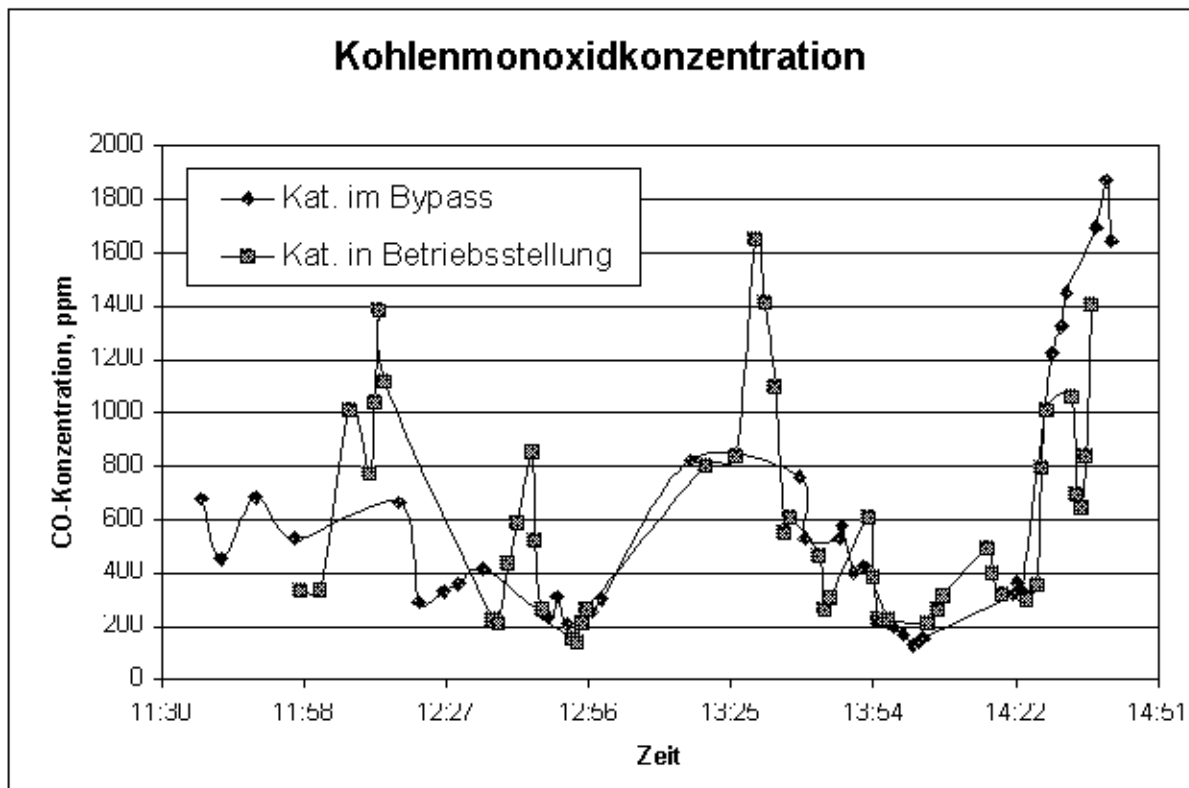


Abb. 16: Verlauf der Kohlenmonoxidkonzentration im Bypass und in der Betriebsstellung des (Messung hinter Katalysator, Ofen 1, 14.5.05, Vierte Messreihe)

Nach Ende dieser Versuchsreihe wurde die Katalysatorlinse ausgebaut und begutachtet (siehe Abb.17). Es zeigte sich, dass beim nachträglichen Einbau des neuen Katalysators die Füllmenge in Relation zum Volumen der Katalysatorlinse zu gering gewählt wurde, was zu Bypassströmungen in der Katalysatorschüttung bei waagerechter Stellung (Betriebsstellung) des Katalysators geführt haben kann. Dies könnte eine Erklärung für die auch bei hohen Temperaturen vergleichsweise schlechten Umsatzwerte der katalytischen Oxidation von Kohlenmonoxid und den Kohlenwasserstoffen an diesem Ofen sein.

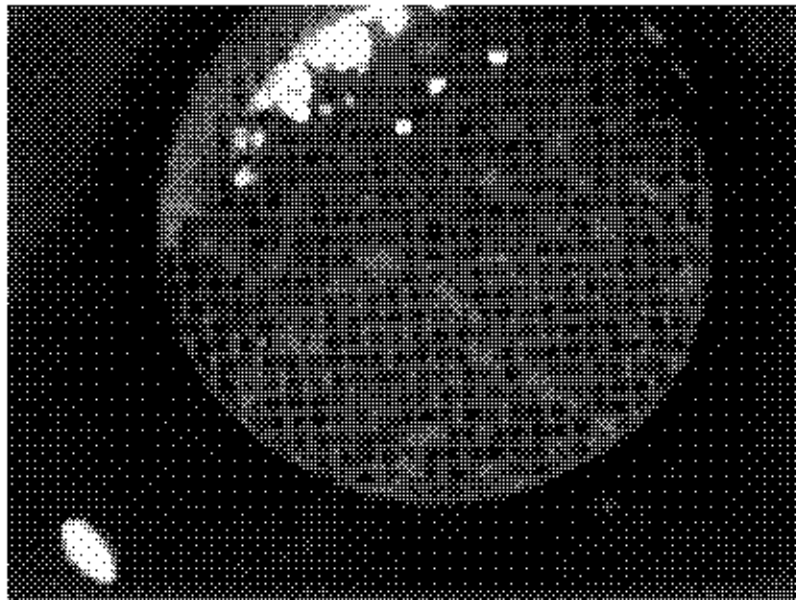


Abb. 17: Katalysatorfreier Bereich in der Katalysatorlinse

Messungen an Ofen 2

Analog zu den Messungen an Ofen 1 wurde auch der Katalysator im Ofensystem 2 (Ofen der Fa. Hase, 7kW Feuerungswärmeleistung) bezüglich der Katalysatoraktivität untersucht. Der Durchmesser des Abgasrohres beträgt 150mm und ist senkrecht auf den Ofen aufgesetzt.

Exemplarisch für die Untersuchungen an diesem Ofensystem ist im Folgenden eine Messreihe wiedergegeben. Für diesen Ofen sind bei ordnungsgemäßem Betrieb die Emissionswerte allerdings so gering, dass die Messwerte nicht aussagekräftig sind. Es war nur mit frischem Holz bei Verbrennung unter Luftmangel und damit auch geringen Abgastemperaturen (60°C, gemessen nach Katalysator) möglich, Kohlenwasserstoffemissionen bis 430 ppm zu erzeugen. Bei der Katalysatorbetriebstemperatur von ca. 350 °C (11:25 Uhr, siehe Abb. 18 und 19) betrug der Kohlenwasserstoffgehalt im Abgas vor Katalysator nur ca. 30ppm.

Obwohl die Temperaturen nach Katalysator bei Betriebsstellung ab ca. 300°C (ab 11:05 Uhr) immer höher als die Abgastemperatur in der Bypassstellung des Katalysators waren, also eine exotherme Reaktion anzeigten, konnte dies nicht durch die Abnahme der Kohlenmonoxidkonzentration bestätigt werden. Lediglich um ca. 11:15 ist eine merkliche CO-Verringerung im Abgas nach Katalysator festzustellen.

Diese Aussage beruht allerdings nur auf zwei Einzelwerten und sollte nicht überbewertet werden.

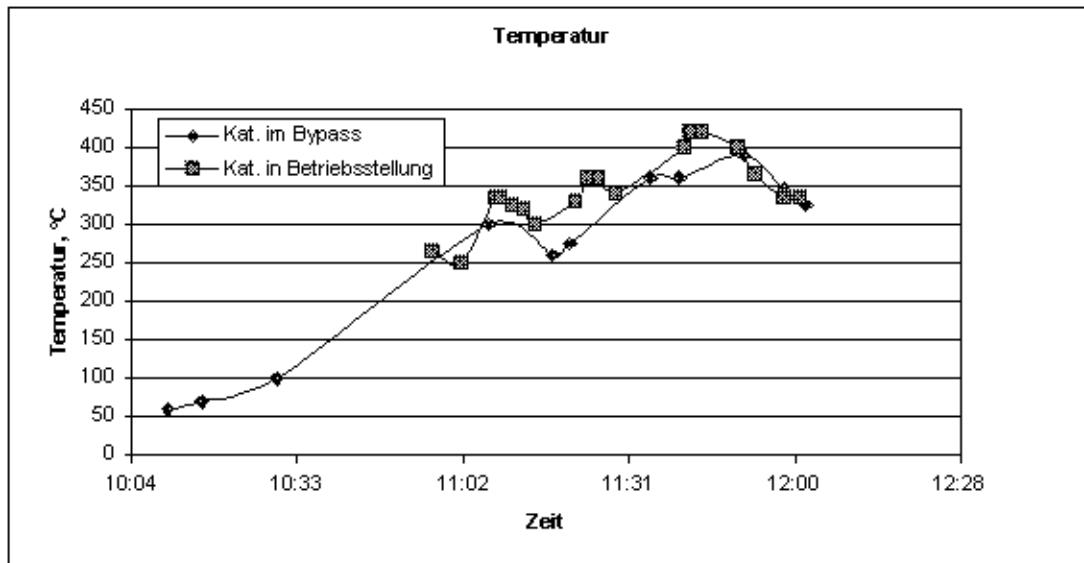


Abb. 18: Temperaturverlauf im Bypass und in der Betriebsstellung des Katalysators (Messung hinter Katalysator, Ofen 2, 19.3.05, Zweite Messreihe)

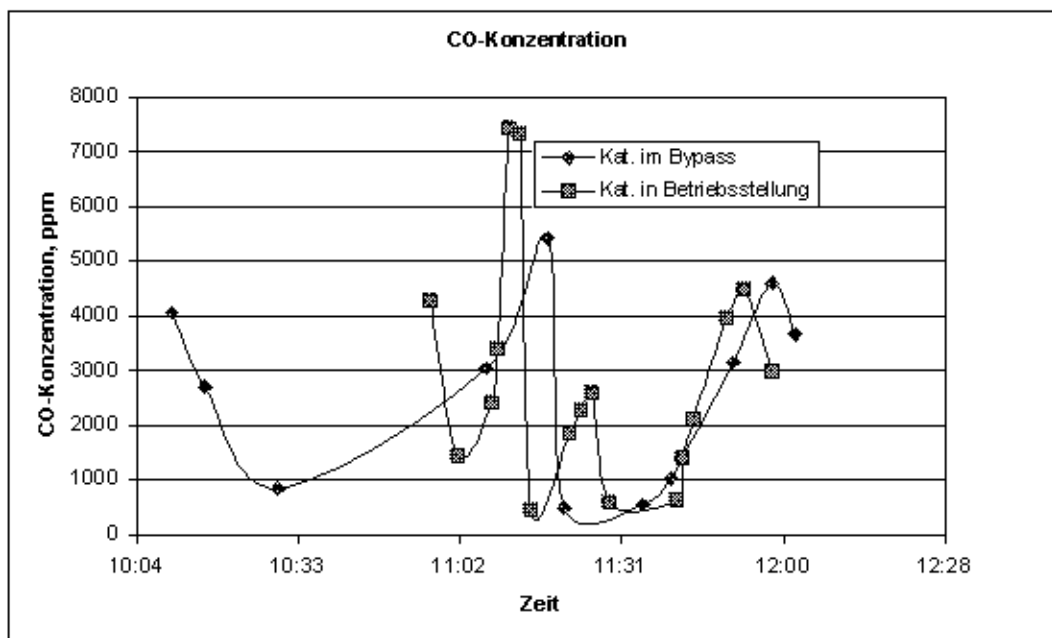


Abb. 19: Verlauf der Kohlenmonoxidkonzentration im Bypass und in der Betriebsstellung des Katalysators (Messung hinter Katalysator, Ofen 2, 19.3.05, Zweite Messreihe)

Messungen an Ofen 3

Die Abgasführung an Ofen 3 (Hersteller: Krog Iversen & Co A/S, DK 5492 Vissenbjerg , 9kW Feuerungswärmeleistung) erfolgt über ein kurzes, waagerechtes Rohrstück direkt in den Abgaskamin (Abb.20 und 21).

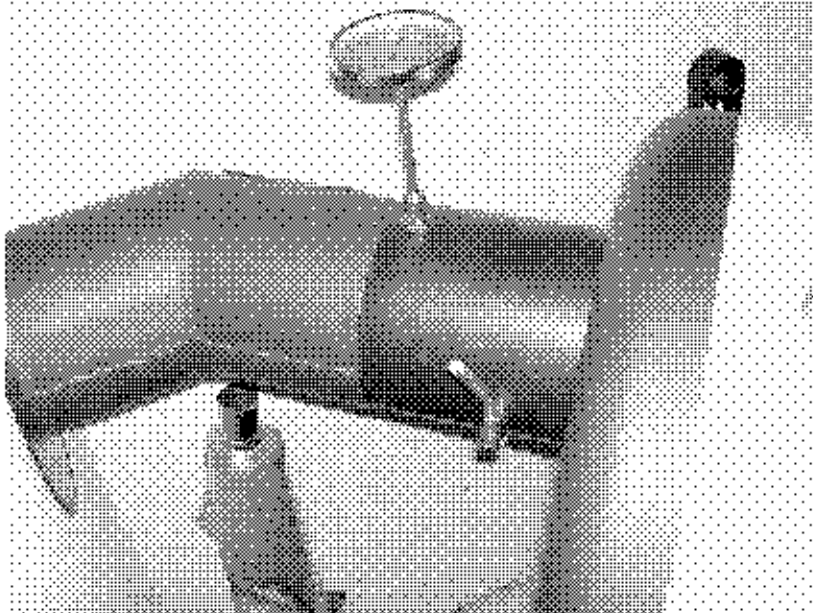


Abb. 20: Einbau des Katalysatorsystems in das waagrecht angeordnete Abgasrohr

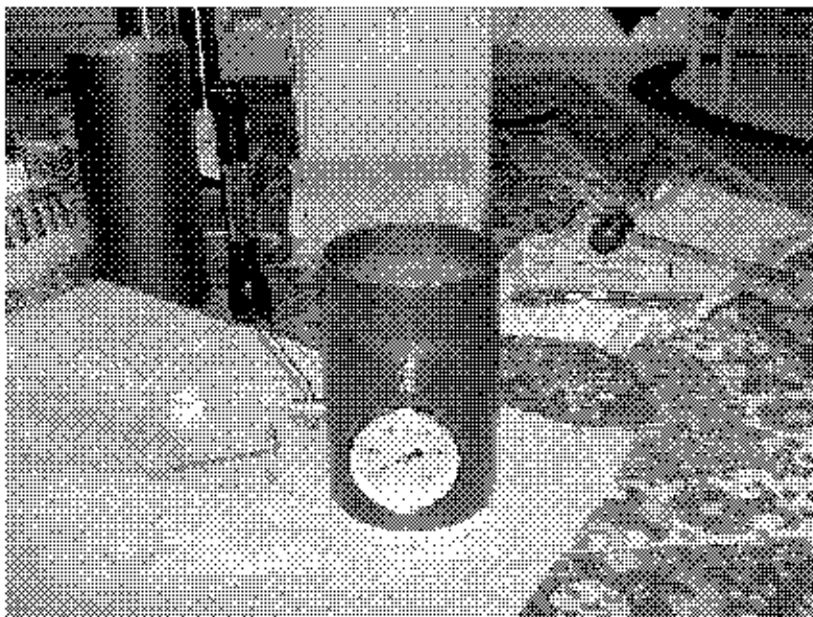


Abb. 21: Rohrstück mit Katalysator und Temperaturanzeige

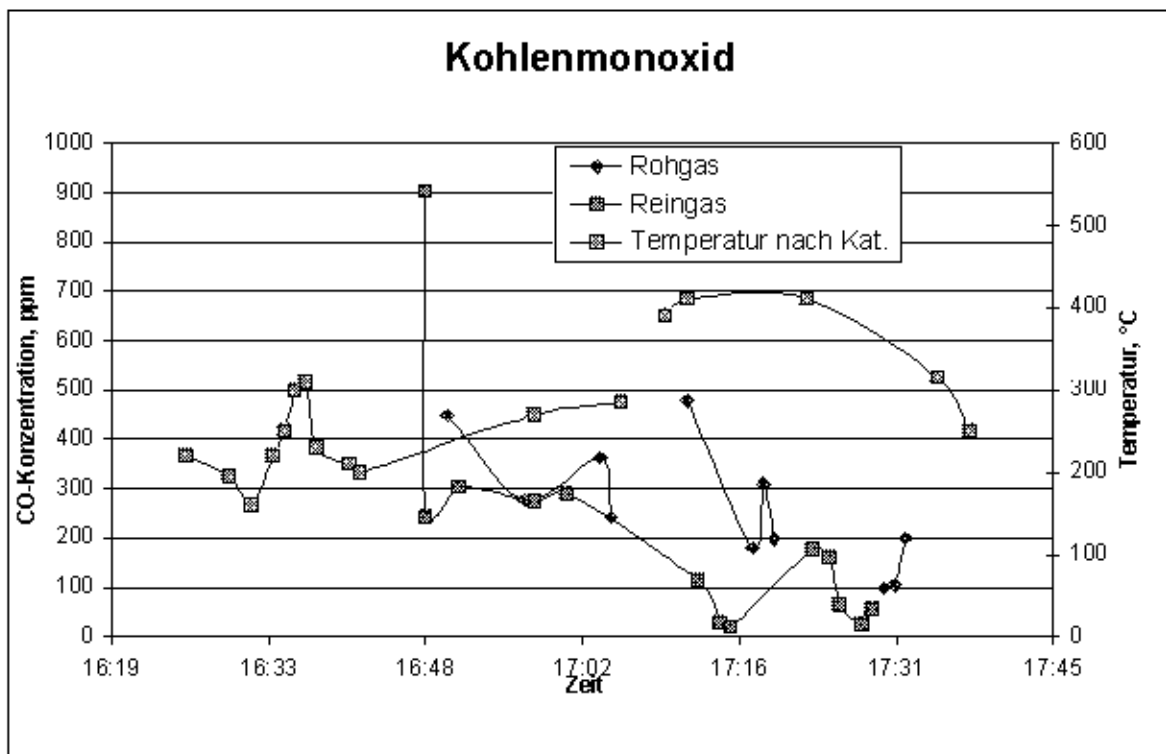


Abb. 22: Verlauf der Kohlenmonoxidkonzentration und der Temperatur bei Bypass- und Betriebstellung des Katalysators (Messung hinter Katalysator, Ofen 3 , erste Messreihe)

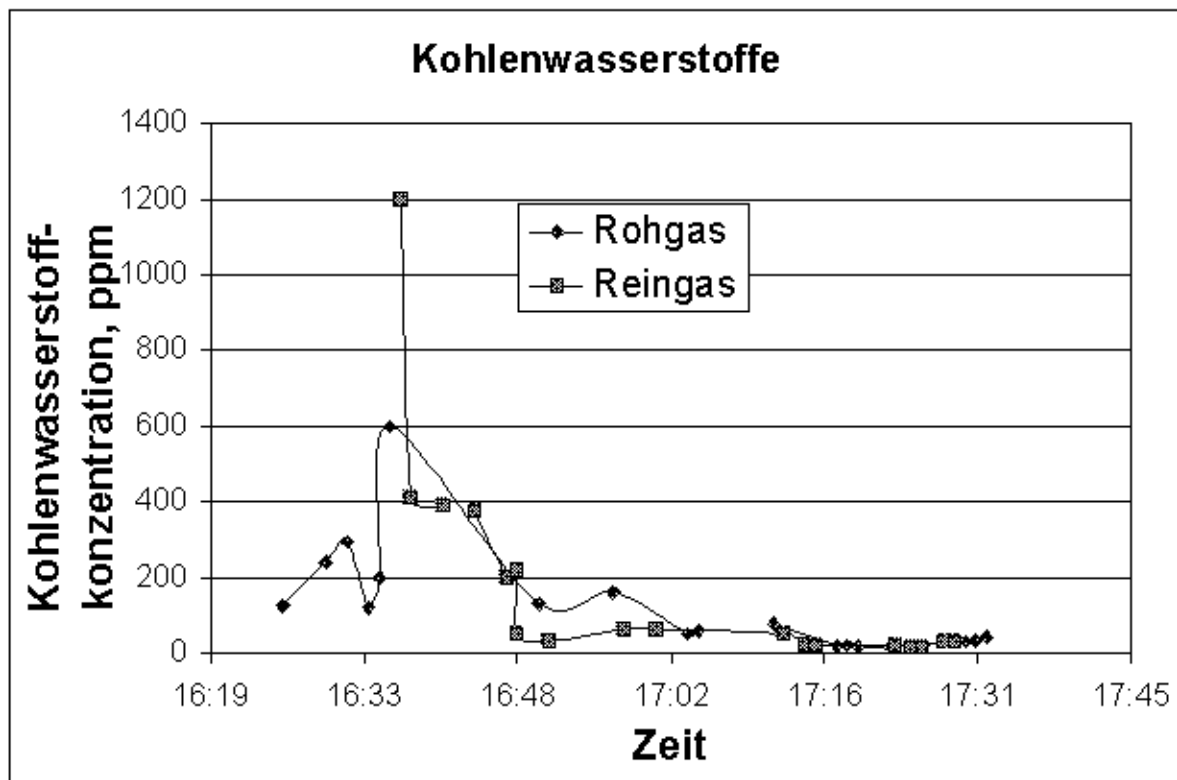


Abb. 23: Verlauf der Kohlenwasserstoffkonzentration bei Bypass- und Betriebstellung des Katalysators (Messung hinter Katalysator, Ofen 3 , erste Messreihe)

In der Abbildung 22 ist der Verlauf der Kohlenmonoxidkonzentration vor und hinter Katalysator zusammen mit der Abgastemperatur, gemessen nach Katalysator, aufgetragen. Bereits bei einer Abgastemperatur von ca. 300°C zeigt sich eine deutliche exotherme Reaktion mit einer Temperaturerhöhung von ca. 70°C, verbunden mit einer starken Abnahme der Kohlenmonoxidkonzentration. Der Umsatz von CO beträgt zu diesem Zeitpunkt (17:12 Uhr) ungefähr 75%.

Gleichförmig zur Umsetzung von CO verläuft auch die Kohlenwasserstoffoxidation. Um 16:50 wird ein Kohlenwasserstoffumsatz von ca. 69% bestimmt. Erstaunlich bei den guten Umsätzen ist allerdings die Tatsache, dass der Katalysator erheblich mit Staub belegt war, wie eine Photographie, die im Ofenrohr über ein Revisionsklappe vor den Messungen gemacht wurde, belegt (Abb. 24). Trotz dieser hohen Staubbelegung waren keine negativen Einflüsse auf den Ofenzug feststellbar.

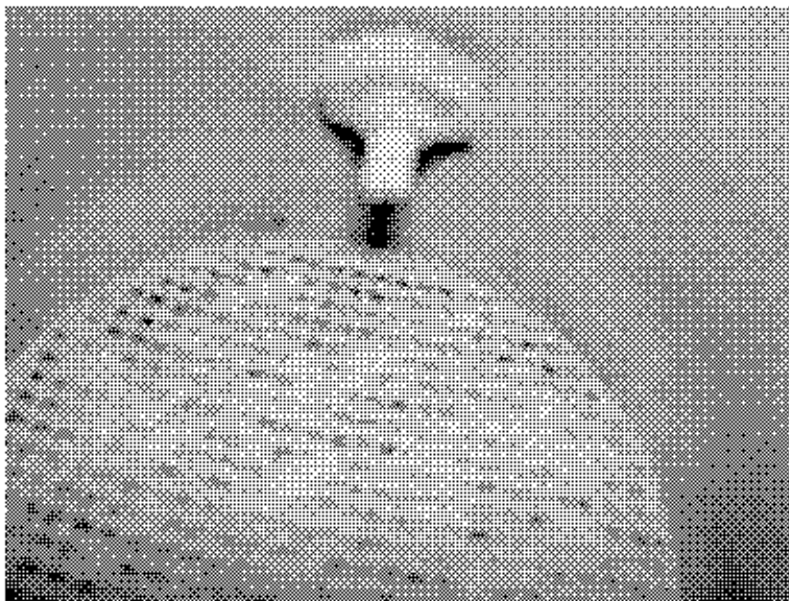


Abb. 24: Mit Staub belegter Katalysator im Ofenrohr

5.3 Olfaktometrische Messungen

An Ofen 3 wurden ca. 2 Wochen nach der Bestimmung der Umsätze an Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffe olfaktometrische Messungen unter Federführung des Ingenieurbüros Lohmeyer (Stuttgart, Karlsruhe) durchgeführt. Die Proben wurden persönlich von Herrn Dr. Lohmeyer genommen (Geruchsproben in Plastiksäcken, die vorab mit 50% Stickstoff gefüllt waren). Abbildung 25 zeigt einen Teil der Probenahmeausrüstung.

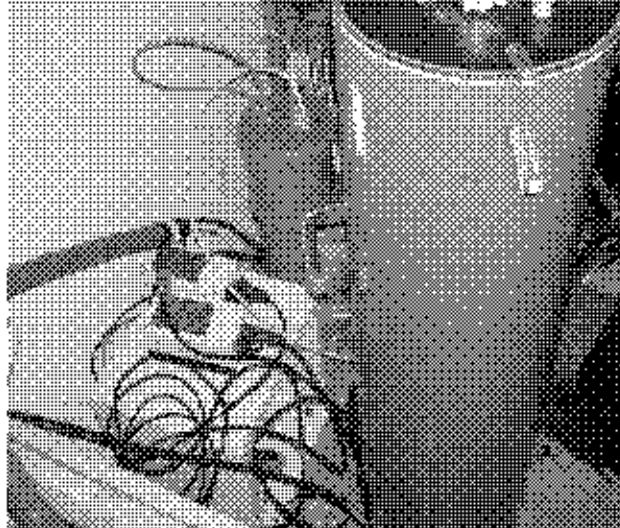


Abb. 25: Probenahme zur olfaktometrischen Messung

Vor der Messung wurde die Katalysatorlinse vom Betreiber ausgebaut, der Katalysator entstaubt sowie mit Wasser und haushaltsüblichem Geschirrspülmittel gereinigt. Nach Aussage des Betreibers haftete der Staub nur lose auf der Oberfläche des Katalysators. Eine Russablagerung in der Katalysatorschüttung oder auf dem Drahtgewebe war nicht feststellbar. Die Staubeinbindung betrug 3,23g (der Staub und die Flüssigkeit wurden gesammelt, das Wasser abdestilliert und der feste Rückstand zusammen mit dem Staub gewogen).

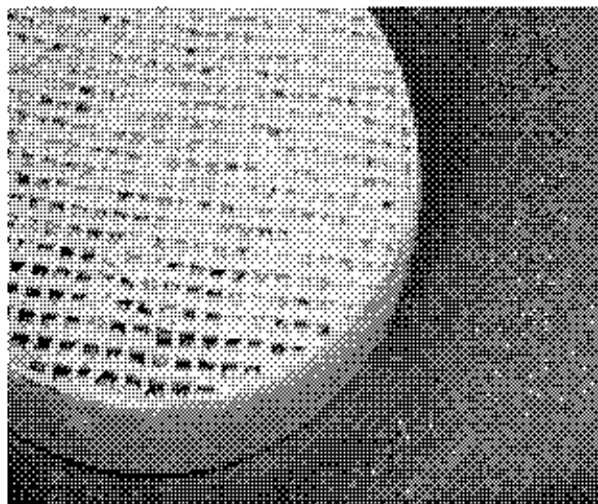


Abb. 26: Katalysatorlinse vor der Reinigung

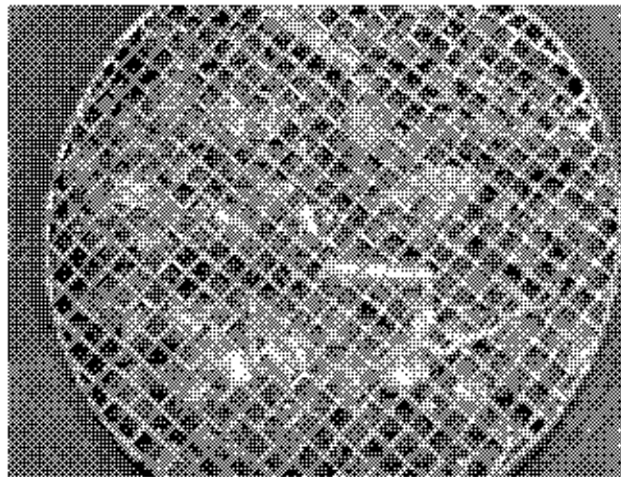


Abb. 27: Katalysatorlinse nach der Reinigung

Die Proben wurden in der Betriebsstellung des Katalysators vor und hinter Katalysator zeitgleich innerhalb weniger Minuten genommen. Die Abgastemperatur wurde ca. 15 Minuten nach dem Anzünden und zum Zeitpunkt der ersten Probenahme zu 348°C bestimmt. Die zweite Probenahme erfolgte bei 365°C Abgastemperatur. Nach den Probenahmen wurde festgestellt, dass sich wässriges Kondensat in den auf 50°C beheizten Probenahmeleitungen befand. Auch war die Katalysatorlinse nicht vollständig in den Abgasstrom eingeschwenkt, sondern nur zu ca. 80°, so dass sich ein Bypassstrom ausgebildet hatte.

Die Auswertung der Gasproben gestaltete sich nach Aussage von Herrn Dr. Lohmeyer allerdings schwierig und ist mit Unsicherheiten behaftet. (Eine erste Auswertung von jeweils 2 Proben vor und hinter Katalysator ergab eine in Anbetracht der Schwierigkeiten sehr gute Geruchsminderung (Z_{50} Wert) von 52 bzw. 36%). Die exakte Auswertung, die als vorläufiges Ergebnis übermittelt wurde, ergab keine Geruchsminderung, sondern bei der zweiten Probenahme sogar eine leichte Zunahme des Z_{50} Werts. Dieses zunächst unverständliche Ergebnis wird nachvollziehbarer, wenn der Ablauf der katalytischen Oxidation in die Interpretation einbezogen wird. Wie das Abbauschema zeigt, erfolgt die Oxidation von beispielsweise Methan über die Stufen Formaldehyd und Ameisensäure, beides geruchsintensive Stoffe. Wird nun das nahezu geruchslose Methan katalytisch oxidiert, können sehr viel geruchsintensivere Zwischenprodukte entstehen. Ebenso verhält es sich mit einer Vielzahl von Inhaltsstoffen im Holzrauch.



Da sich die Ergebnisse der olfaktometrischen Messungen nicht mit den bisherigen Beobachtungen decken und auch den Messergebnissen bezüglich der Kohlenwasserstoffminderung widersprechen, muss diese Messung wiederholt werden. (Nach Aussage von Dr. Lohmeyer sind die wenigen Probenahmen, wobei auch noch Kondensatbildung auftrat, nicht belastbar. Auch vermutet Dr. Lohmeyer, dass die gemessenen Starttemperaturen durch die Fahrenbildung im Abgas über die Bypassströmung nicht der Katalysatortemperatur entsprechen können.) Wahrscheinlich ist auch, dass die Bypassströmung, die nach den Probenahmen entdeckt wurde, nicht nur die Temperaturverteilung sondern auch die olfaktometrischen Ergebnisse massiv beeinflussen.

5.4 Druckverluste des Katalysatorsystems

In den Abbildungen 26 und 27 sind die Bestimmungen der Druckverluste bzw. des Ofenzugs wiedergegeben. Bei Messungen vor Ort können nur Einzelwerte erhalten werden, wobei die momentanen Zugverhältnisse im Kamin sehr stark von den Witterungsverhältnissen, der Art der Befuerung des Ofens, der Holzart, Holzfeuchte und den aktuellen Abgastemperaturen abhängen. Deshalb wurden im Technikum mittels eines Ventilators verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten eingestellt und der daraus resultierende Ofenzug gemessen. Die Werte sind mit einer gewissen Unsicherheit behaftet, da es nicht möglich war, die Strömung in kleinen Bereichen genau einzustellen.

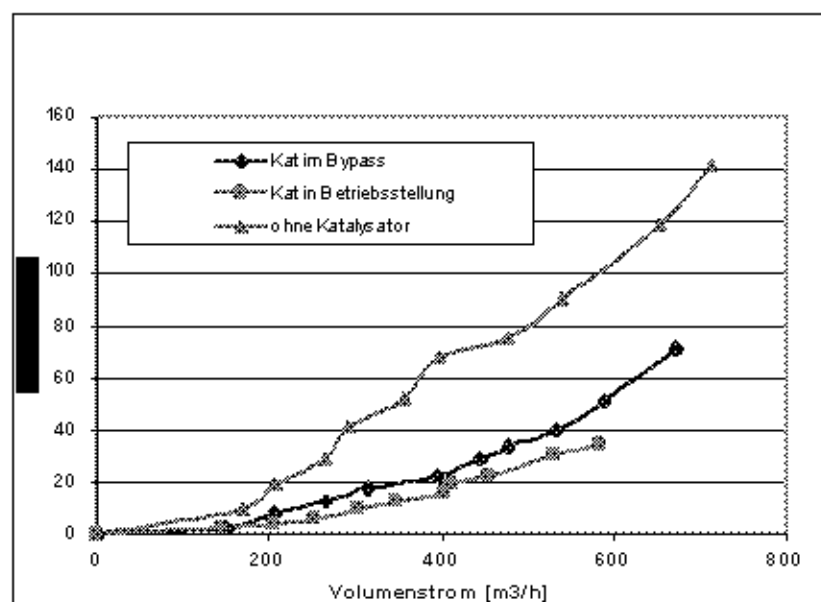


Abb. 26: Bestimmung des Ofenzuges in Abhängigkeit von der Gasströmung (Einbau der Katalysatorlinse in Abgasrohr mit 180mm Durchmesser, Katalysatorlinse 179mm Durchmesser, neuer Katalysator gebraucht, vor Messung grob von Staub befreit)

Obwohl der Volumenstrom nur sehr hoch einzustellen war, zeigt sich dennoch im Vergleich der Werte, dass bei den üblichen Abgasvolumenströmen um $100\text{m}^3/\text{h}$ der Unterschied im Druckverlust zwischen dem Katalysator in Bypassstellung und in der Betriebsstellung sehr gering ist. Die Kurve „ohne Katalysator“ gibt letztlich nur die Pressung des Ventilators wieder und ist damit stark abhängig von der Luftführung hinter dem Ofenrohr bzw. dem gesamten Versuchsaufbau (Rohrbögen, Rauigkeitsbeiwerte, etc.). Erstaunlich ist, dass bei einer Vergleichsmessung mit unbelegten Katalysatoren nahezu die gleichen Werte wie in den Abbildungen 26 und 27 erhalten wurden.

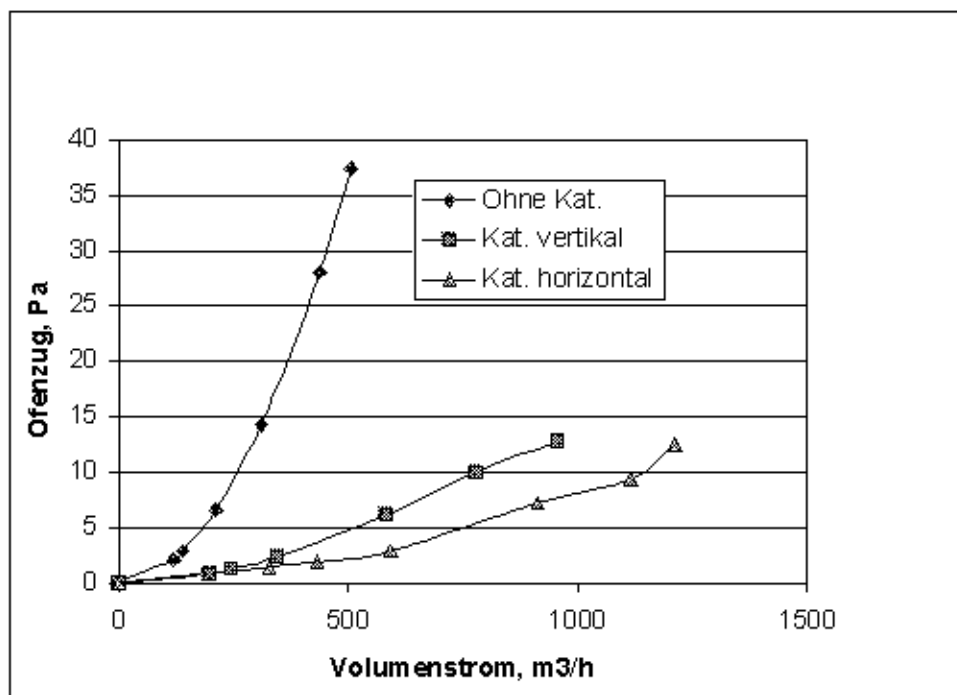


Abb. 27: Bestimmung des Ofenzuges in Abhängigkeit von der Gasströmung (Einbau der Katalysatorlinse in Abgasrohr mit 150mm Durchmesser, Katalysatorlinse 149mm Durchmesser, neuer Katalysator gebraucht, vor Messung grob von Staub befreit)

Prinzipiell die gleiche Aussage ergibt sich aus der Bestimmung des Ofenzugs bei Einbau der 150mm Katalysatorlinse. Die Unterschiede sind bei kleinen Volumenströmen kaum feststellbar. Dies bedeutet, dass eine geringe Belegung mit Staub kaum zu einer Beeinträchtigung des Ofenzuges führt. Vergleichsmessungen zwischen dem ursprünglich eingesetzten und dem neuen Katalysator zeigten, dass der neue Katalysator bei einem Volumenstrom von ca. $70\text{m}^3/\text{h}$ einen ca. $4,7\text{Pa}$ geringeren Druckverlust aufweist.

Wie die meisten Teilnehmer des Feldversuchs bestätigen und durch eigene Messungen und Begutachtungen festgestellt wurde, ist der Kaminzug in der Regel gut ausreichend,

d.h. der Druckverlust klein genug, um den Ofen in der Bypassstellung des Katalysators anzuzünden und zu betreiben.

Geht allerdings in Folge der zunehmenden Staubbilddung während des Katalysatorbetriebes die Katalysatoraktivität zurück, kann sich vermehrt Ruß bilden und ablagern, der in der Folge zu sehr hohen Druckverlusten führt. Dann muss der Katalysator gereinigt werden. Deshalb ist es unumgänglich, die zukünftigen Katalysatorsysteme mit einer Revisionsklappe zu versehen. Erste Prototypen mit Revisionsklappen wurden im Rahmen des Projektes gefertigt und an zwei Teilnehmer ausgeliefert. Nach bisherigen Auskünften der Betreiber ist die Handhabung sehr gut.

5.4.1 Staubabscheidung in der Katalysatorschüttung

Die Messung der Staubabscheidung in der Katalysatorschicht erfolgte bei Befuerung mit trockenem Holz unterschiedlicher Qualität. Davon ausgehend, dass der meiste Staub beim Anfeuern des Ofens gebildet wird, wurden die Staubproben vor und hinter Katalysator kurz nach dem Zünden des Ofens genommen. Die Temperaturen hinter Katalysator lagen zu Beginn der jeweiligen Messungen um 150°C, nach Ende der Probenahmen bei maximal 230°C. Damit ist der Katalysator noch nicht auf Betriebstemperatur, wodurch sichergestellt ist, dass die reine Staubabscheidung gemessen wurde. Zu den Messungen 1-3, durchgeführt mit einem Ofen Olsberg Picollo im IUTA (Feuerungswärmeleistung 11 kW, Durchmesser des Abgasrohres 180mm) wurde gut abgelagertes Holz herangezogen, welches sichtbar zur Staubbildung neigte. Die Messungen 2-5 erfolgten mit trockenem Holz ohne Staubanhaftungen mit einem Ofen der Firma Hase (7 kW Feuerungswärmeleistung, Durchmesser des Abgasrohres 150mm) in der Schornsteinfegerschule Dülmen durchgeführt.

Bei den Staubprobenahmen 1 bis 4 wurde auf dem Filter braune Ablagerungen erhalten. Der Abscheidegrad für Holzstaub beträgt für diese Bestimmungen im Mittel 36 %. Aus vorherigen Staubbmessungen sind diese Abscheidegrade bekannt. Bei den Messungen 4 und 5 ist neben geringer Stauffreisetzung der hohe Abscheidegrad bemerkenswert. Bei Messung 5 war der Roh- und der Reingasfilter mit schwarzem Staub belegt, was auf eine beginnende Russbildung hindeutet. Obwohl die Katalysatortemperatur bei dieser Messung sehr gering war, lassen die guten Reingaswerte auf die beginnende katalytische Umsetzung schließen, die zu dem Russabbau im Katalysator führt.

Tabelle 2: Staubabscheidung auf dem Katalysator

	Staubkonzentration in mg/m ³		
	Rohgas	Reingas	Abscheidegrad in %
Messung 1	315	205	33
Messung 2	620	390	37
Messung 3	420	260	38
Messung 4	57	26	54
Messung 5	146	12	92

5.5 Belegung der Katalysatoroberfläche mit Palladium

Zur Begutachtung der Oberflächenbelegung mit der katalytisch aktiven Komponente Palladium wurde mit 4 Mustern gebrauchter Katalysatoren am Forschungsinstitut Edelmetalle & Metallchemie (FEM) die Palladiumschichtdicke bestimmt. Die Muster (jeweils 20 Späne) wurden vor dem Versand mit Wasser von anhaftendem Staub befreit.

Muster 1: Maximale Temperaturbeaufschlagung 450°C, erste Katalysatorqualität

Muster 2: Maximale Temperaturbeaufschlagung 350°C, erste Katalysatorqualität

Muster 3: Maximale Temperaturbeaufschlagung 450°C, nachträglich eingebauter Katalysator

Muster 4: Maximale Temperaturbeaufschlagung 600°C, nachträglich eingebauter Katalysator

Die mittlere Pd-Schichtdicke auf den Mustern 1 und 2 beträgt ca. 0,10 bis 0,12 µm. Ein Unterschied zu den Originalkatalysatoren ist nicht festzustellen.

Auf Muster 3 war keine Palladiumschicht mehr festzustellen. Muster 4, also die Probe die der höchsten Betriebstemperatur ausgesetzt war, hatte die Ursprungsbelegung mit einer Schichtdicke von 0,06µm Palladium beibehalten.

Das Katalysatorsystem, aus dem Muster 3 entnommen wurde, neigt nach Aussage des Betreibers extrem zur Russabscheidung. Es ist allerdings unwahrscheinlich, dass dieser Befund ursächlich mit der Belegungsdicke an katalytisch aktiver Komponente zusammenhängt, da ebenso gefertigte Katalysatoren bei anderen Teilnehmern des

Feldversuches dieses Verhalten nicht zeigte. Letztlich ist die Abwesenheit von Palladium auf dieser Probe nicht schlüssig zu erklären.

6 Optimiertes Katalysatorsystem zur Reinigung von Abgasen aus Kleinfeuerungsanlagen

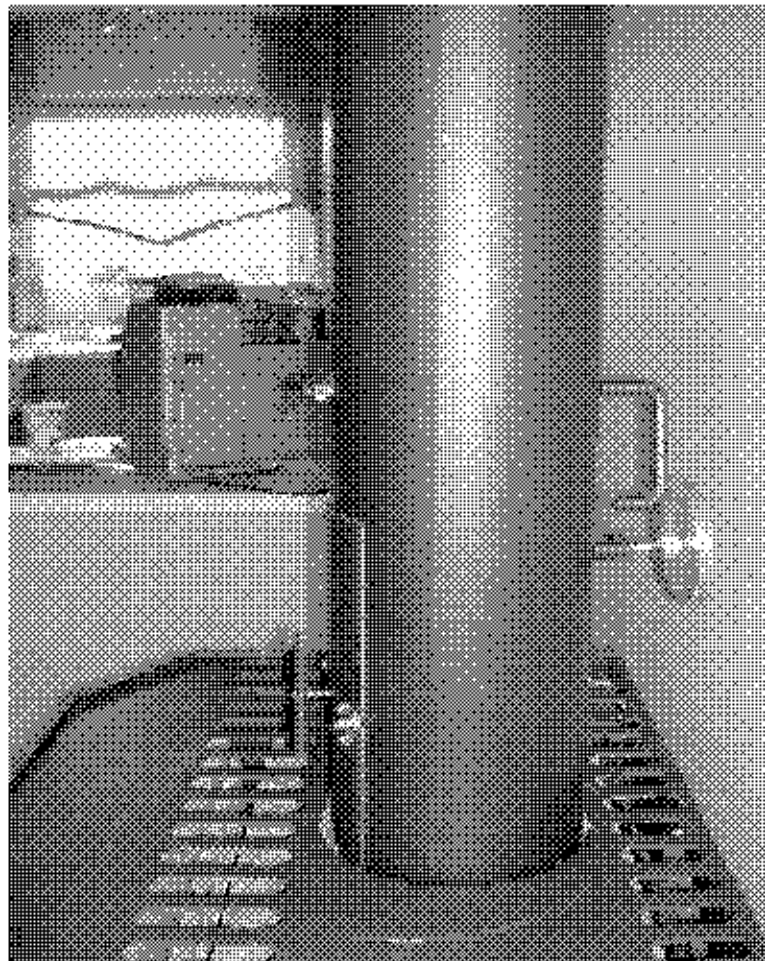


Abb. 28: Das neue System zur Reinigung von Abgasen aus Kleinfeuerungsanlagen

Wie die Untersuchungsergebnisse zeigten und durch die Beobachtungen der Teilnehmer an dem Feldtest bestätigt wurde, kann der Katalysator im eingebauten Zustand nicht vollständig durch Schüttelbewegungen der Katalysatorlinse von abgelagertem Staub befreit werden. Es ist notwendig, den Katalysator regelmäßig vorbeugend zu entstauben. Deshalb wurden gegen Projektende zwei Katalysatorsysteme mit Revisionsklappen gefertigt und ausgeliefert (Abb. 28). Zur Reinigung werden die beiden Flügelmuttern geöffnet, die Katalysatorlinse am

Drehknopf mit der Klappe aus dem Ofenrohr entfernt und entstaubt. Bei Bedarf kann der Katalysator mit Wasser gereinigt werden. Danach wird die Katalysatorlinse wieder eingesetzt und das Ofenrohr mit der Revisionsklappe verschlossen.

7 Zusammenfassung

Im Projekt „Feldtests zur Ermittlung der Praxistauglichkeit und Optimierung eines Verfahrens zur Minderung der Emissionen aus Kleinfeuerungsanlagen“ wurden in ausgewählten Privathaushalten und Institutionen Prototypen eines von IUTA entwickelten katalytischen Abgasreinigungssystems für Kleinfeuerungsanlagen installiert. Ziel des Vorhabens war es, das im Technikum erprobte Katalysatorsystem zur Emissionsminderung von Kleinfeuerungsanlagen bei umfangreichen Feldtests unter verschiedenen Praxisbedingungen zu prüfen.

Nach Projektbewilligung im November 2004 wurden im Folgemonat mit Lieferung der ersten Katalysatorsysteme die Installationen durchgeführt. In Anbetracht der kurzen Projektlaufzeit und des Umstandes, dass ein Betrieb der Holzöfen in der Regel nur in den Abendstunden erfolgt (der Katalysator benötigt eine bestimmte Betriebsdauer um volle Aktivität zu erreichen), zeigten sich die folgend näher spezifizierten Probleme mechanisch-physikalischer und chemischer Art.

Diese Praxisversuche zeigten, dass abhängig von der individuellen Einbausituation und dem jeweiligen Kaminzug der auftretende Druckverlust für eine ungestörte harmonische Verbrennung in einigen Öfen zu hoch war. Deshalb wurde es erforderlich, die Katalysatorschüttung auszutauschen bzw. die Katalysatormenge in der Katalysatorlinse zu reduzieren. Die ursprünglich eingebauten Katalysatorlinsen hatten einen Druckverlust in der Betriebsstellung von ca. 12-14Pa. Ein Ofen benötigt zur harmonischen Verbrennung von Holz ca. 12-15Pa Zug, demzufolge sollte der Kaminzug mindestens 30Pa, besser 40Pa betragen, d.h. die Kaminhöhe sollte mindestens 8m sein. Die neuen Katalysatoren haben bei einem Abgasvolumenstrom von $70\text{m}^3/\text{h}$ einen Druckverlust von unter 5 Pa, der dementsprechend für die meisten Installationen einsetzbar ist.

Die Probleme einiger Teilnehmer des Feldversuchs auch nach der Änderung der Katalysatorschüttung reduzieren sich bei näherer Betrachtung auf den ungenügenden Kaminzug. Dieser führte in zwei Fällen zu einer starken Einschränkung des Abbrandes bei Betriebsstellung des Katalysators. Hierbei dürfte der Kaminzug bei einer

geschätzten Kaminhöhe von jeweils ca. 5m maximal 30Pa bei idealen Witterungs- und Feuerbedingung betragen und damit zu gering für die Ausrüstung des Ofens mit dem katalytischen System sein.

In Anbetracht der guten Labor- und Technikumsergebnisse, die im Vorfeld des Feldversuches erhalten wurden, sind die Ergebnisse des Feldversuches bezüglich der Emissionsminderung differenziert zu betrachten. Die hierbei ermittelten Kohlenmonoxidumsätze von bis zu 65% und Kohlenwasserstoffumsätze von bis zu 75% wurden in dieser Größenordnung durch Vergleichsmessungen an der Universität Stuttgart bestätigt.

Die durchgeführten olfaktometrischen Messungen sind auf Grund der unter Kapitel 5.3 geschilderten Umstände (Probenahmezeitpunkt und damit einhergehende Unsicherheiten bezüglich der Katalysatortemperatur sowie eingetretene Bypassströmung; Kondensatbildung; Statistische Unsicherheit) nicht aussagekräftig genug.

Bedingt durch die kurze Projektlaufzeit konnten weitere Optimierungsarbeiten am neuen Katalysator, der einen wesentlich geringeren Druckverlust aufweist, nicht mehr durchgeführt werden. Neben diesen weiteren Arbeiten zum Einsatz des Katalysatorsystems auch bei geringen Kaminzügen wären die weiteren Untersuchungen in Richtung einer Aktivitätssteigerung zu führen.

Die im Rahmen der Projektarbeiten aufgedeckten Schwachstellen des katalytischen Systems können allerdings mit wenig Aufwand beseitigt werden. Insbesondere besteht weiterer Optimierungsbedarf bei

- der Integration und Anpassung der Katalysatorlinse in die marktüblichen Ofenrohre,
- dem Aufbau der Revisionsklappe, um den Katalysator zur Reinigung schnell und einfach entfernen zu können,
- der Katalysatorbelegung, die auf dem neuen Katalysatorträger zielgenau zur Steigerung der Aktivität angepasst werden sollte.

Trotzdem wird es auch mit dem weiterentwickelten Katalysatorsystem unumgänglich sein, den Einsatzbereich des Systems bezüglich Kaminzug und Mindestbetriebstemperatur zu empfehlen, um Installationen vorzubeugen, die zu unbefriedigenden Ergebnissen führen. Für Einsatzfälle außerhalb der vorgegebenen Parameter müssen zusätzlich Abgasventilatoren und eine Beheizung des Katalysators

z.B. mittels einer Heizpatrone vorgesehen werden. Der Lizenznehmer von IUTA plant geeignete Lösungen für solche Fälle anzubieten.

Obwohl auf Grund der kurzen Projektlaufzeit sowie aufgetretener, unvorhergesehener mechanischer Probleme das Projekt nicht wie ursprünglich vorgesehen bearbeitet werden konnte, sind die erhofften Erkenntnisse erhalten worden und führten zu Lösungsansätzen für eine praktikable und möglichst universelle Umsetzung der bisherigen Entwicklungsarbeiten in eine marktgerechte Anwendung.

Positiv ist anzumerken, dass sich der Katalysatorlieferant entschlossen hat, wenn möglich mit Unterstützung der Feldtestteilnehmer und der Schornsteinfegerinnung NRW die anstehenden Optimierungsarbeiten durchzuführen; Zielsetzung ist, das Katalysatorsystem in optimierter Form zur Heizsaison 2005/2006 auf dem Markt anzubieten.

8 Danksagung

Der Dank der Projektbearbeiter gilt den Teilnehmern des Feldtests für ihre Geduld und ihre tatkräftige Unterstützung. Besonders sei den Verantwortlichen der Schornsteinfegerinnung NRW und der Schornsteinfegerschule Dülmen für das wohlwollende Interesse sowie dem Landesumweltamt NRW für die materielle und finanzielle Unterstützung bei der Projektdurchführung gedankt

Anhang

Feldtest Ofenkatalysator: Telefonische Befragung Projektende

- 1 Zug ist beeinträchtigt (ab 25.4. mit neuem, kaum gefeuerten System); CO-Gehalt über 7000 ppm in offenem Zustand; Temp. oberhalb 250°C bis ca. 350 °C, Zuvor mit dem ersten Katalysator max. Temperaturen von ca. 650 °C erreicht; gute Drehbarkeit der Kat.-Linse. Städt. Umgebung.
- 2 Wesentliche Zugverbesserung nach Austausch der Kat.-Masse; auch beim Befeuern praktisch keine Probleme; max. Temp. bei ca. 400 °C; gute Drehbarkeit der Kat.-Linse.
- 3 Zug ist schlecht; beim Befeuern insbesondere bei milder Witterung Probleme; starke Rußablagerungen; Temp. bis ca. 400 °C; gute Handhabbarkeit des Systems mit Revisionsklappe. Hanglage.
- 4 Ursprüngliche Kat.-Füllung. Zug ist schlecht in Betriebsstellung, besonders bei milder Witterung; wenig Russablagerungen. Hanglage.
- 5 Beim Befeuern entweichen größere Mengen Ruß in den Wohnbereich, daher nach 1-2 Tagen Betriebsdauer Ausbau der Kat.-Linse. Sehr kurzer Kamin, Hanglage.
- 6 Zug ist unter allen Witterungsbedingungen schlecht; bei waagerechter Stellung der Kat.-Linse Qualmen und Holzgeruch im Wohnbereich; max. Temp. bei ca. 200 °C. Sehr kurzer Kamin.
- 7 Ursprüngliche Kat.-Füllung. Zug zunächst sehr gut, wurde mit der Zeit schlechter, verbunden mit Geruchsbelästigung aus dem Ofen (wg. Staubablagerung ?); vorher 74% CO- und 85% KW-Umsatz; Kat. noch nicht gereinigt.
- 8 Starke Verstaubung wg. Verbrennung von Holzbriketts. Gute Messergebnisse. Kaum Einschränkung des Kaminzuges.
- 9 Erstmessungen ergaben ca. 60% CO-Umsatz; starke Verrußung nach 2 Tagen Betriebsdauer. Nach Katalysatoraustausch wieder Verrußung nach 2 Tagen Betrieb. Kaminhöhe nur ca. 5m.
- 10 Zwei Kamine; eigene Messungen ; guter Zug; neuer Katalysator.
- 11 Keine Probleme (Kamin ca. 6 m ?); ursprünglicher Katalysator.
- 12 Keine aktuelle Rückmeldung.

Literaturverzeichnis

- [1] Struschka, M. et al. : UBA-Texte 41/03, Berlin, 2003
- [2] E-Kataster: Quellengruppe Kleinfeuerungsanlagen. Erhebung für Baden
Württemberg, UMEG 2002
- [3] Januten, J. : Problematic emissions of wood combustion compared to other
fuels. Proceedings of the Finish-Austrian workshop of energy from wood.
Bundes-ministerium für Wissenschaft und Forschung, Wien, Nov. 1983, S.
242-256
- [4] Lim, K. J. , Lips, H. I. : Overview of emissions from wood combustion. Wood
energy conference – an alternate ressource for Appalachian industry and
institution. Winston Salem, NC, USA, April 1981, S. 61-74
- [5] Krapfenbauer, A. : Zur Emissionsproblematik bei der Holzverbrennung.
Allgemeine Forstzeitschrift, Bd. 41, 1986, S. 293-295
- [6] Marutzky, R. : Erkenntnisse bei der Verbrennung von Holz und Spanplatten.
WKI- Bericht Nr. 26, 1991, S. 113-138
- [7] Straßberger, J. : Emissionen aus größeren Holz- und Strohfeuerungen. UBA
Forschungsbericht 104 03 346, 1986
- [8] Vesterinen, R. : Emissions from the small-scale combustion of wood and peat.
Proceedings of bioenergy 1984, Vol. 1, S. 376-390