



JAHRESBERICHT 1997

EF Nr. 193930

Über die Arbeiten gemäss Vertrag: 50 367 und 50 368

Titel des Projekts: **Verbrennung und Vergasung von Energiegras
und Feldholz** (Energiegras-Teilprojekte C und D)

Zusammenfassung:

1. Im vorliegenden Projekt wurde die Verbrennung von Gras, Miscanthus, Stroh und Feldholz in Feuerungsanlagen von 1 – 5 MW untersucht. Die detaillierten Angaben zur Anlagentechnik und zur Wirtschaftlichkeit sowie die Schlussfolgerungen aus den Verbrennungsversuchen von Graspellets in Rost- und von Grasballen in Ballenfeuerungen sind im separaten Schlussbericht aufgeführt. Die wichtigsten Resultate aus dieser Arbeit sind: Es wurde gezeigt, dass Feldholz wie naturbelassenes Waldholz in automatischen Holzfeuerungen energetisch genutzt werden kann. Im Vergleich zu Holz weisen Halmgüter dagegen deutlich höhere Aschegehalte und tiefere Ascheerweichungstemperaturen auf. Aus diesem Grund sind für die Verbrennung von Halmgutbrennstoffen Massnahmen zur Vermeidung der Verschlackung erforderlich. Für die Verbrennung sind zudem die erhöhten Gehalte an Kalium, Natrium, Chlor und Stickstoff von Bedeutung, da deren Freisetzung in die Gasphase zu entsprechenden Emissionen (NO_x , HCl, Partikel) und Ablagerungen im Feuerraum und Kessel (KCl, NaCl) führt. Wegen der erforderlichen Massnahmen zur Kessel- und Abgasreinigung sowie zur Verhinderung von Verschlackung ist für Halmgutfeuerungen mit deutlich höheren Investitionskosten (rund um einen Faktor 2) als für Holzfeuerungen zu rechnen. Der Einsatz von Halmgütern ist deshalb vor allem für grössere Leistungen sinnvoll. In Ergänzung zu den geschilderten Untersuchungen wurden in der Berichtsperiode zu folgenden Teilfragen Zusatzuntersuchungen durchgeführt, zu welchen je separate Forschungsberichte vorliegen:
2. Erarbeitung einer Messtechnik zur Bestimmung des Verweilzeitspektrums von Feuerungsanlagen und Darstellung der Konsequenzen auf die Oxidation von Kohlenmonoxid in Feuerungen für biogene Brennstoffe (Arbeit an einer Laboranlage der ETH Zürich)
3. Untersuchung des Verhaltens von Chlor und Alkalimetallen sowie Beschreibung der Auswirkungen bei der Verbrennung von Halmgütern (Messungen an der ETH Zürich, bei Sandia National Laboratories in USA sowie auf einer Rostfeuerung bei der Firma Schmid AG)
4. Untersuchungen zur Partikelgrössenverteilung bei der Verbrennung verschiedener biogener Brennstoffe und Bestimmung des Abscheideverhaltens des rotierenden Partikelseparators (Rotating Particle Separator RPS) in Zusammenarbeit mit Verenum, TU Twente (NL) und der Firma Schmid AG.
5. Bestimmung der Wirkungsgrade und der Wirtschaftlichkeit zur Wärmekraftkopplung mit biogenen Brennstoffen unter Leitung von R. Bühler, Maschwanden.

Dauer des Projekts: 1.7.1992 – 31.12.1997

Beitragsempfänger: Laboratorium für Thermodynamik in neuen Technologien, ETH Zürich

Berichterstatter: Dr. Thomas Nussbaumer

Adresse: Institut für Energietechnik, LTNT
ETH Zentrum, ML, CH – 8092 Zürich

Telefon: 01' 632 25 89 oder 01' 364 14 12

1 Projektziele

1. Das Projekt Energiegras/Feldholz [1] hatte zum Ziel aufzuzeigen
 - welche Feuerungs- und Vergasungsanlagen zur Nutzung von Energiegras in den Aufbereitungsformen Pellets, Briketts, Ballen und lose zur Verfügung stehen
 - welche Abgasreinigungsanlagen eingesetzt werden können
 - mit welchen Emissionen und Rückstandsmengen zu rechnen ist
 - welche Anlagenkosten zu erwarten sind.

Die im Berichtsjahr abgeschlossenen Zusatzarbeiten hatten folgende Ziele:

2. Erarbeiten einer Messtechnik zur Bestimmung des Verweilzeitspektrums von Feuerungsanlagen mittels Zugabe von Tracer und Messen der Sprungantwort, Messung und Bestimmung des Verweilzeitverhaltens unterschiedlicher Feuerraumgeometrien mit zugehörigen Emissionswerten und Beschreibung der Konsequenzen der Feuerraumgestaltung auf die Kohlenmonoxidoxidation [2a und 2b].
3. Messung und Beschreibung des Verhaltens von Chlor und Alkalimetallen im Verbrennungsprozess und Konsequenzen auf Ablagerungen in Feuerraum und Kessel sowie auf Emissionen und Abgasreinigung [3].
4. Ermittlung typischer Partikelgrößenverteilungen bei der Verbrennung und Vergasung verschiedener biogener Brennstoffe (Gras, Holz, Altholz) und Untersuchung der Abscheidemöglichkeit der Staubemissionen im Rotating Particle Separator RPS [4].
5. Resultate aus den Vorarbeiten über die Wärmekraftkopplung, welche im Rahmen des Projekts Energiegras/Feldholz durchgeführt wurden, sind in der separaten Studie „Energie aus Holz“ über die verschiedenen Verfahren zur Produktion von Wärme, Strom und Treibstoffen aus Holz unter Leitung von R. Bühler weiterverwendet worden und durch aktualisierte Berechnungen zu Wirkungsgraden und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen ergänzt worden [5].

Die Resultate der Arbeit für Projektziel 1 wurden im Schlussbericht [1] detailliert dargestellt. Die Zusatzuntersuchungen wurden in separaten Forschungsberichten und Publikationen ausgeführt, Projektziel 2: [2a und 2b], Projektziel 3: [3], Projektziel 4: [4] und Projektziel 5: [5].

Im vorliegenden Jahresbericht werden die Resultate zu den Projektzielen 2, 3 und 4 zusammenfassend dargestellt. Für die Resultate zur Aufgabe 1 wird auf den Schlussbericht [1] verwiesen, für die Untersuchungen zur Wärmekraftkopplung (Ziel 5) wird auf die separate Studie [5] verwiesen.

2 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

1. Abschluss des Schlussberichts Energiegras/Feldholz [1]

Die wichtigsten Schlussfolgerungen aus der Arbeit sind in der Zusammenfassung aufgeführt, die detaillierten Ergebnisse sind im Schlussbericht zusammengestellt [1].

2. Abschluss der Arbeiten zum Verweilzeitspektrum in Feuerungen und dessen Einfluss auf die Kohlenmonoxid-Oxidation [2a und 2b]

Im Rahmen dieser Teilaufgabe wurde eine Messtechnik zur experimentellen Bestimmung des Verweilzeitspektrums der Gase in Feuerräumen und Brennkammern entwickelt sowie ein Modell zur Berechnung des CO-Abbaus in Abhängigkeit von Temperatur, Mischungsintensität, Verweilzeit und Sauerstoffgehalt erarbeitet. Das Verfahren der Verweilzeitbestimmung basiert auf der Eindüsung eines Tracers, welcher mit einem Detektor am Austritt des Reaktors bestimmt wird. Als Tracer wurde Helium verwendet, das mittels eines Wärmeleitfähigkeitsdetektors (WLD) erfasst wurde. Gleichzeitig erfolgte die Bestimmung der Gastemperatur mittels Absaugepyrometer sowie des Sauerstoffgehalts mit einer O₂-Sonde mit kurzer Ansprechzeit. Abbildung 1 zeigt den Versuchsaufbau.

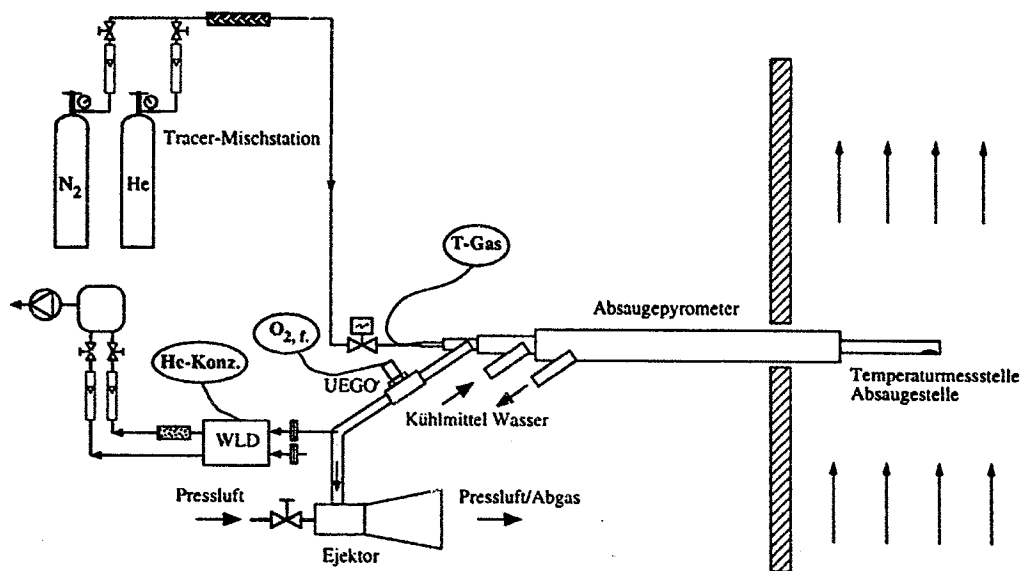


Abbildung 1 Messtechnik zur zeitgleichen Bestimmung der Gastemperatur mit Absaugepyrometer, des Sauerstoffgehalts mit der UEGO-Sonde sowie des Verweilzeitspektrums (Mischung und mittleren Verweilzeit) durch Bestimmung der Sprungantwort der Heliumzugabe durch He-Detektion mit einem WLD-Detektor [2].

Die so entwickelte Messtechnik wurde an einer Laborfeuerungsanlage eingesetzt, bei welcher die Geometrie der Brennkammer durch unterschiedliche Einbauten signifikant verändert wurde, so dass deutlich unterschiedliche Verweilzeitspektren mit entsprechend unterschiedlichen Bodensteinzahlen resultieren (Abbildung 2). Die Bodensteinzahl beschreibt das Verhältnis zwischen Konvektion und Diffusion und ist ein Mass für die Mischungsintensität:

$Bo = u L D_{ax}^{-1}$ mit u = Geschwindigkeit, L = Länge und D_{ax} = axialer Diffusionskoeffizient

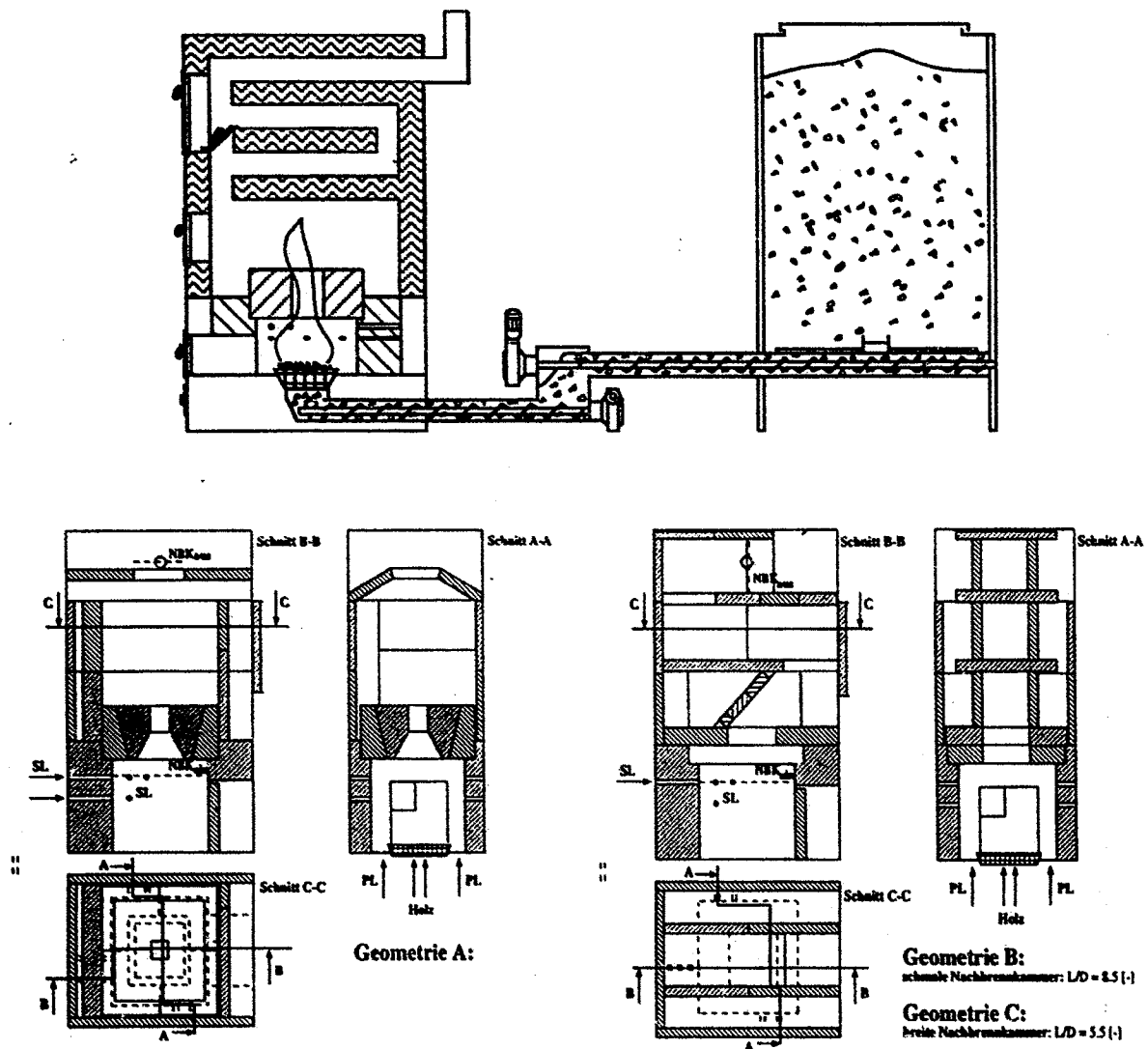
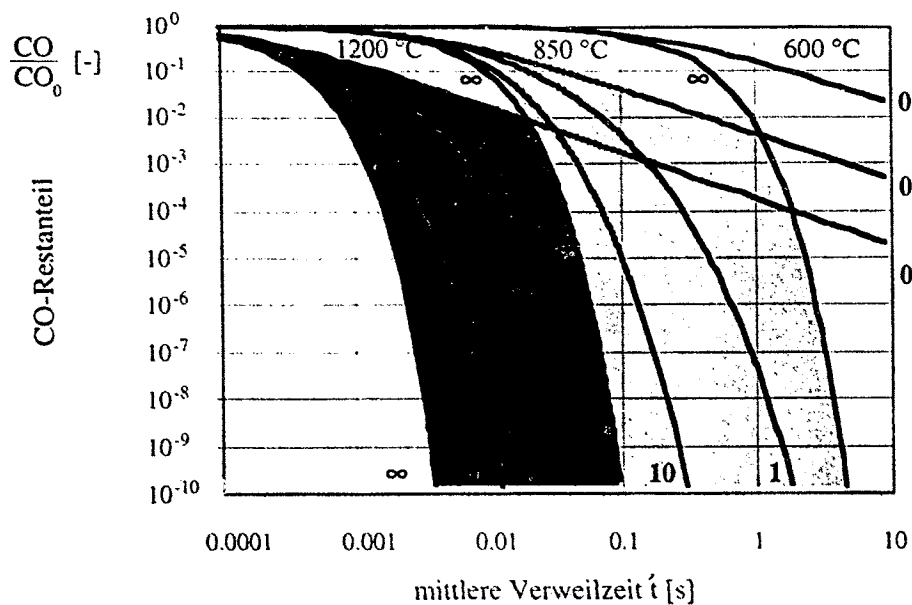


Abbildung 2 Versuchsaufbau zur Bestimmung des Verweilzeitspektrums verschiedener Brennkammergeometrien. Oben: Ansicht der Unterschubfeuerung mit konventioneller Brennkammer. Unten: Anordnung von drei der vier untersuchten Brennkammergeometrien [2].

Zur Beschreibung des Abbauverhaltens verschiedener Feuerraumgeometrien wurde ein Modell angewendet, bei welchem die Oxidation von Kohlenmonoxid mit einer Summenreaktion in Abhängigkeit von Temperatur, Verweilzeit und Bodensteinzahl unter Verwendung kinetischer Daten aus der Literatur beschrieben wird. Abbildung 3 zeigt den berechneten Einfluss der verschiedenen Parameter auf den CO-Abbau. Das Modell geht von einer molekularen Vormischung der Gase am Reaktoreintritt aus.



Scharparameter:

- Bodensteinzahl [-]: 0, 1, 10, ∞
- Temperatur [°C]: 600, 850, 1200

Konstanten:

- Restsauerstoff [Vol% tr.] : 2
- Wasserdampf [Vol%] : 15
- Frequenzfaktor [1/s] : $1.3 \cdot 10^{14}$
- Aktivierungsenergie [kJ/mol] : 125.5
- Reaktionsordnungen O_2 , H_2O [-] : 0.5

Abbildung 3 Berechneter CO-Abbau in Funktion der mittleren Verweilzeit für verschiedene Temperaturen (600°C, 850°C und 1200°C) und unterschiedliche Bodensteinzahlen (0, 1, 10, ∞) [2].

Die Berechnungen zeigen, dass Kohlenmonoxid bei vollständiger Vormischung typischen Verweilzeiten und Bodensteinzahlen bereits bei Temperaturen über 800°C auf nicht mehr nachweisbare Werte abgebaut wird. Aufgrund des Vergleichs gemessener CO-Konzentrationen im Nachweisbereich mit dem berechneten CO-Abbau weit unter die Nachweisgrenze wird vermutet, dass die Annahme der vollständigen Vormischung der Reaktanden am Eintritt nicht erfüllt ist. Mit der Einführung eines unvermischten Bypass-Stromes bzw. einer Segregation der Gase im Modell kann gezeigt werden, dass die effektiv gemessenen CO-Werte im Bereich von einigen ppm bereits durch unvermischte Anteile im Promille-Bereich erklärt werden kann.

Aufgrund dieser Untersuchung werden deshalb in realen Feuerungen die Nichtidealitäten der molekularen Vermischung als Ursache für einen unvollständigen Reaktionsablauf bestätigt. Zur Verbesserung der Mischung ist eine verstärkte Turbulenz zum Beispiel durch höhere Eintrittsgeschwindigkeit der Sekundärluft anzustreben. Im weiteren ist darauf zu achten, dass durch Gestaltung der Brennkammer eine Rückmischung von älterem Fluid vermieden wird, dass also die Brennkammer nach der Mischzone das Verhalten eines Strömungsrohres aufweist.

3. Untersuchungen zum Verhalten von Chlor sowie zur Ablagerungsbildung und zur Partikel- und HCl-Abscheidung in Gewebefiltern [3]

Gräser und Halmgüter wie *Miscanthus* emittieren im Unterschied zu Holz bedeutend höhere Flugaschefrachten und hinterlassen wesentlich mehr Ablagerungen auf den Innenwänden der Feuerungen. Die gegenüber Holz massiv höheren Chlorgehalte solcher Pflanzen liessen vermuten, dass dieses Element aufgrund seiner hohen Flüchtigkeit bei der Emissionsbildung eine wesentliche Rolle spielt. Ziel dieser Arbeit war deshalb die Identifikation der wichtigsten Chlorverbindungen in Emissionen und Rückständen bei der Verbrennung und die Kenntnis der Bildungsmechanismen.

Entsprechend der Vielfalt an erwarteten Chlorverbindungen wurden verschiedene Analyseverfahren angewandt: HCl wurde mittels FTIR-Spektrometrie bei 200 °C im feuchten Abgas bestimmt, eine Methode, welche die simultane Bestimmung weiterer infrarotaktiver Gase erlaubte, wobei die Auswahl auf die Gase H_2O , CO_2 , CO und SO_2 beschränkt wurde. Organische Chlorverbindungen wurden mittels CARBOSIEVE und TENAX Teströhrchen beprobt, und nach anschliessender Extraktion mittels GC-MS quantitativ bestimmt. Neben der gravimetrischen und radiometrischen Bestimmung der Flugaschekonzentration im Abgas wurden Chlorverbindungen in der Flugasche durch Röntgen-Diffraktionsanalyse nachgewiesen und der elementare Anteil des Chlors in der Flugasche durch chemischen Aufschluss bestimmt. Das gleiche Analyseverfahren wurde für Ablagerungsproben aus dem Kessel angewendet. Morphologische Merkmale von Flugaschepartikeln und -ablagerungen wurden mittels Raster-Elektronenmikroskop untersucht.

Der Schwerpunkt der Untersuchung galt der Verbrennung von sieben verschiedenen Pflanzen: Wiesengras, Futtergras, Timothee, Segge, Weizenstroh, *Miscanthus* und Hanf auf einer 450 kW_n Rostfeuerung der Firma Schmid AG in Eschlikon. Holz diente als Vergleichsbrennstoff. Diese Versuche zeigten sehr deutlich, dass mehr als 50 % des Brennstoffchlors als KCl aus dem Brennstoff entweicht und rund 10 % davon in den Ablagerungen auf den Kesselwänden zu finden ist. Mit einem Massenanteil von 20 % tritt K_2SO_4 als weitere mengenmässig wichtige Verbindung in der Flugasche auf. Die Flugaschepartikel nach dem Kessel zeigen die charakteristische kubische Form kristalliner Verbindungen und erreichen eine typische Grösse von 100 nm. Die gleichen charakteristischen Merkmale gelten für die Ablagerungen in den Rauchrohren, wobei die typische Partikelgrösse zwischen 200 und 500 nm beträgt. Der Rest des Brennstoffchlors verteilt sich gleichmässig auf HCl (15 %), welches in maximalen Konzentrationen von 115 mg/Nm³ auftrat, und auf die Bettasche (10 %). Organische Chlorverbindungen trugen mit einer Rate von 0.03 % praktisch nicht zum Chlortransfer bei. Die organischen Hauptanteile waren chlorierte, aliphatische Kohlenwasserstoffe (10 µg/Nm³) und chlorierte Phenole (1 µg/Nm³).

Zur Abklärung des HCl Bildungsmechanismus wurden unter anderem Versuche mit zwei Brennstoffgemischen durchgeführt, bei welchen eine bekannte Menge Chlor in einer gegebenen Verbindung zugegeben wurde. Zum einen wurden Holzschnitzel mit KCl und Methionin gemischt (max. Chlorgehalt: 1 %, max. Schwefelgehalt: 2 %) und auf einer 100 kW_n Unterschubfeuerung der Firma Tibamüller AG in Balsthal verbrannt. In diesem Versuchsbrennstoff liegt das Chlor in ähnlicher Verbindung wie bei Grasbrennstoffen vor. HCl trat dabei in ähnlich geringen Konzentrationen auf wie bei der Verbrennung der untersuchten Pflanzen und zeigte vergleichbare Beziehungen zum Brennstoffchlorgehalt sowie zu SO_2 und H_2O auf. Zum anderen wurden Versuche mit Holz/PVC-Gemischen durchgeführt. Diese haben die Nachweisgüte der angewandten HCl-Messmethode bestätigt. Entspre-

chend der bekannten, hohen Chlortransferrate für HCl aus PVC (> 90 %) wurden bei Chlorgehalten von 1 % wesentlich höhere HCl Konzentrationen (500 – 600 mg/Nm³) festgestellt als bei den verschiedenen Pflanzen.

Die gefundenen Resultate lassen folgende Schlussfolgerungen in bezug auf die Bildungswege von Chlorverbindungen und Ablagerungen zu: Als wahrscheinlichste Ursache der marginalen HCl-Bildung wurde die Verflüchtigung während der Entgasungsphase zu Beginn des Brennstoffabbrands sowie die Bildung von K₂SO₄ aus KCl in Gegenwart von SO₂, H₂O und O₂ erkannt. Chlorierte Kohlenwasserstoffe werden wahrscheinlich ähnlich wie Dioxine im Abgas bei Temperaturen unterhalb von 400 °C gebildet. Verdampfung von KCl aus dem Brennstoff führt zu Flugasche im Abgas, wobei KCl dort teilweise zu K₂SO₄ umgewandelt wird (HCl-Bildung). Der hohe Temperaturgradient in Wandnähe führt bedingt durch Thermodiffusion sowohl zur Kondensation von Flugasche auf Schamottwänden (T_g > 700 °C) als auch zur Ablagerung von festen Partikeln auf Metallwänden im Kessel und Kamin durch Thermophorese (T_g < 700 °C).

Abbildung 4 zeigt den Aufbau des Gewebefilters zur Untersuchung der Partikelabscheidung. In Abbildung 5 sind typische HCl-Gehalte im Abgas und Transferraten von Chlor dargestellt. Abbildung 6 zeigt das Verhalten von Chlor bei der Verbrennung von Halmgütern und Holz.

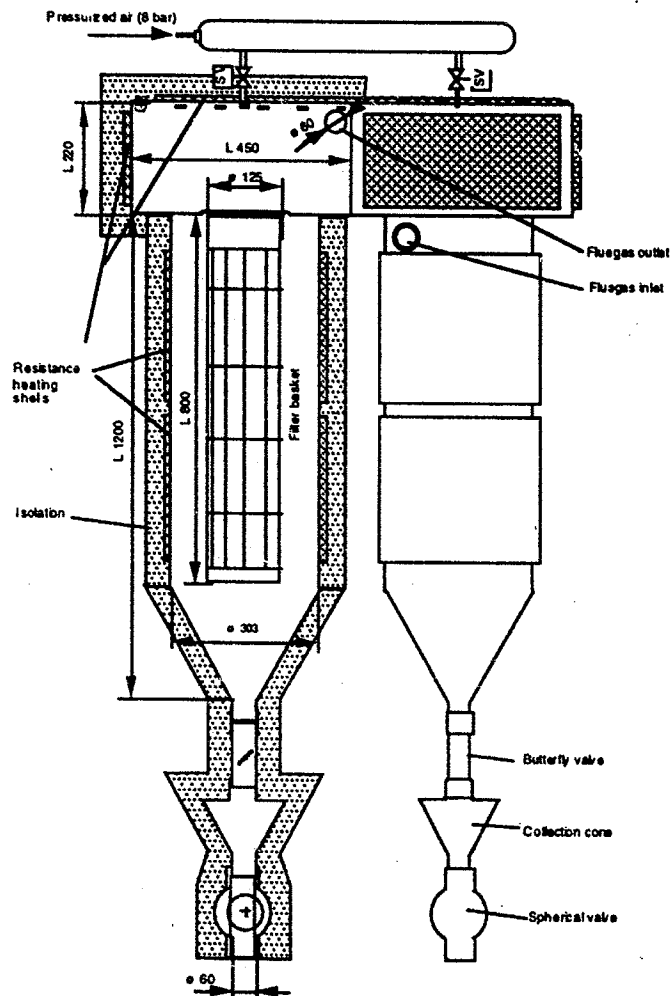


Abbildung 4 Versuchsstand zur Untersuchung der Abscheidung von Partikeln und HCl (mit Additivzugabe) in einem Gewebefilter. Links: Schnittbild, rechts: Aussenansicht.

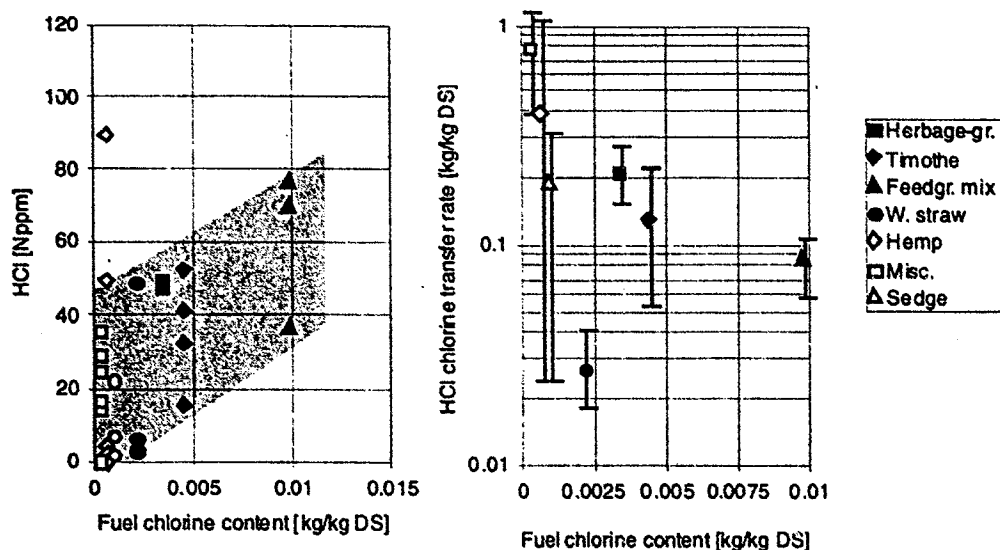


Abbildung 5 HCl-Emissionen in Abhängigkeit des Chlorgehalts im Brennstoff (links) und Transferrate von Brennstoffchlor zu HCl (rechts) [3]. Brennstoffe: Herbage-grass = Heu, Feldgras; Timothe = Timothe; Feedgrass mix. = Futterheu; Wheat straw = Weizenstroh; Hemp = Hanf; Misc. = Miscanthus; Sedge = Segge.

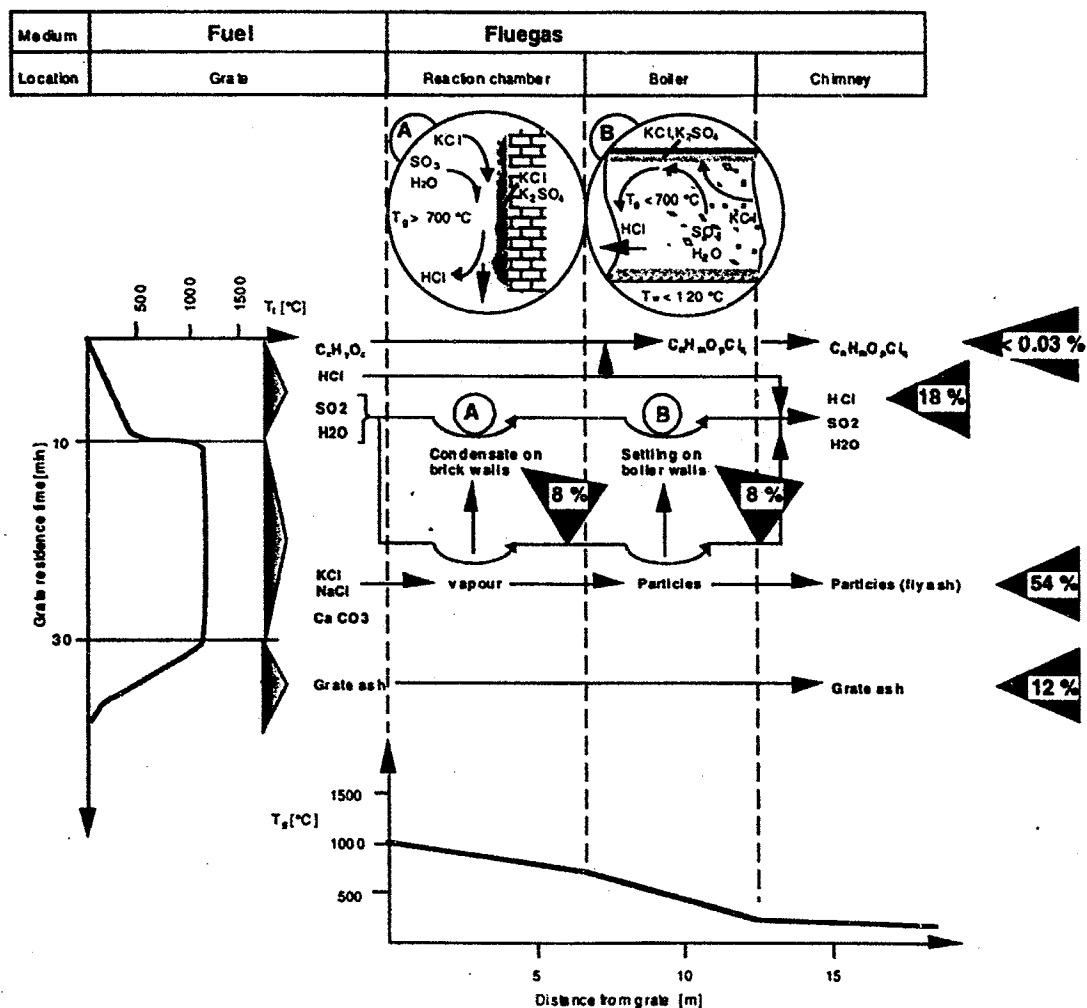


Abbildung 6 Bildungswege von Chlorverbindungen bei der Verbrennung von Halmgütern und Holz mit Darstellung der Ablagerungsbildung an Schamottewänden (A) und Rauchgasrohren (B). Die in Pfeilen angegebenen Zahlenwerte geben die Rate des Chlortransfers an [3].

4. Arbeiten zur Partikelgrößenverteilung bei der Verbrennung und Vergasung von biogenen Brennstoffen und Versuche zur Abscheidung im RPS [4]

Zur Einhaltung des gesetzlichen Staubgrenzwertes werden heute bei automatischen Biomassefeuerungen vor allem Multizyklone eingesetzt. Bei der Verbrennung von naturbelassenen Holzschnitzeln ist die Grenzwerteinhaltung zumeist möglich, bei der Verbrennung von Sägemehl oder Spanplatten sind Grenzwertüberschreitungen jedoch relativ häufig. Zudem fordern einige Länder oder Regionen tiefere Staubemissionen als die Luftreinhalte-Verordnung. Aus diesen Gründen interessieren leistungsfähige Verfahren zur Staubabscheidung, welche nur einen geringen Mehraufwand im Vergleich zu Multizyklonen ergeben. Die Auslegung und Beurteilung von Staubabscheideverfahren erfordert jedoch Kenntnisse über die Partikelgrößenverteilung.

Eigene Untersuchungen sowie verschiedene Literaturquellen zeigen, dass der Hauptanteil der Partikel aus der Holzverbrennung im Bereich $< 1 \mu\text{m}$ liegt und dass die Partikel in einer monomodalen Verteilung vorliegen. Teilweise wurden bimodale Verteilungen mit einem zweiten Maximum bei relativ grossen Partikeln gefunden. Die meisten Untersuchungen in der Literatur beschränken sich auf die Verbrennung von naturbelassenem Holz. Zudem fehlen Angaben zu den verwendeten Feuerungssystemen und den gewählten Betriebsbedingungen. Mit der vorliegenden Untersuchung sollten deshalb erste Kenntnisse über die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Partikelgrößenverteilung bei der Holzverbrennung ermittelt werden. Folgende Versuchsparameter stehen dabei im Vordergrund und wurden in den Versuchen variiert:

- Brennstoff (naturbelassenes Holz, Spanplatten, Rinde, Altholz, Gras)
- Feuerungssystem (Unterschub-, Rostfeuerung)
- Feuerungseinstellung (Primärluftanteil, Abgasrückführung)
- Holzverbrennung / Holzvergasung

Die Partikelgrößenverteilungen wurden mit einem Andersen Kaskadenimpaktor im Abgas ermittelt und haben folgende Tendenzen aufgezeigt:

Bei der Verbrennung von naturbelassenem Holz, Spanplatten, Altholz und Gras liegen mehr als 80% der Partikelmasse im Grössenbereich $< 1 \mu\text{m}$ (aerodynamische Partikeldurchmesser). Die submikronen Partikelkonzentrationen variieren auf der untersuchten Rostfeuerung und den üblichen Feuerungseinstellungen von 70 mg/Nm^3 (naturbelassenes Holz) bis 580 mg/Nm^3 (Gras; Gehalte bei 11 Vol.-% O_2). Die Partikelgrößenverteilungen sind annähernd monomodal. Die höchsten Partikeldichten liegen im Bereich von $0.1 \mu\text{m}$ (naturbelassenes Holz, Spanplatten, Gras) bis $0.2 \mu\text{m}$ (Altholz).

Eine Ausnahme bildet Rinde, bei dessen Verbrennung lediglich rund 50% oder 30 mg/Nm^3 der Flugstaubpartikel im Submikronbereich von $< 1 \mu\text{m}$ beobachtet werden. Die Verteilung ist zudem bimodal mit Maxima im Bereich von $0.1 \mu\text{m}$ und ca. $6 \mu\text{m}$. Da Multizyklone für Partikel ab ca. $2 \mu\text{m}$ ein gutes Abscheideverhalten aufweisen, sind bei Abgasen aus der Verbrennung von Rinde oder rindenreichem Holz höhere Staubabscheidegrade im Zyklon möglich als bei der Verbrennung von naturbelassenem Holz.

Die Feuerungseinstellung, insbesondere die Abgasrückführung, hat bei der untersuchten Unterschubfeuerung einen deutlichen Einfluss auf den Gesamtstaubgehalt im Abgas, nicht hingegen auf die relative Verteilungsdichtefunktion. Bei maximal möglicher Abgasrückführung wurde ein Gesamtstaubgehalt von rund 30 mg/Nm^3 (Bezug auf 11 Vol.-% O_2) erreicht. Ohne Abgasrückführung beträgt der Gesamtstaubgehalt dagegen rund 110 mg/Nm^3 .

Bei den untersuchten Betriebsbedingungen weisen die Partikelfractionen eine weisse Farbe auf. Da unverbrannter Kohlenstoff die Partikel grau bis schwarz verfärbt, ist davon auszugehen, dass die submikronen Partikel nicht auf unverbrannte Bestandteile des Brennstoffes zurückzuführen sind. Die submikronen Partikel sind vermutlich auf flüchtige Aschebestandteile zurückzuführen, da bei gleichen Verbrennungsbedingungen zwischen dem Gesamtstaubgehalt und dem Aschegehalt im Brennstoff ein annähernd linearer Zusammenhang vermutet wird.

Bei der Holzvergasung in einem Festbettvergaser nach dem Gleichstromprinzip und in einem Wirbelschichtvergaser werden bimodale Partikelgrössenverteilungen beobachtet. Die Maxima der Partikeldichten liegen bei ca. $0.2\ \mu\text{m}$ und ca. $5\ \mu\text{m}$ (Festbett) bzw. bei ca. $1.5\ \mu\text{m}$ und ca. $20\ \mu\text{m}$ (Wirbelschicht). Im Festbettvergaser wird eine gesamte Partikelkonzentrationen von rund $230\ \text{mg}/\text{Nm}^3$ gefunden, im Wirbelschichtvergaser rund $10\ 000\ \text{mg}/\text{Nm}^3$. Der Massenanteil der Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von $>5\ \mu\text{m}$ beträgt rund 70% (Festbett) bzw. 90% (Wirbelschicht).

Abbildung 7 zeigt den Aufbau eines Kaskadenimpaktors, Abbildung 8 die auf einer Impaktorplatte abgelagerten Partikel und Abbildung 9 die Partikelgrössenverteilung der untersuchten Brennstoffe.

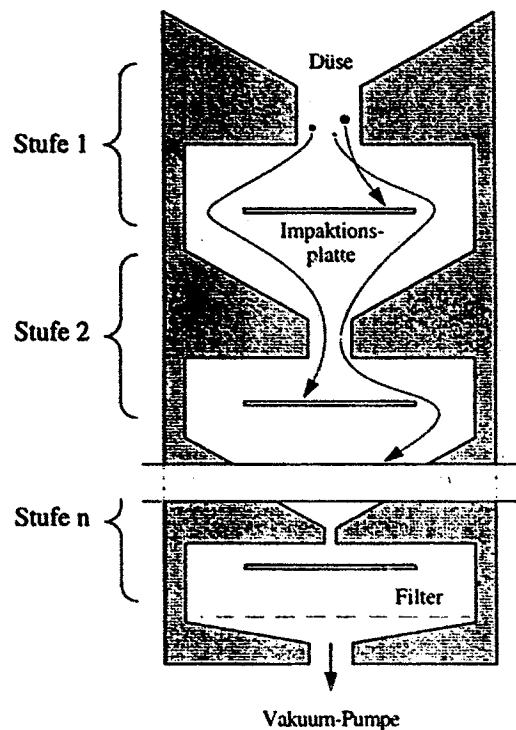


Abbildung 7 Schematischer Aufbau eines Kaskadenimpaktors. Durchmesser der Impaktionsplatten: 60 mm.

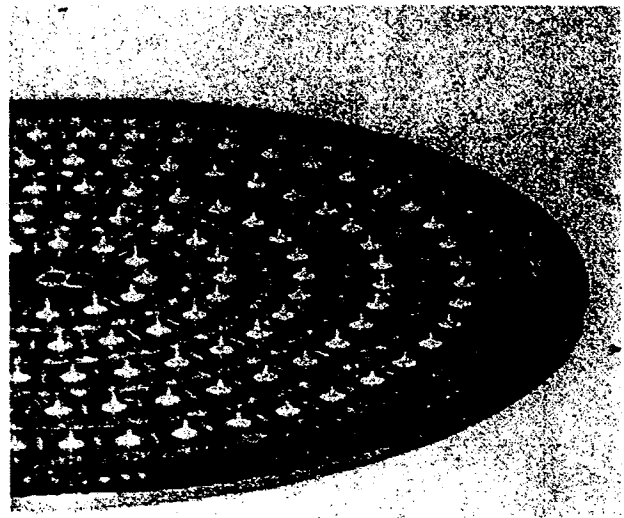


Abbildung 8 Impaktierte Flugstaubpartikel aus der Holzverbrennung auf einer Platte des Andersen-Kaskadenimpaktors (mittlerer aerodynamischer Durchmesser ca. $0.4\ \mu\text{m}$) [4].

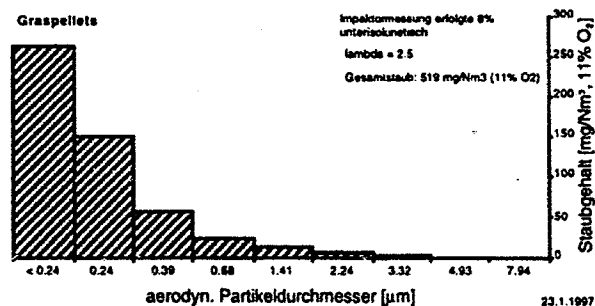
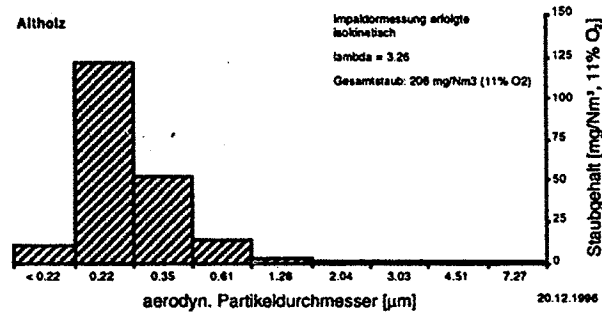
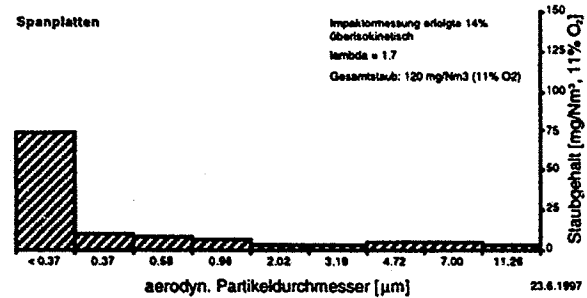
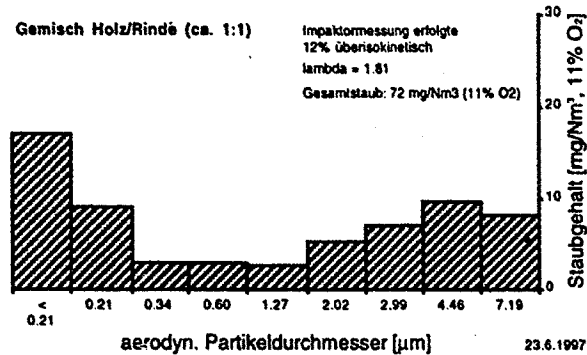
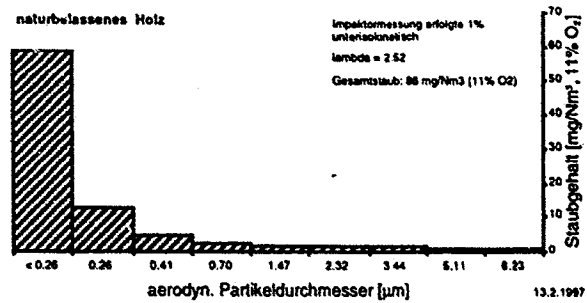


Abbildung 9

Partikelgrößenverteilungen im Abgas bei der Verbrennung von naturbelassenem Holz, einem Gemisch aus Holz und Rinde, Spanplatten, Altholz und Gras (von oben nach unten) in einer Vorschubrostfeuerung [4].

3 Zusammenarbeit

- Schmid Holzfeuerungen AG Eschlikon (Vorschubrostfeuerung, RPS)
- Sandia National Laboratories, Livermore CA (USA) (Ablagerungsbildung)
- Twente University of Technology, Prof. H.H. Brouwers (RPS)
- Paul Scherrer Institut (Wirbelschichtvergaser)
- Indian Institute of Science, CCC und Dasag (Festbettvergasung)
- Tiba-Müller AG Balsthal (Unterschubfeuerung)
- FAT Tänikon

4 Transfer von Ergebnissen in die Praxis

Zusammenarbeit mit Feuerungsherstellern

Vorträge und Publikationen.

5 Perspektiven für 1998

Die Erkenntnisse aus dem abgeschlossenen Projekt werden in ausgewählten Folgeprojekten verwendet, insbesondere in den Arbeiten zur Auslegung von Holzfeuerungen (ETH Zürich, Sachbearbeiter Ch. Bruch), zur Holzvergasung (ETH Zürich, Sachbearbeiter Ph. Morf) sowie im Rahmen eines geplanten BEW-Forschungsprojekts zur Partikelbildung und -abscheidung bei Holzfeuerungen in Zusammenarbeit mit industriellen Partnern.

6 Publikationen 1997

- [1] Nussbaumer, Th.: Verbrennung und Vergasung von Energiegras und Feldholz. In: J.L. Hersener (Red.): *Schlussbericht Projekt Energiegras/Feldholz*, Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern 1997, 42 – 72
- [2a] Biollaz, S.: *Messen des Verweilzeitspektrums in der Nachbrennkammer von Holzfeuerungen zur Modellierung der Kohlenmonoxid-Oxidation*, Diss ETH Nr. 12383, Zürich 1997
- [2b] Biollaz, S.; Nussbaumer, Th.; Onders, Ch.: Messen des Verweilzeitspektrums in Nachbrennkammern von Holzfeuerungen zur Modellierung der CO-Oxidation, 18. *Deutsch-Niederländischer Flammentag*, Delft (NL), 28. – 29.8.1997, VDI-Bericht 1313
- [3] Kaufmann, H.: *Chlorine-Compounds in Emissions and Residues from the Combustion of Herbaceous Biomass*, Diss ETH 12429, Zürich, 1998
- [4] Hasler, P.; Nussbaumer, Th.: *Partikelgrößenverteilung bei der Verbrennung und Vergasung von Biomasse*, Schlussbericht Forschungsprogramm Biomasse, Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern 1997
- [5] Nussbaumer, Th.; Neuenschwander, P.; Hasler, Ph.; Jenni, A.; Bühler, R.: *Energie aus Holz – Vergleich der Verfahren zur Produktion von Wärme, Strom und Treibstoff aus Holz*, Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern 1997, 153 S.