

Zusammenfassender Abschlussbericht
über das Verbundprojekt

**Integrierter Umweltschutz in der Textilindustrie -
Teilvorhaben 1: Betriebsintegrierte, umweltfreundliche Verwertung
von Textilstäuben unter Nutzung ihres Wärmeinhalts**

(Forschungsvorhaben 0330025, 0330026 und 0339922)

Ausführende Stellen : TU-Braunschweig, Braunschweig
 Temafa Maschinenfabrik GmbH
 PILLARD Feuerungen GmbH

Projektleiter : Prof. Dr. techn. R. Leithner
 Dipl.-Ing. L. Tamasi
 Dipl.-Ing. G. Endres

Inhaltsverzeichnis

1.1. Aufgabenstellung	3
1.1.1. Einleitung	3
1.1.2. Gesamtziel des Forschungsvorhabens	3
1.1.3. Aufgabenstellungen der Verbundteilnehmer	4
1.1.3.1. Aufgabenstellung der Fa. Temafa	4
1.1.3.2. Aufgabenstellung der Fa. PILLARD	4
1.1.3.3. Aufgabenstellung der TU-Braunschweig	4
1.2. Voraussetzungen, unter denen das Forschungsvorhaben durchgeführt wurde	5
1.2.1. Voraussetzungen von Seiten der beteiligten Textilunternehmen	5
1.2.2. Voraussetzungen von Seiten der Verbundpartner	5
1.2.3. Wissenschaftliche und technische Voraussetzungen	6
1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens	7
1.3.1. Geplantes Gesamtvorhaben	7
1.3.2. Planung des aktuellen Vorhabens	7
1.3.3. Ablauf des aktuellen Vorhabens	9
1.4. Stand der Wissenschaft und Technik, an den angeknüpft wurde	13
1.4.1. Vorliegende Erfahrungen der Projektbeteiligten	13
1.4.2. Verwendete Fachliteratur, benutzte Informations- und Dokumentationsdienste	14
1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen	14
2.1. Ergebnisse des Forschungsvorhabens	15
2.1.1.1. Beschreibung der Versuchsanlage	15
2.1.1.2. Beschreibung der Dosieranlage	16
2.1.1.3. Eingesetzte Staubsorten	16
2.1.1.4. Eingesetzte Brennervarianten	17
2.1.1.5. Messtechnik zur Abgasanalyse	21
2.1.1.6. Analytik zur Eingangs- und Rückstandsanalyse	21
2.1.1.7. Versuchsdurchführung	27
2.1.2. Ergebnisse	28
2.1.2.1. Ausbrand	28
2.1.2.2. Ergebnisse der Emissionsmessungen	31
2.1.2.3. Abschätzung der maximalen Zumischraten unter Einhaltung der Emissionsgrenzwerte	33
2.1.2.4. Ergebnisse der Eingangsanalysen und der Rückstandsanalysen	35
2.1.3. Bewertung der Ergebnisse	44
2.1.3.1. Bewertung der Ergebnisse der Eingangs und Rückstandsanalysen, Dioxine und Furane	44
2.1.3.2. Bewertung der Ergebnisse der Emissionsmessungen	45
2.1.3.3. Bewertung der Ergebnisse des Ausbrandes	46
2.1.4. Zusammenfassung	47
2.1.5. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	47
2.2. Voraussichtlicher Nutzen der Ergebnisse des Forschungsvorhabens	49
2.3. Bekanntgewordene Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	50
2.4. Veröffentlichung der Ergebnisse des Forschungsvorhabens	50
3. Literatur	50

1.1. Aufgabenstellung

1.1.1. Einleitung

In den verschiedenen Prozessen der Textilerzeugung und -verarbeitung fallen Stäube und Kurzfasern an, die aufgrund ihrer Eigenschaften, beispielsweise der zu geringen Faserlänge, aber auch ihrer Zusammensetzung, nicht mehr in den Produktionsprozess zurückgeführt werden können.

In Abhängigkeit vom verarbeiteten Material kann es sich hierbei um Baumwolle oder Wolle, aber auch um Kunstfasern oder Mischungen aus den genannten Materialien handeln.

Diese Stäube werden üblicherweise an den einzelnen Produktionsanlagen abgesaugt und in einer zentralen Filteranlage abgeschieden. Dadurch entsteht zwangsläufig eine Vermischung der unterschiedlichen Fasertypen mit starken Schwankungen in der Zusammensetzung und in der Fasergröße.

Auf Grund der Faserlänge oder auf Grund der Vermischung der Ausgangsmaterialien können die abgeschiedenen Stäube nicht wieder im Produktionsprozess verwendet werden. Die Stäube müssen entsorgt werden.

Dies geschieht zur Zeit zu einem wesentlichen Teil auf Deponien. Nach Inkrafttreten der TA-Siedlungsabfall können diese Abfälle der Textilindustrie bei Glühverlusten > 90 % nur nach einer thermischen Vorbehandlung deponiert werden. Eine zentrale Behandlungsanlage speziell für die Abfälle der Textilindustrie wäre auf Grund der weiträumigen Verteilung der Betriebe mit hohem logistischem Aufwand verbunden, weshalb eine betriebsinterne Lösung vorzuziehen ist.

1.1.2. Gesamtziel des Forschungsvorhabens

In diesem Forschungsvorhaben wird die Entsorgung über die Mitverbrennung in den betriebseigenen Wärmeerzeugungssystemen (Warmwasser- / Dampferzeuger) untersucht. Durch die Nutzung als Zusatzbrennstoff (Heizwerte der Stäube von ca. 17 MJ/kg bis zu ca. 30 MJ/kg) wird ein Teil des Regelbrennstoffes Öl oder Gas substituiert und gleichzeitig die Belastung der Strassen durch den Transport der Stäube durch die Entsorger vermindert.

Folgende Randbedingungen sind einzuhalten:

- Wirtschaftliche und umweltfreundliche betriebsinterne thermische Verwertung der anfallenden Textilstäube,
- Mitverbrennung der Stäube mit dem Regelbrennstoff unter Einhaltung der geltenden Grenzwerte der TA-Luft ,
- Betrieb des modifizierten Brenners auch ohne Staubzufeuerung (Verfügbarkeit),
- Einbau des modifizierten Brenners in die vorhandenen Feuerungsanlagen,
- Erhalt der Betriebsgenehmigung der vorhandenen Feuerungsanlagen.

Am Verbundvorhaben sind folgende Partner beteiligt;

Verbundteilnehmer:

- Pillard Feuerungen GmbH, Taunusstein
- Temafa GmbH, Bergisch Gladbach
- Technische Universität Braunschweig, Braunschweig
Institut für Wärme- und Brennstofftechnik
Institut für Ökologische Chemie und Abfallanalytik

aus der Textilindustrie (als Unterauftragnehmer der Technischen Universität Braunschweig):

- Textilverband Nord-West, Münster
- Hermann Biederlack GmbH & Co., Greven
- Bierbaum Textilwerke GmbH & Co. KG, Borken
- Ibenä Textilwerke Beckmann GmbH, Rhede
- Wilh. Wülfing GmbH & Co., Borken

Die Ergebnisse sollten durch späteren Einsatz in den am Vorhaben beteiligten Textilbetrieben, durch den Bau und Betrieb entsprechender Anlagen verwertet werden.

1.1.3. Aufgabenstellungen der Verbundteilnehmer

Im Rahmen des beschriebenen Gesamtziels verteilten sich die Aufgaben, wie nachfolgend beschrieben, auf die drei Verbundpartner.

1.1.3.1. Aufgabenstellung der Fa. Temafa

Die Firma Temafa entwickelt und fertigt seit vielen Jahren textiltechnische Anlagen und verfügt über langjährige Erfahrung im Umgang mit den genannten Filterstäuben. Diese Erfahrung sollte in das Verbundprojekt eingebracht werden, indem eine Maschine zur Öffnung und Dosierung der angelieferten Stäube mit anschließender pneumatischer Förderung zum PILLARD - Brenner zu entwickeln und erproben war.

1.1.3.2. Aufgabenstellung der Fa. PILLARD

PILLARD FEUERUNGEN GmbH entwickelt industrielle Feuerungsanlagen für alle Brennstoffe und Brennstoffgemische und verfügt über langjährige Erfahrungen sowohl mit Staub- und Kombibrennern kleiner Leistung, z. B. für Kesselfeuerungen, als auch mit dem Einsatz von Abfallbrennstoffen in verfahrenstechnischen Feuerungsanlagen, z.B. in Drehrohröfen in der Zementindustrie.

Aufgabe war die Entwicklung und Erprobung eines Kleinbrenners passend zur im Institut für Wärme- und Brennstofftechnik der TU Braunschweig vorhandenen Versuchsbrennkammer, der die gleichzeitige Verfeuerung von Gas / Öl und Textilstäuben erlaubt, sowie die Erarbeitung der Vorgaben für die Auslegungsparameter der Versuchsanordnung.

1.1.3.3. Aufgabenstellung der TU-Braunschweig

Das Institut für Wärme- und Brennstofftechnik betreibt eine Versuchsanlage für Brenneruntersuchungen bis zu einer Brennerleistung von 950 kW. Diese Versuchsanlage war für die Mitverbrennung zu modifizieren und die von den Verbundpartnern entwickelten Anlagenkomponenten Dosierung und Brenner in die Anlage zu integrieren. In Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern waren die Anlagen in Betrieb zu nehmen und in Vorversuchen die Betriebsparameter zu optimieren.

In Langzeitversuchen (Versuchsdauer bis zu neun Stunden) waren das Betriebsverhalten der Dosierung und des Brenners zu untersuchen und die Schadstoffe zu messen.

Das Institut für Ökologische Chemie und Abfallanalytik führte eine Eingangsanalyse der von den Textilbetrieben angelieferten Stäube durch und analysierte die Schadstoffgehalte in den Verbrennungsrückständen.

1.2. Voraussetzungen, unter denen das Forschungsvorhaben durchgeführt wurde

1.2.1. Voraussetzungen von Seiten der beteiligten Textilunternehmen

Textilstäube aus der Fertigung, die aufgrund ihrer Eigenschaften nicht mehr in den Produktionsprozess zurückgeführt werden können, fallen entweder als kostenpflichtig zu entsorgender Abfall an oder können alternativ betriebsintern energetisch genutzt werden.

Die betriebseigenen Wärmeerzeugungsanlagen sollen weitergenutzt werden, wenn das zur Entwicklung anstehende Brennstoffhandhabungs- und Feuerungssystem zum Einsatz kommen.

Der modifizierte Brenner muss so konzipiert sein, dass er weiterhin auch ohne Staubzuführung mit dem lokalen Regelbrennstoff betrieben werden kann.

Bei der Staubzuführung zum Regelbrennstoff sollen die für den jeweiligen Betrieb geltenden Emissionsgrenzwerte eingehalten werden, ohne dass zusätzlich Anlagen zur Abgasnachbehandlung (Staubfilter, Wäscher, etc.) installiert werden müssen.

Der Betrieb der vorhandenen Wärmeerzeugungsanlage, der üblicherweise voll automatisiert, d.h. ohne Beaufsichtigung, erfolgt, soll in der gewohnten Weise aufrechterhalten werden können.

1.2.2. Voraussetzungen von Seiten der Verbundpartner

PILLARD entwickelt und fertigt Brenner und Brennstoffhandhabungssysteme für den Einsatz nahezu aller Arten von flüssigen, gasförmigen und staubförmigen Brennstoffen in industriellen Hochtemperaturprozessen und Wärmeerzeugern, wie z.B. Dampf- oder Wärmeträgererhitzerkesseln, darüberhinaus Brennkammern, z.B. für die Heissgaserzeugung in industriellen Trocknungsanlagen, sowie die jeweils zugehörige Mess-, Regelungs- und Überwachungstechnik.

Neben für den jeweiligen grossindustriellen Anwendungsfall massgeschneiderten Lösungen gehören hierzu auch kleinmasstäbliche Entwicklungen für Forschungsstellen, wie das Institut für Wärme- und Brennstofftechnik an der TU Braunschweig, welches seit vielen Jahren erfolgreich mit PILLARD zusammenarbeitet und aus diesem Grund auch für das aktuelle Projekt als Partner gewonnen werden konnte.

Aus Kostengründen sollte die im dort vorhandene Ausrüstung mit möglichst geringen Modifikationen genutzt werden sowie auf ein erprobtes Brennerkonzept zurückgegriffen werden, bei dem jedoch im Hinblick auf die Staubzuführung den besonderen Eigenschaften der Textilfasern Rechnung getragen werden musste.

Das Institut für Wärme- und Brennstofftechnik verfügt über einen Brennerversuchstand mit einer thermischen Leistung von 950 kW (siehe Bild 1). An dieser Anlage wurden unter anderem bereits Forschungsvorhaben zur Entwicklung von Kohlenstaubbrennern kleiner Leistung, Untersuchungen zur Mitverbrennung von Klärschlamm in Braunkohlefeuerungen, Untersuchungen zu Schadstoffemissionen von Leichtölbrennern in Trocknungsanlagen durchgeführt.

Die Messtechnik zur kontinuierlichen Erfassung der Schadstoffe (NO_x , CO , SO_2 , C_xH_y , Staub) und die Messtechnik zur Betriebsüberwachung (O_2 , CO_2 , Volumenströme Verbrennungsluft, Erdgas und Temperaturen) sind vorhanden.

Das Institut für Ökologische Chemie und Abfallanalytik verfügt über Personal und Laboreinrichtungen, um die erforderlichen Analysen zur Schadstoffbestimmung im angelieferten Textilstaub und in den Verbrennungsrückständen durchzuführen.

Die Firma TEMAFa befasst sich mit der Entwicklung, Konstruktion Herstellung und dem Vertrieb von textiltechnischen Anlagen.

Die Produktpalette umfasst:

- Anlagen zum Öffnen, Reinigen und Mischen von Fasern für die Vliesstoff-Industrie
- Anlagen zum Dosieren, Fördern und Abscheiden
- Beschickungsanlagen für Krempeln und Vliesbildner
- Clean-Star-Systeme als Recyclinganlagen für Baumwollabgänge

Spezialmaschinen für

- Färbereien und Bleichereien
- Wollwäschereien
- Reisspinnstoffindustrie
- Sicherheitspapier-Herstellung
- Die Verarbeitung von Glas- und Bastfasern, Linters
- u.a.

Aufgrund der langjährigen Tätigkeit auf dem Gebiet des Anlagenbaus für Faserhandhabung konnte auf eine grosse Erfahrung mit ähnlichen Maschinen zurückgegriffen werden. In diesem Zusammenhang wurde auch das Aufbereitungsverfahren für die zu untersuchenden Textilstäube (Homogenisierung) sowie die Dosierung und die pneumatische Förderung derselben zum Brenner mit modifizierten TEMAFa-Standardmaschinen konzipiert und getestet.

1.2.3. Wissenschaftliche und technische Voraussetzungen

Bei dem anfangs zugrundegelegten Brennerkonzept handelt es sich um einen drallstabilisierten PILLARD - Brenner vom Typ GF-KO mit gestufter Verbrennungsluftzufuhr zur Verminderung der Stickoxid - Emission, wie er an Brennkammern oder Dampfkesseln seit etwa 15 Jahren erfolgreich für die Verbrennung von Kohlenstäuben in Verbindung mit Heizöl oder Erdgas als Aufheizbrennstoff eingesetzt wird.

Die Zuführung des Staubes in der Grundbauart erfolgt mittels eines Transportluftanteils entsprechend etwa 5 - 10% des stöchiometrischen Verbrennungsluftbedarfs über einen Kreisringpalt, der einen konzentrisch in der Brennermitte angeordneten Flammenstabilisator umgibt.

Die primäre Verbrennungsluft wird über zwei radial ausserhalb des Staubkanals liegende Ringkanäle zugeführt, deren innerer mit einer Vorrichtung zur Verdrallung der Luftkomponente ausgerüstet ist und die zur Flammeneinstellung separat einstellbar sind.

Der Brenner sitzt an der Spitze einer konisch geformten, mit feuerfester Stampfmasse ausgekleideten Zündbrennkammer, über deren äusseren Mantel achsparallel zur Flamme die sekundäre Verbrennungsluft (Stufenluft) über einen Ringpalt oder auch über Einzeldüsen eingeblasen wird.

Das Prinzip der Verbrennung mit niedriger Stickoxidbildung beruht auf der Aufteilung der Flamme in einen sauerstoffarmen, brennernahen Wurzelbereich, in dem die Umsetzung von brennstoffgebundenem Stickstoff zu NO unterdrückt wird, und eine sauerstoffreichere Ausbrandzone, in der die restliche Brennstoffumsetzung bei, wegen fortgeschrittenen Strahlungsaustauschs der Primärflamme mit dem Feuerraum, bereits deutlich abgesenkter Temperatur stattfindet, wodurch zusätzlich auch eine geringere thermische NO - Bildung erreicht wird.

Wegen des gezielt eingestellten Luftmangels im Flammenwurzelbereich ist dieses Brennerprinzip empfindlicher in Bezug auf CO - Emission (als Anzeichen nicht vollständigen Ausbrands) als klassische Brenner mit ungestufter Luftzuführung. Die Luftaufteilung muss also entsprechend sorgfältig erfolgen.

Darüberhinaus ist bei der pneumatischen Zuführung fester, staubförmiger Brennstoffe ein geringstmöglicher Transportluftvolumenstrom anzustreben, um den brennernahen Bereich der Flammenwurzel nicht unnötig mit Sauerstoff anzureichern.

Schliesslich ist zur Einhaltung der Emissionsgrenzwerte (Stickoxide wie auch Kohlenmonoxid) ein sensibles Gleichgewicht zwischen Brennstoffzuführung und zur Verfügung stehender Verbrennungsluft einzuhalten, weswegen insbesondere bei festen Brennstoffen ein möglichst gleichmässiger, pulsationsfreier Transport sichergestellt werden muss [14].

1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

1.3.1. Geplantes Gesamtvorhaben

Das Gesamtprojekt gliedert sich in zwei Teilstufen, wobei das beschriebene Vorhaben, für das Fördermittel gewährt wurden, zunächst nur Stufe 1 darstellt :

Stufe 1 : Ermittlung von Basisdaten aus Verbrennungsversuchen im Technikumsmassstab

Stufe 2 : Verifizierung der Ergebnisse im Betriebsmassstab

Stufe 2 soll erst nach erfolgreichem Abschluss der Stufe 1 in Angriff genommen werden, d.h. wenn sowohl die technisch - wissenschaftlichen Resultate eine Machbarkeit belegt als auch die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ein positives Ergebnis gezeigt haben.

1.3.2. Planung des aktuellen Vorhabens

Am Beginn des Forschungsvorhabens stand die Unterzeichnung der Kooperationsvereinbarung zwischen den Partnern des Forschungsverbundes.

Danach erfolgte in Zusammenarbeit mit den Vertretern der drei beteiligten Textilunternehmen und des Verbandes der Nordwestdeutschen Textil- und Bekleidungsindustrie die Definition der zu untersuchenden Textilstäube.

Die nacheinander abzuarbeitenden Schritte des Vorhabens wurden, vorerst unabhängig von der Zuständigkeit des jeweils verantwortlichen Projektpartners, wie folgt, definiert :

Sammlung der in den Textilbetrieben anfallenden Stäube

Eingangsanalyse der zu verfeuernden Stäube

Staubhandhabung : Aufbereitung
 Dosierung
 Förderung

Verbrennungsverhalten : Optimierung der Verbrennung
 Emissionen
 Zumischgrenzen

Emissionsanalysen

Rückstandsanalysen

Auswertung der Daten und Korrelation der Ergebnisse

Machbarkeits- und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Vor Beginn der individuellen Aktivitäten der drei Projektpartner war es erforderlich, die Schnittstellen zwischen den Teilprojekten sowie die Auslegungsparameter für die einzelnen Komponenten zu definieren. Hierbei wurde sich an den Randbedingungen der Versuchsanlage am Institut für Wärme- und Brennstofftechnik orientiert.

Thermische Leistung des Brenners : ca. 500 kW
Nennvolumenstrom Erdgas : ca. 50 m³(n)/h
Maximaler Massenstrom Staub : ca. 25 - 27 kg/h
Transportluftvolumenstrom : ca. 120 - 130 m³/h
Förderleitung : Ø 48,3 x 2,6 mm

Die Zusammenführung der Komponenten und die Einbindung in die Versuchsanlage des IWBT sollte erst stattfinden, nachdem in Kooperation zwischen den Partnern TEMAFA und PILLARD die Funktion des Dosier- und Fördersystems, der Transport zum Brenner und die geeignete Einleitung des Staubes in den Brenner nachgewiesen worden war.

Danach sollte die Inbetriebnahme der Anlage durch alle drei Projektpartner gemeinsam erfolgen und nach erfolgreichem Start an das IWBT zur Durchführung der Verbrennungsversuche übergeben werden.

Die Eingangsanalyse der Stäube, der Verbrennungsrückstände sowie die messtechnische Begleitung der Versuche sollte durch das Institut für Ökologische Chemie und Abfallanalytik, ebenfalls an der TU Braunschweig, erfolgen.

Die Auswertung der Versuchsdaten sollte durch das IWBT erfolgen, die Zusammenfassung der Erkenntnisse sowie die Machbarkeits- und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durch PILLARD mit Unterstützung der DMT GmbH, Essen.

1.3.3. Ablauf des aktuellen Vorhabens

Im März 2001 wurden zwischen den Partnern des Verbundvorhabens die Versuchsparameter und die Schnittstellen zwischen den Anlagen festgelegt.

Für die Eingangsanalysen wurden von den Textilunternehmen Proben der Textilstäube angefordert. Trotz sorgfältiger Sammlung innerhalb der Textilunternehmen, die für die geplanten Versuchsreihen weitgehend sortenreine Stäube zur Verfügung gestellt haben, und trotz gewissenhafter Handhabung, Zwischenlagerung und Transport, lagen die Stäube doch sehr stark verdichtet und verklumpt vor und enthielten eine erhöhte Feuchtigkeit. Eine Vergleichsmässigung (Homogenisierung) konnte nur durch eine vorgeschaltete Staubaufbereitung erreicht werden. Ohne diesen Aufbereitungsschritt ergaben sich signifikante Schwankungen während der Dosierung und Öffnung, die zwangsläufig zu unbefriedigenden Verbrennungsergebnissen geführt hätten.

Das Schüttgewicht der angelieferten Stäube war, je nach Lagerungsdauer und Feuchtigkeit, stark schwankend und betrug im Durchschnitt etwa 80 kg/m³.

Die Staubaufbereitung umfasst im allgemeinen folgende Schritte:

Die angelieferten Staubsäcke müssen geöffnet und die Stäube dosiert in eine Öffnungsmaschine gegeben werden. Dort werden die Verklumpungen aufgelöst, die Qualität vergleichmässigt. Durch die Absaugluft wird darüberhinaus die Feuchtigkeit reduziert.

Der Staub ist anschliessend, zur Optimierung des nachgeschalteten Verbrennungsprozesses, kontinuierlich in den im Zuge des Projekts zu entwickelnden Stauböffner zu dosieren.

Schliesslich wird durch den Stauböffner der Faserstaub dann in weitgehend homogener Form als Faser- / Luftgemisch als Sekundärbrennstoff dem Brenner zugeführt.

Schon die ersten Vorversuche haben gezeigt, dass

- die unterschiedlichen Staubqualitäten gänzlich verschiedene "Einzugseigenschaften" aufwiesen (erneutes Verklumpen, Diskontinuität bis hin zu Betriebsstörungen),
- der Einzug eine Schlüsselrolle für die Kontinuität der Dosierung spielt,
- die aus Sicht der Verbrennungsführung vorgegebene (geringe) Luftmenge eine extrem hohe Anforderung an die pneumatische Absaugung stellt,
- eine Schachtdosierung, nur mit der Gravitation als Vortrieb, nicht funktionieren kann.

Daher wurde das Konzept dahingehend geändert, dass anstelle eines vertikalen Vorratsschachts ein ebenfalls vertikaler Bandeinzug mit einer mechanischen Unterstützung durch eine gegenüberliegende, excentergetriebene Schubplatte installiert wurde.

Um die (manuelle) Beschickung des Stauböffners in der Versuchsanlage zu erleichtern, wurde zusätzlich ein 4,5 m langes Förderband als "Sortiertisch" vor der Anlage installiert.

Nach internen Versuchen im Technikum der Fa. TEMAFa konnte unter Einhaltung der vorgegebenen Förderluftmenge erstmals im Juni 2001 eine dem optischen Eindruck nach pulsationsfreie Dosierung und Einblasung eines, allerdings als unkritisch hinsichtlich des Eintrags in die Dosier- und Fördereinrichtung zu bezeichnenden, Textilstaubes durch ein glattes Rohr DN 32 demonstriert werden.

Um auch kritische Stäube störungsfrei eintragen zu können, wurde, wie oben beschrieben, durch TEMAFa die Einzugsseite der Dosier- und Fördereinrichtung überarbeitet, wodurch im September 2001 eine vergleichbar gute Einblasung auch des als extrem schwierig eingestuften Fasergemischs 50% Wolle (Lama / Alpaka) / 50% Polyacryl, ebenfalls durch ein glattes Rohr DN 32, vorgeführt werden konnte.

Um ein unnötiges Risiko nach dem Transport nach Braunschweig auszuschliessen, wurde daraufhin das Originaleinströmteil des Versuchsbrenners 1 demontiert und im Oktober 2001 im TEMAFa - Technikum erprobt. Hierbei erfolgte die Transportluft-einströmung rechtwinklig zur Brennerachse und die Zuführung des Staubes in den Brennraum durch einen achsparallelen Ringspalt. Wenn auch bei der Demonstration die Staubzuführung relativ pulsationsarm und ohne Unterbrechung durch Kanalverstopfung funktionierte, erschien es dennoch ratsam, vor Beginn der Brennversuche die innere Geometrie des Einströmteils zu überarbeiten, nämlich durch Verzicht auf Zentrierrippen und bestmögliche Glättung der Oberflächen das Risiko für Betriebsstörungen weiter zu vermindern.

Um repräsentative Ergebnisse vor allem bei den Analysen der Verbrennungsrückstände zu erhalten wurden die Brennkammer, die Rauchgaszüge und die Schläuche des Tuchfilters der Versuchsanlage gereinigt. Zur Vorbereitung der Versuche wurde die Gasversorgung des Brenners um einen zweiten Gasversorgungsstrang erweitert. Der Durchsatz durch diesen Strang wird getrennt messtechnisch erfasst werden. Die Sicherheitskette der Versuchsanlage Flammenüberwachung, Verriegelung der Gasversorgung bei Störfällen wurde entsprechend erweitert. Für die Versuche wurde der vorhandene Gaszündbrenner verwendet und mit dem zweiten Gasversorgungsstrang der Gasleistungsbrenner betrieben.

Nach Anlieferung der Dosieranlage und der Brennerteile für die Textilstaubdosierung und den Gasleistungsbrenner wurden die Anlagenteile integriert und getestet.

Im Dezember 2001 fanden die ersten Verbrennungsversuche statt. Die Inbetriebnahme mit Erdgas verlief problemlos, die geforderte Gasmenge von 50 m³(n)/h konnte durchgesetzt werden. Dabei wurden die aktuellen, verschärften Emissionsgrenzwerte für CO (< 50 mg/m³(n)) und für NO_x (< 100 mg/m³(n)) sicher unterschritten werden.

Allerdings konnten anschliessend im Betrieb mit dem obengenannten kritischsten Fasergemisch die Erfahrungen aus dem TEMAFa - Technikum leider nicht bestätigt werden, es trat bereits nach kurzer Zeit eine Verstopfung des Staubweges auf, ausgehend vom Ringspalt im Brenner. Erhöhung der Transportluftmenge und damit der Geschwindigkeit änderte nichts an der Verstopfungsneigung.

Anschliessende Kontrollversuche mit Einblasung durch ein glattes Rohr zeigten zwar, dass die Dosier- und Fördereinrichtung als Verstopfungsursache ausgeschlossen werden konnte, trotzdem aber noch Detailverbesserungen auf der Einzugsseite notwendig erschienen.

Aufgrund dieser Erkenntnisse wurde beschlossen, dass die Konstruktion des nächsten Brenners (Brennavariante 2) ein glattes, möglichst zentrisch und achsparallel angeordnetes Einblasrohr beinhalten sollte, welches zusammen mit dem gas-elektrischen Zündbrenner im Zentralkanal des Brenners unterzubringen war.

Um die Kosten für Umbauten an der Versuchsanlage des IWBT (Neubau einer Zündbrennkammer, Anpassarbeiten) niedrig zu halten, wurde der neue Brenner an den Aussendurchmesser eines aus einem vorangegangenen (privatfinanzierten) Forschungsvorhaben vor Ort befindlichen Brenners angepasst, was leider zu erheblichen Komplikationen bei der Konstruktion und danach auch bei der Beschaffung der verwendeten Materialien führte. Die Fertigung verzögerte sich entsprechend.

Aus diesem Grund war es erst Anfang Mai 2002 wieder möglich, Verbrennungsversuche zu fahren (Brennavariante 2).

Hierbei stellte sich heraus, dass die pneumatische Förderung der Textilfasern und die achsparallele Einblasung annähernd im Zentrum des Brenners (eine gewisse Exzentrizität war wegen der ebenfalls erforderlichen Anordnung des gas-elektrischen Zündbrenners nahe der Brennermitte nicht zu vermeiden) störungsfrei funktionierte, die Ausbrandergebnisse aufgrund der zu kurzen Verweilzeit der Textilfasern im heissen Bereich der Flamme aber nicht zufriedenstellen konnten.

Desweiteren zeigte sich, dass aufgrund der stark unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften der Fasern neben den bereits vorgesehenen Variationsmöglichkeiten (Relativgeschwindigkeiten zwischen den Komponenten etc.) innerhalb des Dosier- und Fördersystems auch noch die Drehzahl des sogenannten "Tambours", des eigentlichen Öffnungsorgans, optimiert werden musste. Höchstmögliche Drehzahl ermöglichte bestmögliche Öffnung auch der schwierigsten Fasern, erforderte aufgrund der internen Luftförderung aber auch die grösste (als Transportluft für die Fasern) abzuführende Luftmenge, was verbrennungstechnisch zwar von Nachteil ist, andererseits aber eine kontinuierliche Zuführung frei von Förderunterbrechungen durch Verstopfungen am Fasereinzug ermöglichte.

Für die nächste Versuchsserie (geplant für Mitte bis Ende Juni 2002) wurden deshalb folgende Modifikationen angestrebt :

- Minimierung der erforderlichen Transportluftmenge durch Umbauten im Austrittstrichter des Dosier- und Fördersystems und durch interne Verringerung der Leckluftmengen, damit
- Verringerung der Austrittsgeschwindigkeit der Fasern in den Feuerraum, dadurch
- Verlängerung der Verweilzeit der Fasern im heissen Bereich der Flamme, zusätzlich
- Verringerung des Dralls in der Gaszuführung im Brenner zum Zweck der Einstellung einer längeren und schlanker Flamme, ebenfalls mit dem Ziel der Verlängerung der Verweilzeit
- Nochmalige Überarbeitung des Fasereinzugs, um ein Rollen der Textilfasern zu vermeiden (Verringerung des Verstopfungsrisikos)

Die Versuchsreihe in der 26. KW 2002 bestätigte die Wirksamkeit der vorgenannten Massnahmen, es war möglich, alle ausgewählten Stäube zuverlässig zu öffnen und pneumatisch zum Brenner zu fördern, ohne dass Verstopfungen im Dosiersystem

oder im Brenner auftraten. Auch die Verbrennungsergebnisse liessen den Rückschluss auf einen hinreichend gleichmässigen Brennstoffmassenstrom in der angestrebten Grössenordnung zu.

Während der Versuche konnten noch Detailverbesserungen an der Abdichtung des Dosiersystems vorgenommen werden, wodurch eine weitere Verringerung der Austrittsgeschwindigkeit der Fasern in den Feuerraum möglich wurde. Es hat sich aber gezeigt, dass der für das Dosiersystem tolerierbare minimale Transportluftvolumenstrom zu einer für einen optimalen Ausbrand immer noch zu hohen Austrittsgeschwindigkeit führte, weswegen eine deutliche Vergrösserung des Querschnitts des Einblassystems im Brenner unumgänglich erschien. Der hierfür erforderliche Neubau eines Brenners wurde unverzüglich in Angriff genommen.

Bei dieser neuen Ausführung, der Variante 3, die aus dem PILLARD - Brenner GF-G (für Heissgaserzeuger in industriellen Trocknungsanlagen) abgeleitet war, erlaubte der Verzicht auf einen gas-elektrischen Zündbrenner (Zündung des Stützbrennstoffs Erdgas jetzt durch Elektroden vor dem Austritt des Gaskanals) die Anordnung eines im Querschnitt erheblich vergrösserten Staubeinblasrohrs exakt im Zentrum des Brenners, bei dem optional auch eine Verdrallung des Staubstroms von aussen mittels einer Luft- oder Gaskomponente möglich war (PILLARD - Patent für den Einsatz fester Sekundärbrennstoffe an Drehrohröfen).

Die Vorversuche verliefen erfolgreich, Betriebsunterbrechungen durch Verstopfung des Dosiersystems traten nicht mehr auf, die Emissionswerte für CO und NO_x stiegen jedoch erwartungsgemäss bei Zufeuerung der Fasern gegenüber dem reinen Gasbetrieb (aktuelle Grenzwerte immer noch unterschritten) leicht an, blieben aber kontrollierbar und sehr stabil, was ein klares Indiz für einen hinreichend gleichförmigen Brennstoffeintrag war.

Damit konnten nun schliesslich die Dauerversuche im 4. Quartal 2002 aufgenommen werden.

Während der Versuche stellte sich heraus, dass die in der Nähe des Staubaustritts vor dem Gaskanal angeordneten Zündelektroden verschmutzten, wodurch sie teilweise funktionsunfähig wurden, und darüberhinaus das Strömungsfeld im Brennernahbereich störten. Daher wurde die Zündvorrichtung komplett nach ausserhalb des Brenners verlagert und nur zum Brennerstart manuell in die Nähe des Gasaustritts gebracht. Desweiteren wurde mit dem Ziel der Erhöhung der Flammenstabilität die Geometrie des Gasdrallkörpers sowie die des Flammenstabilisators variiert.

Mit diesem Brenner (Variante 4) wurden im Mai/Juni 2003 weitere Versuche durchgeführt.

Durch die Verzögerungen bei der Entwicklung von Dosierung und Staubbrenner standen Textilstäube, die vom Institut für Ökologische Chemie und Abfallanalytik bereits analysiert waren, nicht in ausreichenden Mengen für Dauerversuche zur Verfügung. Für die angelieferten Stäube mussten erneut Eingangsanalysen angefertigt werden.

1.4. Stand der Wissenschaft und Technik, an den angeknüpft wurde

In einem 3-jährigen EU - Projekt (Joule III, Nr. JOF3-CT95-0100) wurden u.a. erste Versuch zur Mitverbrennung von Textilstäuben in einem Gasbrenner durchgeführt. In diesem Zusammenhang wurden Daten über das Aufkommen der verschiedenen Textilabfälle in Deutschland und Portugal sowie deren Verwertungspotential in der Textilindustrie erfasst. Die Ergebnisse dieses EU - Projekts können als derzeitiger Stand der Wissenschaft und Technik auf dem Gebiet der Zufeuerung von Textilstäuben betrachtet werden.

Es zeigte sich, dass in beiden Ländern Textilstäube einen nicht weiterverwertbaren Abfallstoff darstellen, der trotz seines Energieinhaltes bisher der Deponie zugeführt wird. Die Größenordnungen des Aufkommens in den beiden Ländern waren vergleichbar (ca. 18.000 t/a).

Die Ergebnisse der Verbrennungsversuche in einer portugiesischen Laborfeuerungsanlage waren durchweg vielversprechend und liessen industrielle Umsetzungsmöglichkeiten erkennen. Im Versuch wurden Kunststofffasern vollständig verbrannt, ohne dass Asche anfiel. Hinsichtlich der Übertragung auf den Einsatz in industriellem Massstab auch von anderen Materialien, z.B. Baumwolle oder Wolle, bestand jedoch weiterer Forschungsbedarf. Auch zeichnete sich ab, dass es einen deutlichen Optimierungsbedarf bei der Aufbereitung und Förderung der Textilstäube sowie bei der Schnittstelle zwischen Förderungssystem und Brenner gibt.

Darüber hinausgehende Forschungen / Entwicklungen / Patente ausserhalb der Projektpartner, aus denen einer Ergebnisverwertung möglicherweise entgegenstehend Schutzrechte anderer hervorgehen könnten, sind nicht bekannt.

Technische Lösungen zur Überführung textiler Abfälle in eine für die Verbrennung geeignete Form, wie z.B. die Zerkleinerung brikettierter Stäube und Staubaufbereitung aus Kurzfasergemischen (Fluff) mittels Schneidmühlen sind bereits bekannt. Auch eine Überführung in rieselfähige Konsistenz ist durch Kompaktierung und anschliessende Feinvermahlung bzw. durch Pelletierung möglich.

Für die hier zu verbrennenden Stäube war allerdings die geeignete Aufbereitungstechnik noch zu ermitteln. Die aus der Fleece - Herstellung bekannte Aufbereitung war zwar Stand der Technik, bedurfte aber einer deutlichen Verbesserung, um eine höhere Gleichmässigkeit der Staubbförderung, wie sie für eine schadstoffarme Verbrennung unabdingbar ist, zu erreichen, desweiteren musste zur Anpassung an die brennerseitigen Anforderungen der Anteil an Transportluft minimiert werden.

Die Mitverbrennung eines Anteils an festen Abfallbrennstoffen bis zu etwa 70% des Gesamtenergieeinsatzes war zum Zeitpunkt des Projektbeginns in Brennern an Drehrohröfen der Zementindustrie zwar Stand der Technik, wurde aber im Bereich der betrieblichen Wärmeversorgung, insbesondere durch Zufeuerung von Textilstäuben, bisher noch nicht angewandt.

Die Koppelung der beiden Komponenten Textilstaubaufbereitung / Förderung und Zufeuerung war daher ebenfalls noch nicht Stand der Technik.

1.4.1. Vorliegende Erfahrungen der Projektbeteiligten

Der Sondertextilmaschinenhersteller TEMAF A verfügt über langjährige Erfahrungen mit Textilmaschinen aus dem Bereich der Staubabscheidung sowie der Aufbereitung von Produktionsresten, z.B. der Öffnung von Stoffabschnitten (Randstreifen) zur

Faserrückgewinnung. Diese Kenntnisse waren von grundlegender Bedeutung für die Lösung der Probleme der Staubaufbereitung (De-Agglomeration).

Der Brennerhersteller PILLARD verfügt über vielfältige Erfahrungen in der Entwicklung von schadstoffarmen Industriebrennern für feste, flüssige und gasförmige Brennstoffe, darunter auch solche für den Einsatz von Sonderbrennstoffen. Für das marktführende Produkt für den Einsatz in Drehrohröfen hält PILLARD ein Patent betreffend den Eintrag von heterogenen, groben Abfallbrennstoffen, welches im aktuellen Forschungsvorhaben genutzt wurde.

Das Institut für Wärme- und Brennstofftechnik verfügt über einen Brennersuchstand mit einer thermischen Leistung von 950 kW (siehe Bild 1). An dieser Anlage wurden unter anderem bereits Forschungsvorhaben zur Entwicklung von Kohlenstaubbrennern kleiner Leistung [16], Untersuchungen zur Mitverbrennung von Klärschlamm in Braunkohlefeuerungen, Untersuchungen zu Schadstoffemissionen von Leichtölbrennern in Trocknungsanlagen durchgeführt.

Die DMT GmbH (Deutsche Montan Technologie), Abteilung Innovations- und Technologiemanagement, hat das oben erwähnte EU - Projekt, in dem es u. a. um die Verwertung von Abfällen der Textilindustrie ging, koordiniert. Neben den Erfahrungen im Bereich der Koordination von Forschungsprojekten, wie in diesem Fall, in dem die DMT als Unterauftragnehmer für PILLARD tätig war (F + E - Fremdleistungen), verfügt das Unternehmen auch über reichhaltige Erfahrungen auf dem Gebiet der Untersuchung des Verbrennungsverhaltens fester Brennstoffe sowie der Emissionsmessung.

1.4.2. Verwendete Fachliteratur, benutzte Informations- und Dokumentationsdienste

Zusätzlich zu den Berichten der Einzelprojekte des EU Forschungsvorhabens JOF3-CT95-0010 "Fuel Blends and Alkali Diagnostics" sowie die einschlägigen Regelwerke zur Luftreinhaltung (TA - Luft, 17. BImSchV, Richtlinie 2000/76/EG des europäischen Parlaments vom 4. Dezember 2000 über die Verbrennung von Abfällen) sowie die im Literaturverzeichnis aufgeführten Literaturstellen wurden keine zusätzlichen externen Quellen herangezogen.

1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Neben den Projektpartnern TEMAFA, PILLARD und den beiden vorgenannten Hochschulinstitutionen der TU Braunschweig sowie der DMT GmbH (als Unterauftragnehmer für PILLARD) wurde bei der Vorbereitung der Versuche der Verband der Nordwestdeutschen Textil- und Bekleidungsindustrie als Koordinator zwischen den Projektpartnern und den beteiligten Textilunternehmen sowie für die Auswahl und Zulieferung der zu verbrennenden Stäube tätig.

2.1. Ergebnisse des Forschungsvorhabens

2.1.1.1. Beschreibung der Versuchsanlage

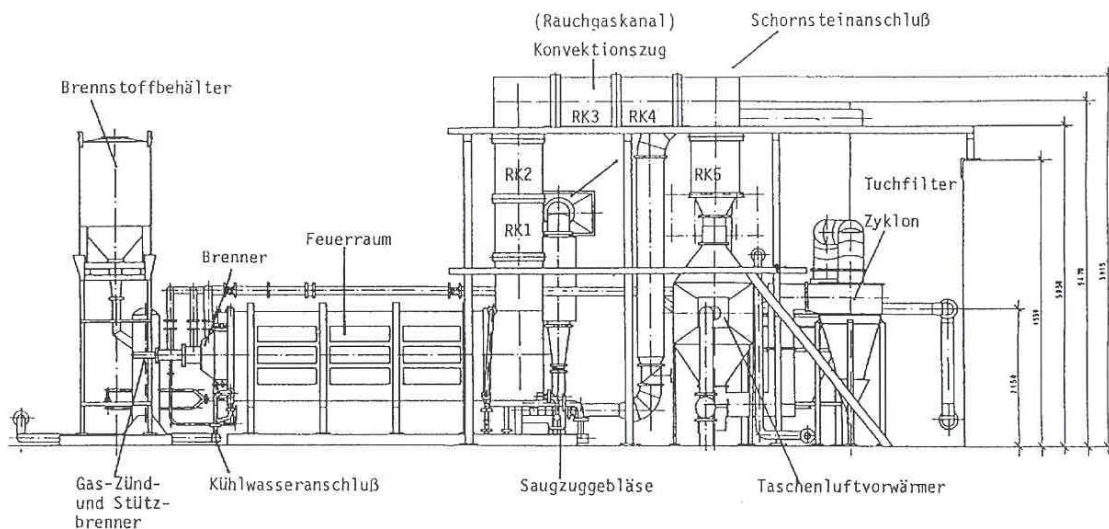


Bild 1: Seitenansicht der Versuchsanlage

Die Versuchsanlage des Institutes für Wärme- und Brennstofftechnik (Bild 1) verfügt über eine wassergekühlte Brennkammer mit einem quadratischen Querschnitt 1,35x1,35 m und einer Länge von 4m. Nach der Brennkammer werden die Rauchgase in einem senkrechten und waagerechten Zug abgekühlt. Zur Staubabscheidung sind im Rauchgasweg ein Zyklon und ein Schlauchfilter eingebaut. Diese Anlage wurde bisher überwiegend für Verbrennungsversuche mit Kohle eingesetzt. Für die Textilstaubverbrennung wurde die Gasversorgung um einen zusätzlichen Gasstrang erweitert und die Kohlenstaubversorgung durch die Aufbereitungs- und Dosieranlage der Firma Temafa ersetzt und der für die Staubmitverbrennung modifizierte Brenner in die Anlage integriert und die Regelung und Steuerung der Versuchsanlage angepasst. Die Versuche wurden bei einer Feuerungswärmeleistung von ca. 500 kW durchgeführt.

Die Probennahme für die kontinuierliche Messung der Abgaszusammensetzung erfolgte unmittelbar nach dem gekühlten Zug der Versuchsanlage. Die Staubmessung wurde vor Zyklon durchgeführt.

Da der Staubanfall an den verschiedenen Stellen in der Versuchsanlage bei Beginn der Versuche nicht abgeschätzt werden konnte wurden für Mitverbrennung zusätzliche Probenahmestellen eingerichtet. In der Brennkammer und in den Konvektionszügen wurden Edelstahlauffangbehälter zur Staubsammlung für die Rückstandsuntersuchungen aufgestellt. Zwei Schläuche aus dem Tuchfilter wurden im Institut für Ökologische Chemie und Abfallanalytik mit Toloul gereinigt, um eventuell abgeschiedene Stäube ohne den Einfluss bereits im Filtergewebe enthaltener Substanzen aus Vorversuchen analysieren zu können. Bei einem Teil der Versuche wurde das Staubmessgerät zur Probensammlung des Flugstaubes vor Zyklon eingesetzt.

2.1.1.2. Beschreibung der Dosieranlage

Bei der Dosieranlage handelt es sich um eine stark modifizierte Öffnungsmaschine, die im Normaleinsatz Textilgewebe (z. B. abgeschnittene Randstreifen von Stoffbahnen) öffnet, um so die Fäden wieder der Textilherstellung zuzuführen. Bei der Staubaufbereitung werden Verfilzungen und Klumpen des Staubes geöffnet. Bei der Öffnung des Staubes bleiben die Längen der Textilfasern unverändert.

Aus Kostengründen wird bei den Versuchen auf eine automatische Staubaufgabe auf das Zuführband verzichtet und der Staub manuell aufgegeben.

Das Zuführband wirft den Staub in eine keilförmige Öffnung. Ein Einzugsband und eine mit einem Excenter angetriebene Schubplatte fördern den Staub in die Einzugsmulde an den Klemmspalt. Ein schnelllaufender Sägezahnambour nimmt den Staub vom Klemmspalt ab und öffnet so die Verfilzungen und Klumpen, die sich bei der Absaugung und Lagerung des Staubes in den Betrieben gebildet haben. Die Kurzfasern werden mit dem Staub von einem hinter der Öffnungsmaschine angeordneten Radialventilator abgesaugt und pneumatisch zum Brenner gefördert. Die Regelung der Dosierleistung erfolgte über die Schichthöhe auf dem Zuführband und die Bandgeschwindigkeit (siehe auch Abschlussbericht des Forschungsvorhabens 0330025 [13]). Der Textilstaub wird im Zentrum des Brenners eingeblasen.

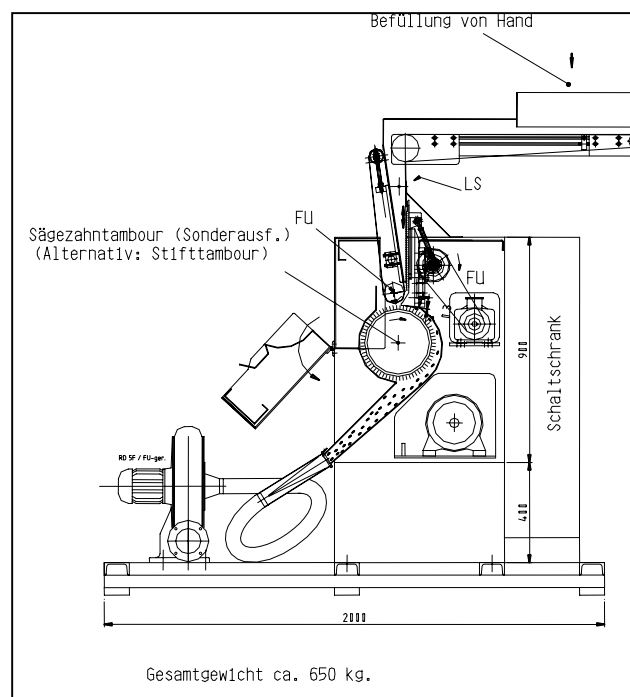


Bild 2: Aufbereitungs- und Dosieranlage für den Textilstaub

2.1.1.3. Eingesetzte Staubsorten

Im wesentlichen wurden Textilstäube, die bei der Verarbeitung von Textilien aus Baumwolle, Acryl und Textilien aus Fasermischungen bestehend aus Acryl, Baumwolle und Wolle bei der Mitverbrennung eingesetzt.

In den Tabellen sind die für die Verbrennung wesentlichen Eigenschaften aufgeführt.

Tab. 1: Ergebnisse der Brennstoffanalysen

	Baumwolle	Polyacryl	Acryl/Wolle Mischung
Wasser (106 °C) Ma-%	5,1	0,8	2,3
Asche (815 °C) Ma-%	1,1	0,2	0,3
Flüchtige Bestandteile Ma-%	82,9	69,8	63,5
C _{fix} Ma-%	10,9	29,2	33,9
Gesamtwasserstoff Ma-%	6,5	6,0	5,9
Heizwert kJ/kg	17.870,0	29.450,0	27.090,0

Tab. 2: Thermische Kennwerte verschiedener Fasern [11], [12]

	Plastifizierungspunkt [C°]	Pyrolysebereich [C°]	Schmelzpunkt [C°]	Fremdzündungstemperatur [C°]
Baumwolle	-	250 - 270	-	350
Wolle	-	150 - 200	-	325
Polyacryl	250	250 - 280	250 - 260	225
Polypropylen	155 - 160	328 - 410	170 - 175	k. A.

Tab. 3: Mittlere Zusammensetzung Stäube (alle Angaben bezogen auf asche- wasserfreie Substanz)

	C Ma-%	S Ma-%	H Ma-%	N Ma-%	O Ma-%
Baumwolle	50,0	-	6,0	0,60	43,4
Wolle	50,0	3,0	7,0	1,60	24,0
Polyacryl	66,6	-	5,7	24,3	34,0

Versuche mit Stäuben, die bei der Textilherstellung für die Innenraumausstattung von Kraftfahrzeugen anfallen, mussten leider abgebrochen werden, da eine stabile Dosierung über die erforderliche Versuchszeit nicht möglich war. Die zur Verfügung gestellten Fasermischungen bestanden zu 25 % aus Baumwolle, zu 25 % aus Polyester und zu 50 % aus Polypropylen. Die Stäube enthielten Gewebestücke, deren Fasern verschmolzen waren. Diese Gewebestücke wurden von der Dosieranlage nicht geöffnet, sondern verklemmten sich in Zähnen des Sägezahntambours. Durch die Wärme bei der Reibung zwischen Zuführband und Sägezahntambour schmolzen die Gewebereste und verstopften die Räume zwischen den Sägezähnen. Mit wachsender Dosierzeit bauten sich auf dem Tambour Schichten auf, die zu Beschädigung des Zuführbandes führten. Eine gleichmässige Dosierung war damit nicht möglich. Die Versuche mussten abgebrochen werden.

2.1.1.4. Eingesetzte Brennervarianten

In diesem Vorhaben wurden insgesamt vier Grundvarianten des Brenners eingesetzt. Bei allen Varianten wird das Erdgas über zwei getrennt regelbare Kanäle zugeführt.

Brennervariante 1:

Die erste Variante mit Textilstaubzufuhr durch einen Ringspalt zwischen Gaszündbrenner und Zentralluft war auf Grund einer Verstopfung im Ringspalt nach ca. 15 Minuten Betrieb für Dauerversuche und damit auch für eine industrielle Anwendung nicht geeignet. Um die Dosieranlage zu testen und um erste Ergebnisse über Verbrennungsverhalten und Schadstoffbildung zu erhalten wurde der Textilstaub über ein Glattrohr in die Brennermuffel mit einem Winkel von ca. 30° schräg zur Flammenachse eingeblasen. Ein grosser Teil des Staubes wurde an die Brennkammerwand geschleudert oder fiel auf den Brennkammerboden. Die Konzentrationen des Kohlenmonoxides schwankten und überschritten mit Werten $> 1300 \text{ mg/m}^3$ den Emissionsgrenzwert deutlich. Die Textilstaubdosierung musste ebenfalls modifiziert werden. Der Staubeinzug und die Staubaufgabe in das Förderrohr waren zu modifizieren, um eine Vergleichsmässigung des Staubtransportes zu erreichen.

Diese Vorversuche wurden genutzt, um erste Einstellparameter (Drehzahl Zuführband, Einstellungen Förderluftgebläse, Tambourdrehzahlen) für die Dosieranlage zu bestimmen. Die Probleme mit der Staubzufuhr und der schlechte Ausbrand erforderte die Neukonstruktion des Brenners.

Brennervariante 2:

Für die Neukonstruktion wurden Teile eines Kohlenstaubbrenners aus einem abgelaufenen Forschungsvorhaben verwendet. Im Zentrum des Brenners waren Gaszündbrenner und Staubeinblasung nebeneinander angeordnet. Für die Staubeinblasung standen ein Glattrohr 60,3 x 3 mm und ein Einblasrohr (48,3 x 2,6) mit einer zusätzlichen Drallluft zu Verfügung. Bei diesem Rohr konnte durch tangentielle Bohrungen im Kopf des Förderrohres dem Staub-Luftgemisch eine Drallkomponente aufgeprägt werden, um die Vermischung mit der Flamme im Bereich der Flammenwurzel zu verbessern.

Bei den Versuchen zeigten die Beobachtungen der Flamme im Bereich der Brennermuffel ein gutes Zünden des Staubes in der Flammenwurzel. Glühende Partikel bzw. Fasern entlang des Flammenweges deuteten auf Ausbrandprobleme hin. Nach Öffnen der Brennkammer zeigte sich, dass ein grosser Teil des Staubes an der Brennkammerrückwand als schwarzer poröser Belag klebte. Im Belag waren noch Faserstrukturen erkennbar. Die hohe Eintrittsgeschwindigkeit des Staubes in die Brennkammer führte zu einer kurzen Verweilzeit in der heissen Flamme, daher wurde der Staub nur gezündet und es erfolgte kein vollständiger Ausbrand.

Bei den Modifikationen am Dosiergerät zur Verminderung des Förderluftvolumenstromes traten Verstopfungsprobleme im Einzug der Staubaufbereitung und im Förderweg auf. Mit der Verminderung der Austrittsgeschwindigkeit wurde die Verschmutzung der Brennkammerrückwand vermieden. Es kam jedoch zu Ablagerungen auf dem Brennkammerboden. Als Ergebnis dieser unbefriedigenden Vorversuche wurden konstruktive Änderungen an der Dosierung und Neukonstruktion des Brenners beschlossen.

Als Ergebnis aus diesen Vorversuchen wurden für die nächste Versuchsserie folgende Modifikationen angestrebt:

- Minimierung der erforderlichen Transportluftmenge durch Umbauten im Austrittstrichter des Dosier- und Fördersystems und durch interne Verringerung der Leckluftmengen, damit

- Verringerung der Austrittsgeschwindigkeit der Fasern in den Feuerraum, dadurch
- Verlängerung der Verweilzeit der Fasern im heissen Bereich der Flamme, zusätzlich
- Verringerung des Dralls in der Gaszuführung im Brenner zum Zweck der Einstellung einer längeren und schlanker Flamme, ebenfalls mit dem Ziel der Verlängerung der Verweilzeit
- Nochmalige Überarbeitung des Fasereinzugs, um das Verstopfungsrisiko zu verringern

Bei den durchgeführten Versuchen funktionierte die Dosierung ohne Verstopfung. Durch Detailveränderungen im Einzug und im Förderweg der Dosierung konnte die Förderluft weiter reduziert werden. Auf Grund des schlechten Ausbrandes und der zum Teil hohen CO Konzentrationen im Abgas waren Dauerversuche mit dieser Brennervariante nicht erfolgversprechend.

Daher wurde die Konstruktion eines weiteren Brenners, der Brennervariante 3, beschlossen.



Bild 3: Gasbrenner zur Textilstaubmitverbrennung (Variante 2 mit gas-elektrischen Zündbrenner und exzentrischer Staubaufgabe) (Zündbrenner und Staubaufgabe ausgebaut)

Brennervariante 3:

Bei diesem Brenner wurde auf den Zündbrenner verzichtet und der bei den vorgegebenen Randbedingungen maximal mögliche Förderrohrdurchmesser eingebaut. Zur Unterstützung der Vermischung in der Flammenwurzel konnte dem Förderluftvolumenstrom über Tangentialbohrungen im Rohrkopf eine Drallkomponente aufgeprägt werden (siehe Bild 3). In Vorversuchen wurde Luft als Medium für die Verdrallung eingesetzt. Bei diesen Vorversuchen traten wieder Schwankungen in der CO-Konzentration im Abgas auf. Eine gleichmässige Verbrennung der aufgegebenen Fasern konnte nicht erreicht werden. Die Verwendung von Erdgas zur Beaufschlagung der Tangentialbohrungen führte zu einer deutlichen Verringerung und Vergleichsmässigung der CO-Konzentrationen und zu einer Verbesserung des Flammenbildes. In den Vorversuchen war ein längerer Betrieb ohne Störungen bei der

Dosierung möglich. Daher wurden mit dieser Brennervariante die Langzeitversuche durchgeführt. Bei den Vorversuchen konnten die Probleme mit dem Ausbrand nicht zufriedenstellend gelöst werden.

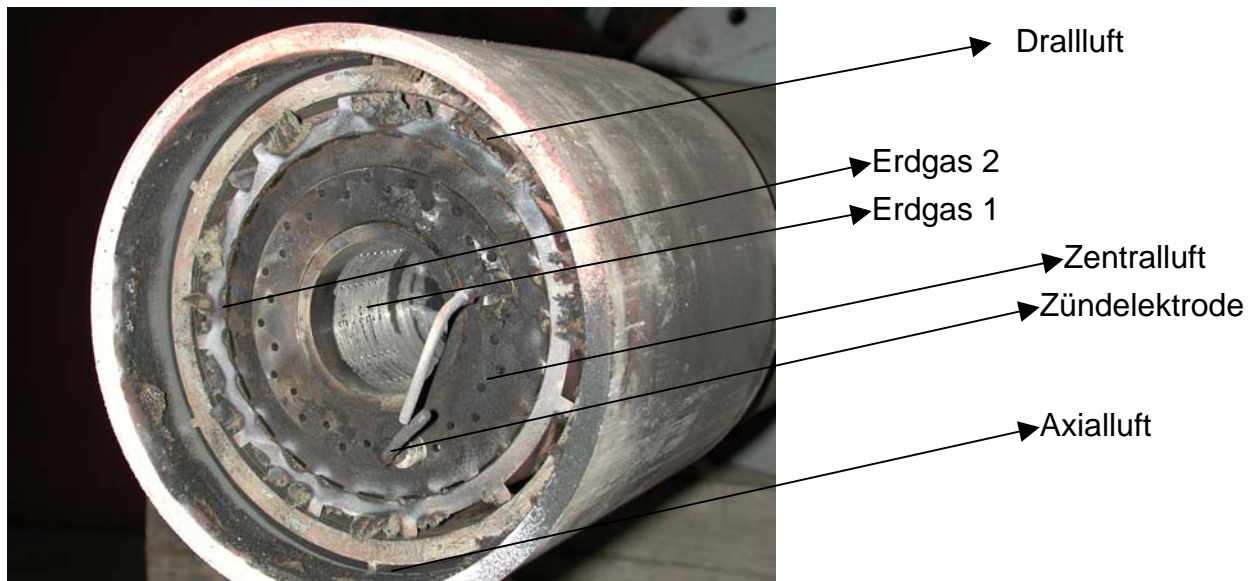


Bild 4: Gasbrenner zur Textilstaubmitverbrennung (Variante 3 ohne gas-elektrischen Zündbrenner)

Brennervariante 4:

Die Beobachtung der Flamme in der Brennermuffel bei der Brennervariante 3 zeigte eine Störung der Strömung im Nahbereich der Flamme durch die Zündelektroden. Nach den Langzeitversuchen zeigten sich zusätzlich Verschmutzungen und Anbackungen an den Zündelektroden (siehe Bild 4). Daher wurden die Zündelektroden entfernt und für die Zentralluft ein rotationssymmetrisches Ausströmsystem eingesetzt. Die Zündung erfolgte mit externen Zündelektroden, die nach dem Start des Brenners aus der Brennkammer entfernt wurden. Die Gaszufuhr erfolgte nicht mehr über Tangentialbohrungen in den Förderluftstrom (siehe Bild 4) sondern über eine Stauscheibe (siehe Bild 5) zentrisch um den Austritt des Förderluft- Staubgemisches. Für die Gasversorgung und die Zentralluft wurden zusätzlich austauschbare Einsätze angefertigt. Variiert wurden bei der Zentralluft und Erdagas die Austrittsflächen und der Drallwinkel

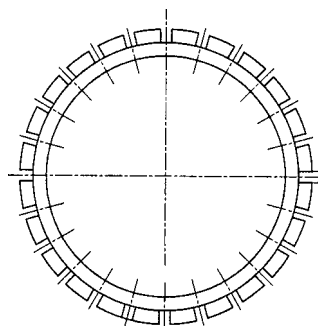


Bild 5: Skizze der Stauscheibe für das Erdgas 1 (siehe Bild 4) mit axialen Sägeschnitten (Ersatz für Tangentialbohrungen)

Für das Erdgas wurden drei verschiedene Varianten verwendet, Zufuhr des Erdgases über axiale Sägeschnitte, Sägeschnitte unter einem Winkel von 45° und über Einzelbohrungen unter einem Winkel von 30°. Für die Zentralluft wurden ebenfalls mit Sägeschnitten unter einem Winkel von 45°, Bohrungen unter einem Winkel von 15°, 30° und 45° eingesetzt (siehe Bild 6). Diese Variationen wurden durchgeführt, um den Ausbrand zu verbessern.

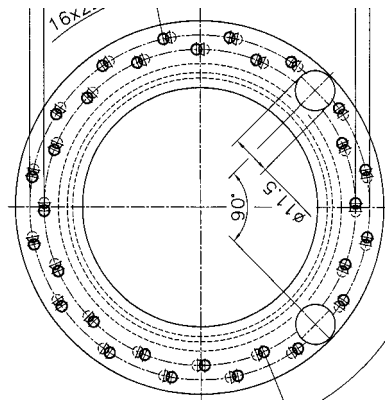


Bild 6: Skizze der Stauscheibe für die Zentralluft, hier Bohrungen unter 15°

2.1.1.5. Messtechnik zur Abgasanalyse

Die Entnahmestelle für die Messgase für die in Tabelle 4 aufgeführten Messgeräte befand sich mit Ausnahme der Staubmessung am Ende des gekühlten Rauchgaszuges. Die Staubmessung wurde vor Abscheidezyklon durchgeführt

Tab. 4: eingesetzte Messgeräte zur Abgasanalyse

Komponente	Messprinzip	Hersteller	Messbereich
CO	NDIR	Maihak	0 - 300 mg/Nm ³ 0 - 3000 mg/Nm ³
CO ₂	NDIR	Maihak	0 - 10 Vol. % 0 - 20 Vol. %
SO ₂	NDIR	Maihak	0 - 500 mg/Nm ³ 0 - 5000 mg/Nm ³
O ₂	Paramagnetismus	Maihak	0 - 25 Vol. % in 4 Messbereichen
O ₂	Zirkonoxidsensor	Maihak	0 - 21 Vol. %
O ₂	Paramagnetismus	Hartmann+Braun	0 - 21 Vol. % in 2 Messbereichen
NO	NDIR	Maihak	0 - 400 mg/Nm ³ 0 - 3000 mg/Nm ³
C _x H _y	FID	JUM Engineering	0 - 10.000 ppm in 6 Messbereichen
Staub	gravimetrisch	Ströhlein	

2.1.1.6. Analytik zur Eingangs- und Rückstandsanalyse

Am Institut für Wärme- und Brennstofftechnik wurden Feuerungsversuche mit Erdgas unter Zuführung des thermisch zu verwertenden Abfalls Textilstaub durchgeführt.

Diese Versuche sollten analytisch begleitet werden. Im Rahmen von fünf Verbrennungsversuchen, wurden vier verschiedene Textilstäube verwendet. Diese wurden wie folgt bezeichnet:

Bierbaum BW 95%, PA 5%
(Einsatz am 17.10.2002)
Biederlack BW Wolle Acryl, je 1/3
(Einsatz am 06.11.2002 und am 16.01.2003)
BW 100%
(Einsatz am 19.11.2002)
Biederlack 100% Acryl
(Einsatz am 09.01.2003)

Die Textilstäube wurden untersucht, um folgende Eingangsbelastungen festzustellen:

Elemente Cd, Tl, Hg, Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V, Sn und Zn (in Orientierung an 17. BImSchV),
polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK; 16 Leitsubstanzen gemäss US EPA 610 [1]) und
polychlorierte Dibenzop-dioxine und Dibenzofurane (PCDD / PCDF).
Sofern sich genügend Verbrennungsrückstände angesammelt hatten, wurden nach den jeweiligen Feuerungsversuchen Proben aus der Brennkammer, dem Horizontalzug und dem Schlauchfilter entnommen und auf PAK, PCDD/F und die o. g. Elemente untersucht. Im Horizontalzug wurde die Asche auf zwei 0,227 m² grossen Edelstahlblechen gesammelt. Bei den ersten drei Versuchen wurde ein Teilstrom des Rauchgases über eine mit Quarzwolle gefüllte Filterhülse geleitet und die so aufgefangene Flugasche untersucht. Während der Versuche am 09.01.2003 und 16.01.2003 wurden Rauchgasproben gemäss VDI 3499 [2] aus der Abgasführung vor dem Schlauchfilter entnommen und PAK- sowie PCDD/F-Analytik durchgeführt.

Zusätzlich wurden fünf weitere Textilstäube und Heizöl wie oben genannt (plus Chlorgehalt) analysiert.

Die Proben trugen folgende Bezeichnungen:

1 Wülfing (100% Baumwolle)
2 Bierbaum (100% Acryl)
3 Bierbaum (100% Baumwolle)
4 Ibenä (Baumwolle/Acryl, 6:4)
7+8 Biederlack (Lama/Alpaca + Acryl)
Heizöl

Obwohl diese Materialien in den Verbrennungsversuchen letztlich nicht zum Einsatz kamen, werden die Analyseergebnisse nachfolgend vorgestellt, da sie einen weiteren Einblick in die Eingangsbelastungen der thermisch zu verwertenden Materialien gewähren.

Insgesamt wurden 23 Element-, 25 PAK- und 20 PCDD/F-Analysen durchgeführt.

Elementanalytik

Für die Bestimmung der Metalle wurden die mit HNO_3 und H_2O_2 versetzten Proben einem mikrowelleninduzierten Druckaufschluss unterworfen. Die Elementbestimmung erfolgte mittels ICP-OES. Für die Bestimmung der Chlorgehalte wurden die Textilstaubproben in einer Verbrennungsapparatur nach Schöninger aufgeschlossen und das in der Absorptionslösung enthaltene Chlorid ionenchromatographisch bestimmt. Die Proben wurden grundsätzlich in zwei Parallelansätzen analysiert.

a) Probenaufbereitung

Für den Mikrowellenaufschluss wurden jeweils 0,5 g Probe eingewogen, mit 10 mL HNO_3 , 65%, p.A. und 2 mL H_2O_2 , 30%, p.A. versetzt. Nach einer Einwirkungszeit von 30 min wurden die Probengefäße verschlossen und in einem Mikrowellengerät weiterbehandelt.

Mikrowellenaufschlussbedingungen für Staubproben: 80 °C, 43 psi (1 min); 140 °C, 87 psi (5 min); 180 °C, 174 psi (15 min).

Mikrowellenaufschlussbedingungen für die Heizölprobe: 120 °C, 100 psi (5 min); 140 °C, 200 psi (5 min); 160 °C, 400 psi (5 min); 180 °C, 500 psi (5 min); 200 °C, 600 psi (15 min).

Die Aufschlusslösungen wurden auf ein Volumen von 25 mL aufgefüllt und standen so für die Messungen zur Verfügung.

Für die Chlorbestimmung durch Verbrennung nach Schöninger wurden jeweils 0,05 g Probe eingewogen. Die Absorptionslösung wurde auf ein Volumen von 50 mL aufgefüllt und mittels Ionenchromatographie gemessen.

b) Apparative Bedingungen

Elementbestimmung mittels ICP-OES

Die Messungen erfolgten mit dem Gerät ICP-OES, JY 70 Plus, Fa. Instruments S. A. mit folgenden Messbedingungen: Hochfrequenzleistung 900 W, Plasma-Argonfluss 12 L/min, Cross-Flow-Zerstäuber bei 42 psi.

Poly- und Monochromator wurden jeweils mit Stickstoff gespült.

Chlorbestimmung mittels Ionenchromatographie

Die Messungen wurden mit einem Ionenchromatographen Mod. 690 der Firma Metrohm durchgeführt. Als Trennsäule diente die Metrohm IC Anionensäule Metrosep Anion Dual 2. Es wurde ein Natriumcarbonat/Natriumhydrogencarbonat-Eluent mit chemischer Suppression (Metrohm-Suppressor-Modul 753) verwendet. Die Aufnahme des Chromatogramms erfolgte mittels Leitfähigkeitsdetektor Metrohm 641 VA.

c) Auswertung und Berechnung

Für beide Analysenmethoden wurde die Kalibrierung über externe Kalibrierstandards vorgenommen. Für die Metallbestimmung mittels ICP-OES erfolgte die Peakauswertung über Gauss-Fitting mit drei Messpunkten. Es wurden je Emissionslinie zwei Messungen durchgeführt.

Die Chlorbestimmung wurde mit dem Auswerteprogramm ChemStation HP 3365 Series II von Hewlett-Packard über lineare Regression unter Verwendung einer Kalibriergeraden durchgeführt. Es wurden jeweils die Peakflächen der erhaltenen Signale zur Auswertung benutzt.

PAK-Analytik

Je nach mengenmässiger Verfügbarkeit der Probenmaterialien wurden definierte Einwaagen der zerkleinerten und homogenisierten Verbrennungsrückstände in Soxhlehülsen gefüllt und für die Dauer von 16 Stunden lichtgeschützt mit Toluol extrahiert. Vor der einstufigen säulenchromatographischen Aufreinigung wurde in n-Heptan umgelöst. Die Messungen erfolgten mittels GC/MS.

a) Extraktion nach Rauchgasprobenahme gemäss VDI 3499

Bei der Rauchgasprobenahme fielen vier aufzuarbeitende Matrices an:

1. Glaswolle aus der Partikelabscheidung
2. XAD-2 aus der Aerosolabscheidung
3. Kondensat aus der Rauchgaskühlung
4. Aceton aus der nachgeschalteten Reinigung der Probenahmeapparatur

Das XAD-2 und die Glaswolle aus den Kartuschen wurden zusammen in Filterhülsen überführt und mit 20 g Na_2SO_4 überschichtet. Die Kartuschen wurden mehrmals mit Toluol nachgespült und 16 Std. in einer Soxhletapparatur mit Toluol extrahiert. Das in der Rauchgas- Probenahmeapparatur anfallende Kondenswasser wurde mit Toluol ausgeschüttelt und letzteres über Na_2SO_4 getrocknet. Das Spülaceton wurde am Rotationsverdampfer eingeeengt und in Toluol umgelöst. Alle Toluolphasen wurden vereinigt, eingeeengt und auf genau 50 mL aufgefüllt. Mit den Rauchgasproben sowie den Extrakten der Verbrennungsrückstände wurde folgende Probenteilung durchgeführt:

- 35 mL für Dioxin-Analytik
- 5 mL für PAK-Analytik
- 10 mL als Rückstelleextrakt

b) Clean-up

Für die Aufreinigung wurde neutrales Aluminiumoxid eingesetzt, das zwei Stunden lang bei 180 °C konditioniert und anschliessend mit 2 % Reinstwasser deaktiviert wurde. Hiervon wurden je 20 g in eine Glassäule gefüllt, mit 4 g Natriumsulfat überschichtet und mit 50 mL

n-Heptan konditioniert. Nach Probenaufnahme erfolgte die Elution mit 60 mL Heptan/Essigsäureethylester (95:5). Das Eluat wurde am Rotationsverdampfer und anschliessend im Stickstoffstrom auf weniger als 2 mL eingeeengt. Als interner Standard wurden 200 μL Benzo[a]pyren- d_{12} (500 $\text{pg}/\mu\text{l}$) zugegeben und auf 2 mL aufgefüllt. Die fertige Messlösung wurde in ein Braunglas GC-Vial überführt und bis zur Messung im Gefrierschrank bei -20 °C aufbewahrt.

c) Messparameter

Die Untersuchung der aufgereinigten Probenextrakte erfolgte mittels GC/MS im SIM-Modus (Geräteparameter s. Tab 5).

Die Quantifizierung der PAK erfolgte über eine externe Kalibrierreihe.

Tab. 5: Geräteparameter GC/MS für PAK

Gaschromatograph:	GC-17A mit Autosampler AOC-20i (Shimadzu)
Detektor:	Massenspektrometer QP 5050A (Shimadzu)
Injektor:	PTV
Trennkapillaren:	DB 5 MS, Länge: 30 m, i.D.: 0,25 mm, Filmdicke: 0,25 µm (J&W Scientific)
Ofentemperatur:	80 °C (1 min); 10 °C/min; 300 °C (10 min)
Transferline:	300 °C
Injektionsvolumen:	1 µL
Flussrate:	1 mL/min
Trägergas:	Helium 4.6
Ionisationsart:	EI, 70 eV

PCDD/F-Analytik

Auch hier wurden je nach mengenmässiger Verfügbarkeit der Verbrennungsrückstände definierte Einwaagen nach Homogenisierung in Soxhlethülsen gefüllt und für die Dauer von 16 Std. lichtgeschützt mit Toluol extrahiert. Die Extraktion nach Rauchgasprobenahme ist unter *PAK-Analytik* (s. o.) beschrieben. Im Anschluss erfolgte ein dreistufiges säulenchromatographisches Clean-up. Gemessen wurde mit GC/MS.

a) Clean-up

Makro-Aluminiumoxid-Säule

In einer Chromatographiesäule mit Hahn (1,6 x 30 cm) wurden 25 g Alumina B Super 1 mit 10 g Natriumsulfat überschichtet. Die Konditionierung erfolgte mit 100 ml n-Heptan. Anschliessend wurden 25 µL ¹³C₁₂-2,3,7,8-PCDD/F (25 pg/µL) Mischstandard zugegeben. Nach Aufgabe der Probe wurde eluiert mit:

- 1) 100 mL n-Heptan/Ethylacetat (99:1): Elution von unpolaren Verbindungen
- 2) 180 mL n-Heptan/Ethylacetat (90:10): Elution der PCDD/F

Die erste Fraktion wurde verworfen, die zweite Fraktion am Rotationsverdampfer auf wenige Milliliter eingengt und auf eine zweite Säule aufgegeben.

Gemischte Kieselgelsäule

Hierbei handelte es sich um eine Kombisäule mit unterschiedlich chemisch modifiziertem Kieselgel, welches zuvor bei 180 °C im Trockenschrank 2 Std. konditioniert wurde.

Als Chromatographiesäule wurde eine Glassäule mit Hahn (1,6 x 30 cm) verwendet. Die Säulenfüllung von oben nach unten bestand aus:

- 10 g Natriumsulfat
- 2 g neutrales Kieselgel
- 10 g saures Kieselgel (44 Gew.% H₂SO₄ konz)
- 2 g neutrales Kieselgel
- 5 g basisches Kieselgel (33 Gew.% 1N NaOH)
- 2 g neutrales Kieselgel

Die Konditionierung erfolgte mit 100 ml n-Heptan; nach der Probenaufgabe wurde mit 250 mL n-Heptan eluiert und das Eluat auf wenige Milliliter eingengt.

Mini-Aluminiumoxidsäule

Zum Nachreinigen der Proben wurde wiederum basisches Aluminiumoxid verwendet, allerdings mit einer kleineren Menge Adsorbens, wodurch auch die Lösemittelmenge reduziert wurde.

In einer Chromatographiesäule (0,8 x 30 cm) wurden 4 g Alumina B Super 1 mit 2 g Natriumsulfat überschichtet. Die Säule wurde mit 10 mL n-Heptan konditioniert. Nach Probenaufgabe erfolgte die Elution mit:

- 1.) 20 mL n-Heptan / Ethylacetat (99:1): Elution von unpolaren Verbindungen
- 2.) 35 mL n-Heptan / Ethylacetat (90:10): Elution der PCDD/F

Die erste Fraktion wurde verworfen, die zweite Fraktion in einem ausgezogenen Spitzkolben aufgefangen, am Rotationsverdampfer auf wenige Milliliter eingengt, und im Stickstoffstrom bis zur Trockne abgeblasen. Die aufgereinigte Probe wurde in 50 µL iso-Octan und 50 µL 1,2,3,4-¹³C-TeCDD (50 pg/µL) als internem Standard aufgenommen. Die fertige Messlösung wurde in einem GC-Micro-Vial (Braunglas) bei -20 °C im Gefrierschrank bis zur Messung aufbewahrt.

b) Messparameter

Die Untersuchung der aufgereinigten Probenextrakte erfolgte mittels GC/MS im SIM-Modus (Geräteparameter s. Tab. 6).

Die PCDD/F wurden über die Isotopenverdünnungsmethode quantifiziert, wobei die Summe der zweier gemessener Massen gebildet wurde. Der zu Beginn der Aufreinigung zugegebene ¹³C₁₂-markierte Standard enthielt alle 17 in 2,3,7,8-Stellung chlorierten Kongenere. Auf diese Weise wurden Verluste während der Aufarbeitung kompensiert, da davon auszugehen ist, dass sich die ¹³C-markierten Substanzen ebenso verhalten wie die ¹²C-Isotope. Als interner Standard („Einspritzstandard“) wurde zusätzlich das ¹³C₁₂-markierte 1,2,3,4-TeCDD zugegeben. Auf den Einsatz einer zweiten, polar belegten GC-Trennkapillare zur Abtrennung der 2,3,7,8-substituierten Kongenere konnte aufgrund der vorliegenden geringen PCDD/F-Kontamination der Proben hier verzichtet werden.

Tab. 6: Geräteparameter GC/MS für PCDD/F

Gaschromatograph:	GC-17A mit Autosampler AOC-20i (Shimadzu)
Detektor:	Massenspektrometer QP 5050A (Shimadzu)
Injektor:	PTV
Trennkapillaren:	DB 5 MS, Länge: 30 m, i.D.: 0,25 mm, Filmdicke: 0,25 µm (J&W Scientific)
Ofentemperatur:	60 °C (4 min); 25 °C/min; 160 °C; 6 °C/min 300 °C (10 min)
Transferline:	300 °C
Injektionsvolumen:	2 µL (splitless)
Flussrate:	1 mL/min
Trärgas:	Helium 4.6
Ionisationsart:	EI, 70 eV

2.1.1.7. Versuchsdurchführung



Bild 7: Staubaufgabe während der Versuche

Die Versuchsanlage wurde mit Erdgas angefahren. Nachdem sich stabile Betriebsbedingungen eingestellt hatten, wurde mit der Dosierung des Staubes begonnen. Zur Bestimmung des aufgegebenen Textilstaubmassenstromes wurden jeweils 5 kg Portionen in einem Karton abgewogen und die Dosierzeit für einen Karton mit der Stoppuhr gemessen. Die Anzahl der Portionen und die Dosierzeit lieferten die integrale Textilstaubmenge während der Versuche.



Bild 8: Textilstäube im Anlieferungszustand

Die angelieferten Stäube waren zum Teil sehr inhomogen (siehe zum Beispiel Bild 8) und enthielten Stofffetzen. Durch den Transport und die Lagerung waren die Stäube verfestigt bzw. verklumpt. Während der Aufgabe auf das Förderband wurden die Klumpen per Hand soweit möglich zerkleinert und aufgelockert, um eine möglichst homogene Zufuhr des Textilstaubes zum Brenner zu erreichen.

Da die Stäube unterschiedliche Dichten hatten, wurde in Vorversuchen für die gewünschte Dosierleistung die erforderliche Schichthöhe auf dem Transportband ermittelt.

Es wurden Kurzzeit und Langzeitversuche durchgeführt. Während der Kurzzeitversuche wurde vor allem Brennerkonfigurationen und Brennereinstellungen und Einstellungen der Dosierung untersucht, um den Einfluss dieser Parameter auf den Ausbrand und die gasförmigen Schadstoffe zu untersuchen. Bei den Langzeitversuchen wurden vor allem für die Rückstandsanalytik durchgeführt.

2.1.2. Ergebnisse

2.1.2.1. Ausbrand

a) Einfluss der Staubaufbereitung und der Einstellungen am Fördergerät

Durch die lange Lagerung hatte sich der Staub zum Teil verfestigt. Die Dichte des Staubes nahm ausserdem mit der Höhe im Lagerbehälter ab. Um den Einfluss der Staubdichte auf die Verbrennung und das Ausbrandergebnis zu untersuchen, wurde zur Auflockerung und Homogenisierung der Staub durch die Dosieranlage gefördert und in einem Auffangbehälter gesammelt. Dieser Staub wurde unmittelbar danach verbrannt. Zum Vergleich wurde die gleiche Staubsorte unmittelbar aus dem Lagerbehälter verbrannt. Der Vergleich der Rückstandsmengen und der Daten der Abgasanalyse ergab keine wesentliche Änderung beim Ausbrand und bei den Emissionen durch das Auflockern und Homogenisieren vor der Verbrennung.

Über Riemenscheiben mit unterschiedlichen Durchmessern konnte die Tambourdrehzahl (siehe Bild 2) der Dosieranlage verändert werden. Die Erhöhung der Tambourdrehzahl ergab bei den Versuchen ebenfalls keinen Einfluss auf die Verbrennung. Bei geringen Drehzahlen traten Betriebsunterbrechungen durch Verstopfungen auf.

b) Einfluss Brennerkonfiguration

Mit den unterschiedlichen Stauscheiben wurden Versuche durchgeführt, um den Ausbrand zu optimieren.

Die Zufuhr der Zentralluft über die Stauscheibe mit Sägeschnitten unter einem Winkel von 45° führte schon beim Anfahren der Anlage zu einer instabilen Flamme, die bei der Leistungssteigerung auf den für die Mitverbrennung erforderliche Feuerungswärmeleistung für die Mitverbrennung erlöschte. Mit dieser Variante war daher eine Mitverbrennung nicht möglich. In Tabelle 8 sind die Ergebnisse aufgeführt.

Die Versuche wurden bei nahezu gleichen Bedingungen durchgeführt. Bei den Versuchen wurden jeweils ca. 5 kg Textilstaub verbrannt und nach dem Auskühlen die Anlage gereinigt und die Rückstandsmengen gewogen. Die Rückstände befanden sich im wesentlichen auf dem Boden der Brennkammer. Bei der Acrylmitverbrennung bildeten sich fest am Brennkammerboden anhaftende Beläge, die nur mechanisch entfernt werden konnten. Die Festigkeit der Beläge nahm mit wachsender Versuchszeit zu.

Die Rückstände aus der Baumwollmitverbrennung waren staubförmig und konnten mit dem Staubsauger vom Brennkammerboden abgesaugt werden. In den Rauchgaszügen, im Zyklonabscheider und auf den Filterschläuchen wurden keine messbaren Rückstände gefunden.

Tab. 7: Ausbrandergebnisse bei den Langzeitversuchen (Brennervariante 3)

Staubart	aufgegebene Staubmenge [kg]	Rückstand		Unverbranntes im Rückstand [%]
		kg	[%]	
Baumwolle	158,8	1,381	8,8	54,8
BW, Wolle, Acryl, je1/3	212,3	20,58 1	9,7	91,4
Baumwolle	132,2	1,404	4,4	-
Acryl	91,5	10,41 4	11,5	99,8
BW, Wolle, Acryl, je1/3	95,0	8,012	8,4	99,8

Tab. 8: Ergebnisse der Ausbranduntersuchungen (Brennervariante 4) Variationen des Austrittswinkels und der Form der Öffnungen der Stauscheiben für Gas und Zentralluft (B Bohrung; S Sägeschnitt)

Nr.	Datum	Brenner		Staubart	Staubmenge [kg]	Rückstand		UV Rückstand [%]
		Gas 1	Luft			kg	[%]	
1.	13.05	S 0°	B 15°	Acryl	5,00	2,065	41,3	53,5
2.	14.05	S 0°	B 15°	Baumwolle	5,50	0,350	6,4	78,3
3.*	20.05	S 45°	B 30°	Acryl	2,97	0,501	16,9	92,2
4.	28.05	S 45°	B 30°	Baumwolle	5,50	0,240	4,4	80,4
5.	02.06	S 45°	B 30°	Acryl	5,50	1,506	27,4	41,2
6.	03.06	B 15°	B 30°	Acryl	5,50	1,720	31,3	54,8
7.	04.06	B 15°	B 15°	Acryl	5,50	2,513	45,7	49,9
8.	05.06	B 15°	B 15°	Baumwolle	5,50	0,051	0,9	78,7
9.	06.06	B 15°	B 45°	Baumwolle	5,50	0,103	1,9	68,2
10.	10.06	B 15°	B 15°	Baumwolle	5,50	0,101	1,8	69,8
11.	26.06	B 15°	B 45°	Acryl	5,35	1,047	19,6	50,4
12.	30.06	B 15°	B 45°	Baumwolle	25,00	0,410	1,6	74,2

*) Versuch wegen Störungen Dosierung abgebrochen

Die mit dieser Methode ermittelten Rückstandsmengen sind mit einer Unsicherheit behaftet. Während des Auskühlens der Anlage fand in den Ablagerungen auf dem Brennkammerboden (siehe auch Bild 9) eine Nachverbrennung statt. Bei allen Versuchen fand das Auskühlen der Anlage unter bei geschlossenen Brennkammerluken statt.

Bei der Acrylmitverbrennung traten bei allen Versuchen hohe Rückstandsmengen auf. Die Untersuchung des Gehaltes an Unverbranntem in den Rückständen nach DIN 51719 „Bestimmung des Aschegehaltes“ [10] führte vor allem bei der Acrylverbrennung bei einem Aschegehalt des Acrylstaubes von ca. 0,2 % auf Gehalte an Unverbranntem, die einen wesentlich höheren Aschegehalt erwarten liessen.

Für den Versuch Nummer 1 in Tabelle wurden daher der Aschegehalt des Textilstaubes vor der Verbrennung und der Aschegehalt des Rückstandes unter den Bedingungen der DIN 51719 [10] und in Abweichung von dieser Norm bei höheren Temperaturen und längeren Verweilzeiten im Ofen untersucht.

Tab. 9: Gehalt an Unverbrannten bei verschiedenen Versuchsbedingungen bei der Bestimmung des Aschegehaltes

	Acrylstaub	Rückstand Brennkammerboden		
Versuchszeit	nach DIN	nach DIN	nach DIN	3h
Ofentemperatur	815 °C	815 °C	1150 C	1150 C
Gehalt an Unverbrannten [%]	99,8	53,7	70,1	99,6

Die in Tabelle aufgeführten Ergebnisse zeigen, dass bei dem Acrylstaub unter DIN-Bedingungen der Aschegehalt der Brennstoffanalyse (Tabelle 1) bestätigt wurde. Beim Rückstand ergibt der Versuch unter DIN Bedingungen ein Aschegehalt von 46,5 %. Bei einer Aufgabemenge von 5 kg wurden aber nur 0,01 kg Asche in die Brennkammer eindosiert. Bei einer Rückstandsmenge von 2,065 kg müsste der Unverbranntengehalt 99,51 % betragen. Durch die Plastifizierung und Anschmelzen der Fasern und die Pyrolyse besteht der Rückstand nahezu aus reinem Kohlenstoff. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass erst bei höherer Temperatur und längerer Verweilzeit das Kohlenstoffgerüst des Rückstandes umgesetzt wird und dann das rechnerisch ermittelte Ergebnis bestätigt wird.

Dieses Verhalten des Rückstandes erklärt auch die schlechten Ausbrandergebnisse bei der Mitverbrennung von Acryl. Durch das Anschmelzen der Fasern im Brennermund entsteht eine Partikel mit einer glatten Oberfläche. Für die Reaktion mit dem Sauerstoff steht damit nur eine kleine Oberfläche zur Verfügung. Die damit für den vollständigen Ausbrand erforderliche Verweilzeit in Gebieten hoher Temperatur können in der Versuchsanlage nicht erreicht werden. Bei allen Textilstäuben, deren Plastifizierungstemperatur unterhalb der Zündtemperatur liegt ist dieses Abbrandverhalten zu erwarten.

Nur bei Baumwolle wurde ein relativ guter Ausbrand ermittelt. Unabhängig von der Brennerkonfiguration lag der Anteil der Rückstände unter 10 %. Der erheblich bessere Ausbrand bei der Mitverbrennung von Baumwolle ergibt sich aus dem unterschiedlichen Verhalten bei der Aufheizung. Im Gegensatz zum Acryl schmilzt die Baumwolle bei der Aufheizung in der Flammenwurzel nicht. Nach Ausgasen der flüchtigen Bestandteile steht eine grosse Oberfläche für die Reaktion mit dem Sauerstoff zur Verfügung. Damit sind die für einen vollständigen Ausbrand erforderlichen Verweilzeiten erheblich kleiner.

Die relativ grossen Unterschiede bei den Rückstandsmengen zwischen Langzeitversuchen und Kurzzeitversuchen ergeben sich aus der Nachverbrennung auf dem Brennkammerboden während der Langzeitversuche.

Bei keinem Versuch konnten die in der 17. BImSchV geforderten 5 % Verlust durch Unverbrannte erreicht werden.

Eine weitere Optimierung der Aufbereitungs- und Dosieranlage zur Verminderung des Förderluftbedarfes ist erforderlich. Beobachtungen des Abbrandverhaltens während der Versuche zeigten bei allen Brennervarianten, dass vor allem relative lange Fasern bzw. Agglomerationen langer Fasern schlecht ausbrennen. Der Einsatz

einer weiteren Aufbereitung, die die Fasern zerkleinert, scheint notwendig zu sein. Ein weiterer Grund für den schlechten Ausbrand resultiert aus der verzögerten Vermischung zwischen dem Förderluft- Staubgemisch und dem Erdgas bzw. den heissen in die Brennermuffel rezirkulierten Rauchgasen.

Der trotz aller Optimierungen noch hohe Förderluftbedarf erfordert einen grossen Austrittsquerschnitt für das Förderluft- Staubgemisch. Besonders im Zentrum des Förderluftstrahles konnte während der Versuche beobachtet werden, dass die Zündung des Staubes ausserhalb der Brennermuffel erfolgt. Grosse Flocken flogen unverbrannt durch das Zentrum der Flamme sanken auf den Brennkammerboden ab und brannten dort aus.



Bild 9: Ablagerungen auf dem Brennkammerboden nach dem Auskühlen der Versuchsanlage (Rückstände Acrylverbrennung)

2.1.2.2. Ergebnisse der Emissionsmessungen

Bei allen Brennervarianten wurden im Gasbetrieb die Emissionsgrenzwerte eingehalten. Bei der Mitverbrennung wurden die Messwerte entsprechend der Mischungsregel aus dem Entwurf zur Änderung der 17. BImSchV ausgewertet. Bei Anlagen, die nicht mehr als 25 % der gefahrenen Feuerungswärmeleistungen aus der Mitverbrennung erzeugen, sind die Grenzwerte aus der Mischungsregel zu bestimmen, d.h. der Mischgrenzwert C errechnet sich aus dem normierten Abgasstrom aus der Abfallverbrennung und dem verbleibenden Teil des normierten Abgasstromes und den entsprechenden Emissionsgrenzwerten.

$$C = \frac{V_{\text{Abfall}} C_{\text{Abfall}} + V_{\text{Verfahren}} C_{\text{Verfahren}}}{V_{\text{Abfall}} + V_{\text{Verfahren}}}$$

In der Mischungsregel bedeuten:

- V_{Abfall} Abgasstrom der bei der Verbrennung des höchstzulässigen Anteiles der Abfälle entsteht. Beträgt der zulässige Anteil weniger als 10 % an der Gesamtfeuerungswärmeleistung, so ist der zugehörige Abgasstrom anhand einer angenommenen Menge von 10 % zu berechnen.
- C_{Abfall} Emissionsgrenzwert für die in der Verordnung aufgeführten Emissionsparameter und Bezugssauerstoffwerte

$V_{\text{Verfahren}}$	verbleibender Teil des normierten Abgasstromes
$C_{\text{Verfahren}}$	Emissionsgrenzwerte und Bezugssauerstoffgehalte des Regelbrennstoffes
C	Berechneter Emissionsgrenzwert oder Bezugssauerstoffgehalt

Ausgenommen aus der Mischungsregel sind der Bezugssauerstoffgehalt, Gesamtstaub und die in Gruppen zusammengefassten Schadstoffe (Schwermetalle, Benzo(a)pyren, polychlorierte Dibenzodioxine und Dibenzfurane). Für den Regelbrennstoff Gas gilt für die Ermittlung der Emissionen ein Bezugssauerstoffgehalt von 3 % und für die aus der Mischungsregel ausgeschlossenen Schadstoffe die Werte der 17. BImSchV. Der höchstzulässige Anteil der Abfälle wird im Genehmigungsverfahren festgelegt. Für die Auswertung der Langzeitversuche wurde zur Ermittlung von V_{Abfall} von einem Anteil der Mitverbrennung von 25 % an der Gesamtfeuerungsleistung ausgegangen. Die Mischungsregel wird für die Berechnung der Grenzwerte der Schadstoffe NO_x und SO_x angewendet.

Mit den in Tabelle 1 aufgeführten Heizwerten und werden die Zumischraten des Textilstaubes bezogen auf 1 m^3 Erdgas für einen Anteil von 25 % bzw. 10 % aus der Mitverbrennung an der Gesamtfeuerungsleistung Q_{FW} berechnet. Für das Erdgas wurde ein Heizwert von $31,33 \text{ MJ/m}^3$ angesetzt.

Tab. 10: Zumischraten in kg Staub pro m^3 Erdgas für 10 % und 25 % Anteil der Staubverbrennung an der Gesamtfeuerungsleistung Q_{FW} . ($H_{\text{uErdg.}} = 31,33 \text{ MJ/m}^3$)

Anteil des Staubes an Q_{FW}	Baumwolle $\text{kg}_{\text{BW}}/\text{m}^3$	Wolle $\text{kg}_{\text{W}}/\text{m}^3$	Acryl $\text{kg}_{\text{Ac}}/\text{m}^3$	BW, Wolle, Acryl, je1/3 $\text{kg}_{\text{Gem}}/\text{m}^3$
25%	0,584	0,388	0,355	0,446
10%	0,195	0,129	0,118	0,149

Tab. 11: Ergebnisse der Abgasanalyse während der Langzeitversuche (Brennervariante 3)

Textilstaubsorte	Anteil TS [%]	O_2 [Vol. %]	CO [mg/m^3]	bezogen auf 3,0 % $\text{O}_{2,\text{tr}}$			
				NO_x [mg/m^3]		SO_2 [mg/m^3]	
				MW	MG	MW	MG
BW 95, PA5	20,6	3,0	23,9	245,1	125,4	11,2	20,2
BW, Wolle, Acryl, je1/3	24,9	4,4	50,9	247,5	124,9	184,1	20,0
BW, Wolle, Acryl, je1/3	16,8	3,9	11,3	217,7	124,9	294,5	20,0
BW	15,7	5,7	126,9	157,9	125,4	4,7	20,2
Acryl	17,2	3,1	7,2	252,5	124,8	54,6	19,9

MW: normierter Messwert; MG: Mischgrenzwert ; TS: Textilstaub; MG CO $50 \text{ mg}/\text{m}^3$ für alle Anteile Textilstaub

Bei den Langzeitversuchen wurden bis auf einen Versuch die Grenzwerte für die CO Emissionen eingehalten. Die Grenzwerte für NO_x konnten nicht eingehalten werden. Bei den Versuchen zur Optimierung des Ausbrandes überschritten die Messwerte die CO-Grenzwerte in Versuchen, bei denen ein extrem schlechter Ausbrand vorlag. Nur bei der Acrylmitverbrennung traten messbare Gesamt-C Konzentrationen auf, die die Grenzwerte aber nicht überschritten. Die höchsten Gesamt-C Gehalte traten bei schlechtem Ausbrand charakterisiert durch eine grosse Rückstandsmenge und relativ hohe CO-Konzentrationen im Abgas auf (Vergleich der Werte zu Versuchs-

nummer 1 in Tab. 13, Tab. 12 und Tab. 8).

Bei der Mitverbrennung von Fasern mit hohem Wolleanteil wurden durch den hohen Schwefelgehalt der Wolle die Emissionsgrenzwerte für SO₂ deutlich überschritten. Die SO₂-Emissionen bei der Acrylmitverbrennung könne durch Wollbeimischungen im Textilstaub verursacht worden sein.

Tab. 12: Ergebnisse der Abgasanalyse während der Ausbrandversuche (Brennervariante 4)

Datum	Nr.	Staubsorte	Anteil TS [%]	O ₂ [Vol. %]	bezogen auf 3,0 % O _{2,tr}				
					CO [mg/m ³]	NO _x [mg/m ³]		SO ₂ [mg/m ³]	
						MW	MG	MW	MG
13.05	1.	Acryl	13,4	6,0	114,0	110,4	124,8	96	19,9
14.05	2.	Baumwolle	15,7	5,5	35,0	124,6	125,4	n.n	20,2
20.05	3.	Acryl	keine Werte wegen Störung Dosierung						
28.05	4.	Baumwolle	13,7	5,5	13,4	124,6	125,4	n.n	20,2
02.06	5.	Acryl	16,2	5,0	50,6	77,6	124,8	78,8	19,9
03.06	6.	Acryl	13,5	6,5	359,9	19,0	124,8	124,1	19,9
04.06	7.	Acryl	16,8	6,1	60,4	64,9	124,8	114,8	19,9
05.06	8.	Baumwolle	14,2	5,2	22,8	118,8	125,4	n.n	20,2
06.06	9.	Baumwolle	15,5	6,0	42,0	128,8	125,4	n.n	20,2
10.06	10.	Baumwolle	14,2	6,0	28,8	147,2	125,4	n.n	20,2
26.06	11.	Acryl	14,3	6,0	33,6	73,6	124,8	48	19,9
30.06	12.	Baumwolle	16,1	5,0	45,0	207,0	125,4	n.n	20,2

MW: normierter Messwert; MG: Mischgrenzwert ; TS: Textilstaub; MG CO 50 mg/m³ für alle Anteile Textilstaub

Tab. 13: Staub- und Gesamt C Konzentrationen während der Ausbrandversuche (Brennervariante 4)

	Nr.	Staubsorte	Anteil TS [%]	O ₂ [Vol. %]	bezogen auf 3,0 % O _{2,tr}		
					Gesamt C [mg/m ³]	Staub [mg/m ³]	
						MW	MG
13.05	1.	Acryl	13,4	6,0	4,59	-	10
28.05	4.	Baumwolle	13,7	5,5	n.n	-	10
10.06	10.	Baumwolle	14,2	6,0	n.n	-	10
26.06	11.	Acryl	14,3	6,0	2,65	-	10
30.06	12.	Baumwolle	16,1	5,0	n.n	0,02	10

MW: normierter Messwert; MG: Mischgrenzwert ; TS: Textilstaub; MG CO 50 mg/m³ für alle Anteile Textilstaub

Der geringe Messwert für den Gesamtstaubgehalt im Abgas resultiert aus den grossen Rauchgasquerschnitten und damit geringen Geschwindigkeiten in der Versuchsanlage. Der grösste Teil des Feststoffes wurde in der Brennkammer abgetrennt.

2.1.2.3. Abschätzung der maximalen Zumischraten unter Einhaltung der Emissionsgrenzwerte

Da keine zusätzlichen Rauchgasreinigungseinrichtungen für die Mitverbrennung von Textilstaub vorgesehen sind, werden alle über den Textilstaub eingetragenen Schad-

stoffe mit dem Abgas aus der Anlage transportiert. Die mit Gas gefeuerten Wärmeerzeugern sind nicht mit Entstaubern ausgerüstet. Damit werden auch alle Schadstoffe, die sich am Staub anlagern bzw. am Staub gebunden werden mit dem Abgas aus der Anlage transportiert. Einspeichern des Staubes nach einer Kesselreinigung führt nur kurzfristig zu einer Verminderung der Staubemission.

Die in den Eingangsanalysen ermittelten Gehalte der Ausgangssubstanzen für die Emissionsparameter werden zur Berechnung der Grenzwerte der Zudosierung für die verschiedenen Emissionsparameter herangezogen. Es wird davon ausgegangen, dass die mit der Zudosierung eingebrachten Schadstoffe die in der 17. BImSchV angegebenen Tagesmittelwerte der Emissionsgrenzwerte einhalten. Da die zur Einhaltung aller Emissionsgrenzwerte zulässigen Anteile der Staubmitverbrennung 10 % der Gesamtfeuerungswärmeleistung unterschreiten, wird für die Berechnung des Grenzwertes für die SO₂ Emission in der Mischungsregel ein Anteil der Mitverbrennung von 10 % an der Gesamtfeuerungsleistung in Rechnung gestellt.

Tab. 14: Gehalte der Schadstoffparameter im Textilstaub

Parameter für Schadstoff	Baumwolle	Acryl	Wolle	BW, Wolle, Acryl, je1/3
Schwefelgehalt [Ma-%]	-	-	3,0	1,0
Aschegehalt [Ma-%]	1,1	0,2	-	-
Chlor [mg/kg]	2080,0	1570	-	1590
Sb+As+Pb+Cr+ Co+Cu+Mn+Ni+ V + Sn [mg/kg]	24,4	14,68	-	71,22

Tab. 15: maximale Zumischraten in kg Staub pro m³ Erdgas (H_{uErdg.} = 31,33 MJ/m³) zur Einhaltung der Emissionsgrenzwerte

Schadstoff	Grenzwert mg/m ³	Baumwolle kg _{BW} /m ³ _{Gas}	Acryl kg _{Ac} /m ³ _{Gas}	Wolle kg _W /m ³ _{Gas}	BW, Wolle, Acryl, je1/3 kg _{Gem} /m ³ _{Gas}
SO ₂	14,1*	-	-	0,0021	0,0064
HCl	20	0,0885	0,124		0,120
Staub	10	0,0082	0,047		
Sb+As+Pb+Cr+ Co+Cu+Mn+Ni+ V + Sn	0,5	0,206	0,43		0,0664

*) Mittelwert aus Anwendung Mischungsregel

Tab. 16: Anteil an der Textilstäube an der Gesamtfeuerungswärmeleistung bei den maximalen Zumischraten zur Einhaltung der Emissionsgrenzwerte

Schadstoff	Grenzwert mg/m ³	Baumwolle Anteil Q _{FW} [%]	Acryl Anteil Q _{FW} [%]	Wolle Anteil Q _{FW} [%]	BW, Wolle, Acryl, je1/3 Anteil Q _{FW} [%]
SO ₂	14,1	-	-	0,182	0,476
HCl	20	4,81	10,43		8,23
Staub	10	0,46	4,23		
Sb+As+Pb+Cr+ Co+Cu+Mn+Ni+ V + Sn	0,5	10,51	28,78		4,73

Der die Zugabe des Textilstaubes limitierende Emissionsparameter ist in den Tabellen kursiv fett gekennzeichnet. Bei der Ermittlung der Staubkonzentration wurde angenommen, dass der Ausbrand vollständig ist und als Staub nur die Asche des Textilstaubes die Anlage mit den Abgasen über den Kamin verlässt. Die aufgeführten Werte gelten nur, wenn die in den Eingangsanalysen ermittelten Konzentrationen der Ausgangssubstanzen für die Emissionsparameter nicht überschritten werden.

2.1.2.4. Ergebnisse der Eingangsanalysen und der Rückstandsanalysen

Die Analyseergebnisse der Ausgangsmaterialien, die nicht in den Verbrennungsversuchen eingesetzt wurden, sind in den nachfolgenden Tabellen 17 bis 19 aufgeführt. Bei der Elementanalytik sind jeweils die Mittelwerte aus zwei Messungen angegeben.

Für die hier untersuchten PAK-Leitsubstanzen werden in der Ergebnisdarstellung folgende Abkürzungen verwendet:

NAP: Naphthalin, ACY: Acenaphthylen, ACE: Acenaphthen, FLE: Fluoren, PHE: Phenanthren, ANT: Anthracen, FLA: Fluoranthen, PYR: Pyren, BaA: Benz[a]anthracen, CHR: Chrysen, BbF: Benzo[b]fluoranthen, BkF: Benzo[k]fluoranthen, BaP: Benzo[a]pyren, IcdP: Indeno[1,2,3,c,d]pyren, DahA: Dibenzo[a,h]anthracen, BghiP: Benzo[g,h,i]perylen.

Die Konzentrationen sind mit einer Ausnahme auf die Masse der Asche in kg bezogen. Bei dem Verbrennungsversuch am 6.11.2002 war jedoch die Asche im Horizontalzug feucht und klebrig, sodass sie nur mit Toluol-getränkten Wischetüchern entnommen werden konnte. Die beprobten Bleche wurden ausgemessen und die Analyt-Konzentrationen in der Probe daher pro m² angegeben. Die Gehalte sind daher nicht mit anderen Werten vergleichbar, sollten aber dennoch mit aufgenommen werden.

Im Ausgangsmaterial und in den Brennkammeraschen konnten aufgrund ausreichender Probenmengen immer die Element-, PAK und PCDD/F-Gehalte bestimmt werden. Darüberhinaus wurden die einzelnen Untersuchungen je nach Menge der angefallenen Aschen durchgeführt. Details sind nachfolgend den Ergebnisdarstellungen zu den einzelnen Versuchen zu entnehmen.

Tab. 17: Elementgehalte der Textilstäube und des Heizöls, die nicht verbrannt wurden [mg/kg]

	1 Wülfing BW	2 Bierbaum Acryl	3 Bierbaum BW	4 Ibena BW/Acryl	7 + 8 Biederlack Wolle/Acryl	Heizöl
As	<7,5	<7,5	<7,5	<7,5	<7,5	<7,5
Cd	<2,5	<2,5	<2,5	<2,5	<2,5	<2,5
Co	<2,5	<2,5	<2,5	<2,5	<2,5	<2,5
Cr	<2,5	<2,5	<2,5	<2,5	<2,5	<2,5
Cu	<2,5	<2,5	8,13	25,5	2,82	<2,5
Hg	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Mn	4,90	<2,5	6,03	4,13	4,91	<2,5
Ni	<2,5	<2,5	<2,5	<2,5	<2,5	<2,5
Pb	<5,0	5,16	5,97	6,71	<5,0	6,22
Sb	<2,5	<2,5	2,85	7,03	4,01	<2,5
Sn	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	5,18
Tl	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0
V	<2,5	<2,5	<2,5	<2,5	<2,5	<2,5
Zn	17,8	4,38	22,4	21,4	22,9	7,29
Cl	1.750	1.570	2.080	1.610	1.590	n.b.

n.b.: nicht bestimmt, BW Baumwolle

Tab. 18: PAK-Gehalte der Textilstäube und des Heizöls, die nicht verbrannt wurden [µg/kg]

	1 Wülfing BW	2 Bierbaum Acryl	3 Bierbaum BW	4 Ibena BW/Acryl	7 + 8 Biederlack Wolle/Acryl	Heizöl
NAP	3,43	3,65	4,70	43,3	3,20	731
ACY	n.b.	n.b.	n.b.	< 2,5	n.b.	0,396
ACE	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	1,36
FLE	2,91	8,36	4,88	4,41	2,51	186
PHE	23,5	109	78,5	54,0	16,5	394
ANT	n.b.	4,83	3,34	5,64	< 2,5	26,6
FLA	13,0	48,8	89,6	124	n.b.	5,48
PYR	12,1	46,0	58,3	69,4	n.b.	21,0
BaA	n.b.	n.b.	5,79	13,7	< 2,5	n.b.
CHR	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	< 2,5	n.b.
BbF + BkF	12,9	< 2,5	< 2,5	36,0	< 2,5	n.b.
BaP	2,99	10,9	< 2,5	n.b.	< 2,5	n.b.
IcdP	n.b.	< 2,5	< 2,5	< 2,5	< 2,5	n.b.
DahA	< 2,5	< 2,5	< 2,5	< 2,5	< 2,5	n.b.
BghiP	3,51	< 2,5	< 2,5	< 2,5	< 2,5	n.b.
Σ PAK	74,4	232	245	350	22,2	1.370

n.b.: nicht bestimmt aufgrund von Störungen

Tab. 19: PCDD/F-Gehalte der Textilstäube und des Heizöls, die nicht verbrannt wurden [ng/kg]

	1 Wülfing BW	2 Bierbaum Acryl	3 Bierbaum BW	4 Ibena BW/Acryl	7 + 8 Biederlack Wolle/Acryl	Heizöl
Σ TeCDD	< 13	< 10	< 10	< 10	< 10	< 200
Σ PeCDD	< 13	< 10	< 10	< 10	< 10	< 200
Σ HxCDD	< 13	< 10	< 10	< 10	< 10	< 200
Σ HpCDD	< 13	< 10	< 10	< 10	< 10	< 200
OCDD	< 13	254	< 10	817	< 10	< 200
Σ TeCDF	< 13	< 10	< 10	< 10	< 10	< 200
Σ PeCDF	< 13	< 10	< 10	< 10	< 10	< 200
Σ HxCDF	< 13	< 10	< 10	< 10	< 10	< 200
Σ HpCDF	< 13	251	< 10	1.190	< 10	< 200
OCDF	< 13	608	105	3.340	< 10	< 200
Σ PCDD/F	< 13	1.110	105	5.340	< 10	< 200
Σ I-TEQ	n.b.	1,89	0,110	9,83	n.b.	n.b.

n.b.: nicht bestimmt aufgrund von Störungen

Die nachfolgenden Tabellen 20 bis 33 enthalten die Analysenergebnisse zu den Feuerungsversuchen einschliesslich der Analysenwerte für die tatsächlich eingesetzten Textilstäube.

Verbrennungsversuch 17.10.2002, BW 95%, PA 5%

Bei diesem Versuch wurde 159 kg Material mitverbrannt und aus der Brennkammer 1,381 kg Asche entnommen. Auf den Blechen im Horizontalzug wurden 13,5 g Asche entnommen, im Schlauchfilter konnte keine verwertbare Asche gesammelt werden. Auf der Filterhülse waren 5,89 g Flugasche.

In der Horizontalzugasche wurden Elementgehalte und PAK untersucht, für die PCDD/F-Analytik war die Aschemenge nicht ausreichend. Die Asche der Filterhülse wurde lediglich auf PAK untersucht, da eine Probenteilung nicht möglich war.

Tab. 20 Elementgehalte des Ausgangsmaterials und der Aschen [mg/kg]

	Ausgangsmaterial	Brennkammerasche	Horizontalzugasche
As	< 7,5	< 7,5	< 12
Cd	< 2,5	< 2,5	< 2,5
Co	< 2,5	8,48	21,7
Cr	3,01	31,1	139
Cu	8,86	1.440	1.620
Hg	< 10	< 10	< 10
Mn	3,55	192	813
Ni	< 2,5	155	199
Pb	< 5,0	14,5	41,2
Sb	< 7,5	< 7,5	n.b.
Sn	< 5,0	6,01	n.b.
Tl	< 5,0	< 5,0	n.b.
V	< 2,5	< 2,5	17,3
Zn	20,2	328	236

n.b.: nicht bestimmt aufgrund von Störungen

Tab. 21: PAK-Gehalte des Ausgangsmaterials und der Aschen

	Ausgangs- material [µg/kg]	Brennkam- merasche [µg/kg]	Horizontal- zugasche [µg/kg]	Filterhülsen- asche [µg/kg]
NAP	30,0	341	699	15,3
ACY	1,80	< 1,6	15,4	< 2,7
ACE	63,7	< 1,6	8,10	< 2,7
FLE	31,7	3,10	20,4	< 2,7
PHE	117	119	220	27,2
ANT	4,80	3,20	5,60	< 2,7
FLA	75,2	28,1	80,1	12,9
PYR	37,2	16,8	47,1	5,80
BaA	4,20	16,5	19,5	3,70
CHR	8,90	9,80	31,4	3,20
BbF + BkF	< 1,2	14,6	90,3	< 2,7
BaP	< 1,2	3,20	10,3	< 2,7
IcdP	2,60	1,90	8,30	< 2,7
DahA	< 1,2	< 1,6	< 1,6	< 2,7
BghiP	3,40	2,70	13,7	< 2,7
Σ PAK	380	560	1.270	68

Tab. 22: PCDD/F-Gehalte des Ausgangsmaterials [ng/kg]

	Ausgangsmaterial
Σ TeCDD	< 10
Σ PeCDD	< 10
Σ HxCDD	< 10
Σ HpCDD	< 10
OCDD	150
Σ TeCDF	< 10
Σ PeCDF	< 10
Σ HxCDF	< 10
Σ HpCDF	38,9
OCDF	276
Σ PCDD/F	465
Σ I-TEQ	0,815

In der Asche aus der Brennerkammer konnten bei einer Bestimmungsgrenze von 10 ng/kg keine PCDD und PCDF nachgewiesen werden.

Verbrennungsversuch 06.11.2002, BW Wolle Acryl, je 1/3

Für diesen Versuch wurden 212,3 kg Ausgangsmaterial verbrannt und aus der Brennkammer 20,51 kg Asche entnommen. Wie schon beschrieben mussten von den Edelstahlblechen im Horizontalzug aufgrund der Konsistenz des Niederschlags in diesem Fall Wischproben entnommen werden. In dem Niederschlag wurden PAK

und PCDD/F bestimmt. Im Schlauchfilter konnten 2,1 g Asche gesammelt werden, die auf PAK und Elementgehalte untersucht wurden. Für eine Bestimmung der PCDD/F reichte die Aschemenge hier nicht aus. Auf der Filterhülse waren nur 0,258 g Asche, die komplett für die Element-Analytik verwendet wurden.

Tab. 23: Elementgehalte des Ausgangsmaterials und der Aschen [mg/kg]

	Ausgangs- material	Brennkam- merasche	Filterhülsen- asche	Schlauchfilter- Asche
As	< 7,5	< 7,5	< 7,5	< 10
Cd	< 2,5	< 2,5	< 2,5	< 7,0
Co	< 2,5	4,69	10,2	8,79
Cr	< 2,5	38,5	35,1	41,3
Cu	26,8	200	277	166
Hg	< 10	< 10	< 10	< 25
Mn	5,96	71,6	146	820
Ni	17,0	27,1	11,7	145
Pb	5,16	8,32	5,82	37,4
Sb	< 7,5	< 7,5	< 7,5	< 10
Sn	< 5,0	< 7,5	< 5,0	< 30
Tl	< 5,0	< 5,0	< 5,0	n.b.
V	< 2,5	< 2,5	< 2,5	< 25
Zn	16,3	112	212	7.450

n.b.: nicht bestimmt aufgrund von Störungen

Tab. 24: PAK-Gehalte des Ausgangsmaterials und der Aschen

	Ausgangs- material [µg/kg]	Brennkam- merasche [µg/kg]	Horizontal- zugasche [µg/m²]	Schlauchfilter- Asche [µg/kg]
NAP	6,20	14,8	493	218
ACY	< 0,8	1,50	166	29,1
ACE	< 0,8	< 0,8	37,2	< 10
FLE	4,90	1,20	126	20,2
PHE	38,2	3,50	1.240	361
ANT	1,60	1,20	166	17,0
FLA	11,9	2,40	685	198
PYR	6,20	1,70	548	130
BaA	< 0,8	< 0,8	111	42,6
CHR	< 0,8	< 0,8	142	52,1
BbF + BkF	< 0,8	2,00	135	107
BaP	< 0,8	1,00	39,2	23,8
IcdP	< 0,8	< 0,8	46,4	20,9
DahA	< 0,8	< 0,8	< 35	< 10
BghiP	< 0,8	< 0,8	< 35	26,5
Σ PAK	69	29	3.940	1.250

Tab. 25: PCDD/F-Gehalte der Horizontalzugasche [ng/m²]

	Horizontalzugasche
Σ TeCDD	< 220
Σ PeCDD	< 220
Σ HxCDD	< 220
Σ HpCDD	945
OCDD	571
Σ TeCDF	< 220
Σ PeCDF	< 220
Σ HxCDF	< 220
Σ HpCDF	371
OCDF	< 220
Σ PCDD/F	1.890
Σ I-TEQ	13,7

Die Konzentrationen in der Horizontalzugasche mussten aufgrund der oben erläuterten Probleme auf die Fläche der Edelstahlbleche im Horizontalzug bezogen werden.

Im Ausgangsmaterial und in der Brennkammerasche konnten keine PCDD und PCDF nachgewiesen werden. Die Bestimmungsgrenze betrug in beiden Fällen 10 ng/kg.

Verbrennungsversuch 19.11.2002, BW 100%

Bei diesem Versuch wurden 132 kg Material verbrannt. In der Brennkammer verblieben 1,404 kg Asche. Aus dem Horizontalzug wurden 8,3 g, aus dem Schlauchfilter 14,9 g Asche entnommen. Bei beiden Aschen wurden alle Parameter untersucht. Die auf der Filterhülse gesammelte Aschemenge von 0,349 g wurde komplett für die PAK-Analytik verwendet.

Tab. 26: Elementgehalte des Ausgangsmaterials und der Aschen [mg/kg]

	Ausgangs- material	Brennkammer- asche	Horizontalzug- asche	Schlauchfilter- asche
As	< 7,5	< 7,5	< 7,5	< 10
Cd	< 2,5	< 2,5	3,20	< 6,0
Co	< 2,5	7,42	31,9	6,80
Cr	< 2,5	28,3	106	30,0
Cu	11,1	1.510	1.470	550
Hg	< 10	< 10	< 10	< 10
Mn	3,45	172	1.620	995
Ni	2,63	20,7	119	58,7
Pb	< 5,0	9,49	178	32,9
Sb	< 10	n.b.	n.b.	n.b.
Sn	< 5,0	n.b.	n.b.	n.b.
Tl	< 5,0	< 5,0	n.b.	n.b.
V	< 2,5	< 2,5	< 7,5	< 2,5
Zn	7,22	289	245	1.830

n.b.: nicht bestimmt aufgrund von Störungen

Tab. 27: PAK-Gehalte des Ausgangsmaterials und der Aschen [$\mu\text{g}/\text{kg}$]

	Ausgangsmaterial	Brennkammerasche	Horizontalzugasche	Filterhülsenasche	Schlauchfilterasche
NAP	9,80	1.370	534	33,4	572
ACY	< 2,0	< 2,0	< 5,0	< 23	< 2,3
ACE	6,13	< 2,0	< 5,0	< 23	< 2,3
FLE	4,76	2,71	9,42	< 23	< 2,3
PHE	54,8	697	180	100	650
ANT	2,65	8,56	6,60	< 23	6,63
FLA	33,8	117	38,2	55,7	119
PYR	21,8	74,3	20,9	30,5	94,4
BaA	< 2,0	11,0	< 5,0	< 23	45,6
CHR	< 2,0	99,0	44,0	< 23	179
BbF + BkF	< 2,0	73,0	11,6	61,9	191
BaP	19,6	8,18	< 5,0	< 23	22,0
lcdP	< 2,0	14,1	< 5,0	< 23	21,2
DahA	< 2,0	3,90	< 5,0	< 23	11,7
BghiP	2,74	23,1	< 5,0	< 23	40,9
Σ PAK	156	2.500	844	281	1.950

Tab. 28: PCDD/F-Gehalte des Ausgangsmaterials und der Aschen [ng/kg]

	Ausgangsmaterial	Horizontalzugasche	Schlauchfilterasche
Σ TeCDD	< 8,0	< 32	< 14
Σ PeCDD	< 8,0	< 32	< 14
Σ HxCDD	< 8,0	< 32	< 14
Σ HpCDD	9,96	< 32	21,2
OCDD	153	223	30,9
Σ TeCDF	< 8,0	< 32	< 14
Σ PeCDF	< 8,0	< 32	< 14
Σ HxCDF	< 8,0	< 32	< 14
Σ HpCDF	50	85,1	< 14
OCDF	375	788	24,3
Σ PCDD/F	588	1.100	76,4
Σ I-TEQ	1,13	1,86	0,27

In der Brennkammerasche konnten bei einer Bestimmungsgrenze von 8 ng/kg keine PCDD und PCDF nachgewiesen werden.

Verbrennungsversuch 09.01.2003, 100% Acryl

Es wurden 90 kg Ausgangsmaterial verbrannt und aus der Brennkammer 10,41 kg Asche entnommen. Im Horizontalzug hatte sich keine Asche abgelagert, aus dem Schlauchfilter konnten lediglich 2,4 g Asche entnommen werden, die auf Element- und PAK-Konzentrationen untersucht wurden. Da bei diesem Versuch eine Rauchgasprobenahme nach VDI 3499 durchgeführt wurde, wurde kein Teilstrom auf eine Filterhülse gezogen. Das Rauchgas wurde auf PAK und PCDD/F untersucht.

Tab. 29: Elementgehalte des Ausgangsmaterials und der Aschen [mg/kg]

	Ausgangsmaterial	Brennkammerasche	Schlauchfilterasche
As	< 7,5	< 7,5	< 10
Cd	< 2,5	< 2,5	< 20
Co	< 2,5	< 2,5	9,72
Cr	< 2,5	58,0	45,4
Cu	4,24	36,6	111
Hg	< 10	< 10	< 10
Mn	7,41	40,7	1.160
Ni	3,03	30,8	47,6
Pb	< 5,0	< 5,0	106
Sb	< 7,5	< 7,5	n.b.
Sn	< 5,0	< 5,0	n.b.
Tl	< 5,0	< 5,0	n.b.
V	< 2,5	< 2,5	< 5,0
Zn	< 2,5	20,3	34.300

n.b.: nicht bestimmt aufgrund von Störungen

Tab. 30: PAK-Gehalte des Ausgangsmaterials, der Aschen und des Rauchgases

	Ausgangs- material [µg/kg]	Brennkam- merasche [µg/kg]	Schlauchfilter- asche [µg/kg]	Rauchgas [µg/m³]
NAP	2,73	4,07	37,9	0,670
ACY	< 1,6	< 0,9	< 4,2	0,021
ACE	4,86	4,45	20,8	0,028
FLE	4,08	< 0,9	4,37	0,095
PHE	14,3	1,36	82,8	0,428
ANT	< 1,6	< 0,9	< 4,2	< 0,006
FLA	1,61	1,19	49,2	0,144
PYR	< 1,6	< 0,9	15,9	0,069
BaA	< 1,6	< 0,9	7,47	0,010
CHR	< 1,6	< 0,9	14,9	0,009
BbF + BkF	< 1,6	< 0,9	39,8	< 0,006
BaP	< 1,6	< 0,9	< 4,2	< 0,006
IcdP	< 1,6	< 0,9	11,7	< 0,006
DahA	< 1,6	< 0,9	< 4,2	< 0,006
BghiP	< 1,6	< 0,9	8,12	< 0,006
Σ PAK	27,6	11,1	293	1,47

Im Rauchgas wurde lediglich das OCDD mit einer Konzentration von 0,0304 ng/m³ entsprechend 0,0000304 ng TEQ/m³) nachgewiesen. Die Bestimmungsgrenze betrug 0,01 ng/m³.

PCDD/F: Im Ausgangsmaterial und der Brennkammerasche konnten bei einer Bestimmungsgrenze von 7 ng/kg keine PCDD und PCDF nachgewiesen werden.

Verbrennungsversuch 16.01.2003, BW Wolle Acryl, je 1/3

Bei diesem Versuch wurden 95 kg Material verbrannt. Aus der Brennkammer wurden 8,013 kg Asche entnommen. Im restlichen Teil der Anlage lagerte sich keine Asche ab. Es wurde eine Rauchgasprobenahme nach VDI 3499 durchgeführt und daher keine Filterhülse eingesetzt

Tab. 31: Elementgehalte des Ausgangsmaterials und der Aschen [mg/kg]

	Ausgangs- material	Brennkammer- asche	Horizontalzug- asche	Schlauchfilter- asche
As	< 7,5	< 7,5	15	< 13
Cd	< 2,5	< 2,5	< 2,5	< 15
Co	< 2,5	9,09	18,9	9,80
Cr	< 2,5	49,1	87,2	42,5
Cu	26,8	296	203	122
Hg	< 10	< 10	< 10	< 10
Mn	5,96	182	2.370	1.340
Ni	17,0	32,7	107	44,3
Pb	5,16	5,66	40,1	118
Sb	< 7,5	n.b.	< 15	< 10
Sn	< 5,0	< 7,5	n.b.	n.b.
Tl	< 5,0	< 10	n.b.	n.b.
V	< 2,5	< 2,5	< 10	< 10
Zn	16,3	205	1.010	34.040

n.b.: nicht bestimmt aufgrund von Störungen

Tab. 32: PAK-Gehalte des Ausgangsmaterials, der Brennkammerasche und des Rauchgases

	Ausgangsmaterial [µg/kg]	Brennkammerasche [µg/kg]	Rauchgas [µg/m³]
NAP	6,20	42,5	0,884
ACY	< 0,8	< 1,3	0,0436
ACE	< 0,8	1,37	0,0839
FLE	4,90	5,00	0,220
PHE	38,2	17,0	0,950
ANT	1,60	< 1,3	< 0,011
FLA	11,9	5,76	0,0926
PYR	6,20	5,00	0,0453
BaA	< 0,8	2,00	< 0,011
CHR	< 0,8	6,00	< 0,011
BbF + BkF	< 0,8	14,0	< 0,011
BaP	< 0,8	< 1,3	< 0,011
IcdP	< 0,8	< 1,3	< 0,011
DahA	< 0,8	< 1,3	< 0,011
BghiP	< 0,8	< 1,3	< 0,011
Σ PAK	69	101	2,32

Tab. 33: PCDD/F-Gehalte der Brennkammerasche und des Rauchgases

	Brennkammerasche [ng/kg]	Rauchgas [ng/m³]
Σ TeCDD	< 5,0	< 0,011
Σ PeCDD	< 5,0	< 0,011
Σ HxCDD	< 5,0	< 0,011
ΣHpCDD	22,5	0,0120
OCDD	< 5,0	0,0444
Σ TeCDF	< 5,0	< 0,011
Σ PeCDF	< 5,0	< 0,011
Σ HxCDF	< 5,0	< 0,011
Σ HpCDF	< 5,0	< 0,011
OCDF	< 5,0	< 0,011
Σ PCDD/F	22,5	0,0564
Σ I-TEQ	0,225	0,000164

2.1.3. Bewertung der Ergebnisse

2.1.3.1. Bewertung der Ergebnisse der Eingangs und Rückstands- analysen, Dioxine und Furane

In fünf der neun untersuchten **Textilstäube** wurden PCDD und PCDF im ng/kg- bis unteren µg/kg-Konzentrationsbereich nachgewiesen und zwar überwiegend die octachlorierten Kongenere und in untergeordnetem Masse heptachlorierte Dioxine und Furane. Vier der fünf belasteten Proben enthielten mindestens anteilig Baumwolle. Eine Probe bestand zu 100% aus Acryl (s. Tab. 19: Probe 2 *Bierbaum*). Die Messergebnisse stimmen mit Literaturangaben überein [3-6]. Das Auftreten der Kontaminationen könnte einerseits mit der Pestizidanwendung im Baumwollanbau und der offenbar z. T. noch immer gängigen Praxis der Baumwollkonservierung mit Pentachlorphenol für Seetransporte zusammenhängen. Andererseits stellt die Anwendung bestimmter Farbstoffe, z. B. Dioxazin-Farbstoffe und Pigmente auf Chloranil-Basis, eine Quelle für PCDD/F-Belastungen der Textilstäube dar.

Alle untersuchten Textilstäube waren im µg/kg-Konzentrationsbereich mit PAK (Summe der 16 Indikatorsubstanzen gemäss US EPA) belastet. PAK entstehen beispielsweise bei allen unvollständigen Verbrennungsprozessen und vielen thermischen Belastungen organischer Materialien. Sie sind ubiquitär verbreitet. Die Gründe für die PAK-Kontaminationen der Textilstäube können somit vielfältig sein. In welchem Ausmass die im Ausgangsmaterial vorkommenden PAK und PCDD/F auf der Abgasseite der Feuerungsanlage eine Rolle spielen, ist nicht abschätzbar, da sie in der Verbrennung zu einem nicht bekannten Anteil zerstört werden. Andererseits sind die Voraussetzungen für eine Neubildung dieser Schadstoffgruppen in der Abgasführung durchaus gegeben. Die Verbrennung ist trotz aller Optimierung unvollständig. Flugaschen bieten eine grosse reaktive Oberfläche. Über die Ausgangsmaterialien werden katalytisch relevante Schwermetalle wie Cu, Mn, Pb, Sn und Zn im mg/kg-Konzentrationsbereich eingetragen, die Einfluss auf die PCDD/F- und PAK-Bildung haben [7]. Darüber hinaus sind die Chlorgehalte recht hoch (durchschnittlich 1,7 g Cl/kg Textilstaub, s. Tab. 17).

Da die Elemente bzw. **Schwermetalle** durch die Verbrennung weder gebildet noch zerstört werden, ist ihr Vorkommen in den Aschen allein vom Eintrag mit dem Ausgangsmaterial abhängig. Die Flüchtigkeit der einzelnen Schwermetalle ist unterschiedlich ausgeprägt und wird zudem stark von den Verbrennungsbedingungen in der Feuerungsanlage beeinflusst. Die flüchtigkeitsgesteuerte Anreicherung der verschiedenen Schwermetalle an bestimmten Punkten in der Anlage stimmt gut mit Literaturangaben überein [8].

Die PCDD/F-Gehalte in den **Aschen** der fünf Verbrennungsversuche sind als gering einzustufen. Sie liegen im unteren Bereich der Konzentrationen, die in Holzaschen aus nichtgenehmigungspflichtigen Holzverbrennungsanlagen nach der 1. BImSchV gefunden wurden [9]. Bei der Verbrennung von unbehandeltem Fichtenholz und Spanplatten in einer 250 kW-Unterschubfeuerung wurden in den Brennkammeraschen PCDD/F-Belastungen von bis zu 281 ng/kg (0,9 ng I-TEQ/kg) gefunden. Bei der Textilstaubverbrennung konnten lediglich in einer Brennkammerasche PCDD/F in einer Konzentration von 22,5 ng/kg (0,225 ng I-TEQ/kg) nachgewiesen werden. In den Brennkammeraschen der vier übrigen Versuche wurden keine PCDD/F detektiert (Bestimmungsgrenze: 10 ng/kg).

PAK-Gehalte in den Brennkammeraschen der o.g. Holzverbrennung lagen zwischen 428 und 974 µg/kg. Die bei den Textilstaubverbrennungen gefundenen Werte in den Brennkammeraschen lagen zwischen 11,1 und 2.500 µg/kg (Mittelwert 640 µg/kg). Drei der fünf Aschen wiesen Konzentrationen bis 101 µg/kg auf. Die beiden Aschen mit erhöhten PAK-Gehalten stammen aus Versuchen in denen Textilstäube aus 95 bzw. 100% Baumwolle verbrannt wurden. Der sogenannte Horizontalzug (siehe Bild 1) der im Projekt verwendeten Anlage ist von den Temperaturen im Rauchgas ungefähr zu vergleichen mit dem Wärmetauscher einer früher untersuchten Holzverbrennungsanlage, wobei dort die Aschemengen im Wärmetauscher sehr viel grösser waren als die Aschemengen, die bei der Textilstaubverbrennung im Horizontalzug entnommen werden konnten. Bei der Textilstaubverbrennung wurden in nur drei Aschen PAK bestimmt. Die gefundenen Konzentrationen betragen 844 bzw. 1.270 µg/kg. Die bei der Holzverbrennung gefundenen PAK-Konzentrationen lagen zwischen 372 und 5.020 µg/kg.

Die PCDD/F-Konzentrationen im **Rauchgas** lagen weit unterhalb des Grenzwertes von 0,1 ng I-TEQ/Nm³, der für Anlagen nach der 17. BImSchV gilt. Die gefundenen PAK-Konzentrationen sind ebenfalls als sehr gering einzustufen. Mit 1,47 bzw. 2,32 µg/Nm³ waren sie niedriger als die bei der Holzverbrennung im Rauchgas gefundenen PAK-Konzentrationen von 4,67 bis 142 µg/Nm³.

2.1.3.2. Bewertung der Ergebnisse der Emissionsmessungen

Die durch die Feuerführung beeinflussbaren Schadstoffe CO, Gesamt-C und NO_x sind für die Textilstaubmitverbrennung beherrschbar. Die Brennermodifikationen von Brennervariante 3 auf Brennervariante 4 führte auf eine Verringerung der NO_x-Konzentration im Abgas. Mit weiteren Optimierungen bei der Feuerführung sind die NO_x Emissionen beherrschbar. Die bei den Versuchen ermittelten Konzentrationen der Dioxine und Furane unterschritten die Emissionsgrenzwerte. Die Staub und SO₂ Emissionen hängen von den Schwefel- bzw. Aschekonzentration des Textilstaubes ab.

2.1.3.3. Bewertung der Ergebnisse des Ausbrandes

Während der Versuche konnte keine Brennereinstellung und keine Einstellung der Parameter der Dosieranlage gefunden werden, die einen Gehalt an Unverbranntem <5 % in den Rückständen ergab. Besonders bei der Mitverbrennung von Acryl- oder Wollfasern liegt eine Ursache bei dem Plastifizieren und Anschmelzen der Fasern bei der Aufheizung. Die resultierenden porenarmen Oberflächen der Fasern erfordern hohe Verweilzeiten unter Verbrennungsbedingungen, die in der Versuchsanlage nicht erreicht wurden. Vor allem lange Fasern und Agglomerationen von Fasern verursachten den hohen Anteil an Unverbranntem in den Rückständen. Der trotz aller Optimierungen noch hohe Förderluftbedarf führt mit dem grossen Austrittsquerschnitt für das Förderluft- Staubgemisch zu einer verzögerten Vermischung mit dem Erdgas und heissen rezirkulierten Rauchgasen und damit zu einer verzögerten Zündung des Staubes. Faseragglomerate, die unverbrannt auf den Brennkammerboden fielen, lieferten einen wesentlichen Beitrag zum Unverbranntem. Zusätzlich zu der Homogenisierung und Auflockerung der Textilstäube in der Aufbereitungs- und Dosieranlage sollte ein Kürzen der Fasern erfolgen, um durch die Zerkleinerung der Fasern den Ausbrand zu verbessern.

Ein Problem für die **Entsorgung der Aschen** stellen jedoch die hohen Glühverluste (54,8 bis 99,3 %) dar. Eine Ablagerung der anfallenden Aschen wäre demnach weder gemäss Deponieklasse I, noch gemäss Deponieklasse II möglich, da nach der TA Siedlungsabfall der Grenzwert für den Glühverlust bei maximal bei 5 Masse% (Deponieklasse II) liegt. Die TASI trifft für diesen Fall unter 9.1.2.2 folgende Aussage: *„Sofern ungenügend ausgebrannte Rückstände mit einem Glühverlust von mehr als 5% anfallen, sind sie getrennt zu erfassen und ggf. nach vorheriger Aufbereitung erneut der thermischen Behandlung zuzuführen.“* Hinzu kommen die z. T. recht hohen Schwermetallbelastungen, die eine Überschreitung der Eluatgrenzwerte nach TA Siedlungsabfall Anhang B befürchten lassen. Solche Untersuchungen wurden im Rahmen dieses Projektes jedoch nicht durchgeführt.

Nach dem **Europäischen Abfallkatalog** sollten die Aschen aus einer Gas/Textilstaub-Verbrennung unter den EAK-Schlüssel 10 01 15 fallen: *Rost- und Kesselaschen, Schlacken und Kesselstaub aus der Abfallmitverbrennung (ohne Ölfeuerungen)*. Aschen aus einer Öl/Textilstaubfeuerung fielen vermutlich unter den EAK-Schlüssel 10 01 04: *Filterstäube und Kesselstaub aus Ölfeuerung* und stellten somit von vorneherein besonders überwachungsbedürftige Abfälle dar (Bestimmungsverordnung besonders überwachungsbedürftige Abfälle, Anlage 1).

Beide Abfallarten könnten dennoch über eine **Hausmüllverbrennungsanlage** thermisch verwertet (nachverbrannt) werden. Ein wichtiges Beurteilungskriterium sind in diesem Fall die Schwermetallkonzentrationen in den Aschen. Hier werden Gehalte einzelner Schwermetalle im Prozentbereich als kritisch angesehen. Exakte Grenzwerte existieren jedoch nicht. Die Beurteilung hängt vom jeweiligen verantwortlichen Betreiber der Verbrennungsanlage ab.

Ein zweites wichtiges Kriterium für die Annahme des Abfalls zur Nachverbrennung ist, dass das Material so **konditioniert** sein sollte, dass eine geringe Staubentwicklung aus der Förderung resultiert. Die Alternative einer untätigen Ablagerung der Aschen als besonders überwachungsbedürftiger Abfall ist sicher teuer und stiesse wahrscheinlich aufgrund des hohen organischen Anteils des Abfalls ebenfalls auf Schwierigkeiten.

2.1.4. Zusammenfassung

In dem Vorhaben wurde die Aufbereitung und Dosierung von Textilstäuben für die Mitverbrennung in einer Gasflamme erfolgreich getestet. Die Mitverbrennung in einem Gasbrenner verlief störungsfrei. Die CO- und Gesamt-C- Konzentrationen sowie die Konzentration der Dioxine und Furane unterschritten in den meisten Versuchen die gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerte (Grenzwert für Erdgas : CO < 50 mg/m³).

Die NO_x-Emissionen sind beherrschbar.

Problematisch ist der unvollständige Ausbrand des mitverbrannten Textilstaubes mit Gehalten an Brennbarem bis zu 99 % im Rückstand vor allem bei der Mitverbrennung von Wolle und Kunstfasern.

Der Eintrag der Schadstoffparameter mit den Textilstäuben, insbesondere von Schwefel und Asche, lassen zur Einhaltung der Grenzwerte im Mischbetrieb mit Erdgas nur geringe Zumischraten zu. Das gilt auch für den Mischbetrieb mit Heizöl EL, zumindest im Hinblick auf die Staubemission. Für höhere Zumischraten ist deshalb für die meisten Stäube das Vorhandensein einer Abgasreinigungseinrichtung erforderlich. Bei der Baumwollmitverbrennung reicht zum Beispiel eine Staubabscheidung aus, um unter Einhaltung der Grenzwerte grössere Mengen Staub mitverbrennen zu können.

Der Schwefeleintrag durch die untersuchten Textilstäube liegt typischerweise deutlich unter dem Schwefeleintrag durch Heizöl S, ist deshalb auch im Mischbetrieb mit Heizöl S (Grenzwert: SO_x < 850 mg/m³) nicht der limitierende Emissionsparameter. Das gleiche gilt für NO_x (Grenzwert für Heizöl S: < 350 mg/m³), welches für Heizöl S durch die gleichen feuerungstechnischen Massnahmen kontrolliert wird wie für die Stäube und im Betrieb mit Gas 50 % dieses Grenzwertes selten überschritten hat. Für CO gilt hier ein höherer Grenzwert als für Gas (für Heizöl S : CO < 80 mg/m³), der im Betrieb mit 5 - 10 % Zufeuerung von Textilstäuben in einer Feuerungsanlage mit einer thermischen Leistung > 5 MW (Voraussetzung für Einsatz von Heizöl S) wegen der, im Vergleich mit der Versuchsanlage, längeren Verweilzeit der Fasern in der Flamme problemlos eingehalten werden kann.

Die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit sollte jedoch auf der sicheren Seite liegen, daher wurde eine Zufeuerungsrate von lediglich 5% des Gesamtenergieeintrags zugrundegelegt, die für jeden der untersuchten Stäube realisiert werden kann.

2.1.5. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Annahmen Kennzahlen:		
Staubaufkommen im Textilbetrieb	200 t Textilstaub/a 16,7 t Textilstaub/Monat	
Aschewerte	1,1 Gew.% 0,2 Gew.% 0,3 Gew.%	Baumwolle Acryl Wolle
Heizwerte	20 MJ/kg 31 MJ/kg 40 MJ/m ³	Textilstaub Erdgas Schweröl

Feuerungsleistung der Brenner		5,6 MW Schweröl 3,7 MW Erdgas		
Textilstaub-Zufeuerung		5% der Feuerungswärmeleistung		
	entspricht:	0,28 MW	Schwerölbrenner Fa. Biederlack	
		50,4 kg Textilstaub/h	Schwerölbrenner Fa. Biederlack	
	entspricht:	0,19 MW	Erdgasbrenner Fa. IBENA	
		33,3 kg Textilstaub/h	Erdgasbrenner Fa. IBENA	
Betriebsstunden bei besagter Zufeuerung		3968 h/Jahr	Schwerölbrenner	
		6006 h/Jahr	Erdgasbrenner	
Personalkosten		60 T€/Jahr Techniker 294 €/Tag Techniker		
Brennstoffkosten				
	Erdgas	2,3 ct/kWh		
	Schweröl	1,7 ct/kWh		
	Stromkosten	7 ct/kWh		
Deponiegebühr (Hausmüll)		70 €/t Textilstaub		
Müllverbrennungsgebühr		140 €/t Textilstaub		
Transport zur Entsorgung		40 €/ Fahrt retour		
monatliche Containermiete		20 €/Monat		
Investitionen:				
		Erdgas	Schweröl	
		T€	T€	
Integration des Aufbereitungssystems in das Prozessschema des Textilbetriebs		33,0	33,0	
Textilstaubförderung		41,3	41,3	
Staubaufbereitung		44,0	44,0	
Dosieranlage		49,5	49,5	
Brennersystem (10 MW)		85,0	88,0	
Summe:		252,8	255,8	

Betriebskosten nach Einführung der betriebsintegrierten Textilstaubfeuerung:

	Erdgas	Schweröl	
	T€/a	T€/a	
AfA (linear, 10 Jahre)	25,3	25,6	
Personal (1 MannTag pro Woche)	15,3	15,3	
Energiekosten (Strom); 6 kWh	2,5	1,7	
Wartung (10% der AfA)	2,5	2,6	
Entsorgung Asche auf Mülldeponie			
Baumwolle	0,0	0,0	220 kg/a Asche
Acryl	0,0	0,0	40 kg/a Asche
Wolle	0,0	0,0	60 kg/a Asche
Transportkosten (1 Transport/a zur Entsorgung und Containermiete)	0,3	0,3	
jährliche Betriebskosten:	45,9	45,4	

Einsparung nach Einführung der betriebsintegrierten Textilstaubfeuerung:

Hauptbrennstoff	Erdgas T€/a	Schweröl T€/a
Variante Mülldeponie		
Energiekosteneinsparung durch Zufeuerung	25,6	18,9
Einsparung bei der Entsorgung Textilstaub	14,0	14,0
Einsparung Transportkosten	0,6	0,6
Einsparung pro Jahr:	40,2	33,5
Variante Müllverbrennung		
Energiekosteneinsparung durch Zufeuerung	25,6	18,9
Einsparung bei der Entsorgung Textilstaub	28,0	28,0
Einsparung Transportkosten	0,6	0,6
Einsparung pro Jahr:	54,2	47,5

Finanzielle Gesamtbilanz der Massnahme:			
	Erdgas T€/a	Schweröl T€/a	
Delta = Einsparung - Betriebskosten			
Delta: Variante Mülldeponie	-5,7	-11,9	
ROI	n.a	n/a	Jahre
Delta: Variante Müllverbrennung	8,3	2,1	
ROI	31	120	Jahre

Wie aus dem letzten Absatz der vorstehenden Tabelle hervorgeht, ist für die relativ geringe thermische Leistung der beiden zugrundegelegten Feuerungsanlagen auf Basis der heutigen Energiekosten die erforderliche Investition zu hoch, um eine Amortisation innerhalb eines vernünftigen Zeitraums erwarten zu können. Da jedoch die Kosten für die Systemkomponenten mit einer Verdoppelung oder Verdreifachung des Staubdurchsatzes nur geringfügig steigen, ebenso auch die Personalkosten relativ leistungsunabhängig bleiben dürften, wird die Amortisationszeit für grössere Anlagen deutlich günstiger ausfallen. Da der Gegenstand des vorliegenden Forschungsvorhabens jedoch die Untersuchung der Möglichkeit der Nutzung in der Textilindustrie war, würden weitergehende Berechnungen den Rahmen der Aufgabenstellung sprengen.

2.2. Voraussichtlicher Nutzen der Ergebnisse des Forschungsvorhabens

Die Ergebnisse der Entwicklung eines Aufbereitungs- und Dosiersystems für Textilstäube und eines Staubbrenners und dessen Verknüpfung mit einer Feuerungsanlage stellen nicht nur der Textilindustrie ein Instrument zur Verfügung, bisher als Abfall eingestufte Sekundärprodukte intern energetisch zu nutzen und damit sowohl Entsorgungskosten als auch einen Teil der bisherigen Kosten für die Brennstoffbeschaffung einzusparen, sondern lassen sich auch auf andere Anwendungen übertragen.

Die Dosier- und Förderanlage ist beispielsweise gleichermassen für sonstige faserige Materialien oder für Biobrennstoffe (Stroh etc.) einsetzbar.

Für die beteiligten industriellen Partner TEMafa und PILLARD eröffnet sich damit ein potentiell zusätzliches Marktsegment.

Voraussetzung für eine zukünftige Vermarktung des Systems ist allerdings, neben einer nachgewiesenen Wirtschaftlichkeit, dass sich unter den Randbedingungen der Brennkammer einer industriellen Feuerungsanlage mit einer Leistung deutlich grösser als 5 MW der Ausbrand der eingesetzten Stäube so weit verbessern lässt, dass die Rückstände weniger als 5% Unverbranntes enthalten, wie es für Kohlenstaubfeuerungen bereits Stand der Technik ist

2.3. Bekanntgewordene Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Durchführung des Vorhabens sind dem Zuwendungsempfänger keine Fortschritte bei anderen Stellen auf dem Gebiet des Vorhabens bekannt geworden.

2.4. Veröffentlichung der Ergebnisse des Forschungsvorhabens

Der erste Bericht über das Forschungsvorhaben wurde vom Autor des Abschlussberichts am 10. September 2003 anlässlich des 21. Deutschen Flammentages in Cottbus vorgetragen und findet sich in gedruckter Form im zugehörigen Tagungsband (VDI - Bericht 1750) [17].

Der Bericht wird über den Verband der Nordwestdeutschen Textil- und Bekleidungsindustrie, Münster, den angeschlossenen Unternehmen zugänglich gemacht. Danach erfolgt, basierend auf der Realisierungs- und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, eine Diskussion der Ergebnisse und möglicherweise eine Entscheidung über eine Weiterverfolgung des Projekts in einer geeigneten Energieversorgungsanlage eines der am Forschungsvorhaben beteiligten Unternehmen.

Ebenso wie der vorgenannte erste Bericht auf dem 21. Deutschen Flammentag enthalten weder der vorliegende zusammenfassende Schlussbericht noch der kurzgefasste Erfolgskontrollbericht Einzelheiten, die zur Wahrung der Interessen des Zuwendungsempfängers oder Dritter vertraulich zu behandeln sind.

3. Literatur

- [1] United States Environmental Protection Agency (EPA) (1982): Method 610: Polynuclear Aromatic Hydrocarbons.
- [2] VDI-Richtlinie 3499, Blatt 2E (03.1993): Messen von Emissionen, Messen von PCDD/F, Filter/Kühler-Methode, VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 5, Beuth Verlag, Berlin.
- [3] L. Klasmeier, M. S. McLachlan (1998): PCDD/F in Textiles – Part I: A Screening Method for Detection of Octachlorodibenzo-p-dioxin and Octachlorodibenzofuran; Chemosphere 36, 1627-1635.
- [4] M. Horstmann, M. S. McLachlan (1995): Results of an initial Survey of Polychlorinated Dibenzo-p-dioxins (PCDD) and Dibenzofurans (PCDF) in Textiles; Chemosphere 31, 2579-2589.
- [5] M. Horstmann, M. S. McLachlan (1994): Textiles as a Source of Polychlorinated Dibenzo-p-dioxins and Dibenzofurans (PCdD/F) in Human Skin and Sewage Sludge; ESPR – Environ. Sci. & Pollut. Res. 1, 15-20.
- [6] K. Ballschmiter, R. Bacher (1996): Dioxine; VCH, Weinheim, New York, S. 255-262.
- [7] M. Wobst, H. Wichmann, M. Bahadir (2003): Influence of heavy metals on the formation and the distribution behavior of PAH and PCDD/F during simulated fires; Chemosphere 51, 109-115.
- [8] H. Wichmann, R. Sprenger, M. Wobst, M. Bahadir (2000): Brandinduzierter Schwermetalltransport in der Gasphase, Eine Literaturstudie; Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 15 Umwelttechnik, Nr. 223, ISBN 3-18-322315-5.

- [9] A. Pieper (2001): Untersuchungen zur Schadstoffbildung und Emissionsminderung bei der energetischen Verwertung von Resthölzern in Kleinf Feuerungsanlagen, Dissertation, TU Braunschweig
- [10] DIN 51719 Bestimmung des Aschegehaltes
- [11] Brennbarkeit von Textilien
aus: http://www.textile-warenkunde.de/Flammschutz%20auf%20Textilien.htm#_ftnref3
- [12] Textileigenschaften
aus: <http://www.polisilk.com/textilei.htm>
- [13] Abschlussbericht des Forschungsvorhabens 0330025
Verbundpartner Temafa
- [14] Abschlussbericht des Forschungsvorhabens 0339922
Verbundpartner Pillard
- [15] Berichte der Einzelprojekte des EU Forschungsvorhabens JOF3-CT95-0010 Fuel Blends and Alkali Diagnostics, zum Teil verfügbar unter <http://www.euro-cleancoal.net/frames/j3r5.html>
- [16] Leithner, R.; Lendt, B.; Ro, S. H.
Entwicklung eines emissionsarmen Kohlenstaubbrenners kleiner Leistung
in: Braunkohle Bd. 41 (1989), Nr. 5, S. 156-166, 05/1989
- [17] Müller, H.; Pieper, A.; Wichmann, H.; Endres, G.; Tamasi, L.
Untersuchungen zur Mitverbrennung von Textilstäuben in Gasfeuerungen
Vortrag 21. Deutscher Flammentag, Cottbus VDI-Bericht 1750; ISBN 3-18-091750-4
- [18] Abschlussbericht des Forschungsvorhabens 0330026
Verbundpartner IWBT, TU Braunschweig