

**Forschungszentrum Karlsruhe**

Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 6319

**Angekoppelte Druckimpulsabreinigung  
(CPP – Abreinigung)  
mit integriertem Sicherheitsfilter**

Robert Mai, Diana Kreft, Hans Leibold, Helmut Seifert  
Karsten Schulz \*

Institut für Technische Chemie

\* USF SCHUMACHER Umwelt- und Trenntechnik GmbH,  
Crailsheim

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

1999

Gefördert durch  
Bundesministerium für  
Bildung, Wissenschaft,  
Forschung und Technologie (BMBF)  
Forschungsvorhaben 0326833

## **Angekoppelte Druckimpulsabreinigung (CPP – Abreinigung) mit integriertem Sicherheitsfilter**

Das Vorhaben beinhaltete die Entwicklung eines verbesserten Abreinigungssystems für keramische Filterkerzen, das außerdem bei Kerzenbruch durch ein integriertes Sicherheitsfilter 1.) den vorgeschriebenen Reingasstaubgehalt einhält und 2.) die selbsttätige Blockade des schadhafte Filterelements hervorruft, so daß die übrigen Filterelemente der Kerzengruppe ohne zusätzliche Maßnahmen weiter betrieben werden können. Strömungsdynamische und filtrationstechnische Untersuchungen an einer Einzelkerzenanlage (Raumtemperatur, Systemdruck bis 6 bar) und an einer 6-Kerzen-Anlage (Temperatur bis 600 °C, atmosphärisch) belegen die Vorteile des verbesserten Konzepts. Durch die Ankoppelung der Abreinigungseinheit über das Sicherheitsfilter an die Filterkerze ermöglicht das optimierte Verfahren eine deutlich höhere Abreinigungsintensität im Vergleich zur konventionellen Jet-Pulse - Technik, bei gleichzeitig geringerem anlagentechnischen Aufwand. Der Vorteil der Ankoppelung liegt hpts. darin, daß der Abreinigungsdruck lediglich um einen relativ geringen Differenzbetrag (0,5 - 1 bar) über dem Systemdruck liegen und nicht das 2-fache desselben betragen muß. Das System kann darüber hinaus an bereits bestehenden Anlagen nachgerüstet werden. Ein stabiler Filterbetrieb mit Restdruckverlusten nahe dem Anfangsdruckverlust wird erzielt. Das verbesserte Abreinigungsverfahren, genannt CPP - Abreinigungsverfahren (CPP = Coupled Pressure Pulse), wurde im April 1999 gemeinsam vom Forschungszentrum Karlsruhe und vom Kooperationspartner Fa. SCHUMACHER zum Patent angemeldet. Ein direkt anschließendes, 2-jähriges Vorhaben verfolgt die Umsetzung zur Marktreife.

## **Coupled Pressure Pulse Recleaning (CPP – Recleaning) with Integrated Safety Filter**

The project focused on the development of an improved recleaning system for ceramic filter candles. In case of a broken candle, an integrated safety filter 1.) ensures that the dust concentration specified for the clean gas is not exceeded and 2.) causes the defective filter element to be blocked automatically such that the remaining filter elements of the candle group can be further operated without any additional measures being required. Investigations with regard to flow dynamics and filtration technology in a single candle (room temperature, system pressure up to 6 bar) and a 6-candle system (temperature up to 600 °C, atmospheric pressure) confirm the advantages of the improved concept. Coupling of the recleaning unit to the filter candle via the safety filter leads to a significant increase in the recleaning intensity as compared to conventional Jet-Pulse technology. At the same time, a reduced technical expenditure is required. The major advantage of coupling consists in the fact that the recleaning pressure has to exceed the system pressure by a relatively small differential amount (0.5 - 1 bar) only and not by a factor of 2. Furthermore, already existing plants can be retrofitted with this system. A stable filter operation is achieved with the residual pressure losses being close to the initial pressure loss. A patent for the improved recleaning method, called CPP (coupled pressure pulse) recleaning method, was applied for jointly by the Karlsruhe Forschungszentrum and the co-operation partner, the SCHUMACHER company, in April 1999. Implementation of the concept up to commercial maturity shall now be pursued in a follow-up project of two years' duration.

## Inhaltsverzeichnis

	Seite	
1	Einleitung und Problemstellung	1
2	Prinzip der CPP – Abreinigung	2
2.1	CPP – Abreinigungssystem für Einzelkerzen	2
2.2	CPP – Abreinigungssystem für Kerzengruppen	4
3	Experimentelles	6
3.1	Filterkerzen	6
3.2	Einzelkomponenten des CPP – Abreinigungssystems für Kerzengruppen	7
3.2.1	Sicherheitsfilter	7
3.2.2	Schaltelement	11
3.2.3	Schnellöffnungsventil	11
3.3	Schnelle Druckmeßtechnik	14
3.4	Versuchsstände	15
3.4.1	Konventionelle Jet-Pulse – Abreinigung für Einzelkerzen	15
3.4.2	CPP – Abreinigung für Einzelkerzen	17
3.4.3	CPP – Abreinigung für Kerzengruppen – Einzelkerzenanlage für hohen Druck	19
3.5	CPP – Abreinigung für Kerzengruppen – Mehrkerzenanlage SAMUM	23
3.6	CPP – Abreinigung für Kerzengruppen – Mehrkerzenanlage SUT	26
4	Untersuchungen an der Einzelkerze	31
4.1	Minimierung des Verlustes an Abreinigungsluft beim CPP – Abreinigungssystem für Einzelkerzen	31
4.2	Drucksignale entlang der Filterkerze bei der Jet-Pulse – Abreinigung und bei der CPP – Abreinigung für Kerzengruppen	32
4.3	Druckprofile beim CPP – Abreinigungssystem für Kerzengruppen	35
4.3.1	Einfluß des Abreinigungsdrucks / Vergleich mit konventionellem Jet-Pulse	35
4.3.2	Einfluß Systemdruck	36
4.3.3	Einfluß der Betriebsweise	37
4.3.4	Einfluß des Filterkerzentyps	38
4.4	Filtrations- und Abreinigungsuntersuchungen an der Einzelkerze	39

## II

5	Untersuchungen an Kerzengruppen	41
5.1	Abreinigungsintensität	41
5.1.1	Einfluß der Temperatur	41
5.1.2	Einfluß des Schnellöffnungsventils	42
5.1.3	Einfluß des Sicherheitsfiltertyps	44
5.1.4	Einfluß des Schaltelementtyps	48
5.1.5	Einfluß der Abreinigungstechnik	
	Vergleich mit konventioneller Jet-Pulse – Abreinigung	51
5.2	Abreinigungsuntersuchungen an der Kerzengruppe	52
5.2.1	Schaumkeramik als Sicherheitsfilter	53
5.2.2	Kornkeramik als Sicherheitsfilter	56
6	Zusammenfassung und Ausblick	59
7	Literaturverzeichnis	61

## 1 Einleitung und Problemstellung

Keramische Hochtemperaturfilter mit Betriebstemperaturen bis 850 °C bieten ein breites Anwendungspotential zur Optimierung von Hochtemperaturprozessen wie der Vergasung von Biomasse, Abfällen oder Kohle sowie der Pyrolyse von Abfällen. Moderne Kohleverstromungsverfahren mit kombiniertem Gas- und Dampfturbinenkreislauf benötigen ebenfalls eine Hochtemperaturfilterstufe. Bei erhöhtem Feinstaubanteil, der für Hochtemperaturprozesse typisch ist, neigen kommerziell erhältliche Filtersysteme jedoch zu frühzeitigem Verstopfen und somit zu instabilem Betriebsverhalten.

Eine der derzeitigen Begrenzungen ist in dem konventionell angewandten Druckimpuls – Abreinigungsverfahren zu sehen. Dieses Verfahren basiert auf einem Freistrahls, der mit maximal Schallgeschwindigkeit in die Filterkerze bzw. im Falle von Mehrkerzenanordnungen in ein Verteilersystem bläst / Mitchell 1997 /. Durch die Anordnung des Freistrahls wird i.d.R. Sekundärgas aus dem Reingasraum angesaugt und für den Spülvorgang mitverwendet. Durch dieses Injektorprinzip wird zwar die Gesamtgasmenge erhöht, jedoch der Primärimpuls des Treibstrahls entsprechend der Energiebilanz stark geschwächt. Dies bedingt insbesondere bei den keramischen Filterkerzen, die einen hohen Durchströmungswiderstand aufweisen, eine zu geringe Abreinigungsintensität. Bedingt durch das Freistrahlsprinzip sind hohe Ausgangsdrücke nötig, die etwa das 2-fache des Systemdrucks betragen. Demgegenüber werden aber nur Überdrücke von wenigen Prozent des Ausgangsdrucks in der Kerze erzielt, so daß die Effizienz des Verfahrens sehr gering ist. Insbesondere bei Hochdruckanwendungen wie der Kohlevergasung mit Systemdrücken bis 40 bar ist ein enormer energetischer und apparativer Aufwand für die Bereitstellung des Abreinigungsgases notwendig.

Im großtechnischen Maßstab werden die einzelnen Filterkerzen zu Reihen oder Clustern zusammenfaßt. Infolge von Rohrleitungsverlusten wird die Abreinigungsintensität schon im Verteilersystem stark abgeschwächt. Aufgrund der insgesamt geringen Abreinigungsintensität wird der Staub nur teilweise abgelöst, bekannt unter dem Schlagwort „patchy cleaning“. Eine Erhöhung des Ausgangsdrucks führt bei der Einzelkerzenabreinigung zu ungünstigen Druck- und Geschwindigkeitsprofilen entlang der Filterkerze. Während man im Bereich des Kerzenbodens höhere Abreinigungsintensitäten erzielt, können die erforderlichen Abreinigungskräfte im kritischen Einlaßbereich häufig nicht aufgebracht werden / Mai 1995, Mai 1996, Leibold 1998 /.

Weiterhin unterliegen die Filterelemente im Betrieb einer hohen mechanischen, thermischen und chemischen Beanspruchung, die im Extremfall zum Bruch der Filterkerze führen kann

/ Mitchell 1997, Leibold 1998 /. Dadurch kann staubbeladenes Rohgas ungereinigt die Filterstufe passieren und zur Beeinträchtigung bzw. Schädigung nachgeschalteter Anlagenkomponenten führen. Im Falle der o. g. Kohleverstromungsprozesse mit einer Gasturbine nach der Hochtemperaturfilterstufe muß die Gesamtanlage aufgrund eines Kerzenbruchs abgefahren werden, was zu unnötigen Stillstandszeiten führt. Der Markt verlangt deshalb nach Lösungen, die eine Aufrechterhaltung des Anlagenbetriebs erlauben / Mitchell 1997, Shell 1993 /.

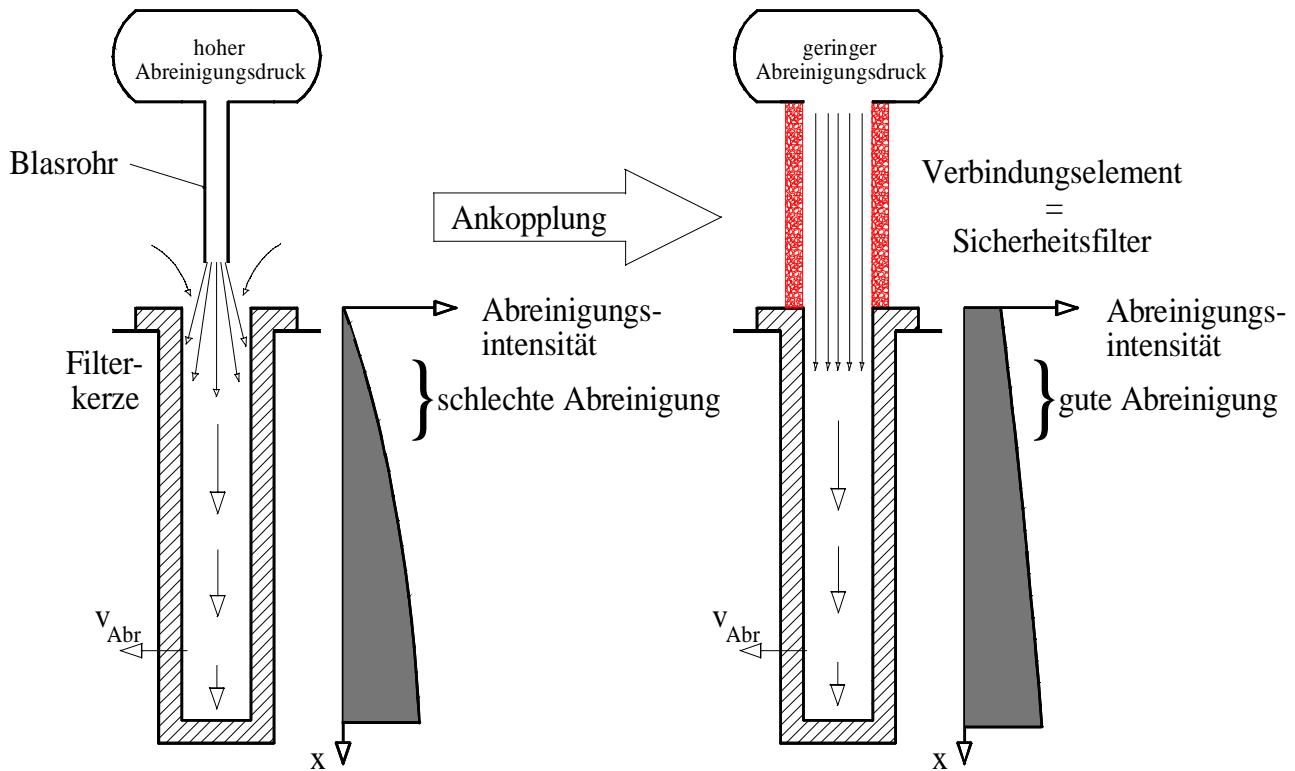
## **2 Prinzip der CPP – Abreinigung**

Durch direkte Kopplung der Abreinigungseinheit mit einer oder mehreren Filterkerzen über ein poröses Verbindungselement kann einerseits die Abreinigungsintensität auch an problematische Stäube (z.B. klebrige Stäube aus der thermischen Abfallbehandlung) angepaßt werden, andererseits fungiert dieses Element als integriertes Sicherheitsfilter. Bei der Einzelkerzenabreinigung kann das Verbindungselement und das Sicherheitsfilter als Einheit ausgeführt werden. Für die Abreinigung von Kerzengruppen, -reihen oder -clustern werden Sicherheitsfilter und Verbindungselement getrennt ausgeführt. In diesem Fall ist das Sicherheitsfilter direkt an die Kerze adaptiert. Die Freischaltung des Abreinigungsgasstroms bzw. des Reingasstroms im Filtrationsfall ermöglicht das poröse Verbindungselement als strömungsdynamisches Schaltelement.

Die Untersuchungen in der vorliegenden Arbeit wurden an kornkeramischen Filterkerzen durchgeführt, sind aber ebenso auf bspw. faserkeramische Filtermedien zu übertragen. Im folgenden wird zunächst das neue Abreinigungsverfahren vorgestellt.

### **2.1 CPP – Abreinigungssystem für Einzelkerzen**

Der Grundgedanke des verbesserten Abreinigungssystems liegt in der direkten Kopplung der Abreinigungsströmung mit der Durchströmung der Filterkerze, also sozusagen in einer Zwangsführung der Strömung. Dadurch wird bei der CPP – Abreinigung der statische Überdruck in der Filterkerze direkt mit der Strömung aufgeprägt. Im Gegensatz hierzu wird bei der Jet-Pulse – Abreinigung der Überdruck aus der kinetischen Energie des Freistrahls gewonnen. **Abbildung 2-1** zeigt den Übergang vom konventionellen Jet-Pulse – auf das CPP – Verfahren.



**Abbildung 2-1:** Schematischer Vergleich der konventionellen und der angekoppelten Druckimpulsabreinigung im Fall der Einzelkerzenabreinigung

Bei der konventionellen Jet-Pulse – Abreinigung an der Einzelkerze herrscht am Eintritt des Freistrahls in die Filterkerze aufgrund der nicht gekoppelten Systeme praktisch Systemdruck. Der Überdruck in der Filterkerze entsteht erst durch Umwandlung von dynamischen in statischen Druck. Die Höhe des Überdrucks wird bei gegebener Filterkerze einerseits durch den Strömungsimpuls am Blasrohr, also durch die Ausströmgeschwindigkeit und den Massenstrom, und andererseits durch die Geometrie der Anordnung bestimmt. Die Ausströmgeschwindigkeit ist jedoch auf Schallgeschwindigkeit limitiert. Eine weitere Erhöhung des Strömungsimpulses ist nur über eine Erhöhung des Vordrucks bzw. eine Vergrößerung des Blasrohrdurchmessers möglich. Bezüglich der Geometrie erhält man die höchsten Überdrücke in der Filterkerze, wenn der Freistrahlskegel die Filterkerzenöffnung überdeckt. Dies führt dazu, daß bei zunehmendem Blasrohrdurchmesser das Blasrohr immer näher an die Filterkerze rückt, bis es schließlich bei gleichem Innendurchmesser wie die Filterkerze direkt auf der Filterkerze aufsitzt. Dies stellt den Extremfall der angekoppelten Druckimpulsabreinigung dar. Führt man nun das Blasrohr als poröses Element aus, kann die Filtrationsströmung dieses Element passieren. Hierbei tritt ein zusätzlicher Druckverlust auf. Im Fall eines Kerzenbruchs fungiert das Element gleichzeitig als Sicherheitsfilter. Bei der Abreinigung entweicht ein Teil des Abreinigungsgases bereits hier.

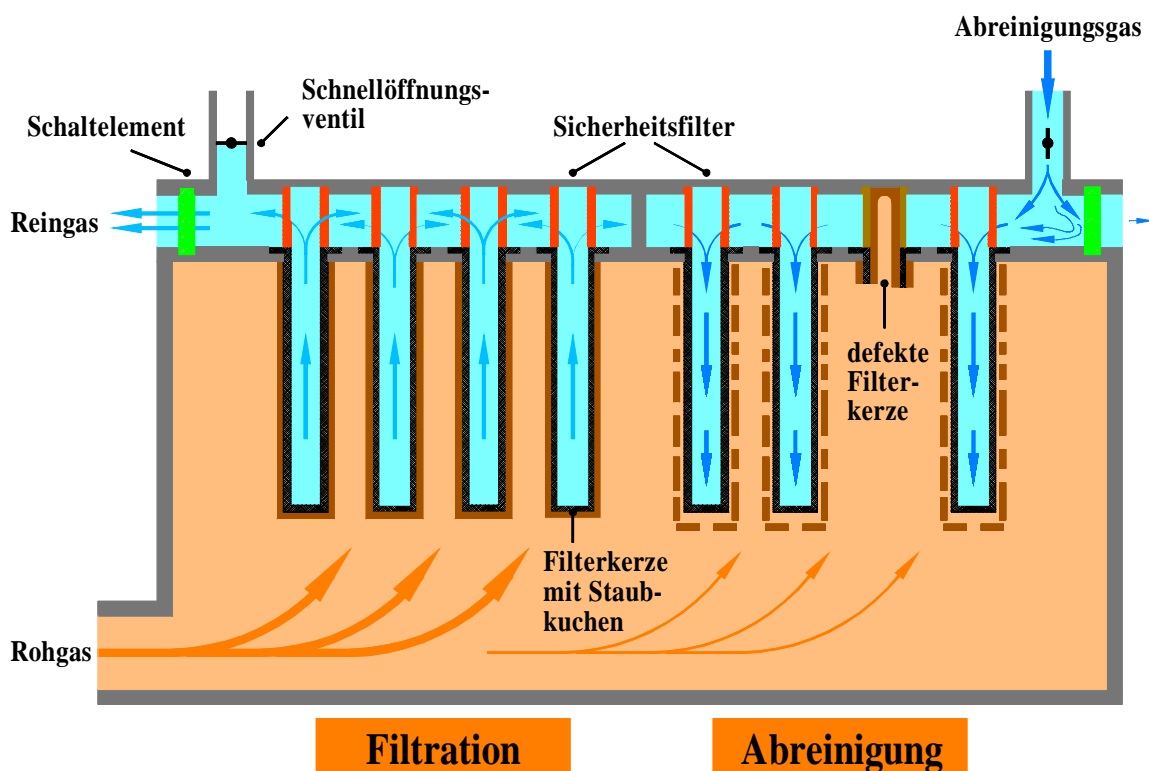


## 2.2 CPP – Abreinigungssystem für Kerzengruppen

Bei Großanlagen ist eine direkte Ankopplung an jede einzelne Filterkerze praktisch nicht möglich. **Abbildung 2-2** zeigt den schematischen Aufbau des CPP – Abreinigungssystems für Mehrkerzenanlagen. Die Filterkerzen sind in Gruppen zusammengefasst. Die Gruppierung der Filterkerzen wird durch die räumliche Auftrennung des Reingasbereichs in mehrere Zellen erreicht. Jede Filterkerze ist mit einem individuellen Sicherheitsfilter bestückt. Das Abreinigungsventil trennt den Reingasraum vom Vorlagebehälter für Abreinigungsgas. Als Abreinigungsgas kann sowohl Fremdgas (z.B. Luft, N<sub>2</sub>, Dampf) oder auch gereinigtes Produktgas eingesetzt werden. In der weiterführenden Reingasleitung ist ein sog. Schaltelement eingebaut.

### Normalbetrieb

Bei der Filtration (**Abbildung 2-2 links**) durchströmt das zu reinigende Gas zunächst die Filterkerze, anschließend das Sicherheitsfilter und zuletzt das Schaltelement. Der gegenüber der konventionellen Jet-Pulse – Abreinigung zusätzliche Anfangsdruckverlust durch Sicherheitsfilter und Schaltelement ist gering.



**Abbildung 2-2:** Schematische Darstellung des CPP – Abreinigungssystems für Kerzengruppen

Zur Abreinigung (**Abbildung 2-2 rechts**) wird das Abreinigungsventil geöffnet und somit der Reingasraum mit dem Vorlagebehälter verbunden. Das darin gespeicherte Abreinigungsgas steht unter einem gegenüber dem Systemdruck um lediglich 0,5 – 1,0 bar erhöhten Druck. Der Reingasraum wird dadurch kurzzeitig auf ein höheres Druckniveau gebracht. Um den notwendigen Massenstrom zu erreichen, ist die Abreinigungsleitung und das Abreinigungsventil ausreichend dimensioniert. Damit die Strömung bevorzugt durch das Sicherheitsfilter in die Filterkerzen gelangt und dort zur Abreinigung der Staubschicht führt, ist das Sicherheitsfilter leicht durchströmbar, während das Schaltelement im Gegensatz zur Filtration jetzt einen hohen Widerstand aufweist. Zur Erzielung der Schaltcharakteristik wird ein Kanalsystem eingesetzt, das bei der Filtration laminar und bei der Abreinigung turbulent durchströmt wird.

### **Störfallbetrieb (Kerzenbruch)**

Bei einem Kerzenbruch (**Abbildung 2-2 rechts**) gelangt Rohgas aufgrund der Widerstandsverminderung an dieser Stelle mit hoher Anströmgeschwindigkeit in das Sicherheitsfilter. Dieses hat nun zunächst die Aufgabe, einen vorgegebenen Reingasstaubgehalt einzuhalten. Hierzu muß das Sicherheitsfilter eine entsprechend hohe Abscheideleistung aufweisen. Aufgrund der hohen Anströmgeschwindigkeit gelangt der Staub tief ins Filtermedium. Das Sicherheitsfilter verstopft innerhalb kurzer Zeit und bringt diesen Teilstrom zum Erliegen. Damit der Staub bei der folgenden Abreinigung nicht wieder ausgetragen wird, wird ein Filterelement mit Tiefenfiltercharakteristik eingesetzt, das den Staub sicher einspeichert. Ein weitgehender Staubaustrag hätte einen erhöhten Verlust an Abreinigungsgas an dieser Stelle und somit eine geringere Abreinigungsintensität an den noch intakten Filterkerzen der betroffenen Gruppe zur Folge. Durch die Blockade des Sicherheitsfilters werden die verbliebenen intakten Kerzen der betroffenen Kerzengruppe mit unverminderter Intensität abgereinigt.

In **Tabelle 2-1** sind die Anforderungen an die Einzelkomponenten, die aus der Funktionsweise resultieren, zusammengefaßt.

**Tabelle 2-1:** Anforderungen an Sicherheitsfilter und Schaltelement bei der CPP – Abreinigung

	Sicherheitsfilter	Schaltelement
<b>Filtration</b>	niedriger Druckverlust	niedriger Druckverlust
<b>Abreinigung</b>	niedriger Druckverlust	hoher Druckverlust
<b>zusätzlich bei Kerzenbruch</b>	ausreichende Abscheideleistung Tiefenfiltercharakteristik sichere Blockade	

### 3 Experimentelles

#### 3.1 Filterkerzen

Die Untersuchungen wurden an der Faser/Kornkeramik DIA-SCHUMALITH F40 und an der Korn/Kornkeramik DIA-SCHUMALITH 10-20 durchgeführt. Geometrie und filtertechnische Daten der beiden Filterkerzentypen sind in der nachstehenden **Tabelle 3-1** gegenübergestellt.

**Tabelle 3-1:** Geometrie und filtertechnische Daten der beiden verwendeten Filterkerzentypen (Herstellerangaben)

		Faser / Kornkeramik	Korn / Kornkeramik
		DIA-SCHUMALITH F40	DIA-SCHUMALITH 10-20
Aufbau Tragstruktur Filtermembran		SiC-Korn Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Faser / SiC-Korn (einschichtig)	SiC-Korn 3Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·2SiO <sub>2</sub> -Korn (zweischichtig)
Länge	mm	1000	1000
Außendurchmesser	mm	60	60
Innendurchmesser	mm	30	40
Filterfläche	m <sup>2</sup>	0,16	0,188
Einlaßquerschnitt	cm <sup>2</sup>	7,1	12,6
Permeabilität	nPm	250	63
Widerstandsbeiwert K·μ	kPa/(m/s)	10,8	28,6
Druckverlust bei 5 cm/s	Pa	540	1430

### 3.2 Einzelkomponenten des CPP – Abreinigungssystems für Kerzengruppen

Für das neue CPP – Abreinigungsverfahren war die Entwicklung und Erprobung von drei neuen Komponenten notwendig. Erstens ein Sicherheitsfilter (SF), das bei einem Bruch der Filterkerze verstopft und so die folgenden Anlagenkomponenten vor einem Staubdurchbruch schützt. Zweitens ein Schaltelement (SE), das als hydraulischer Schalter wirkt und die Abreinigungsluft in den Reingasraum des Filterbehälters lenkt, bei der Filtration jedoch keine Beeinträchtigung darstellt. Drittens ein Schnellöffnungsventil, das innerhalb weniger Millisekunden einen großen Rohrquerschnitt freigibt und somit der Abreinigungsströmung einen geringen Widerstand entgegensetzt. Diese drei Einzelkomponenten werden mit ihren Variationen im Folgenden näher beschrieben.

#### 3.2.1 Sicherheitsfilter

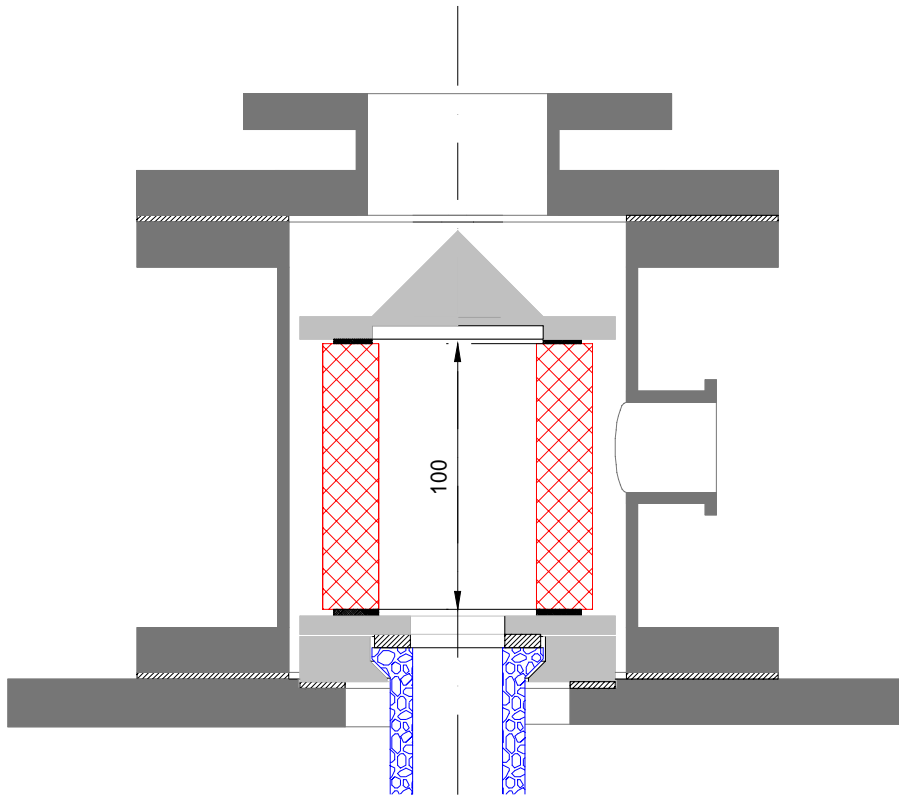
Das Sicherheitsfilter muß sowohl während der Filtration als auch während der Abreinigung einen niedrigen Druckverlust aufweisen, um die Strömung des Filtrations- und Abreinigungsgases möglichst wenig zu behindern. Der zusätzliche Druckverlust durch das Sicherheitsfilter soll laut Kooperationspartner Fa. SCHUMACHER 10 % des Druckverlustes der Filterkerze nicht überschreiten. Im Fall eines Kerzenbruchs muß das Sicherheitsfilter zudem einen Staubdurchbruch zuverlässig verhindern. D.h. es muß sehr schnell irreversibel verstopfen, damit die Abreinigungsintensität der noch intakten Filterkerzen der gleichen Kerzengruppe nicht zurückgeht, und die nachfolgenden Anlagenkomponenten vor einer erhöhten Staubkonzentration geschützt werden. Während der Untersuchungen kamen drei verschiedene Sicherheitsfiltertypen zum Einsatz.

#### **BW0-GF**

Zunächst wurde für die Einzelkerzenanlage für hohen Druck (siehe **Kapitel 3.4.3**) der Prototyp eines Sicherheitsfilters eingesetzt. Es handelte sich hierbei um einen mit Glasfasergewebe beschichteten Kunststoffgranulat-Grundkörper, kurz BW0-GF. Das grobe Kunststoffgranulat übernimmt die Funktion der Tragstruktur. Zur sicheren Verhinderung eines Staubdurchbruchs wurde der Trägerkörper außen mit Glasfasergewebe beschichtet, das einen Faserdurchmesser von 20 bis 30 µm aufweist. Dieses Gewebe wird üblicherweise für Schlauchfilter eingesetzt. Das verwendete Material stellt einen Kompromiß aus gestellten Anforderungen und verfügbaren Materialien dar. Es weist einen Druckverlust in Höhe von etwa einem Drittel der Filterkerze auf. Dieses Sicherheitsfilter wurde bis zu einem Absolutdruck von 7 bar bei Raumtemperatur eingesetzt. Das Material war für Hochtemperaturversuche nicht geeignet.

**Tabelle 3-2:** Technische Kenngrößen des prototypischen Sicherheitsfiltermaterials BW0-GF

Porosität	29 %
Temperaturbeständigkeit max.	80 °C
Abmessung da/di/h	125/100/100 mm
Material	PE-UHMW

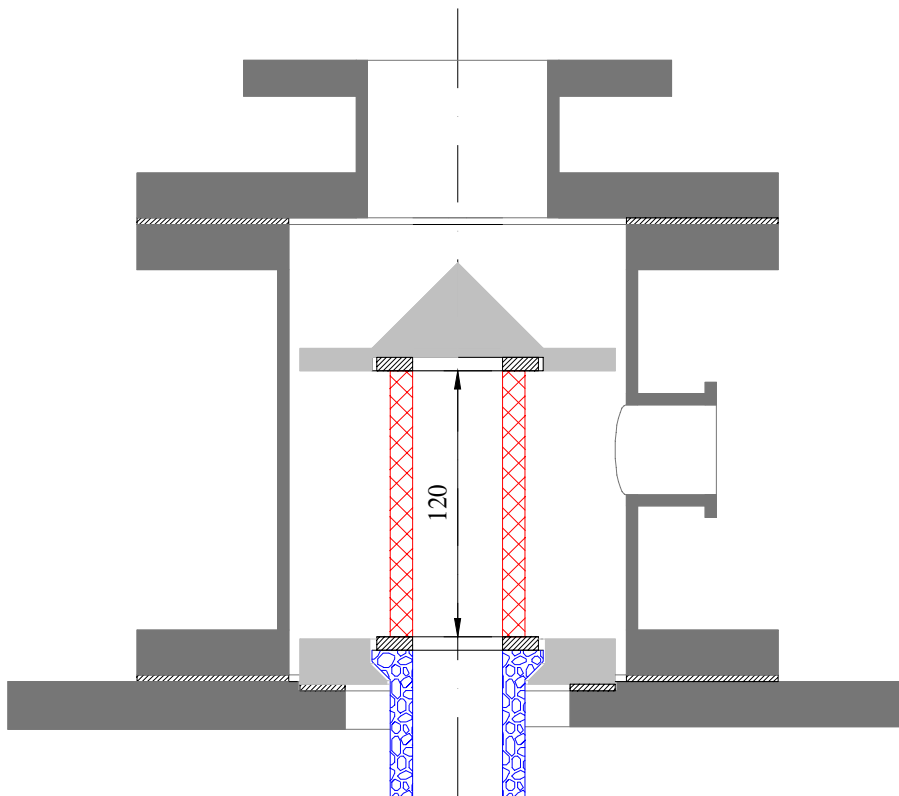
**Abbildung 3-1:** Eingespanntes Sicherheitsfilter BW0-GF und Filterkerze (schematische Darstellung) an der Einzelkerzenanlage für hohen Druck**Schaumkeramik PPI 60**

Für die Hochtemperaturversuche bis 600 °C an den beiden Mehrkerzenanlagen SAMUM und SUT wurde eine einschichtige Schaumkeramik (Spezifikation: PPI 60 = 60 pores per inch = 60 Poren pro Zoll) eingesetzt. Dieses temperaturbeständige Material wies in Plattenform im Vergleich zum Prototyp einen signifikant niedrigeren Druckverlust auf. Es ist sowohl für Heißgas als auch für korrosive Umgebungen geeignet, aber mechanisch nur gering belastbar. Um zylindrische Sicherheitsfilter zu erhalten, wurde die gewünschte Form aus plattenförmigen Polypropylen-schäumen ausgeschnitten und entsprechend keramisiert. Bei den so hergestellten Sicherheitsfilterelementen waren viele Poren verlegt, so daß sich ein deutlich höherer Differenzdruck ergab als nach

den Messungen an den ebenen Proben erwartet wurde. Die Werte sind mit denen des Sicherheitsfilters BW0-GF vergleichbar.

**Tabelle 3-3:** Technische Kenngrößen der Schaumkeramik PPI 60

Poren / Zoll	60
Temperaturbeständigkeit	max. 1000 °C
Abmessung da/di/h	60/40/190 mm
Material	Aluminiumoxid



**Abbildung 3-2:** Eingespanntes Sicherheitsfilter PPI 60 und Filterkerze (schematische Darstellung) an der Einzelkerzenanlage für hohen Druck

### **Kornkeramik SCHUMATHERM 60**

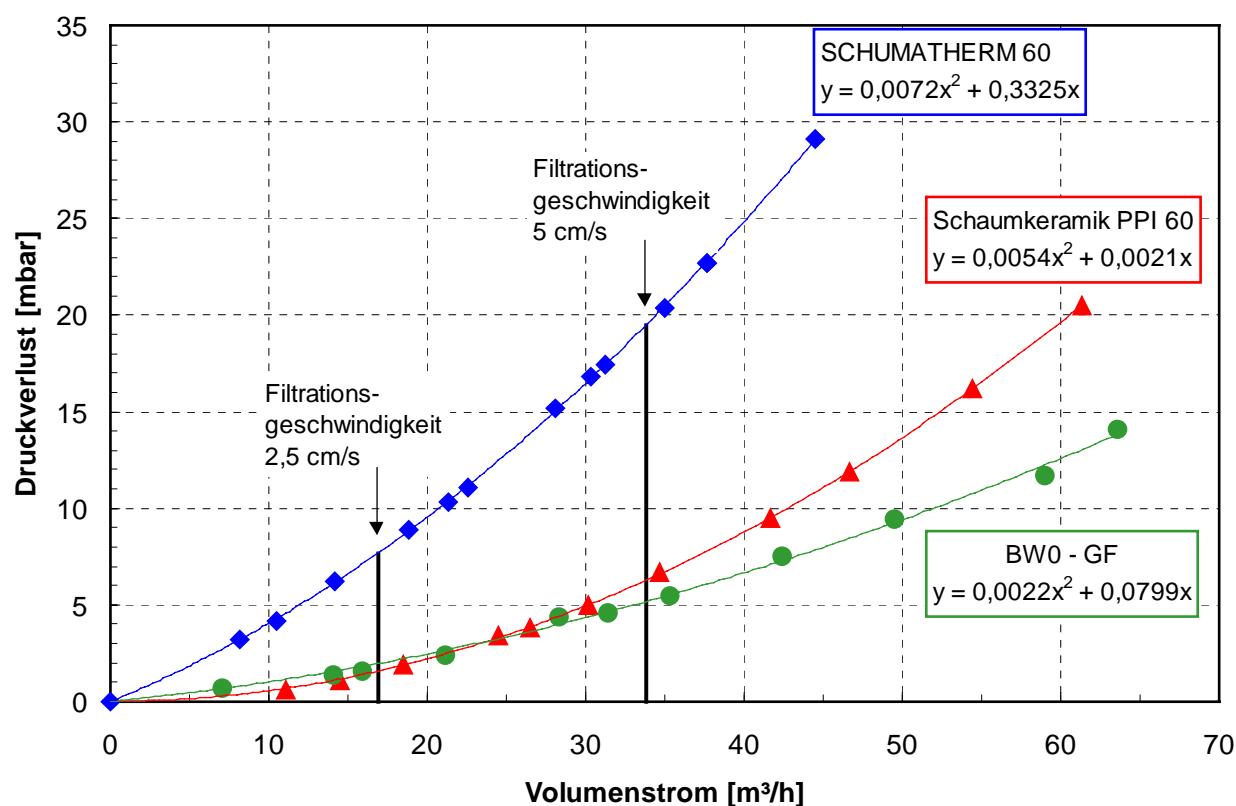
An der Mehrkerzenanlage SUT wurde außerdem noch ein im Sortiment des Industriepartners SCHUMACHER vorhandenes Material auf seine Eignung als Sicherheitsfilter überprüft. Es handelt sich hierbei um eine poröse Schamottekeramik, kurz SCHUMATHERM 60. Das Material wurde aufgrund seiner grobkörnigen Struktur und seiner Eignung als Tiefenfilter bei hohen Temperaturen gewählt. Der Druckverlust des Materials ist im Vergleich zu BW0-GF und Schaum-

keramik PPI 60 hoch. Die mechanische Belastbarkeit liegt bei SCHUMATHERM 60 jedoch sehr viel höher, als bei den beiden anderen Materialien.

**Tabelle 3-4:** Technische Kenngrößen des Sicherheitsfiltermaterials SCHUMATHERM 60

Porosität	35 %
Temperaturbeständigkeit max.	600 °C
Abmessung da/di/h	70/50/190 mm
Material	Schamottekeramik

An der Anlage SUT wurden die beiden für hohe Temperaturen geeigneten Sicherheitsfiltermaterialien nicht wie an den anderen Anlagen mit der Filterkerze über eine Druckplatte und Schrauben verspannt. Sie wurden mit einem Keramikkleber an der Filterkerze befestigt und oben mit Metallplatten abgeschlossen, die ebenfalls angeklebt waren. Im Fall von SCHUMATHERM wurden anstatt der Metallplatten Keramikplatten verwendet. Bei Fa. SCHUMACHER wurde die Kerzen- und Sicherheitsfilterverspannung über eine Gewichtsbelastung realisiert.



**Abbildung 3-3:** Druckverlustkennlinien der eingesetzten Sicherheitsfilter Raumtemperatur, Umgebungsdruck

In **Abbildung 3-3** sind die Druckverlustkennlinien der einzelnen Sicherheitsfilter bei unterschiedlichen Volumenströmen aufgetragen. Hier wird nochmals deutlich, daß die Druckverlustcharakteristik des BW0-GF und der Schaumkeramik nahe beieinander liegen. SCHUMATHERM liegt im Vergleich dazu um den Faktor 3 – 4 höher.

### 3.2.2 Schaltelement

Das Schaltelement ist jeweils im Reingaskanal eingebaut. Es verhindert, daß während der Abreinigung Gas in den Reingaskanal entweichen kann, anstatt in die Filterkerzen zu strömen. Um das zu gewährleisten, muß das Schaltelement bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten, wie sie bei der Abreinigung herrschen, einen hohen Widerstand erzeugen. Während der Filtration, bei der am Schaltelement wesentlich geringere Strömungsgeschwindigkeiten vorliegen, soll es jedoch der Strömung nur einen sehr geringen Widerstand entgegensetzen, so daß der Gesamtdruckverlust der Anlage niedrig bleibt.

Als Schaltelement wurde sowohl an der Einzelkerzenanlage (siehe **Kapitel 3.4.3**) als auch an den beiden Mehrkerzenanlagen SAMUM (siehe **Kapitel 3.5**) und SUT (siehe **Kapitel 3.6**) ein Katalysatorträger mit 1 · 1 mm – Kanälen verwendet. Der Außendurchmesser des Elementes betrug je nach Anlage 30 – 40 mm und die Höhe 20 – 40 mm. Für die Versuche an der Mehrkerzenanlage SUT wurde zusätzlich eine sehr grobporige Schaumkeramikplatte (PPI 20) eingesetzt. Das Katalysatorträgermaterial konnte hier aufgrund anlagenbedingter Gegebenheiten nicht mit dem erforderlichen Durchmesser von 80 mm in die Reingasleitung eingebaut werden, sondern nur mit einem maximalen Außendurchmesser von 40 mm. Es erzeugte dadurch bei der angestrebten Filtrationsgeschwindigkeit von 5 cm/s im Filtrationsfall einen für das Gebläse der Anlage zu hohen Druckverlust. Die Schaumkeramik PPI 20 hingegen konnte mit einem Außendurchmesser von 80 mm und einer Höhe von 15 mm in die Reingasleitung eingebaut werden und erlaubte den Filtrationsbetrieb mit einem akzeptablen Druckverlust.

### 3.2.3 Schnellöffnungsventil

Das Schnellöffnungsventil hat die Aufgabe den gesamten Rohrquerschnitt der Abreinigungsstrecke innerhalb von 20 – 50 ms vollständig freizugeben und so schnell wie möglich wieder zu schließen. Der Unterschied zu den bisher für die Abreinigung mittels Freistrahls verwendeten Ventilen besteht hauptsächlich im zu öffnenden Querschnitt. Die bisher eingesetzten Ventile hatten einen Durchmesser von 6 – 20 mm. Für die CPP – Abreinigung muß das Ventil einen Durchmesser von mindestens 80 mm besitzen. Die Abreinigungsvorrichtung ist hier direkt mit der Reingasseite des Filterbehälters über eine große Zuleitung gekoppelt. So wird dem System der zur Abreinigung

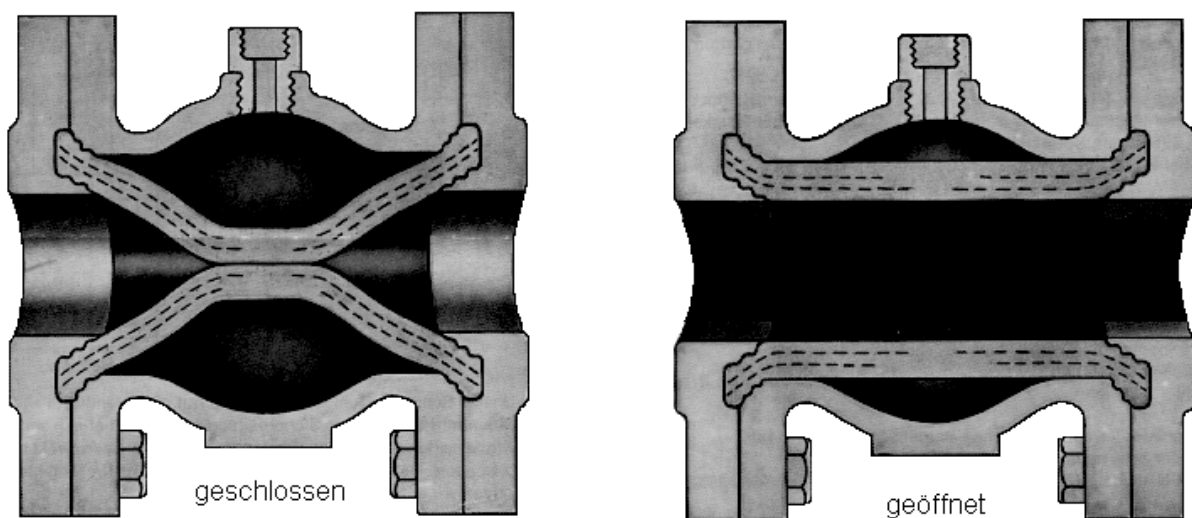


notwendige Spüldruck direkt aufgeprägt und dadurch die Abreinigungsintensität erhöht. Verluste durch Strömung und Druckumwandlungen, wie sie bei der Freistrahlabreinigung mehrfach auftreten, entfallen.

Ventile, die einen so großen Querschnitt in der gewünschten Zeit freigeben und gleichzeitig ohne Umbau immer wieder ausgelöst werden können, sind kommerziell nicht erhältlich. Daher wurden die beiden in den Versuchen verwendeten Ventile selbst entwickelt, bzw. angepaßt.

### Quetschventil

Das am häufigsten eingesetzte Ventil war ein selbst entwickeltes Quetschventil. Kommerziell erhältliche Quetschventile werden in der Industrie zur schnellen Abschottung von Rohrleitungen, z.B. bei Staubexplosionen eingesetzt. Sie bestehen aus einem Gehäuse, einer Manschette aus Elastomer mit Gewebeeinlage und zwei Flanschen zum Verspannen der Manschette. Das Ventil wird geschlossen, indem man die Manschette von außen mit Druckluft beaufschlagt und geöffnet, indem man die Manschette wieder entlastet (siehe **Abbildung 3-4**).



**Abbildung 3-4:** Quetschventil (schematische Darstellung)

Im Vergleich zur handelsüblichen Version besitzt das neuentwickelte Ventil eine wesentlich flexiblere Naturgummimanschette, die beim Öffnungsvorgang schneller zurückfedert und so den Querschnitt schneller freigibt. Um eine optimale Mischung zwischen Elastizität und mechanischer Festigkeit zu erreichen, ist die Manschette nur in den Außenbereichen mit einer Gewebeeinlage verstärkt. In der Mitte fehlt diese Gewebeeinlage und die Manschette ist hier dünner. Damit erreicht man zusätzlich eine gute Dichtigkeit des Ventils. Am Umfang wurden drei große Magnetventile mit

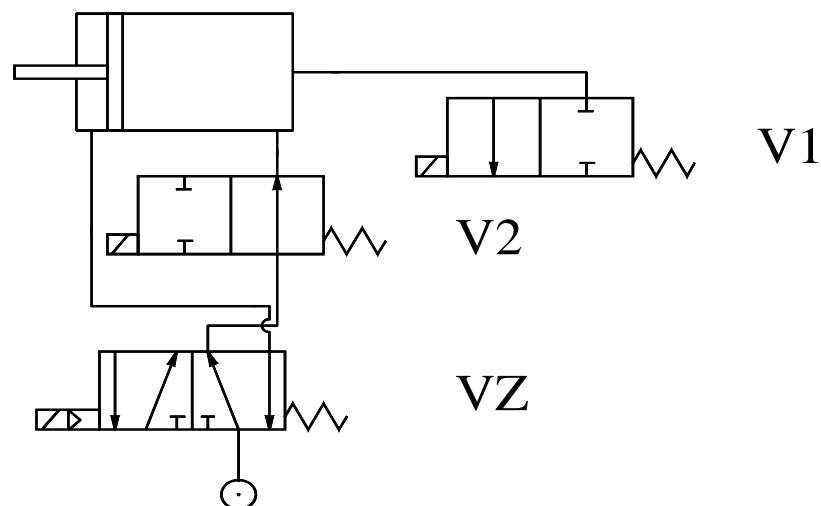
einem Durchmesser von 16 mm angebracht, die gleichzeitig öffnen und so den Ringraum sehr schnell entlasten. Handelsüblich ist nur ein einziges Ausströmventil mit geringerem Querschnitt vorhanden.

Aufgrund der Naturgummimanschette dürfen am Quetschventil nur Temperaturen bis 80 °C herrschen, da das Gummi ansonsten zu weich wird und reißt. Andere kommerziell erhältliche Manschettenmaterialien, die bei Temperaturen bis maximal 150 °C eingesetzt werden können, sind nicht flexibel genug, um eine schnelle Öffnung und gute Dichtigkeit zu garantieren. Sie verformen sich zudem schneller plastisch. Deshalb wurde das Quetschventil an den Mehrkerzenanlagen in einem Abstand von 1 bis 2 m vom Reingasbehälter angebracht und teilweise zusätzlich von außen mit Luft gekühlt. Da die Manschette trotz der Kühlung ein Verschleißteil ist, wurde an der Mehrkerzenanlage SAMUM noch ein zweites schnellöffnendes Ventil getestet.

### Schieber

Hierbei handelt es sich um einen kommerziell erhältlichen, pneumatisch gesteuerten Schieber mit 80 mm Innendurchmesser. Der Zylinder, über den der Schieber bewegt wird, ist doppelt wirkend ausgeführt und für einen Steuerdruck von bis zu 10 bar geeignet. Das Öffnen und Schließen wird über ein 5/2-Wege Ventil (VZ) gesteuert.

### Antriebszylinder Schieber



**Abbildung 3-5:** Ansteuerung des schnellöffnenden Schiebers

Der Schieber wurde so verändert, daß der Antriebszylinder über einen großen Auslaßquerschnitt (Nennweite 40) ohne Gegendruck öffnen kann. Dies wird durch den Einbau von zwei

2/2-Wege Ventilen in die Ansteuerung des Zylinders erreicht (siehe **Abbildung 3-5**). Ventil V1 sorgt dafür, daß der Zylinder ohne Gegendruck zurückfahren und das Ventil somit schnell öffnen kann. Ventil V2 verhindert ein Durchströmen des Zylinders vom Druckluftnetz aus während der Abreinigung.

### 3.3 Schnelle Druckmeßtechnik

Sowohl bei der konventionellen als auch bei der angekoppelten Druckimpulsabreinigung starrer Filterkerzen wird auf der Reingasseite der Filterkerze kurzzeitig ein Überdruck gegenüber der Rohgasseite aufgebaut. Mit dem Anstieg des Differenzdrucks ist eine Erhöhung der Durchströmungsgeschwindigkeit der Kerzenwand und des Staubkuchens verbunden. Die tatsächliche Durchströmungsgeschwindigkeit als Maß für die Abreinigungsintensität ist jedoch wegen des instationären Vorgangs beim Druckimpuls meßtechnisch nur schwer zugänglich, so daß üblicherweise Differenzdrücke zur Charakterisierung herangezogen werden /Mai 1996 /. Zur Korrelation der beiden Größen wird von einem linearen Zusammenhang gemäß der Darcy-Gleichung ausgegangen.

$$\Delta p = K \cdot \mu \cdot u \quad (\text{Gleichung 1})$$

Zur Bestimmung der Abreinigungsintensität während des Abreinigungsvorgangs wurden an den Anlagen die zeitlichen Druckverläufe auf Rein- und Rohgasseite gemessen. Hierzu dienten piezoresistive Absolutdruckaufnehmer (Fa. ENDEVCO) mit einem Meßbereich von 7 bar (siehe **Tabelle 3-5**). Zur Messung und Speicherung der Signale wurden digitale Zweikanal-Speicheroszilloskope (Fa. HAMEG, Fa. KIKUSUI) verwendet (siehe **Tabelle 3-6**). Druckaufnehmer und Oszilloskope erlaubten eine zeitliche Auflösung der Druckverläufe bis 8  $\mu$ s pro Meßintervall.

**Tabelle 3-5:** Kennwerte der Absolutdruckaufnehmer ENDEVCO 8530C-100

	<b>ENDEVCO 8530C-100</b>
Meßbereich	100 psia = 7 bar, absolut
Empfindlichkeit	2,25 mV/psi = 32,6 mV/bar
Resonanzfrequenz	500 kHz
Linearität	0,4 % FSO (2)
kombinierte Nichtlinearität & Hysterese	0,5 %
Betriebsbereich	- 18 °C bis 93 °C
Therm. Nullpunktverschiebung	3 % FSO (2, 3)
Temperaturkompensation	3 % FSO (2, 3)
Speisespannung	10 VDC
(2) FSO: full scale output, (3) im angegebenen Betriebsbereich	

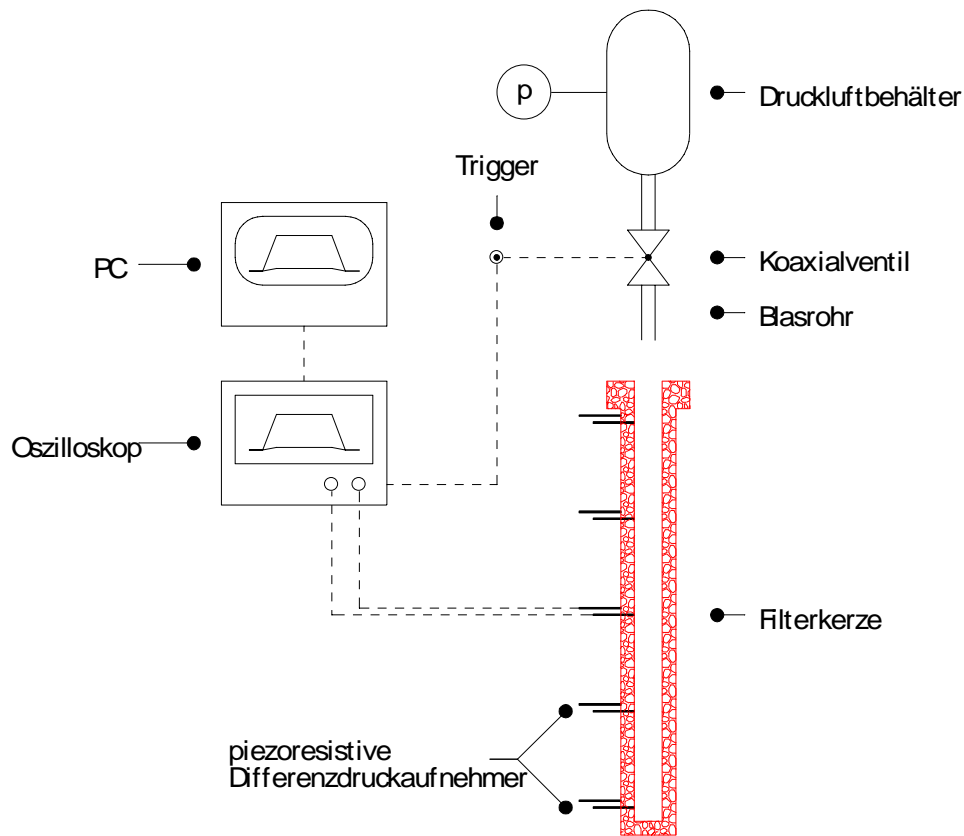
**Tabelle 3-6:** Kennwerte der eingesetzten Oszilloskope HAMEG HM 208 und KIKUSUI COR 5521 U

	<b>HAMEG HM 208</b>	<b>KIKUSUI COR 5521 U</b>
<b>Horizontalverstärkung (X)</b>		
Auflösung (auf 10 cm)	1024 Punkte	4096 Punkte
Zeitbasis pro DIV (= cm)	0,01 µs bis 50 s	0,2 µs bis 5 s
Abtastfrequenz	10 MHz	10 MHz
<b>Vertikalverstärkung (Y)</b>		
Auflösung (auf 10 cm)	256 Punkte	256 Punkte
Anstiegszeit / Überschwingen	17,5 ns / 1 %	17,5 ns / 1 %
Ablenkungskoeffizient pro DIV (= cm)	5 mV bis 20 V	2 mV bis 10 V

### 3.4 Versuchsstände

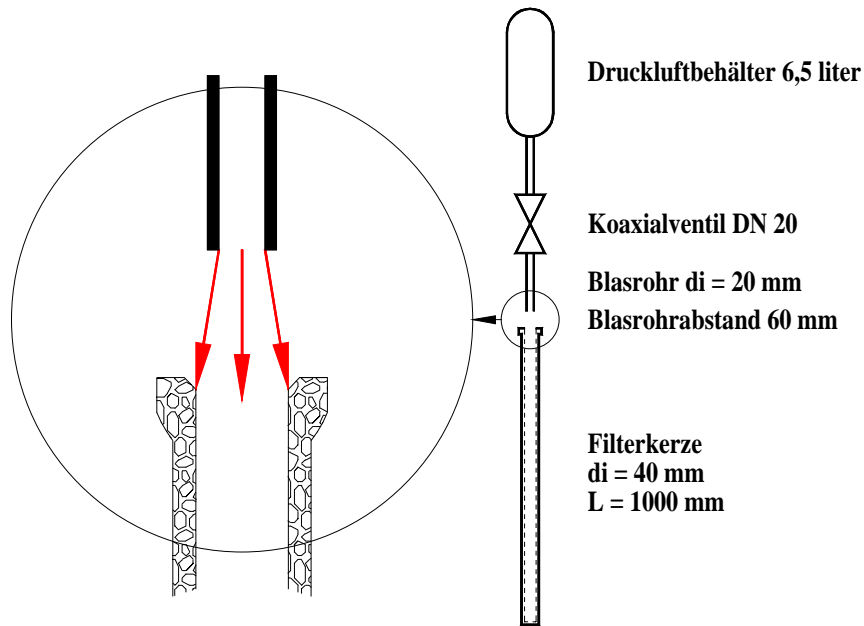
#### 3.4.1 Konventionelle Jet-Pulse – Abreinigung für Einzelkerzen

Um die Durchströmungscharakteristik der Filterkerze beim CPP – Verfahren mit der des Jet-Pulse – Verfahrens vergleichen zu können, wird im folgenden zunächst die Versuchsanordnung für das konventionelle Verfahren beschrieben (siehe **Abbildung 3-6**).



**Abbildung 3-6:** Schematischer Aufbau zur Messung des Differenzdruckprofils entlang der Filterkerze bei der Einzelkerzenabreinigung mit konventionellem Jet-Pulse

Für die Messungen zur Durchströmungscharakteristik wurde eine Filterkerze des Typs DIA-SCHUMALITH F40 mit einer Länge von 1000 mm und einem Innen-/Außendurchmesser von 40/60 mm verwendet. Zur Bestimmung der axialen Verteilung des statischen Drucks im Inneren der Filterkerze wurden piezoresistive Differenzdruckaufnehmer in Durchgangsbohrungen in verschiedenen Höhen entlang der Filterkerze eingebracht. Zur späteren rechnerischen Ermittlung des Differenzdrucks über der Kerzenwandung wurden zusätzlich Druckaufnehmer in gleicher Höhe direkt auf der Oberfläche positioniert. Bezugsdruck ist jeweils der Umgebungsdruck außerhalb der Filterkerze. Digitale Speicheroszilloskope ermöglichten die gleichzeitige Erfassung der Meßsignale. Zur Auswertung der Meßsignale wurden diese über eine Schnittstelle mit einem PC ausgelesen. Um hydraulische Verluste zu minimieren, wurden Druckluftbehälter und Blasrohr über der Filterkerze axial fluchtend positioniert und das Blasrohr möglichst kurz gewählt. Der Abstand von Blasrohr und Filterkerze wurde so eingestellt, daß der Freistrahlskegel die Einströmöffnung genau überdeckt. Dies ergab bei den Versuchen die höchsten statischen Drücke in der Filterkerze (siehe **Abbildung 3-7**).

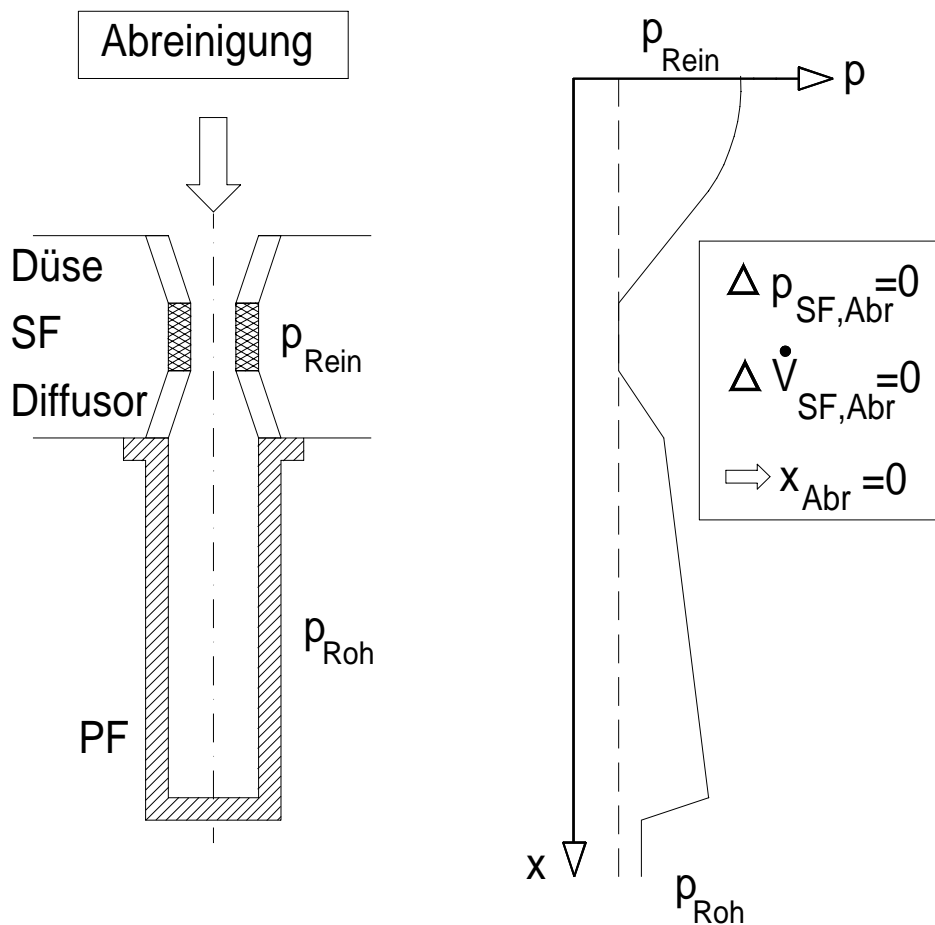


**Abbildung 3-7:** Schematische Darstellung der Anordnung bei der Druckimpulsabreinigung

### 3.4.2 CPP – Abreinigung für Einzelkerzen

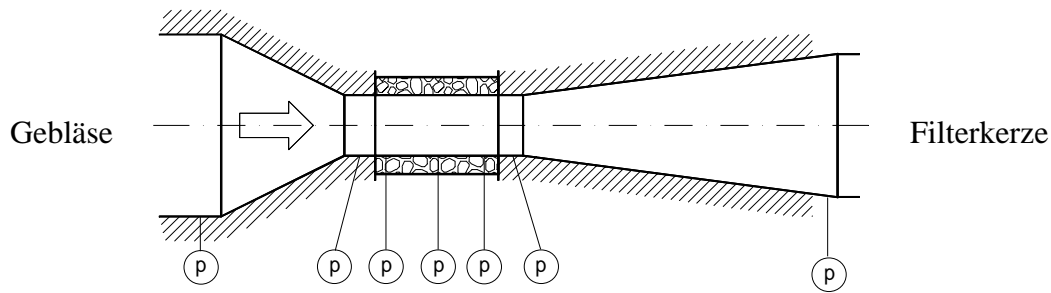
Das in **Kapitel 2.1** beschriebene CPP – Verfahren für die Einzelkerze weist zwei Problem-  
punkte auf. Zum einen bedingt das poröse Verbindungselement während der Filtration einen zusätz-  
lichen Druckverlust, zum anderen strömt Abreinigungsluft während des Abreinigungsvorgangs  
ungenutzt durch das Verbindungselement in den Reingasraum. Sowohl der Druckverlust als auch  
der Verlust an Abreinigungsgas sollten so gering wie möglich gehalten werden. Dies führt zu einem  
Zielkonflikt, da die erste Anforderung einen niedrigen Widerstandsbeiwert, die zweite jedoch einen  
hohen Widerstandsbeiwert des porösen Elements erfordert. Um die beiden Anforderungen zu ent-  
koppeln eignet sich ist folgende Lösung.

Zur Minimierung des Verlustes an Abreinigungsgas ist die Ausführung des Verbindungs-  
elementes als Venturi-Düse und der Einbau eines porösen Elements in der Venturi-Kehle sinnvoll.  
Dadurch wird an dieser Stelle der statische Druck in dynamischen Druck umgewandelt. Im  
anschließenden Diffusor wird die Strömung wieder verlangsamt und dadurch statischer Druck bis  
zu einem gewissen Grad zurückgewonnen. **Abbildung 3-8** zeigt den schematischen Aufbau des  
Verbindungselementes und den zugehörigen prinzipiellen Verlauf des statischen Drucks entlang des  
Elements. Das poröse Element kann nun hinsichtlich seines Druckverlustes und seiner  
Abscheideleistung als Sicherheitsfilter optimiert werden, unabhängig vom Verlust an  
Abreinigungsluft.



**Abbildung 3-8:** Verlustminimierung bei der Einzelkerzenabreinigung durch Ausführung des Sicherheitsfilters als Venturi-Düse

Durch geeignete Formgebung der Venturi-Düse kann der Differenzdruck in der Venturi-Kehle zum Reingasraum auf Null gebracht werden, die Düse läßt sich sogar ansaugend betreiben. Gleichzeitig ist jedoch der Druckverlust bezüglich der Abreinigungsströmung in axialer Richtung zu berücksichtigen. Den Quotienten von statischem Druck nach dem Diffusor zu statischem Druck vor Venturi-Düse nennt man Diffusor-Wirkungsgrad. Zur Bestimmung des örtlichen Druckverlaufs wurde der statische Druck mittels mehrerer Wandinbohrungen entlang des Verbindungselementes bei stationärer Durchströmung ermittelt (siehe **Abbildung 3-9**).



**Abbildung 3-9:** Schematischer Aufbau zur Messung des Druckverlaufs in der Venturi-Düse mit integriertem Sicherheitsfilter

Bei Großanlagen ist eine direkte Ankopplung an jede einzelne Filterkerze praktisch nicht möglich. Alle weiteren Untersuchungen verfolgten das Konzept der CPP – Abreinigung für die Kerzengruppe.

### 3.4.3 CPP – Abreinigung für Kerzengruppen – Einzelkerzenanlage für hohen Druck

Die Einzelkerzen-Versuchsfilteranlage für hohen Druck ermöglicht strömungsdynamische und filtrationstechnische Untersuchungen an einer Einzelkerze bei einem Systemdruck bis zu 7 bar absolut im geschlossenen Kreislauf. Die Anlage läßt sich in Filtrationskreislauf und Abreinigungszweig unterteilen. Der schematische Aufbau der Anlage, sowie die technischen Kenngrößen sind in **Abbildung 3-10** und **Tabelle 3-7** wiedergegeben.

#### Filtrationskreislauf

Die Förderung des Gases im Kreislauf erfolgt über einen Injektor. Der Treibstrahl wird hierbei vom Kompressor erzeugt. Die Druckluft wird in drei Stufen gefiltert, so daß sie völlig trocken und ölfrei in den Filtrationskreislauf gelangt. Der für die unterschiedlichen Betriebsdrücke und Volumenströme notwendige Vordruck wird über einen Druckminderer vor dem Injektor eingestellt. In **Abbildung 3-11** ist der Injektor detailliert dargestellt. Nach dem Düsenmund wird über den ersten Stutzen die Kreislauf Luft angesaugt. Damit werden ca. zwei Drittel der Luft im Kreis gefördert. Um die Zerstäubung zu verbessern, wurde der zunächst vorgesehene Diffusor durch ein Rohr mit 8 mm Durchmesser ersetzt. Durch die Verengung wird an der Staubzugabestelle eine wesentlich höhere Geschwindigkeit erreicht und der Staub besser dispergiert. Der Staub wird mittels eines Spiraldosierers am zweiten Stutzen aufgegeben. Er wird an der Rohrverengung, an der je nach Filtrationsgeschwindigkeit Strömungsgeschwindigkeiten bis zu 170 m/s auftreten, dem Gasstrom zugemischt. Im anschließenden Carnot-Diffusor wird der Staub aufgrund der hohen



Turbulenz dispergiert. Vorratsbehälter und Antriebsmotor für die Spirale des Dosierers sind in einem Druckbehälter untergebracht.

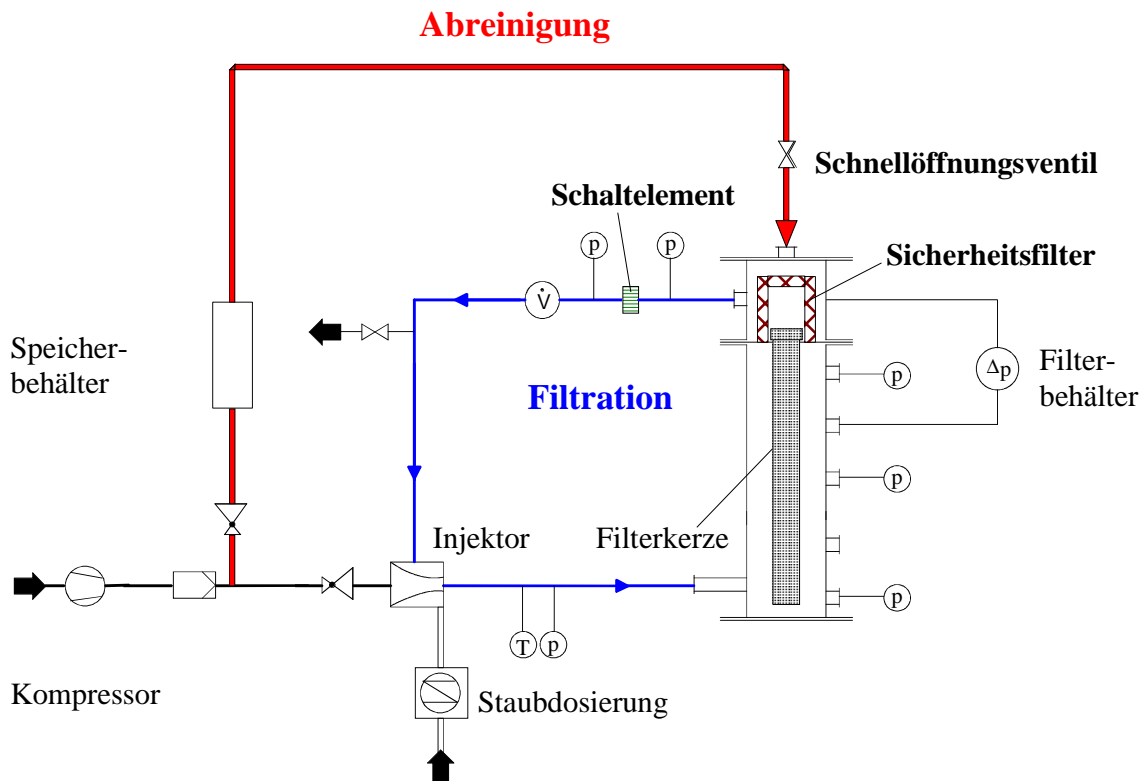


Abbildung 3-10: Schematische Darstellung der Einzelkerzenanlage für hohen Druck

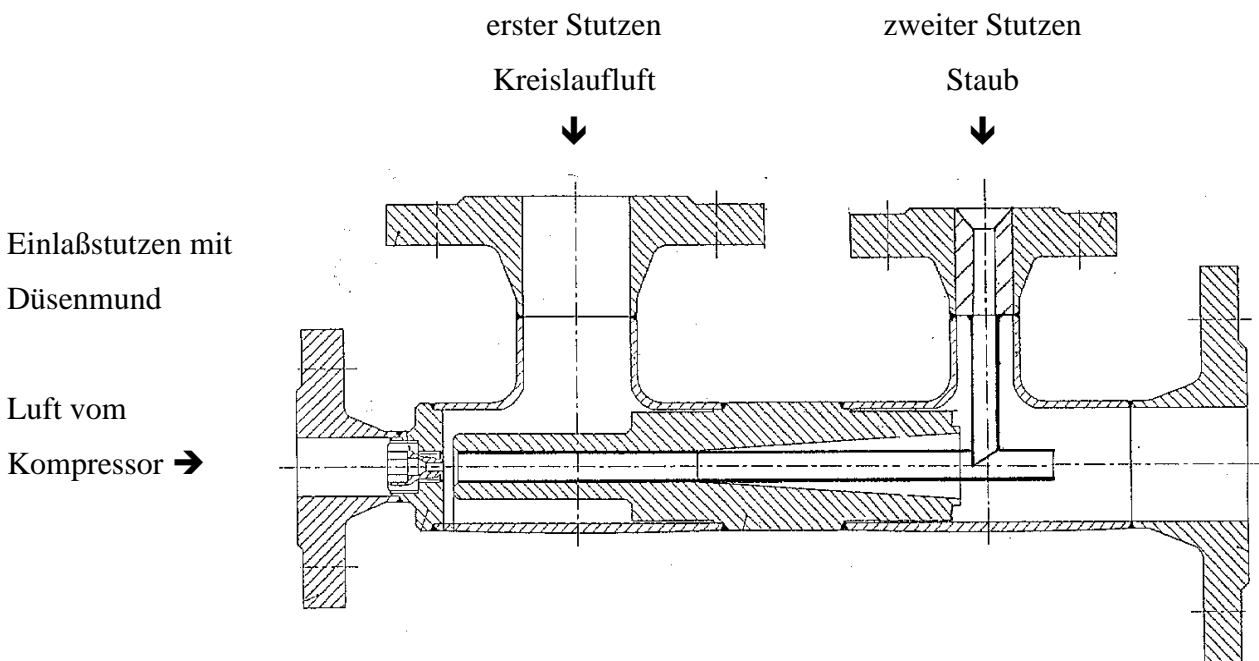


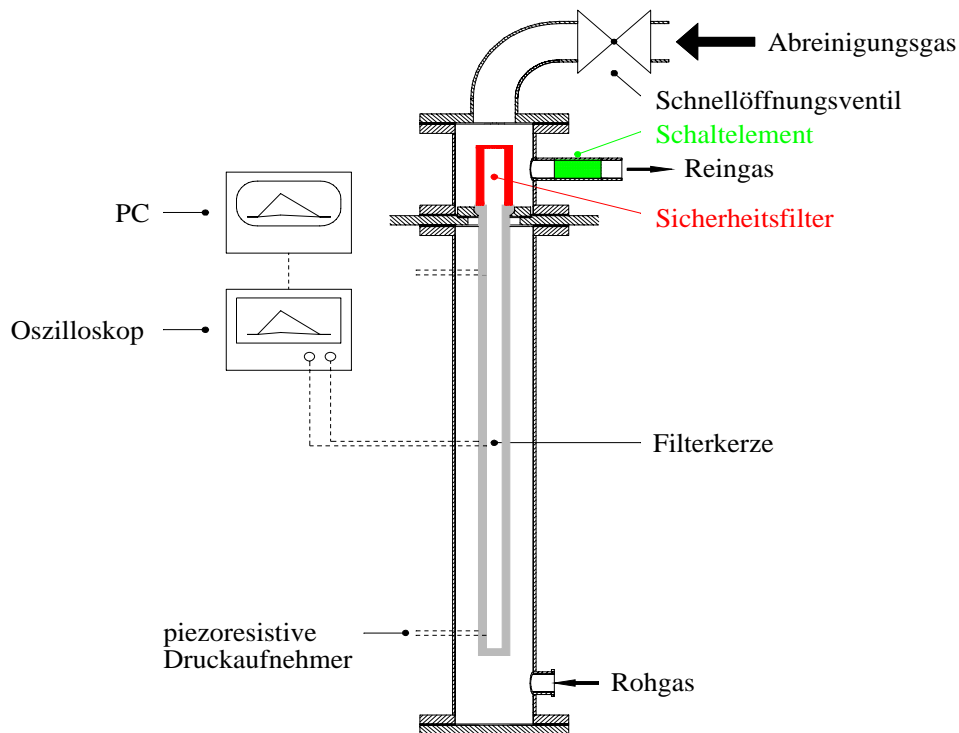
Abbildung 3-11: Injektor

**Tabelle 3-7:** Technische Kenngrößen der Einzelkerzenanlage für hohen Druck

Betriebstemperatur	25 °C
Betriebsdruck	1 – 6 bar
Anzahl der Filterkerzen	1
Filterkerzenabmessungen: Länge: Außendurchmesser: Filterfläche:	1000 mm 60 mm bis 0,19 m <sup>2</sup>
Filtrationsgeschwindigkeit	2,5 – 5 cm/s bei 1 bar absolut Betriebsdruck  2,5 cm/s bei bis zu 7 bar absolut Betriebsdruck
Volumenstrom	max. 32 m <sup>3</sup> /h
Staub	BaSO <sub>4</sub>
Mittlere anzahlbezogene Partikelgröße	d <sub>50,0</sub> = 0,4 µm; polydisperse Verteilung
Staubkonzentration	1 – 10 g/m <sup>3</sup>

Im Rohgaskanal werden Betriebsdruck und –temperatur gemessen. Der Rohgasstrom gelangt tangential in den Filterbehälter. In der Trägerplatte, die Roh- und Reingasraum trennt, hängt eine Filterkerze. Das Sicherheitsfilter im Reingasraum ist zusammen mit der Filterkerze verspannt (siehe **Abbildung 3-1** und **Abbildung 3-2**). Der Druckverlust über Filterkerze und Sicherheitsfilter wird mit einem Differenzdruckmeßgerät bestimmt. Das Schaltelement befindet sich im Reingaskanal. Danach erfolgt die Volumenstrommessung mit einem Flügelradanemometer. Anschließend wird die überschüssige Luft über ein Handventil ausgeschleust. Eine Regelung des Volumenstromes während der Filtration erfolgt nicht, da er sich im Verlauf des Differenzdruckanstieges an der Filterkerze nur geringfügig ändert. Am Filterbehälter und an der Filterkerze, sowie an den Rohren vor und nach dem Schaltelement sind Meßstellen für piezoresistive Druckaufnehmer vorhanden, so daß die schnellen Druckänderungen während der Abreinigung gemessen werden können (siehe **Abbildung 3-12**).

Die ersten Versuche an der Anlage wurden im off-line Betrieb ohne Sicherheitsfilter und Schaltelement durchgeführt, um Verluste auszuschließen und die maximale Abreinigungsintensität zu erhalten. Zur Abschottung des Reingasrohres während der Abreinigung wurde eine Klappe an der Stelle des Schaltelementes eingesetzt. Während der Filtration war die Klappe um 90° gedreht, also vollständig offen.



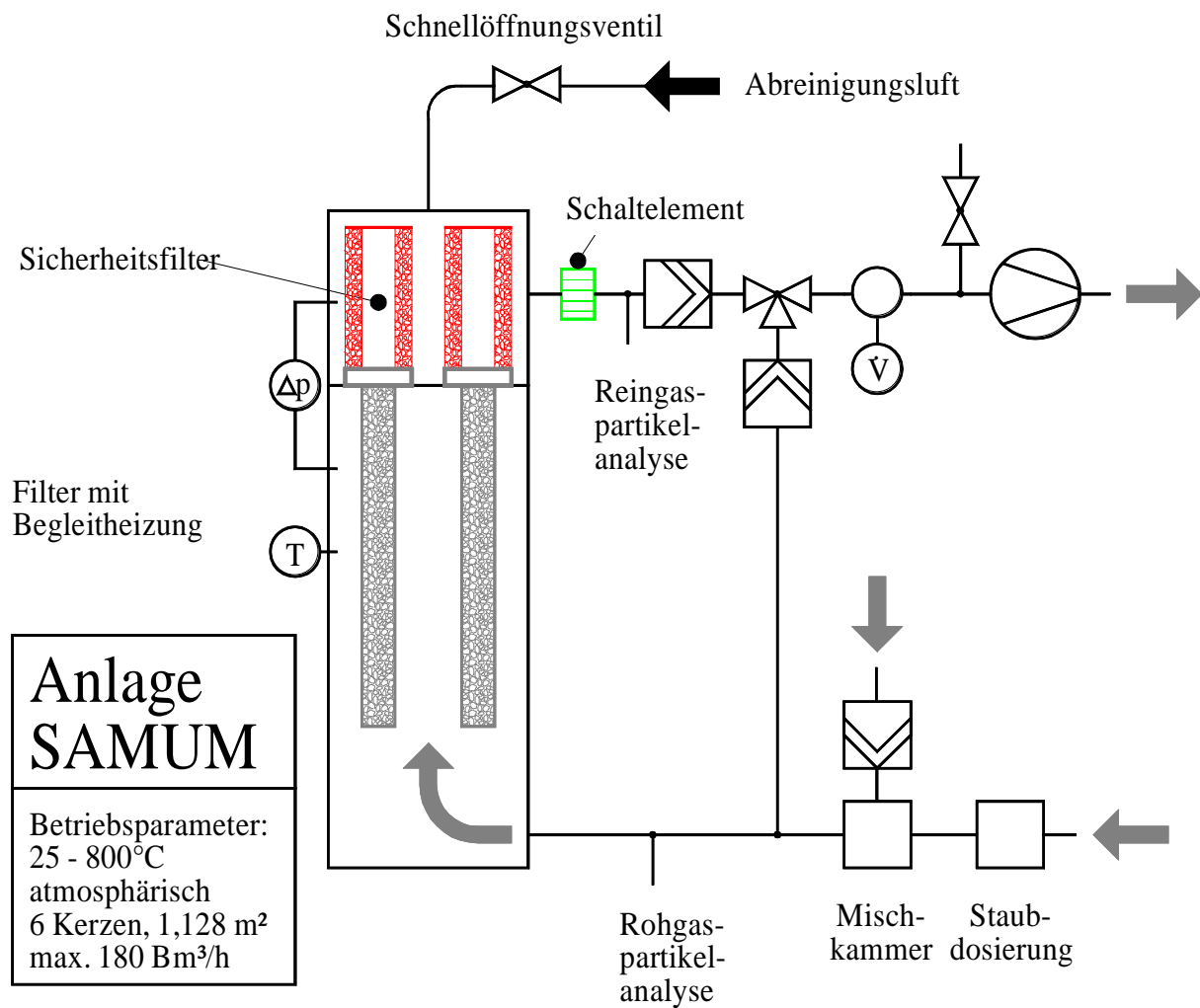
**Abbildung 3-12:** Schematische Darstellung des Meßaufbaus für schnelle Druckmessungen an der Filterkerze während der Abreinigung

### Abreinigungsweig

Zwischen dem Kompressor und dem Injektor wird ein Teilstrom entnommen, um den Abreinigungsbehälter zu füllen. Das Volumen des Abreinigungsbehälters mit 750 Litern ist in Bezug auf die Größe des Filterbehälters weit überdimensioniert. Er wurde gewählt, um während des Abreinigungsverfahrens einen möglichst konstanten Abreinigungsdruck zu gewährleisten. Der gewünschte Abreinigungsdruck wird über einen Druckminderer eingestellt. Bei Erreichen eines vorgegebenen Druckverlustes über der Filterkerze wird das Schnellöffnungsventil kurzzeitig geöffnet und damit eine Abreinigung ausgelöst. Hierbei strömt Abreinigungsluft in den Reingasraum. Bedingt durch die behinderte Abströmung steigt der Druck im Reingasraum. Entsprechend den Widerstandsverhältnissen von Reingaskanal mit Schaltelement und Sicherheitsfilter plus Filterkerze teilt sich die Abreinigungsluft auf. Zur Minimierung von hydraulischen Verlusten besteht die Abreinigungsstrecke aus Rohren mit 80 mm Durchmesser. Die Steuerung der Abreinigung und die Datenspeicherung übernimmt ein Computer. Das dazu notwendige Programm ist mit der Software DASYLAB programmiert.

### 3.5 CPP – Abreinigung für Kerzengruppen – Mehrkerzenanlage SAMUM

Die Hochtemperatur-Technikumsfilteranlage SAMUM\* ermöglicht Untersuchungen zum Zeitverhalten keramischer Filterkerzen bei kontinuierlicher Filtration von Feinstäuben und unterschiedlichen Abreinigungsmethoden bis zu Temperaturen von 800 °C. Der schematische Aufbau der Anlage und technische Kenngrößen sind in **Abbildung 3-13** und **Tabelle 3-8** wiedergegeben.



**Abbildung 3-13:** Schematische Darstellung der Mehrkerzenanlage SAMUM

\* SAMUM = heißer, trockener Wind in der Zentralsahara  
 Akronym; bezeichnet einer Tradition des Instituts folgend die Versuchsstände mit Namen von Luftströmungen in der Atmosphäre

**Tabelle 3-8:** Technische Kenngrößen der Hochtemperatur-Technikumsfilteranlage SAMUM

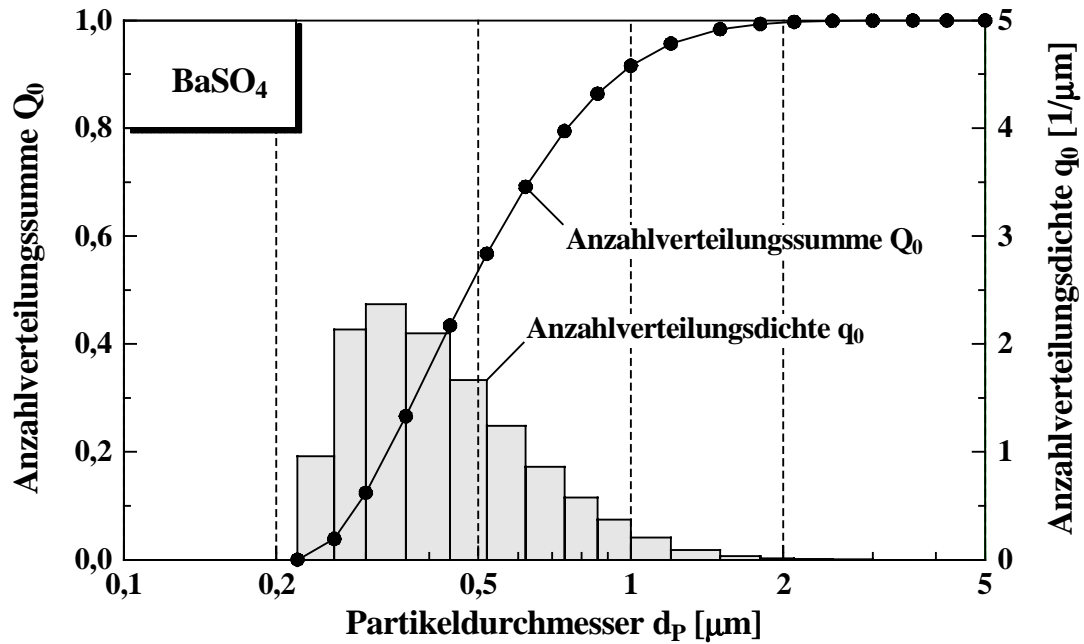
Betriebstemperatur	max. 800 °C
Betriebsdruck	1 bar absolut, atmosphärisch
Anzahl der Filterkerzen	1 – 7
Filterkerzenabmessungen: Länge: Außendurchmesser: Filterfläche / Filterkerze:	500, 1000 mm 60 mm bis 0,19 m <sup>2</sup>
Filtrationsgeschwindigkeit	1 – 10 cm/s
Volumenstrom	max. 65 m <sup>3</sup> /h
Staub	BaSO <sub>4</sub>
Mittlere anzahlbezogene Partikelgröße	d <sub>50,0</sub> = 0,4 µm, polydisperse Verteilung
Staubkonzentration	1 g/m <sup>3</sup>

Die Filteranlage ist für offenen Saugbetrieb ausgelegt. Die nachstehende Beschreibung der einzelnen Anlagenkomponenten erfolgt entlang des Gasstromes.

### Rohgasstrecke

Die Zugabe des Staubes erfolgt wahlweise mittels Bürstendosierer (RBG-1000, Fa. PALAS) oder Banddosierer (BEG-1000, Fa. PALAS). Für die Untersuchungen wurde als Modellstaub chemisch gefälltes Bariumsulfat, sog. "blanc fixe", der Fa. Sachtleben eingesetzt. Die zudosierte Staubmenge wurde so eingestellt, daß sich im Filterraum eine auf den Betriebsvolumenstrom bezogene Staubkonzentration von etwa 1 g/m<sup>3</sup> ergibt. In **Abbildung 3-14** werden die Herstellerangaben zur massenbezogenen Partikelgrößenverteilung sowie daraus berechnete Anzahlverteilungskurven der verwendeten Körnung dargestellt. Die mittlere anzahlbezogene Partikelgröße beträgt 0,4 bis 0,5 µm, die Verteilung ist polydispers.

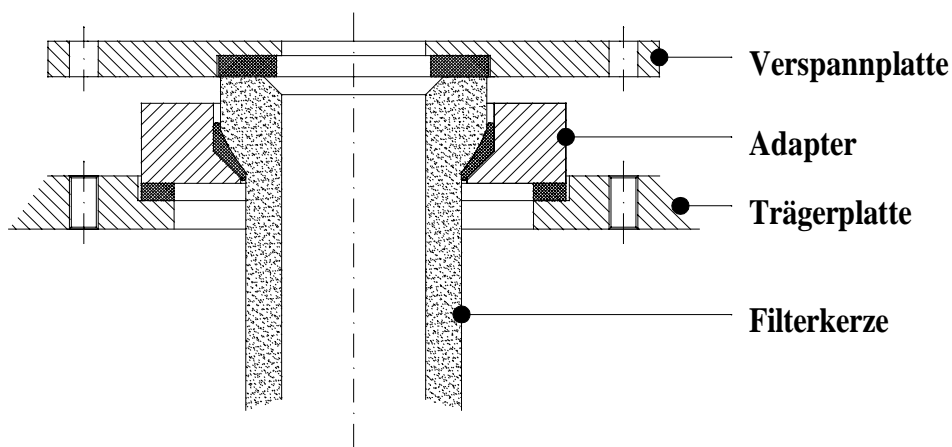
Nach der Staubdosierung wird gefilterte Umgebungsluft bis zum Erreichen des Nennvolumenstroms zugemischt. Danach folgt die Rohgaspartikelanalyse mittels Streulichtpartikelzähler. Damit gemessene mittlere Partikelgrößen stimmen mit denen des Herstellers gut überein, was als Beleg für eine gute Dispergierung gewertet wird. Das staubbeladene Rohgas wird in der Aufheizstrecke auf Solltemperatur aufgeheizt. Die Aufheizstrecke besteht aus einem von außen beheizten metallenen Gasführungsrohr. Der Durchmesser der Aufheizstrecke kann im Hinblick auf einen guten Wärmeübergang an unterschiedliche Volumenströme angepaßt werden, so daß turbulente Strömungsbedingungen herrschen. Die Heizung und Isolierung besteht aus Keramikfasermodulen mit eingebetteten Heizwendeln (FIBROTHAL RAC 200 bzw. HAS 200, Fa. Kanthal).



**Abbildung 3-14:** Herstellerangaben zur Partikelgrößenverteilung des Modellstaubes BaSO<sub>4</sub>

### Filter

Nach der Aufheizstrecke gelangt das Rohgas in den Filterraum. Der Filterbehälter besteht aus zwei zylindrischen Abschnitten, dem Rohgas- und dem Reingasraum. Beide sind durch eine Trägerplatte, die bis zu 7 Filterkerzen von 1 m Länge aufnehmen kann, getrennt. Die Filterkerzen sind über einen speziellen Adapter befestigt, der einen Ausbau der Filterkerze ohne Beschädigung des Staubkuchens ermöglicht (**Abbildung 3-15**). Dadurch können die auf der Filterkerze verbliebenen Staubstrukturen weiter analysiert werden.



**Abbildung 3-15:** Kerzenbefestigung

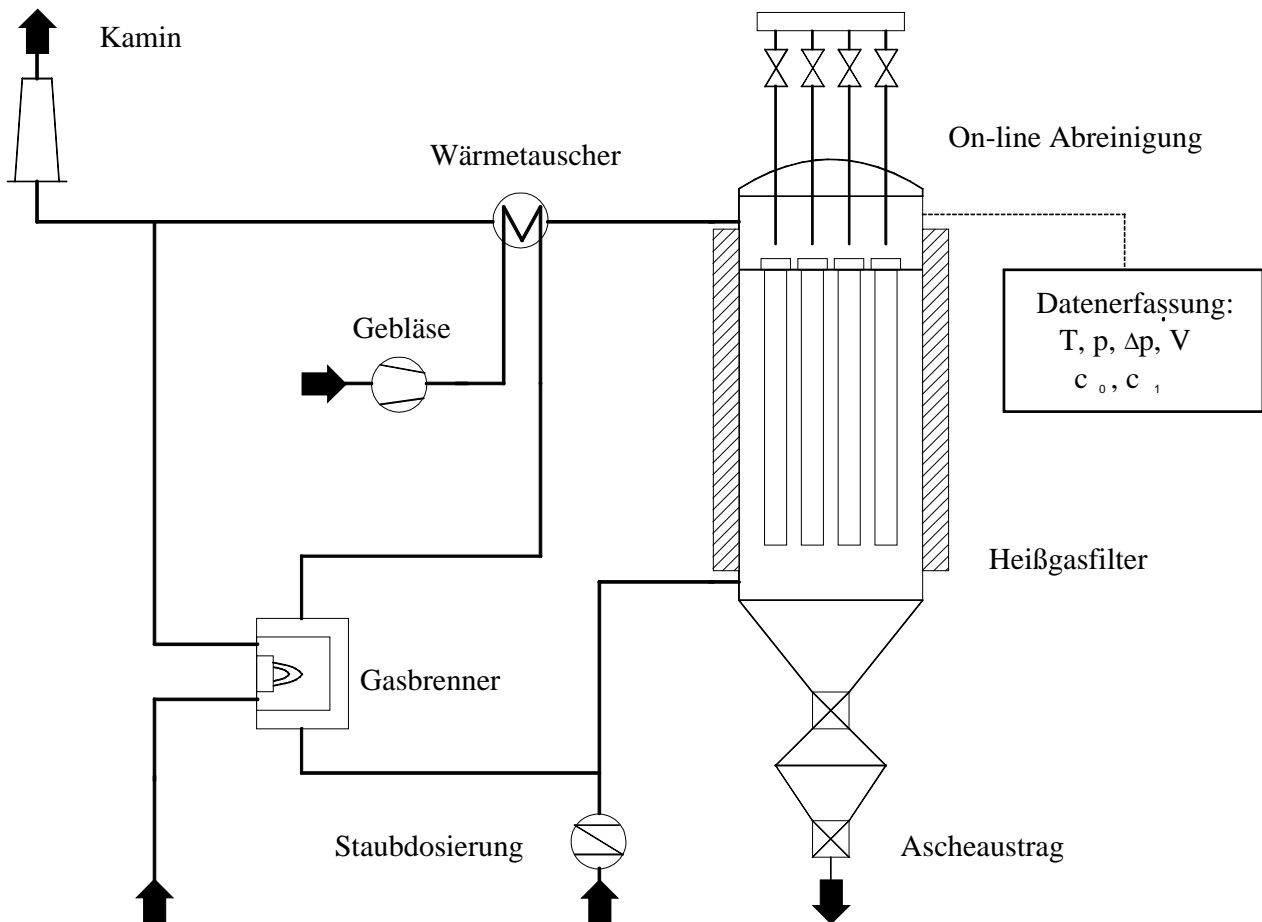
Zur Kompensation von Wärmeverlusten ist das gesamte Filtergehäuse ähnlich wie die Aufheizstrecke von außen mit einer elektrischen Heizung ausgerüstet (FIBROTHAL HAS 200, Fa. Kanthal). Das Rohgas durchströmt die Filterkerze und wird nach Austritt aus dem Filterraum mittels Doppelrohrkühler abgekühlt. Anschließend erfolgt die Reingaspartikelanalyse. Vor der unregulierten Vakuumpumpe (VFT 100, Fa. Rietschle) wird der Volumenstrom mittels Laminar-Flow-Element gemessen und über Zumischung von Fremdluft geregelt.

Regelung der Anlage und Meßwerterfassung erfolgten mittels SPS und PC. Meßgrößen sind der Volumenstrom, der Absolutdruck und die Temperatur an der Volumenstrommeßstelle und im Filterraum sowie der Differenzdruck über der Filterkerze. Die Regelung der Heizungen übernehmen PID-Regler getrennt für die einzelnen Heizzonen. Partikelmessungen im Rohgas- oder Reingaskanal erfolgen unabhängig von der zentralen Meßwerterfassung mit eigenständigen Systemen.

Zur Regelung des Betriebsvolumenstroms wird der gemessene Volumenstrom über das ideale Gasgesetz umgerechnet und ein Kugelhahn im Bypass vor der Vakuumpumpe entsprechend angesteuert. Die Abreinigung wird wahlweise bei Erreichen eines vorgegebenen Differenzdrucks oder zeitgesteuert ausgelöst. Der Bypass zwischen Rohgas- und Reingaszweig erlaubt eine off-line Fahrweise bei der Abreinigung.

### **3.6 CPP – Abreinigung für Kerzengruppen – Mehrkerzenanlage SUT**

Zusätzlich zu den Experimenten an der eigenen Technikumsanlage wurden Untersuchungen an der Heißgasfiltrations-Versuchsanlage des Kooperationspartners Fa. SCHUMACHER durchgeführt, deren Aufbau schematisch in **Abbildung 3-16** dargestellt ist. Diese Anlage dient der Ermittlung des Filtrations- und Abreinigungsverhaltens von bis zu 6 keramischen Filterelementen. Insbesondere lassen sich die Auslegungsparameter für eine großtechnische Filtrationsanlage unter praxisnahen Bedingungen ermitteln. Beim Bau der Anlage wurde auf geometrische Ähnlichkeit zu praxisüblichen Heißgasfilteranlagen geachtet. Außerdem wurden die gleichen Standardkomponenten (z.B. Ventile, Meßumformer) verwendet. Die Testanlage wird grundsätzlich bei Umgebungsdruck betrieben. Für druckbetriebene Anlagen müssen deshalb die Versuchsergebnisse auf die Auslegungsparameter einer Großanlage umgerechnet werden. Im wesentlichen beschränkt sich dies jedoch auf die Festlegung des notwendigen Abreinigungsdruckes.



**Abbildung 3-16:** Schematische Darstellung der Mehrkerzenanlage SUT

Die durch das Seitenkanalgebläse angesaugte Umgebungsluft wird im Wärmetauscher vorgewärmt. Über ein Gasstrahlrohr (Nacherhitzer) wird dem Luftstrom die restliche Energie zugeführt, so daß die gewünschte Betriebstemperatur von maximal 800 °C erreicht wird. Das Gasstrahlrohr besteht aus einem erdgasbetriebenen Gasbrenner, der durch einen Wärmetauscher vom aufzuheizenden Gas getrennt ist. Diese Trennung ist erforderlich, da das zu erheizende Gas einem Überdruck mit zusätzlichen Druckschwankungen aufgrund der Abreinigung der Filterelemente unterworfen ist.

Dem erhitzten Gasstrom wird Staub zudosiert. Das Staubdosiersystem besteht im wesentlichen aus dem Staubdosierbehälter, einer Doppelschnecke und dem nachfolgenden Ejektor. Der Ejektor hat die Aufgabe, die Staubpartikeln im heißen Gas zu dispergieren. Zu Versuchszwecken kann über den Ejektor noch zusätzlich Gas oder Flüssigkeit (z.B. Wasser) beigemischt werden. Dies kann für Untersuchungen zur Korrosionsbeständigkeit erforderlich sein. Da der Treibluftstrahl der Staubdosage und der zudosierte Staub die Gastemperatur reduzieren, ist am Austritt des Nacher-



hitzers eine etwas höhere Temperatur als die gewünschte Betriebstemperatur im Filterbehälter erforderlich.

Im nachgeschalteten Filterbehälter wird der Staub an den keramischen Filterelementen abgeschieden. In den Filterbehälter werden 6 Filterelemente in eine Lochplatte eingebaut. Die Elemente werden von außen nach innen durchströmt. Staubpartikeln werden dabei auf der Filteroberfläche zurückgehalten. Die Abreinigung des angelagerten Staubes erfolgt intervallweise, druck- oder zeitgesteuert, mittels eines Druckimpulses entgegen der Filtrationsrichtung. Dazu ist über jedem einzelnen Filterelement ein Abreinigungsrohr positioniert.

Die Strömungsführung des Rohgases im Filterbehälter ist so gewählt, daß der Staubaustrag bei der Abreinigung unterstützt wird. Mittels eines zentralen Steigrohrs wird der Rohgasstrom zunächst senkrecht in Richtung Lochplatte geführt. Dort wird der Luftstrom umgelenkt, so daß sich die Hauptströmung im Filterbehälter entlang der Filterelemente in Sedimentationsrichtung des abgelösten Staubes ergibt. Hierdurch läßt sich vor allem bei niedrigen Staubbeladungen und feinen Partikeln eine geringere Wiederanlagerung nach dem Abreinigungsvorgang erreichen. Der abgereinigte Staub fällt in den Aschekonus und wird über eine Druck- und Temperaturschleuse periodisch ausgetragen. Mittels einer Förderspirale wird er intervallweise in den Staubdosierbehälter gefördert, so daß sich bezüglich des Staubes ein geschlossener Kreislauf ergibt. Der gereinigte Gasstrom wird im nachgeschalteten Wärmetauscher abgekühlt und dient dabei zur Vorwärmung der angesaugten Umgebungsluft.

Nach Bedarf kann der Ansaugluft zusätzlich Brennerabgas zugemischt werden. So kann neben der Gaszusammensetzung auch die relative Feuchte des Rohgases variiert werden. Wird eine hohe Betriebstemperatur verlangt, die mit dem Gasstrahlrohr nicht mehr erreicht werden kann, so kann der Filterbehälter zusätzlich mittels einer elektrischen Begleitheizung beheizt werden. Das abgekühlte Reingas wird zusammen mit dem verbleibenden Brennerabgas über einen Kamin abgeleitet. Die Pilotanlage ist vollautomatisiert. Dauerversuche können somit problemlos durchgeführt werden. Alle prozeßrelevanten Daten wie Differenzdruck, Volumenstrom und sämtliche Temperaturwerte werden zentral angezeigt und für spätere Auswertungen digital über einen PC sowie auch mittels Schreiber aufgezeichnet.

**Tabelle 3-9:** Technische Kenngrößen der Mehrkerzenanlage SUT

Betriebstemperatur max.	600 °C (max. 800 °C)
Betriebsdruck	1 bar absolut, atmosphärisch
Anzahl der Filterkerzen	6
Filterkerzenabmessungen: Länge: Außendurchmesser: Filterfläche / Filterkerze:	1000 mm (max. 1500 mm) 60 mm bis 0,19 m <sup>2</sup>
Filtrationsgeschwindigkeit	5 cm/s
Volumenstrom	max. 180 m <sup>3</sup> /h
Staub	aus Druckwirbelschichtanlage Grimethorpe, GB
Mittlere anzahlbezogene Partikelgröße	d <sub>50,0</sub> = 1,13 µm, polydisperse Verteilung
Staubkonzentration	30 g/m <sup>3</sup>

Die Kerzenbefestigung erfolgt im Unterschied zu den anderen Anlagen nicht über eine Verschraubung, sondern über eine Gewichtsbelastung mit 5 bis 6 kg.

### **Konventioneller Druckimpuls**

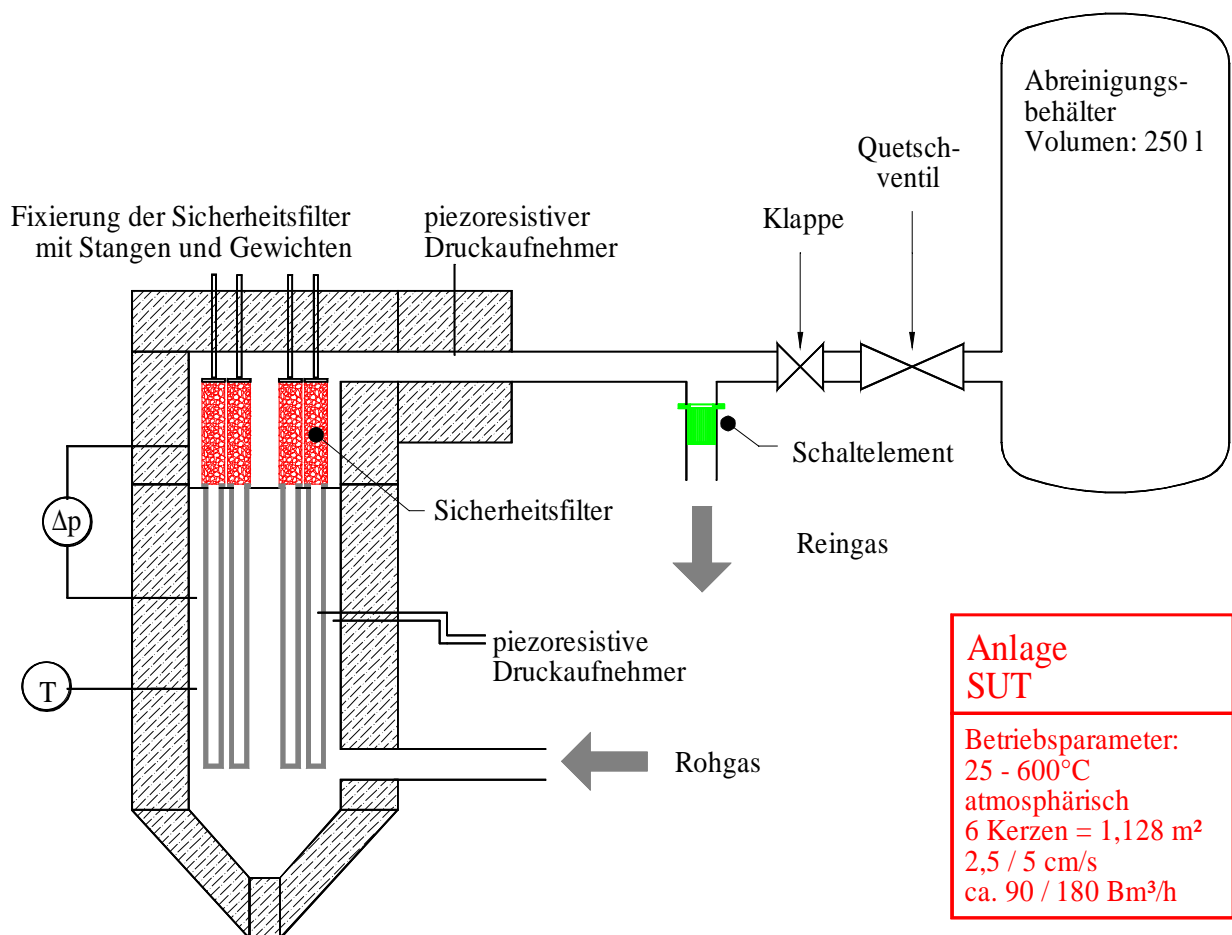
Bei der Abreinigung mit konventionellem Druckimpuls wird Druckluft aus einem Druckluftbehälter über ein Koaxial-Ventil entspannt. Der Druckluftbehälter an dieser Anlage faßt 30 – 60 Liter Druckluft, entsprechend 5 – 10 Liter Druckluft pro Filterkerze. Über ein Blasrohr mit einem Innendurchmesser von 6 mm gelangt das Abreinigungsgas in die Filterkerze. In der Filterkerze wird die Strömung abgebremst und es baut sich ein statischer Überdruck auf. Dieser bewirkt eine Durchströmung der Filterkerze in radialer Richtung nach außen und damit eine Abreinigung des Staubkuchens.

### **Angekoppelter Druckimpuls (CPP)**

Bei der Abreinigung durch angekoppelten Druckimpuls ist der Druckluftbehälter über eine wesentlich größere Zuleitung (Durchmesser 80 mm) mit dem Reingasraum verbunden (siehe **Abbildung 3-17**). Der Druckluftbehälter an der Anlage SUT faßt ein Volumen von 250 Litern. Das schnellöffnende Abreinigungsventil besitzt den gleichen Innendurchmesser von 80 mm wie die Zuleitung. Bei den Versuchen an dieser Anlage wurde das Quetschventil verwendet. Als Hitzeschutz wurde vor dem Abreinigungsventil eine hochtemperaturbeständige Klappe eingebaut, die nur während der Abreinigung kurzfristig geöffnet war. Mit der Öffnung des Ventils wird dem System der zur Abreinigung notwendige Überdruck gegenüber dem Systemdruck direkt aufgeprägt. Die Druckumwandlung und damit verbundenen Umwandlungsverluste des konventionellen Abreini-

gungsverfahrens entfallen hierdurch. Somit wird es möglich, mit wesentlich geringerem Vordruck größere Abreinigungskräfte zu erzeugen, als beim konventionellen Druckimpuls. Man benötigt hier nur noch einen Abreinigungsdruck der um 0,5 – 1,0 bar über dem Betriebsdruck der Anlage liegt, unabhängig von der Höhe des Betriebsdruckes. Bislang liegt der Druckluftverbrauch bei diesem Verfahren mit 20 – 40 Liter pro Kerze noch deutlich höher als bei konventioneller Abreinigung. Die Ursache liegt in der Öffnungs- und Schließcharakteristik des Quetschventils und ist zusätzlich auf ein noch nicht optimiertes Schaltelement zurückzuführen.

An der Anlage wurden die schnellen Druckänderungen während der Abreinigung mit piezoresistiven Druckaufnehmern gemessen. Diese Versuche fanden bei Raumtemperatur statt. Die Druckmeßstellen befinden sich im Reingaskanal, im Rohgasraum und im Kerzeninnern etwa in Kerzenmitte (siehe **Abbildung 3-17**).



**Abbildung 3-17:** Schematische Darstellung der Mehrkerzenanlage SUT mit CPP – Abreinigung

## 4 Untersuchungen an der Einzelkerze

### 4.1 Minimierung des Verlustes an Abreinigungsluft beim CPP – Abreinigungssystem für Einzelkerzen

Abbildung 4-1 zeigt den Druckverlauf in der Venturi-Düse bei stationärer Durchströmung. Zur Korrelation der Werte mit der Position in der Düse ist die Meßanordnung darunter abgebildet. Parameter ist der durchgesetzte Volumenstrom. Mit zunehmendem Volumenstrom steigt der Überdruck am Einlaß der Düse. Vom Eingang bis etwa zur Mitte der Venturi-Kehle liegt der Überdruck bei Werten um Null. Bei niedrigen Volumenströmen steigt er bis zum Ende der Kehle geringfügig an. Bei hohen Volumenströmen hingegen fällt er dagegen stark ab, bedingt durch Strömungsablösungen. Am Ende des Diffusors ergibt sich durchwegs ein Überdruck, der mit dem Volumenstrom ansteigt, mit Werten, die geringer sind als am Eintritt in die Düse.

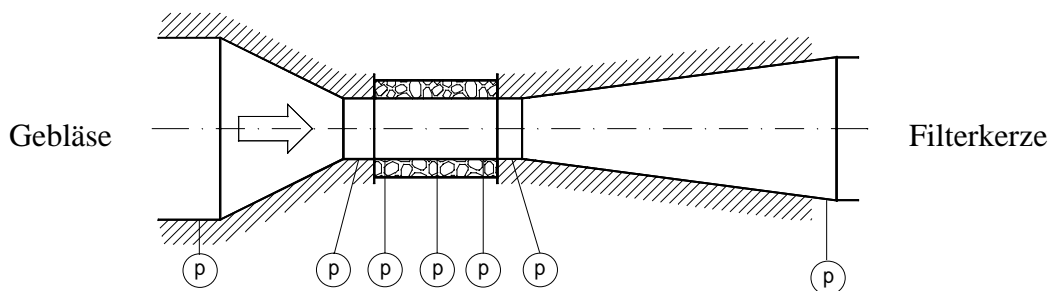
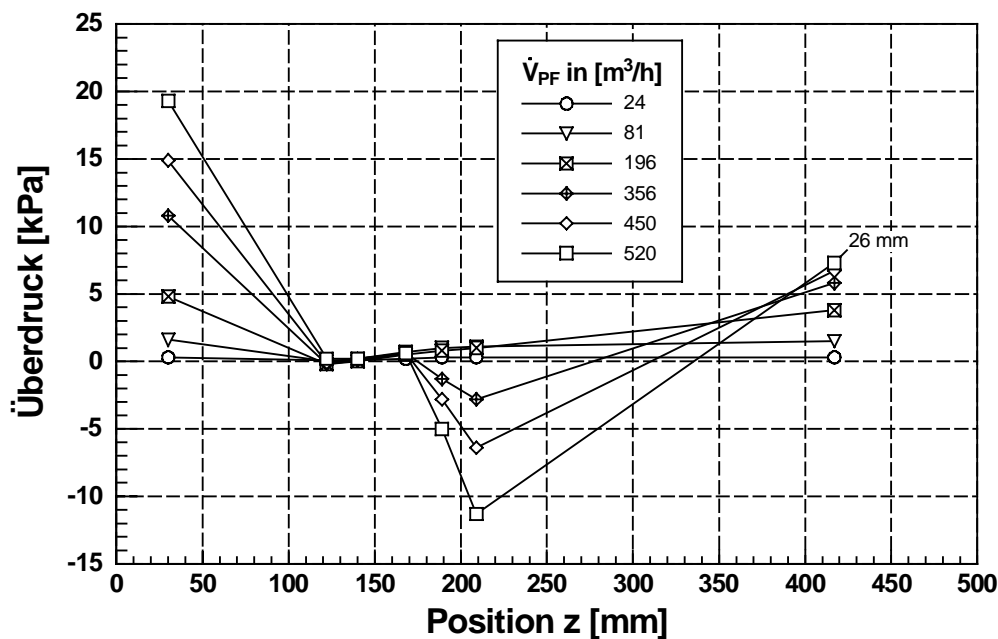
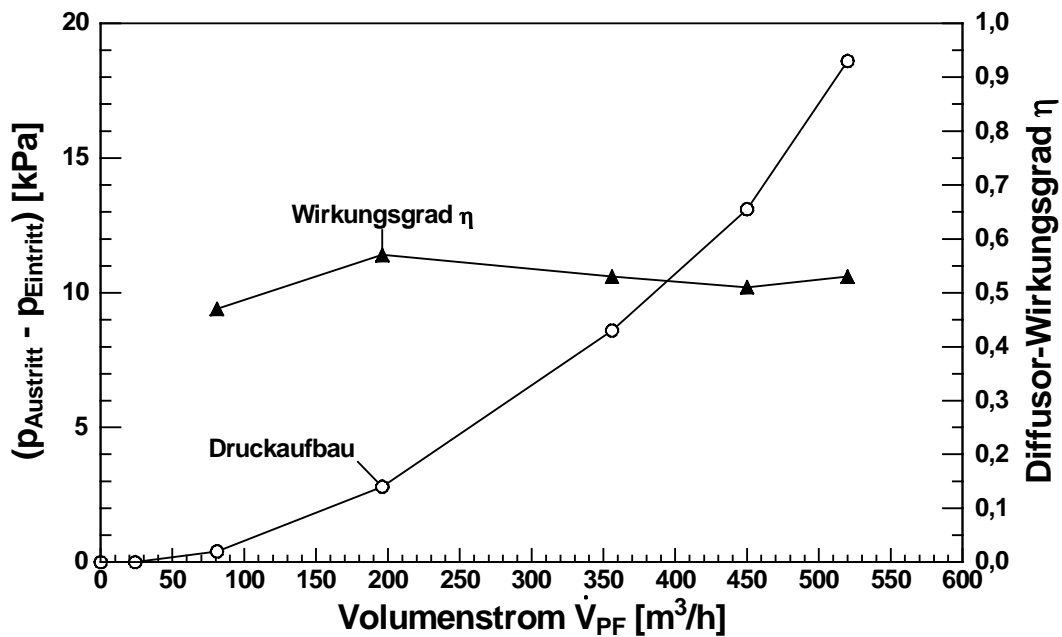


Abbildung 4-1: Druckverlauf in der Venturi-Düse mit integriertem Sicherheitsfilter (Innendurchmesser 26 mm)

Wie beabsichtigt, wird mit dieser Anordnung der Verlust an Abreinigungsluft minimiert. In der 2. Hälfte der Venturi-Kehle findet sogar Ansaugung aus dem Reingasraum statt. Zur Bewertung von Strömungswiderstand und Druckrückgewinn ist in **Abbildung 4-2** der Druckverlust der Anordnung und der Diffusor-Wirkungsgrad dargestellt. Letzterer liegt bei etwa 50 %, was der ursprünglichen Auslegung der Anordnung entspricht.

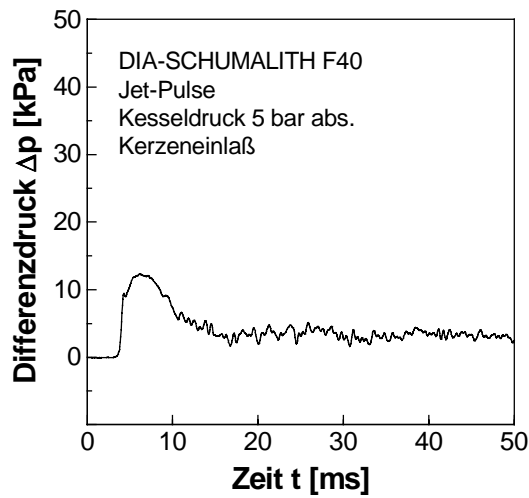


**Abbildung 4-2:** Druckrückgewinn und Diffusor-Wirkungsgrad

#### 4.2 Drucksignale entlang der Filterkerze bei der Jet-Pulse – Abreinigung und bei der CPP – Abreinigung für Kerzengruppen

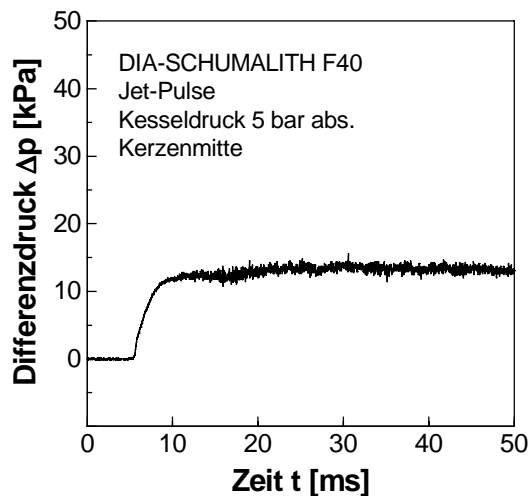
Die beiden folgenden Seiten zeigen charakteristische Drucksignale entlang der Faser/Kornkeramik Filterkerze bei der Jet-Pulse – Abreinigung und bei der CPP – Abreinigung. Eine ausführliche Diskussion der Drucksignale bei der Jet-Pulse – Abreinigung, auch für andere Filterkerzentypen, ist / Mai 1996, Leibold 1998 / zu entnehmen. Bei der Jet-Pulse – Abreinigung tritt im Einlaßbereich der Filterkerze ein typischer Peak auf, der aufgrund des kurzzeitigen Aufstaus an Abreinigungsluft während des Anlaufvorgangs entsteht. Nach Beschleunigung des Gases in der Filterkerze kann der Freistrahл mit höherer Geschwindigkeit in die Filterkerze treten und der Druck sinkt auf ein geringes Niveau knapp über dem Nullwert. Der Peak tritt bei der CPP – Abreinigung nicht auf. Der Anlaufvorgang ist insgesamt langsamer (ca. Faktor 2) und der Beschleunigungseffekt tritt nicht auf. Die Signale in Kerzenmitte (Jet-Pulse und CPP) sowie am Kerzenboden (Jet-Pulse) zeigen einen steilen Anstieg und im Anschluß ein quasistationäres Profil. Das Signal am Kerzenboden bei der CPP – Abreinigung weist nach dem Anstieg starke, niedrigfrequente Oszillationen auf, die von Schwingungen der Luftsäule in der Kerze herrühren.

### Jet-Pulse – Abreinigung



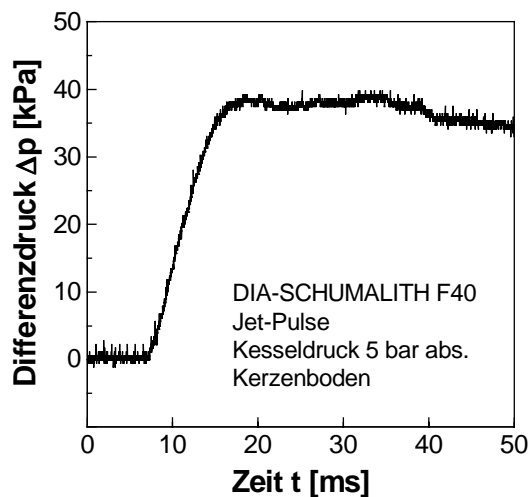
#### **Kerzeneinlaß:**

- kurzer Peak während der Anlaufphase, bedingt durch Strömungsabbremmung (maximal 12 kPa)
- im Anschluß geringes Niveau knapp über dem Nullwert



#### **Kerzenmitte:**

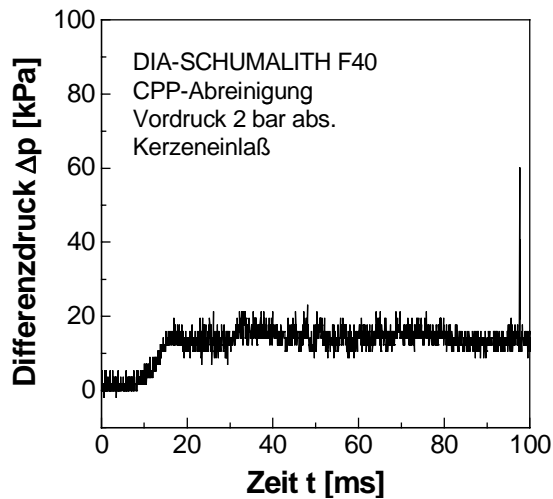
- steiler Anstieg auf maximal 13 kPa
- im Anschluß quasistationäres Profil



#### **Kerzenboden:**

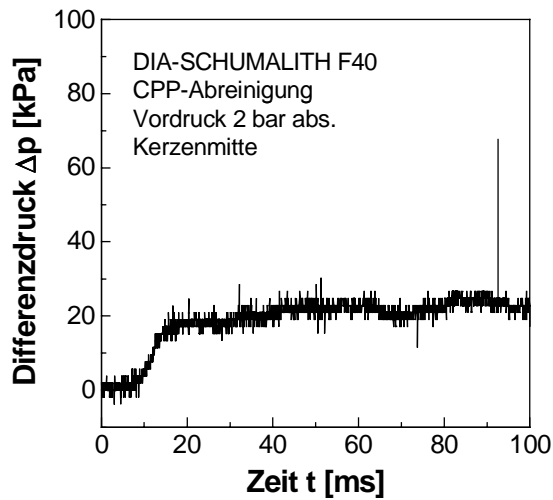
- ähnliches Drucksignal wie in Kerzenmitte
- sehr steiler Anstieg auf maximal 38 kPa
- im Anschluß quasistationäres Profil

## CPP – Abreinigung



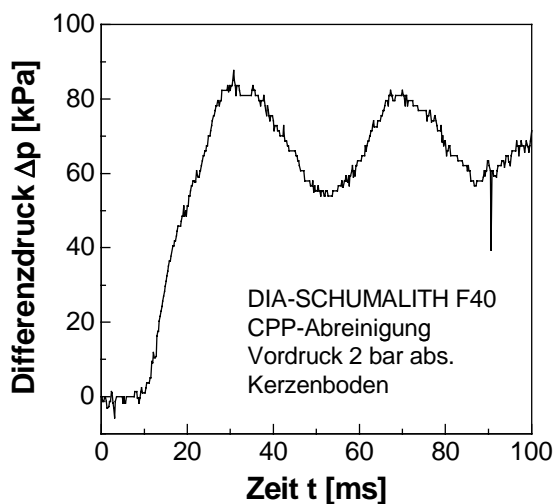
### **Kerzeneinlaß:**

- kein Peak, keine Oszillationen
- hohes Differenzdruckniveau von maximal 15 kPa
- im Anschluß quasistationäres Profil



### **Kerzenmitte:**

- ähnliches Drucksignal wie am Kerzeneinlaß, maximal 20 kPa
- im Anschluß quasistationäres Profil



### **Kerzenboden:**

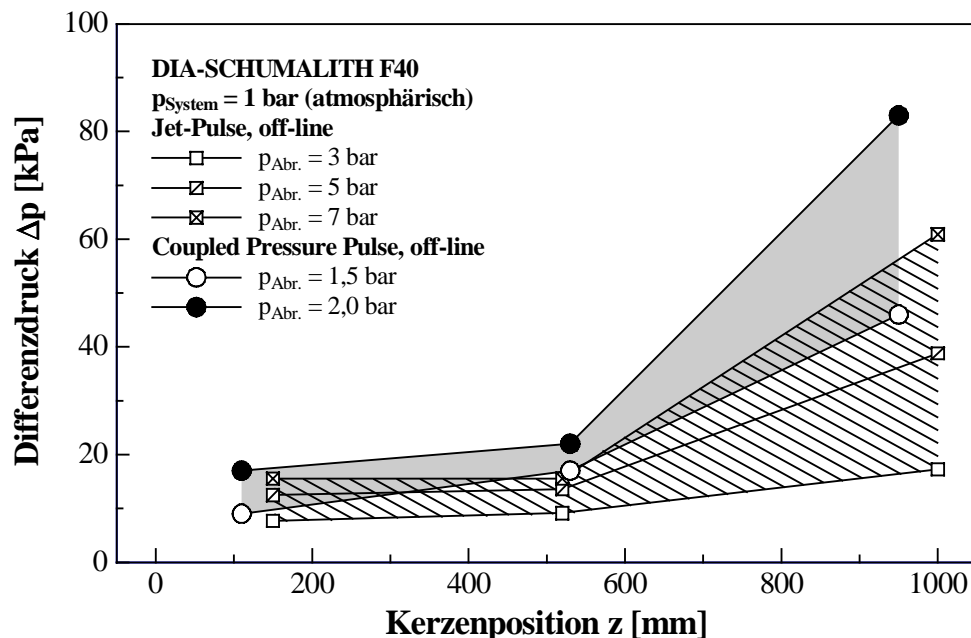
- hohes Drucksignal mit niedrigfrequenten, starken Oszillationen  $70 \pm 15$  kPa
- maximal 85 kPa

### 4.3 Druckprofile beim CPP – Abreinigungssystem für Kerzengruppen

Aus den im vorangegangenen Kapitel stellvertretend dargestellten Drucksignalen wurde jeweils der Maximalwert bestimmt. Trägt man diese Werte über der Kerzenposition auf, erhält man die in den nachfolgenden Kapiteln beschriebenen Druckprofile.

#### 4.3.1 Einfluß des Abreinigungsdrucks / Vergleich mit konventionellem Jet-Pulse

Um einen direkten Vergleich zu den früheren Untersuchungen mit der konventionellen Jet-Pulse – Abreinigung zu ermöglichen, war der Rohgasraum der Anlage (siehe **Kapitel 3.4.3**) zunächst gegen Umgebung offen. Dadurch kann sich auf der Rohgasseite während der Abreinigung kein Gegendruck aufbauen. Beobachtet wurde der ideale Fall der CPP – Abreinigung ohne Verluste an Abreinigungsgas und ohne zusätzlichen Druckverlust durch das Sicherheitsfilter. Die Abreinigungsintensitäten in Form der maximal erreichbaren Differenzdrücke für das konventionelle Jet-Pulse – und das CPP – Verfahren sind für die Filterkerze des Typs DIA-SCHUMALITH F40 in **Abbildung 4-3** vergleichend dargestellt. Die Abreinigungsdrücke für das CPP – Verfahren wurden so gewählt, daß vergleichbare bzw. höhere Abreinigungsintensitäten wie bei der konventionellen Jet-Pulse – Abreinigung erzielt werden.



**Abbildung 4-3:** Vergleich der Differenzdruckprofile bei der konventionellen Jet-Pulse – Abreinigung und der CPP – Abreinigung (DIA-SCHUMALITH F40)

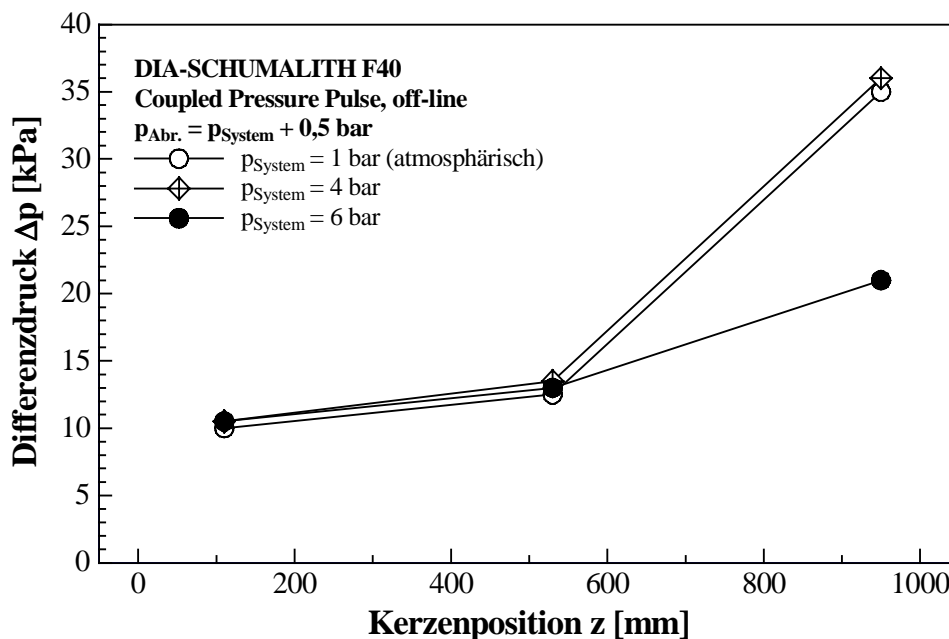
Generell steigen die Differenzdruckprofile zum Kerzenende hin an, bedingt durch die Umwandlung von dynamischen in statischen Druck. Mit zunehmendem Abreinigungsdruck erhöht sich das Niveau, wobei jedoch am Kerzenende ein überproportionaler Anstieg vorliegt. Ein ausge-



glichenes Differenzdruckprofil entlang der Filterkerze auf hohem Niveau ist bei der Filterkerze vom Typ DIA-SCHUMALITH F40 nicht erzielbar. Der Grund hierfür liegt in der hohen Eintrittsgeschwindigkeit der Abreinigungsströmung / Mai 1996, Leibold 1998 /.

Im Vergleich der beiden Verfahren ist zu erkennen, daß bei der CPP – Abreinigung bereits mit einem Abreinigungsdruck von 2 bar im kritischen Einlaufbereich der Filterkerze höhere Differenzdrücke erreicht werden als beim konventionellen Verfahren mit einem Abreinigungsdruck von 7 bar Um die Differenzdrücke in diesem Bereich noch weiter anzuheben genügt die Erhöhung des Abreinigungsdrucks auf bspw. 2,5 bar, da bei der CPP – Abreinigung im Gegensatz zur Jet-Pulse – Abreinigung die Differenz zwischen Abreinigungs- und Systemdruck und nicht der Quotient aus Abreinigungs- und Systemdruck maßgeblich ist. Dies wird bei der Ermittlung des Einflusses des Systemdrucks deutlich. Hierbei wurde der Rohgasraum geschlossen.

#### 4.3.2 Einfluß Systemdruck



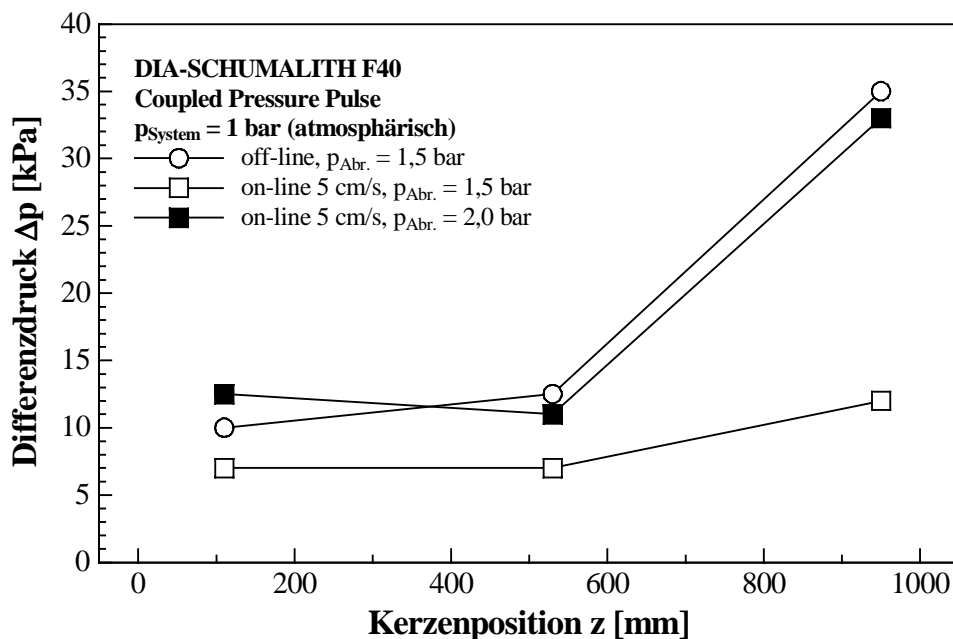
**Abbildung 4-4:** Differenzdruckprofile bei der CPP – Abreinigung  
Einfluß des Systemdrucks (DIA-SCHUMALITH F40)

Bei höheren Systemdrücken (4 bzw. 6 bar) wird der besondere Vorteil des CPP – Verfahrens deutlich. Um vergleichbare Abreinigungsintensitäten wie bei atmosphärischen Bedingungen zu erzielen, muß der Abreinigungsdruck lediglich um einen praktisch konstanten Differenzbetrag über dem Systemdruck liegen. Bei höheren Systemdrücken nimmt die Überhöhung gegen Kerzenende

ab, das Profil vergleichmäßigt sich. Letzteres ist darauf zurückzuführen, daß der Volumenstrom durch das Abreinigungsventil mit steigendem Abreinigungsdruck und gleichbleibendem Differenzdruck abnimmt.

### 4.3.3 Einfluß der Betriebsweise

Nach den off-line Untersuchungen wurde die Einzelkerzen-Versuchsfilteranlage mit Sicherheitsfilter und Schaltelement bestückt und die weiteren Versuche im on-line Betrieb durchgeführt. Gegenüber den off-line Versuchen bedingt der eingebaute Sicherheitsfilter einen zusätzlichen Druckverlust, sowohl bei der Filtration als auch bei der Abreinigung. Durch das in die Reingasleitung eingebaute Schaltelement geht zudem Abreinigungsgas ungenutzt verloren. Um vergleichbare Abreinigungsintensitäten zu erzielen wurde der Abreinigungsdruck deshalb von 0,5 bar bei den off-line Versuchen auf 1,0 bar erhöht.



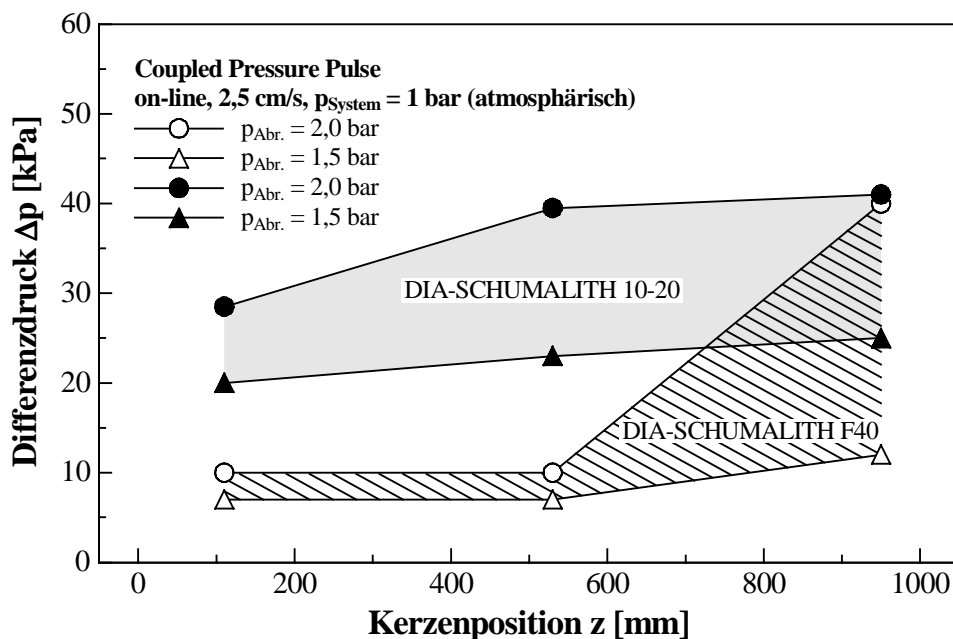
**Abbildung 4-5:** Differenzdruckprofile bei der CPP – Abreinigung  
Einfluß der Betriebsweise (DIA-SCHUMALITH F40)  
Systemdruck: atmosphärisch  
off-line: kein Druckverlust, kein Verlust an Abreinigungsgas  
on-line: mit Druckverlust, mit Verlust an Abreinigungsgas

#### 4.3.4 Einfluß des Filterkerzentyps

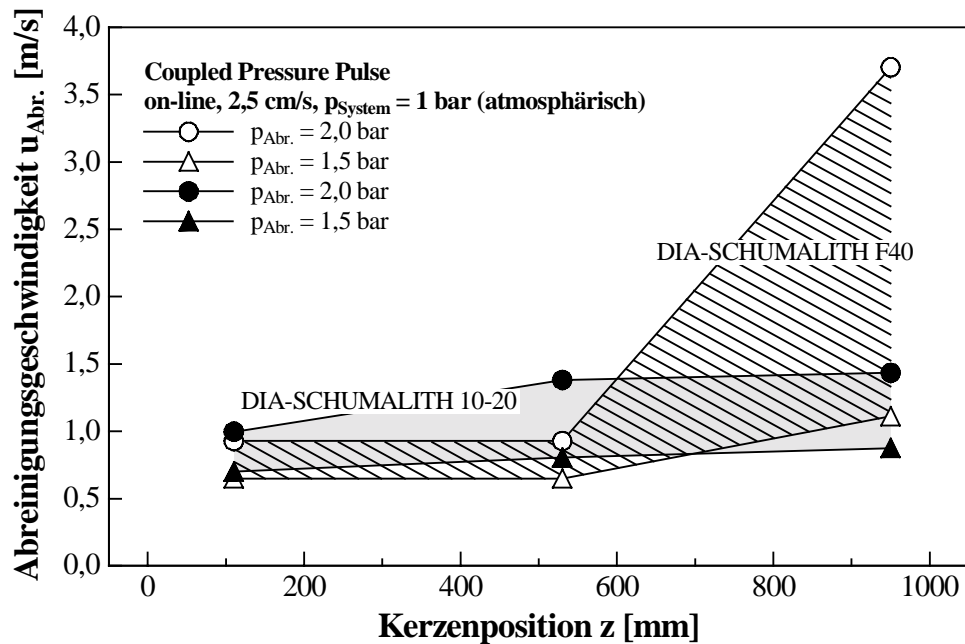
Bei gleichem Abreinigungsdruck ergaben sich an der Korn/Kornkeramik Filterkerze DIA-SCHUMALITH 10-20 verglichen mit der Faser/Kornkeramik Filterkerze DIA-SCHUMALITH F40 höhere Differenzdrücke sowie ein ausgeglichenes Profil entlang der Kerze (siehe **Abbildung 4-6**). Dies ist sowohl auf den größeren Innendurchmesser als auch auf den höheren Widerstandsbeiwert der Korn/Kornkeramik Filterkerze DIA-SCHUMALITH 10-20 (siehe **Tabelle 3-1**) zurückzuführen. Detaillierte Analysen der Durchströmungscharakteristik unterschiedlicher Filterkerzen sind in / Mai 1996, Leibold 1998 / zu finden. Für die Abreinigung der Staubschicht ist jedoch nicht der Differenzdruck entscheidend, sondern die entsprechende Durchströmungsgeschwindigkeit. Um unterschiedliche Filtermedien hinsichtlich der Abreinigungsintensität vergleichen zu können, muß diese herangezogen werden. Durch Umstellung der Gleichung 1 (Seite 14) läßt sie sich berechnen.

$$u = \frac{\Delta p}{K \cdot \mu}$$

(Gleichung 2)



**Abbildung 4-6:** Differenzdruckprofile bei der CPP – Abreinigung für unterschiedliche Filterkerzentypen



**Abbildung 4-7:** Abreinigungsgeschwindigkeitsprofile bei der CPP – Abreinigung für unterschiedliche Filterkerzentypen (gerechnet)

Wie **Abbildung 4-7** zu entnehmen ist, werden die höheren Differenzdrücke durch den höheren Widerstand des Filtermaterials stark kompensiert. Die Abreinigungsgeschwindigkeiten liegen trotzdem bei der Korn/Kornkeramik DIA-SCHUMALITH 10-20 im entscheidenden Einlaßbereich und in Kerzenmitte über den Werten der Faser/Kornkeramik DIA-SCHUMALITH F40. Nur im Endbereich der Kerze erhält man niedrigere Werte, die jedoch noch über den Werten in Kerzenmitte liegen. Betrachtet man nur die Abreinigungsintensität, sollte sich bei gleichem Abreinigungsdruck eine bessere Abreinigung für die Korn/Kornkeramik DIA-SCHUMALITH 10-20 ergeben.

#### 4.4 Filtrations- und Abreinigungsuntersuchungen an der Einzelkerze

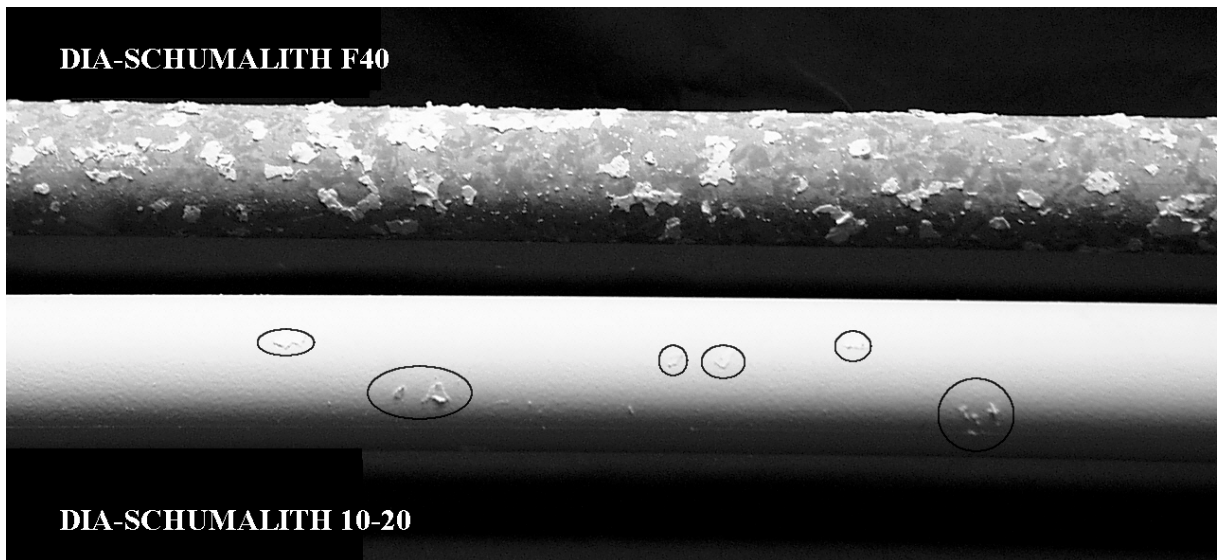
Bei Systemdrücken von 1 bzw. 6 bar sowie einer Filtrationsgeschwindigkeit von 2,5 bzw. 5 cm/s wurden bei Raumtemperatur Abreinigungsuntersuchungen an den beiden Filterkerzentypen durchgeführt. Der Abreinigungsdruck wurde entsprechend der strömungsdynamischen Untersuchungen um jeweils 1,0 bar über dem Systemdruck gewählt. Die Versuche wurden mit  $\text{BaSO}_4$  durchgeführt. Anfiltriert wurde bis zu einem Differenzdruck von 2000 Pa, entsprechend einer Staubkuchendicke von ca. 0,5 mm. Innerhalb der jeweils 10 Zyklen lagen die Restdruckverluste nur geringfügig über den Anfangsdruckverlusten. Bezüglich der Reststaubstrukturen ergaben sich für die jeweiligen Filterkerzentypen jedoch typische Unterschiede:

### Faser/Kornkeramik DIA-SCHUMALITH F40

Bei der niedrigen Filtrationsgeschwindigkeit wurde durchweg eine vollständige Abreinigung ohne Staubkuchenreste erzielt. Bei der höheren Filtrationsgeschwindigkeit verbleiben noch geringe Reste an Staubkuchen auf der Filteroberfläche (siehe **Abbildung 4-8 oben**). Diese führen jedoch nicht zur Erhöhung des Restdruckverlustes.

### Korn/Kornkeramik DIA-SCHUMALITH 10-20

Bei der Korn/Kornkeramik wurde selbst bei der hohen Filtrationsgeschwindigkeit von 5 cm/s eine vollständige Abreinigung ohne Staubkuchenreste erzielt (siehe **Abbildung 4-8 unten**). Die bessere Abreinigung ist vor allem auf die homogenere Struktur des Filtermediums / Leibold 1998 / und auf die höhere Abreinigungsintensität (siehe **Kapitel 4.3.4**) zurückzuführen.



**Abbildung 4-8:** Reststaubstrukturen auf verschiedenen Filterelementtypen nach 10 Abreinigungen

## 5 Untersuchungen an Kerzengruppen

Zur Erprobung des neuen Abreinigungsverfahrens an Mehrkerzensystemen sowie zur Simulation des Störfallbetriebs, wurden die beiden Mehrkerzenanlagen SAMUM und SUT (siehe **Kapitel 3.5 und 3.6**) auf die neue CPP – Abreinigungstechnik umgerüstet. Die Anlagen können bei atmosphärischem Druck und einer Temperatur bis zu 600 °C betrieben werden. In beiden Anlagen wurde ausschließlich der Filterkerzentyp DIA-SCHUMALITH 10-20 mit einer Länge von 1000 mm verwendet. Die gesamte Filterfläche betrug also ca. 1,13 m<sup>2</sup>.

### 5.1 Abreinigungsintensität

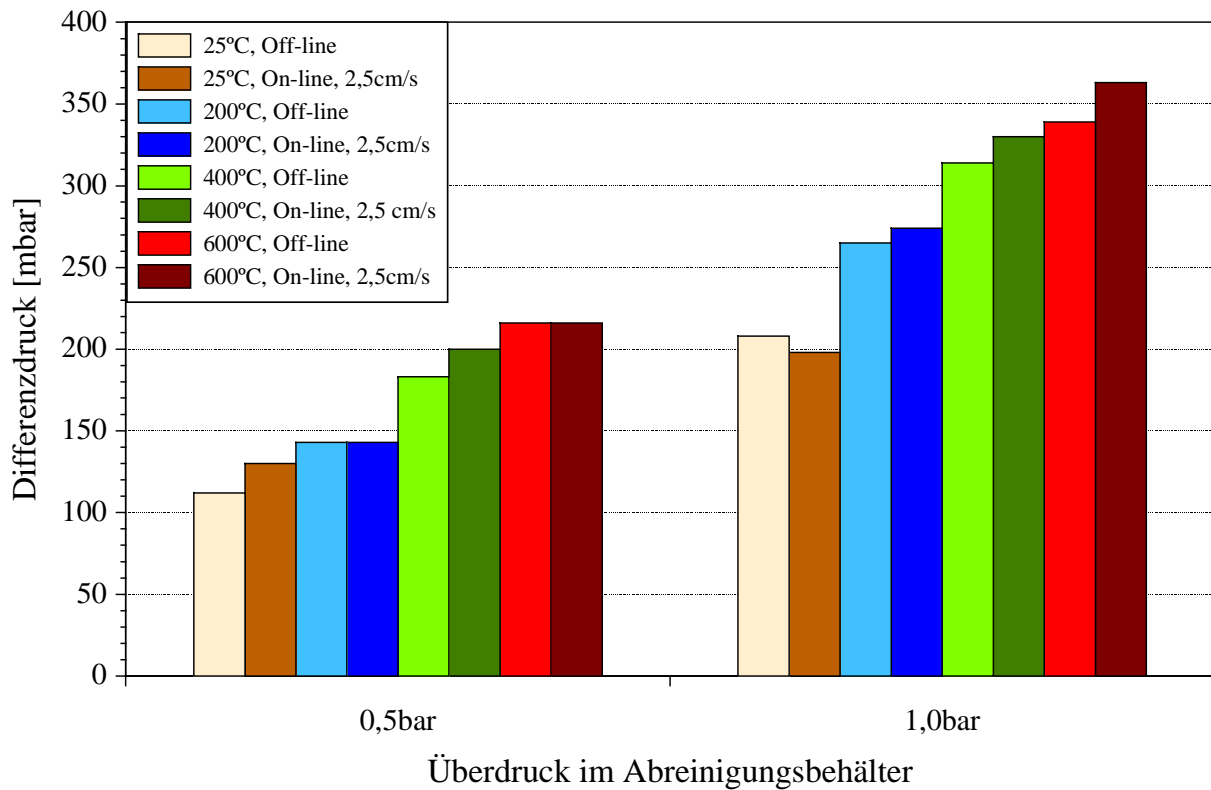
An der Anlage SAMUM wurde an einem Cluster von 6 Filterkerzen die Abreinigungsintensität bei verschiedenen Temperaturen mit dem CPP – Abreinigungsverfahren bestimmt. Hierfür wurde die bisher an der Einzelkerzenanlage für hohen Druck verwendete Abreinigungstechnik unverändert umgesetzt. Ebenso wurde der Einfluß des Schnellöffnungsventils auf die erreichbare Abreinigungsintensität getestet.

An der Anlage SUT wurde die Abreinigungsintensität bei Raumtemperatur mit unterschiedlichen Sicherheitsfiltern und Schaltelementen ermittelt. Zusätzlich wurde das Abreinigungsverfahren variiert. Es wurde sowohl mit konventionellem Druckimpuls, als auch mit CPP abgereinigt, um die Verbesserung aufzuzeigen.

#### 5.1.1 Einfluß der Temperatur

An der Anlage SAMUM wurde der Einfluß der Temperatur auf die Abreinigungsintensität gemessen. Als Sicherheitsfilter wurde die einschichtige Schaumkeramik PPI 60 mit einer Länge von 120 mm und als Schaltelement ein Katalysatorträger mit 1x1 mm Kanälen eingesetzt. Das Schaltelement hatte einen Außendurchmesser von 40 mm und eine Länge von 36 mm. Als Abreinigungsventil kam das Quetschventil zum Einsatz. Die Meßstellen für die piezoresistiven Druckaufnehmer befanden sich im Reingaskanal und am Rohgasbehälter, außerhalb der "heißen Zone". Die Meßstelle im Reingaskanal wurde zusätzlich von außen wassergekühlt, da die Druckaufnehmer nur bei Temperaturen bis ca. 100 °C einsetzbar sind.

Die Messungen zum Druckaufbau über den 6 Filterkerzen und Sicherheitsfiltern während der Abreinigung ergeben eine Zunahme des maximal erreichbaren Differenzdrucks mit der Temperatur (siehe **Abbildung 5-1**).

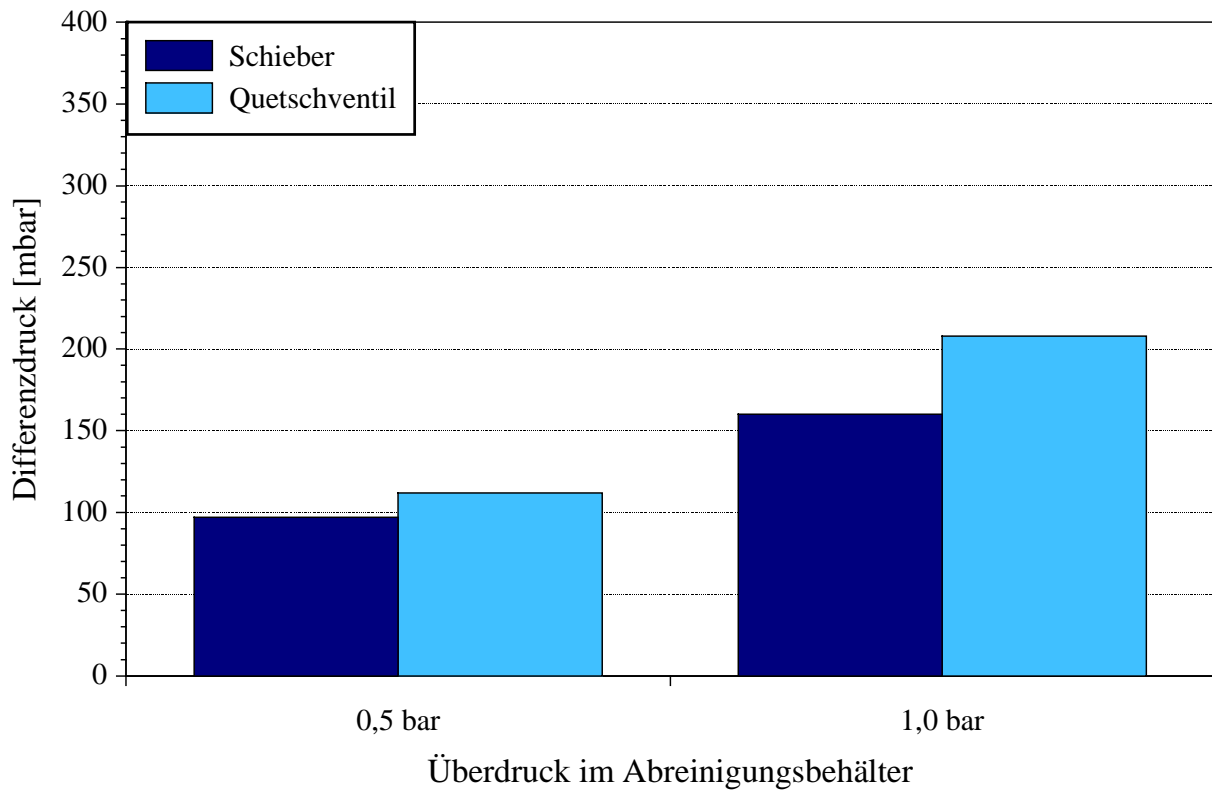


**Abbildung 5-1:** Maximale Abreinigungsintensität bei verschiedenen Temperaturen  
6 Filterkerzen eingebaut, Sicherheitsfiler: Schaumkeramik PPI 60  
on-line und off-line Abreinigung

Zurückzuführen ist dies einerseits auf die Erhöhung der Gasviskosität mit der Temperatur und der damit verbundenen geringeren Verluste durch das Schaltelement und andererseits auf die Aufheizung und Expansion der kalten Abreinigungsluft. Ein Einfluß der Betriebsweise on-line und off-line ist praktisch nicht gegeben.

### 5.1.2 Einfluß des Schnellöffnungsventils

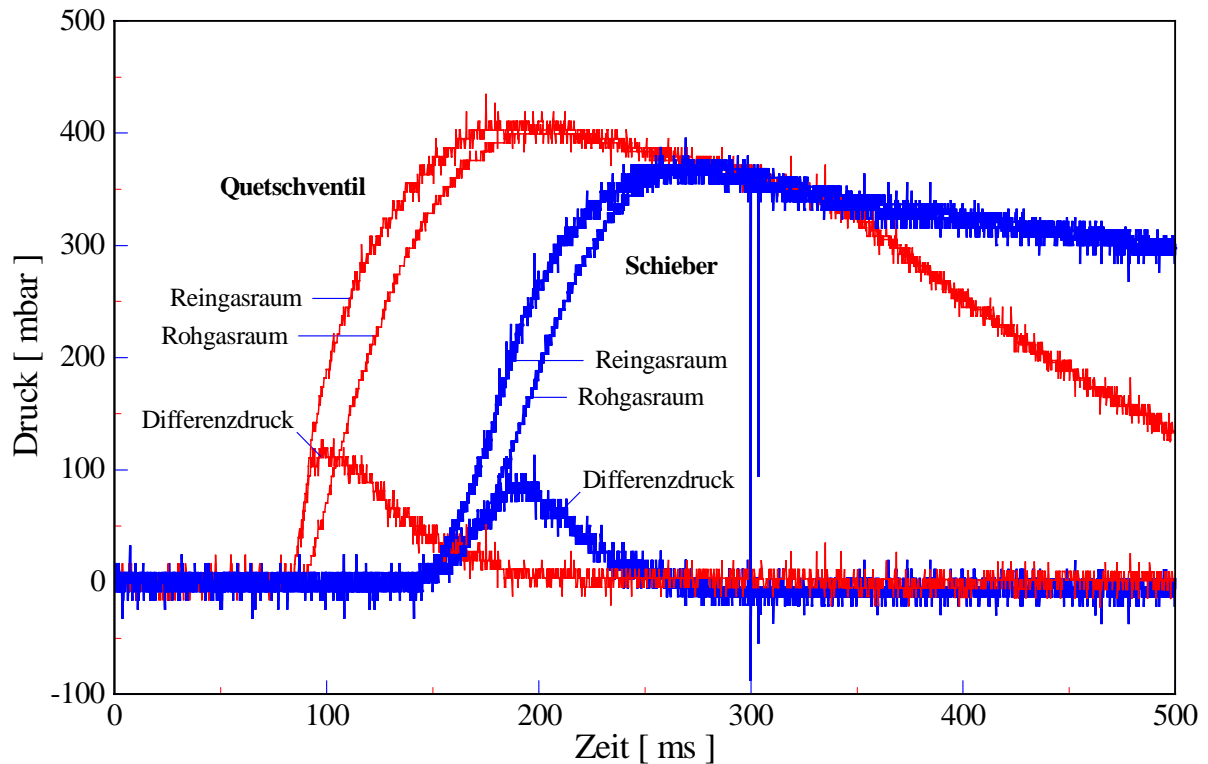
Der Einfluß des Schnellöffnungsventils auf die erreichbare Abreinigungsintensität wurde ebenfalls an der Anlage SAMUM getestet. Außer dem Quetschventil kam ein konventioneller Schieber zum Einsatz, der hinsichtlich kurzer Öffnungszeit optimiert wurde. Die Versuche wurden bei Raumtemperatur durchgeführt und es wurde off-line abgereinigt. In **Abbildung 5-2** erkennt man, daß sich mit dem prototypischen Quetschventil höhere Differenzdrücke ergeben als mit dem optimierten Schieber.



**Abbildung 5-2:** Maximale Abreinigungsintensität bei verschiedenen Schnellöffnungsventilen  
6 Kerzen, Sicherheitsfilter Schaumkeramik PPI 60  
off-line – Abreinigung

Der Grund für die, im Vergleich zum Quetschventil, niedrigeren Abreinigungsintensitäten bei Verwendung des Schiebers liegt in der Öffnungscharakteristik. Der Schieber öffnet wesentlich langsamer und gibt dadurch zunächst nur einen geringen Strömungsquerschnitt frei. Dadurch ergibt sich ein geringerer Volumenstrom, der wiederum einen langsameren Druckanstieg im Reingasraum nach sich zieht (siehe **Abbildung 5-3**). Bedingt durch den langsameren Anlaufvorgang sinkt der Abreinigungsdruck im Abreinigungsbehälter stärker. Das Druckmaximum ist dadurch niedriger und wird zu einem späteren Zeitpunkt erreicht.

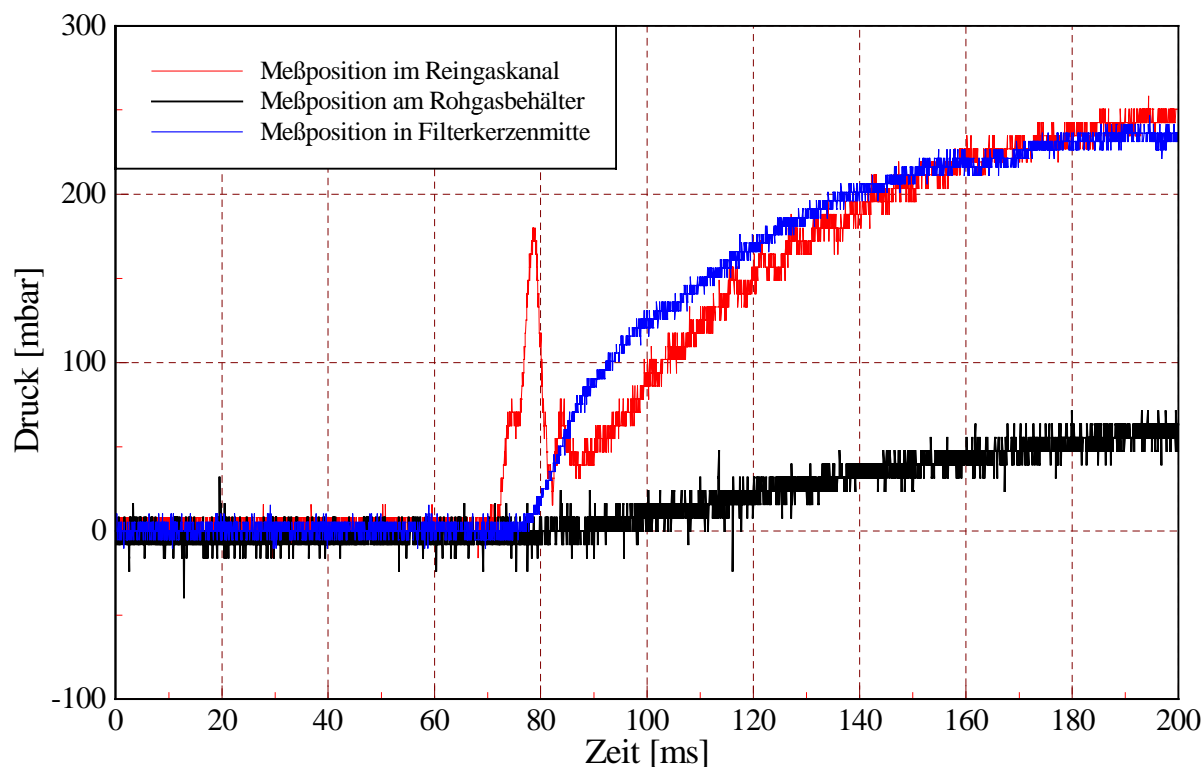




**Abbildung 5-3:** Zeitlicher Druckverlauf im Reingas- und im Rohgasraum sowie daraus berechneter Differenzdruckverlauf bei unterschiedlichen Schnellöffnungsventilen

### 5.1.3 Einfluß des Sicherheitsfiltertyps

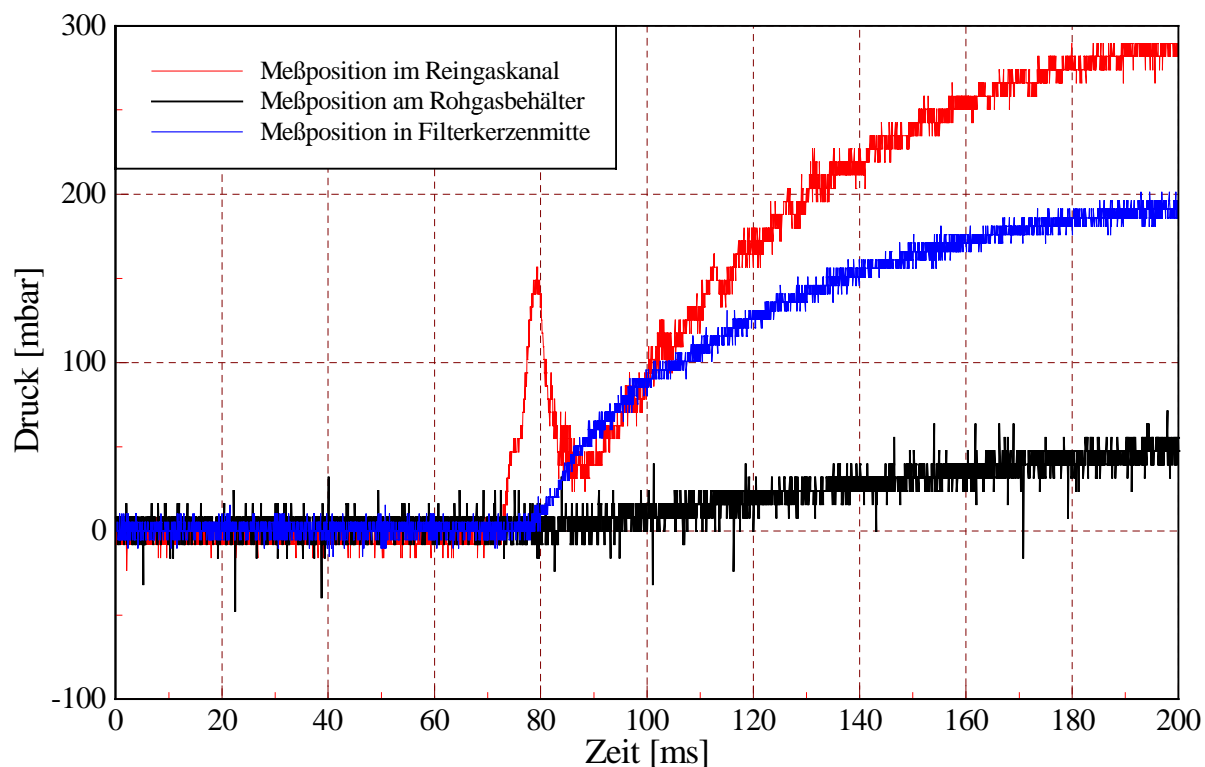
Die Untersuchungen zum Einfluß des Sicherheitsfiltertyps auf die Abreinigungsintensität bei der CPP – Abreinigung wurden an der Anlage SUT des Industriepartners Fa. SCHUMACHER durchgeführt. Die Messungen fanden bei Raumtemperatur statt. Dies ermöglichte die Bestimmung des zeitlichen Druckverlaufs direkt in der Filterkerze. Zwei weitere Meßstellen befanden sich im Rohgasbehälter und in der Reingasleitung (siehe **Abbildung 3-17**). Daraus ergab sich die Möglichkeit, den während der Abreinigung über der Kerzenwand anliegenden Differenzdruck zu bestimmen. In **Abbildung 5-4** sind die zeitlichen Druckverläufe an den 3 Meßstellen bei Verwendung der Schaumkeramik als Sicherheitsfilter dargestellt. Ein Unterschied zwischen on-line und off-line – Abreinigung konnte nicht festgestellt werden.



**Abbildung 5-4:** Druckverlauf mit Schaumkeramik PPI 60 als Sicherheitsfilter  
 Abreinigungsüberdruck: 1,0 bar  
 on-line – Abreinigung von 6 Filterkerzen  
 Filtrationsgeschwindigkeit: 2,5 cm/s

Das Meßsignal im Reingaskanal (rote Kurve in **Abbildung 5-4**) weist sofort nach dem Öffnen des Quetschventils einen kurzen Peak auf. Dieser rührt aus der Abbremsung der Abreinigungsströmung her, wenn diese im Reingaskanal auf ruhendes Gas bzw. im on-line – Betrieb auf entgegenströmendes Gas trifft. Im Anschluß an diesen Peak, also nach Beschleunigung des Gases, steigt der Druck kontinuierlich und strebt einem Maximalwert zu. Die maximalen Drücke in der Reingasleitung und in Kerzenmitte sind etwa gleich hoch, was auf den niedrigen Strömungswiderstand des Schaumkeramik zurückzuführen ist. Hinsichtlich der maximalen Abreinigungsintensität können also beide Meßstellen als gleichwertig betrachtet werden.

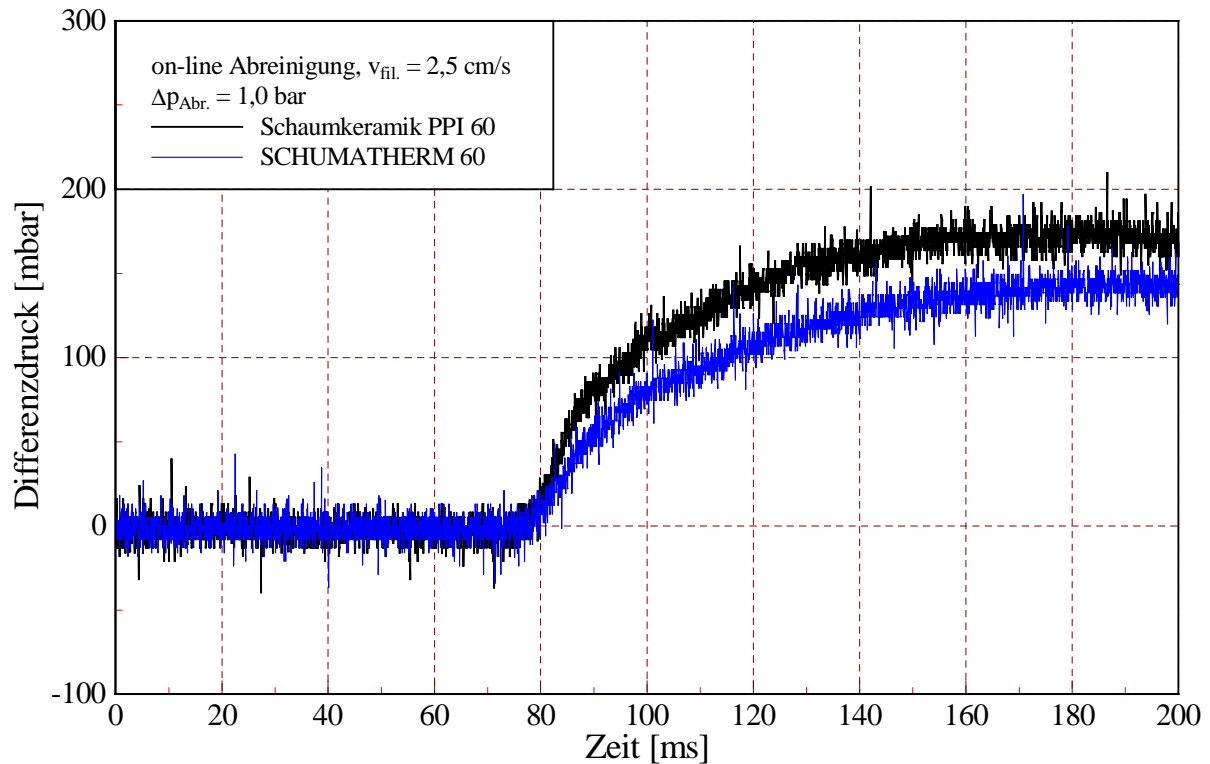
Mit der Kornkeramik als Sicherheitsfilter ist im Vergleich zu den Messungen mit der Schaumkeramik als Sicherheitsfilter ein deutlicher Unterschied in den Drucksignalen im Reingaskanal und in der Filterkerze zu sehen (siehe **Abbildung 5-4** und **Abbildung 5-5**). Der maximal erreichbare Druck ist im Reingaskanal sehr viel höher, als in der Filterkerze. Die Meßstellen müssen also zur Beurteilung der Abreinigungsintensität an der Filterkerze getrennt betrachtet werden. Ausschlaggebend ist hier die Meßposition in der Filterkerze.



**Abbildung 5-5:** Druckverlauf mit SCHUMATHERM 60 als Sicherheitsfilter  
 Abreinigungsüberdruck: 1,0 bar  
 On-line – Abreinigung von 6 Filterkerzen  
 Filtrationsgeschwindigkeit: 2,5 cm/s

Aus den Drucksignalen lassen sich durch Differenzbildung (Filterkerzenmitte minus Rohgas) die Differenzdruckverläufe, stellvertretend für die Abreinigungsintensität, berechnen. In **Abbildung 5-6** sind diese Verläufe für die beiden Sicherheitsfilter vergleichend dargestellt.

Wie aus **Abbildung 5-6** ersichtlich, wurde mit der Kornkeramik als Sicherheitsfilter trotz des im Vergleich zur Schaumkeramik 3- bis 4-fach höheren Durchströmungswiderstands ein nur geringfügig niedrigerer maximaler Differenzdruck an der Filterkerze erreicht (ca. 140 mbar). Aufgrund der stärker behinderten Abströmung über dem Kornkeramik-Sicherheitsfilter baut sich im Reingasraum ein höherer Druck auf, der den höheren Durchströmungswiderstand zumindest teilweise kompensiert. Gleichzeitig steigt jedoch der Verlustvolumenstrom über das Schaltelement an und mehr Abreinigungsluft geht verloren.



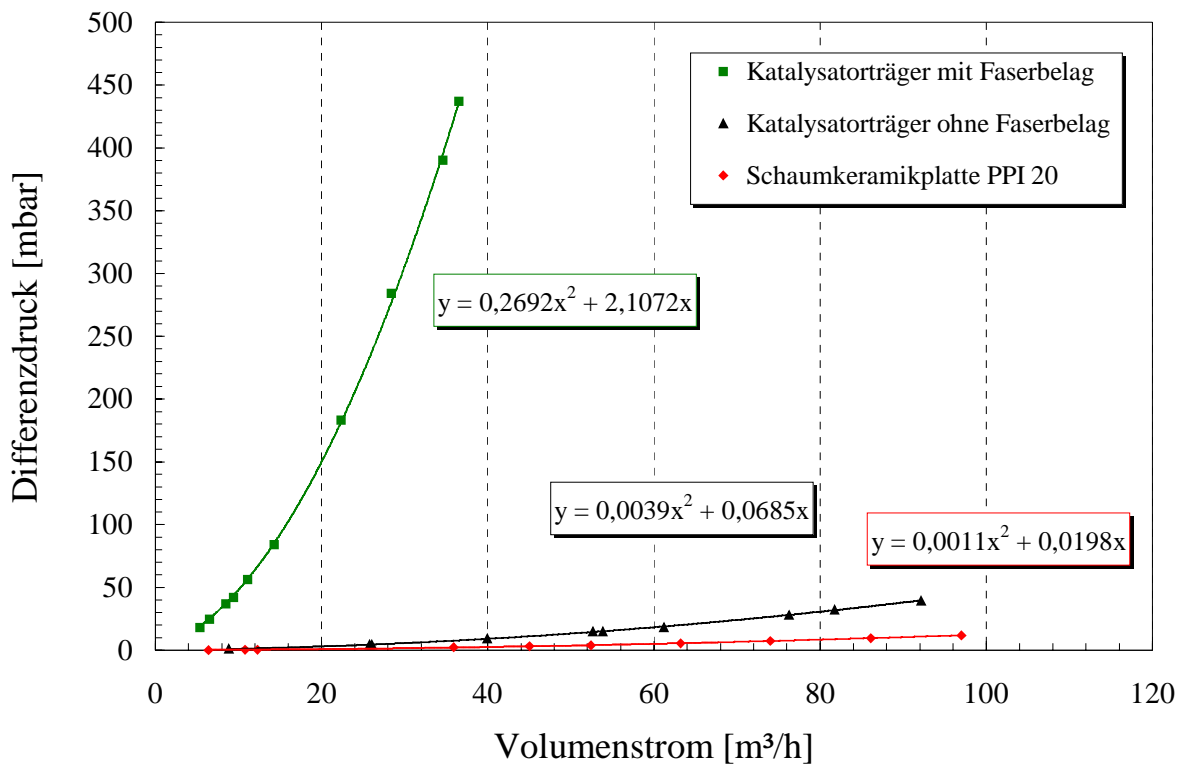
**Abbildung 5-6:** Zeitlicher Differenzdruckverlauf in Filterkerzenmitte bei unterschiedlichen Sicherheitsfiltern

Die an der Anlage SUT mit der Schaumkeramik als Sicherheitsfilter maximal erreichbaren Differenzdruckwerte über Filterkerze und Sicherheitsfilter lagen im Vergleich zu den an der Anlage SAMUM erzielten etwas niedriger. Hauptgrund ist der kleinere Abreinigungsbehälter, der eine größere Abnahme des Abreinigungsdrucks während des Abreinigungsverfahrens zur Folge hat. So wurden beispielsweise bei Raumtemperatur und 2,0 bar Vordruck mit der Schaumkeramik als Sicherheitsfilter an SAMUM etwa 200 mbar (siehe **Abbildung 5-1**), an der Anlage SUT etwa 180 mbar, also 10 % weniger (siehe **Abbildung 5-6**) gemessen.

Während dieser Messungen hatte das Schaltelement einen erhöhten Widerstand, da es mit Fasermaterial aus der Anlagenisolierung verlegt war. Dies wurde erst nach den Messungen beim Ausbau festgestellt. Die Auswirkungen die sich daraus auf die Abreinigungsintensität ergaben sind im nächsten Kapitel detailliert dargestellt.

### 5.1.4 Einfluß des Schaltelementtyps

Der Einfluß des Schaltelementtyps auf die Abreinigungsintensität bei der CPP – Abreinigung wurde ebenfalls an der Anlage SUT gemessen. Die Meßstellen für die piezoresistiven Druckaufnehmer befanden sich an der Zuleitung zum Reingasbehälter und am Rohgasbehälter der Filteranlage. Die Meßstelle in der Filterkerze entfiel.



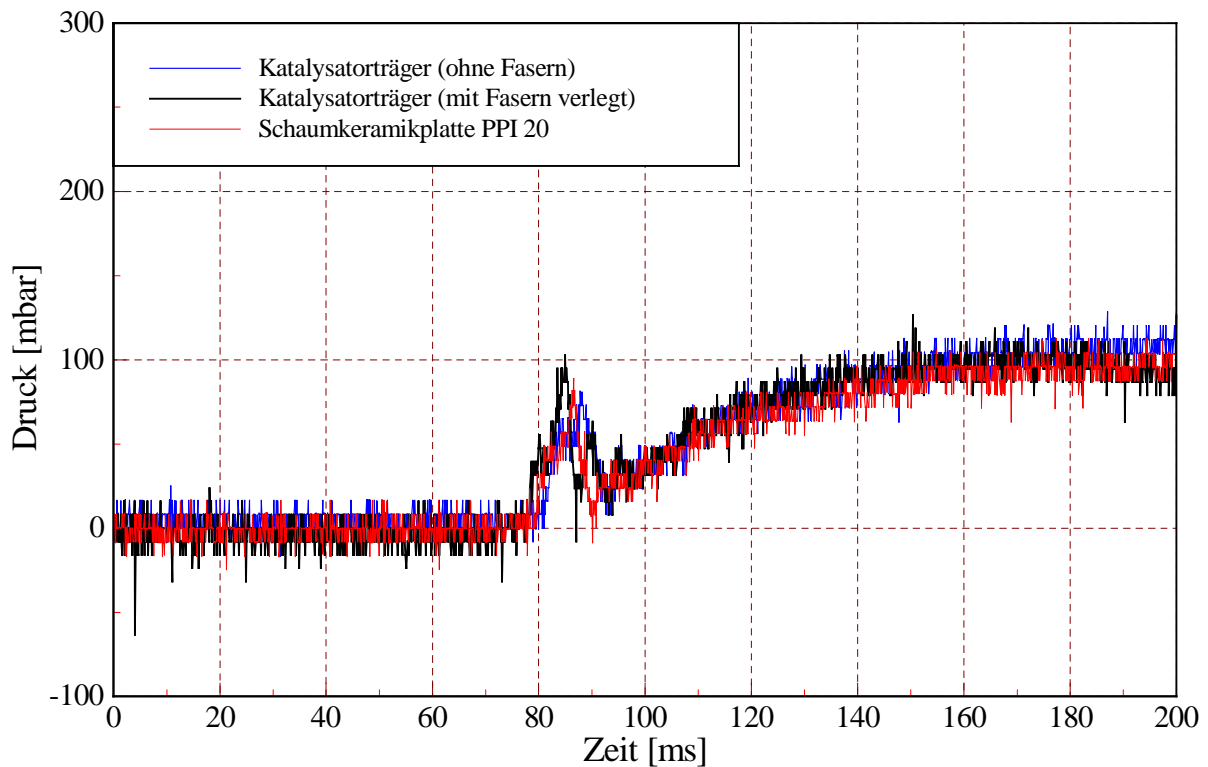
**Abbildung 5-7:** Druckverlustkurven der verschiedenen Schaltelemente

Als Schaltelement war in der Reingasleitung (DN80) zunächst ein Katalysatorträger mit 1x1 mm Kanälen eingebaut. Konstruktionsbedingt betrug der durchströmbare Querschnitt jedoch nur 30 mm. Die Länge des Elementes betrug 20 mm. Daraus resultiert ein hoher Druckverlust. Zusätzlich ergab sich ein anlagenspezifisches Problem, welches den Druckverlust an dieser Stelle drastisch erhöhte (siehe **Abbildung 5-7**). Das zur Isolierung der Anlage verwendete Fasermaterial gelangte bei der Montage der Filterkerzen und Sicherheitsfilter in den Reingasraum und wurde von dort aus auf das Schaltelement getragen. Hier bildete es auf dem Schaltelement einen dichten Belag, der den Differenzdruck sehr stark erhöhte. Dies führte dazu, daß bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 5 cm/s die Leistungsgrenze des Gebläses erreicht wurde. Um diese Probleme zu lösen, wurde der Reingasraum gründlich von Fasermaterial gereinigt und es wurde eine grobe Schaumkeramikplatte (PPI 20) als Schaltelement verwendet. Die Platte hatte wie das Reingasrohr einen

Außendurchmesser von 80 mm. Die Länge betrug 20 mm. Dieses Schaltelement besaß einen deutlich geringeren Druckverlust (siehe **Abbildung 5-7**), ist allerdings nur als Behelf zu werten, da dieses Element nicht die gewünschte Schaltcharakteristik besitzt.

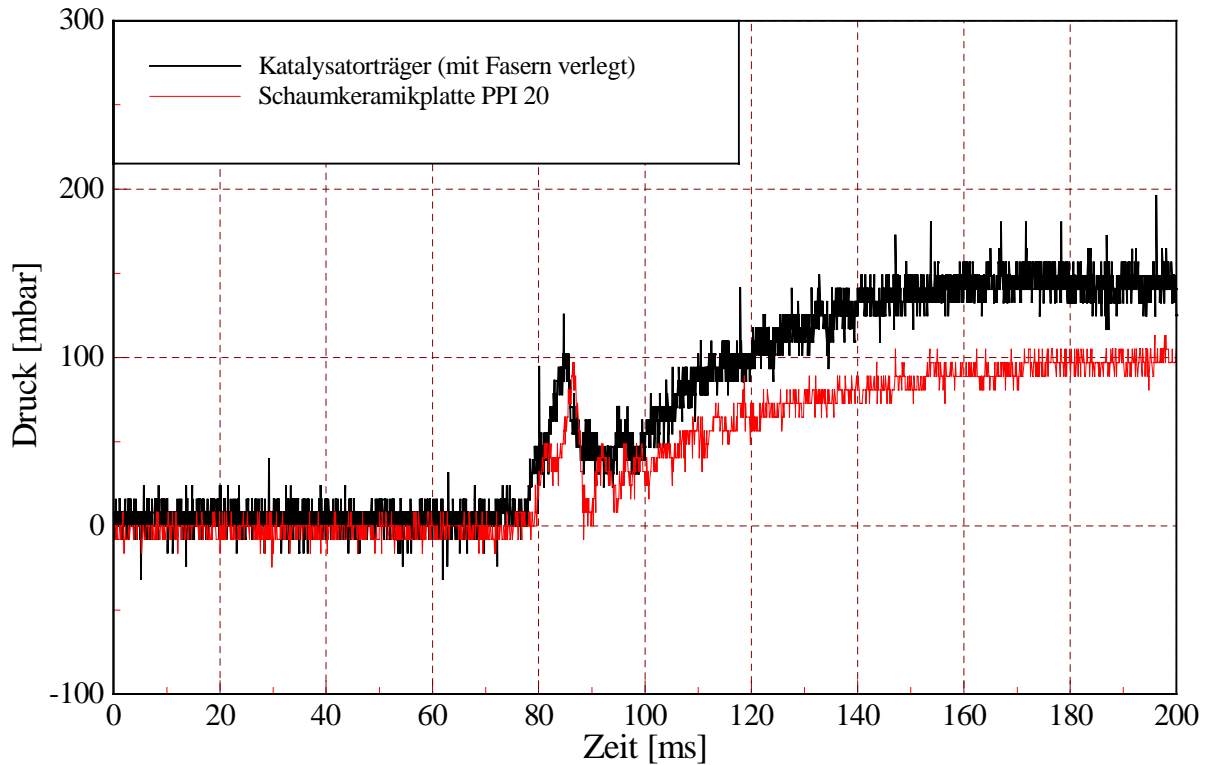
### Normalbetrieb

Bei den Versuchen mit der Schaumkeramik PPI 60 als Sicherheitsfilter hatte das verwendete Schaltelement auf die Abreinigungsintensität, gemessen über Filterkerze und Sicherheitsfilter, keinen Einfluß (siehe **Abbildung 5-8**). Lediglich die erste Druckspitze liegt bei dem mit Fasern verlegten Katalysatorträger etwas höher. Der maximal erreichte Differenzdruck bleibt aber bei allen Versuchen gleich. Es bestand auch kein Unterschied darin, ob on-line oder off-line abgereinigt wurde.



**Abbildung 5-8:** Abreinigungsintensität bei verschiedenen Schaltelementen  
Schaumkeramik PPI 60 als Sicherheitsfilter  
off-line – Abreinigung, Abreinigungsüberdruck 0,5 bar  
6 Filterkerzen eingebaut

Die Messungen mit SCHUMATHERM 60 als Sicherheitsfilter wurden immer an neuwertigen Materialien vor den Abreinigungsversuchen durchgeführt. Hier ist der Unterschied der verwendeten Schaltelemente in der erreichbaren Abreinigungintensität deutlich zu sehen (siehe **Abbildung 5-9**).



**Abbildung 5-9:** Abreinigungintensität bei verschiedenen Schaltelementen  
SCHUMATHERM 60 als Sicherheitsfilter  
off-line – Abreinigung, Abreinigungsüberdruck 0,5 bar  
6 Filterkerzen eingebaut

Bei gleichem Abreinigungsdruck liegt der maximal erreichbare Druck im Reingasraum bei der Schaumkeramikplatte PPI 20 um ca. 50 mbar niedriger, als beim mit Fasern verlegten Katalysatorträger. Somit ist anzunehmen, daß auch die Abreinigungintensität über der Filterkerzenwandung mit der Schaumkeramikplatte als Schaltelement zurückgeht. Durch die Kornkeramnik-Sicherheitsfilter SCHUMATHERM 60 wird der Widerstand, den die Abreinigungsströmung im Vergleich zur Schaumkeramik PPI 60 überwinden muß, wesentlich erhöht. Je größer nun der Widerstand ist, den das Schaltelement dieser Strömung entgensezt, um so höher ist der Druckaufbau im Reingasbehälter. Wird der Widerstand des Schaltelementes geringer, so kann sich auch nur ein geringerer Überdruck im Reingasbehälter aufbauen, da mehr Abreinigungsgas über das Schaltelement abströmen kann.

### **Störfallbetrieb**

Um den Störfallbetrieb zu simulieren, wurde eine Filterkerze entfernt. Bei Versuchen ohne Bestäubung nimmt der Gesamtwiderstand der Anordnung dadurch ab. Im Fall einer vollständigen, irreversiblen Verstopfung des Sicherheitsfilters bei Bestäubung steigt hingegen der Gesamtwiderstand der Anordnung. Beides sollte sich in gegenüber dem Normalbetrieb veränderten Drücken im Reingaskanal bemerkbar machen.

Die Messungen mit dem Schaltelement ohne Faserbelag und der Schaumkeramik PPI 20 wurden nach den Abreinigungsversuchen durchgeführt, d.h. die Kerzen waren bereits bestaubt. Bei simuliertem Kerzenbruch sanken die maximal erreichbaren Drücke im Reingaskanal um ca. 20 mbar (bspw. von 100 mbar auf 80 mbar bei 1,5 bar Abreinigungsdruck). Abreinigungsgas konnte durch die gebrochene Filterkerze entweichen. Die geringere Abreinigungsintensität ist somit ein Indiz dafür, daß das Sicherheitsfilter nicht vollständig irreversibel verstopfte (zu den Filtrations- und Abreinigungsuntersuchungen siehe **Kapitel 5.2**).

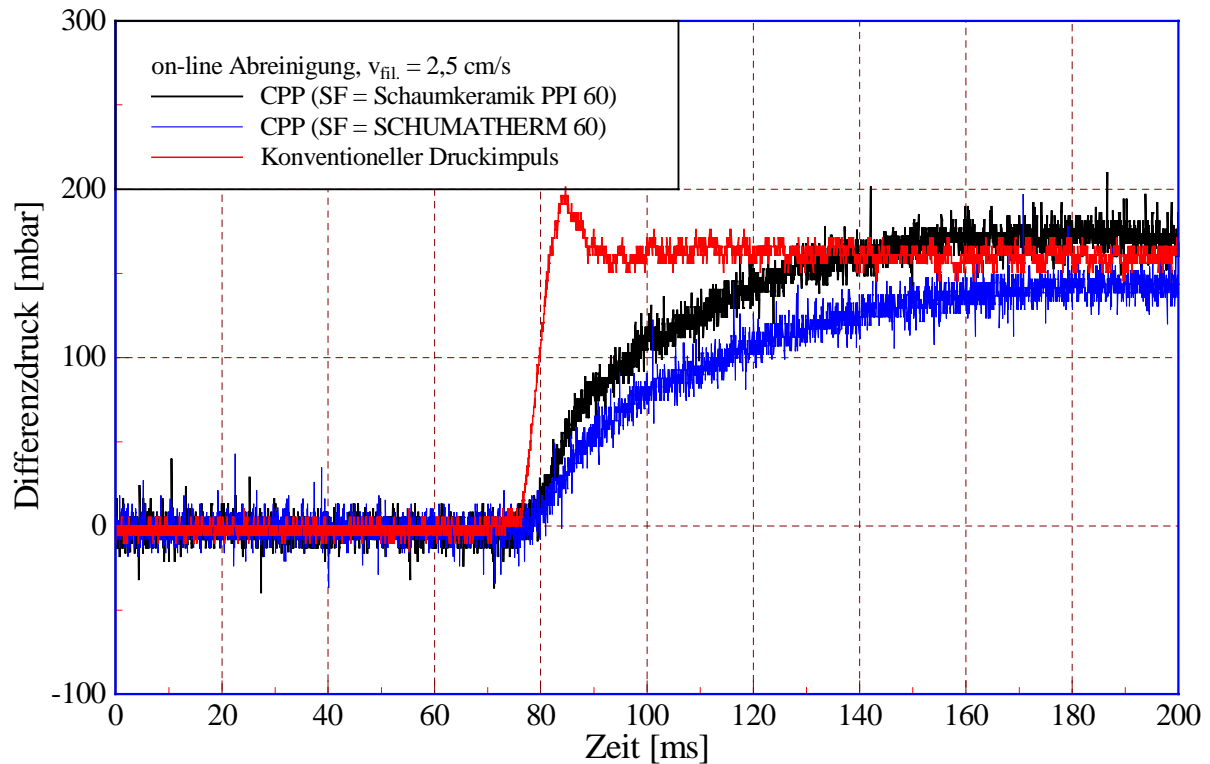
Auch mit der Kornkeramik als Sicherheitsfilter und der Schaumkeramikplatte PPI 20 als Schaltelement sinkt beim Kerzenbruch die erreichbare Abreinigungsintensität über den verbleibenden Filterkerzen und Sicherheitsfiltern um ca. 20 mbar im Vergleich zum Normalbetrieb, ebenfalls ein Indiz für eine nicht irreversible Verstopfung.

### **5.1.5 Einfluß der Abreinigungstechnik**

#### **Vergleich mit konventioneller Jet-Pulse – Abreinigung**

Vergleichsmessungen mit der bisher eingesetzten konventionellen Jet-Pulse – Abreinigungstechnik des Industriepartners, die ebenfalls an der Anlage SUT durchgeführt wurden, belegen die Vorteile des neuen Abreinigungssystems. Erst bei einem Vordruck von 5,2 bar werden vergleichbare Abreinigungsdrücke wie beim neuentwickelten CPP – Verfahren mit lediglich 1,0 bar Vordruck erreicht (siehe **Abbildung 5-10**).





**Abbildung 5-10:** Differenzdruckverlauf: Vergleich CPP und konventioneller Druckimpuls  
 Vordruck bei CPP – Abreinigung: 1,0 bar  
 Vordruck bei konventionellem Druckimpuls: 5,2 bar

Im Vergleich zur Jet-Pulse – Abreinigungstechnik ist allerdings der Druckanstieg beim CPP – Verfahren deutlich langsamer (Faktor 10 bis zum Erreichen des Maximums), so daß eher ein Rückspülvorgang, als ein Druckimpuls vorliegt.

## 5.2 Abreinigungsuntersuchungen an der Kerzengruppe

Die Abreinigungsuntersuchungen an der Kerzengruppe wurden an der Anlage SUT bei einer Betriebstemperatur von 600 °C im Dauerbetrieb durchgeführt. Die Anströmgeschwindigkeit für die 6 Filterkerzen lag mit 5 cm/s unüblich hoch. Sie wurde so gewählt, um kritische Bedingungen zu simulieren. Der Abreinigungsdruck lag lediglich bei 1,5 bar. Der verwendete Staub kam aus der Druckwirbelschichtanlage Grimethorpe, GB. Dieser Staub wurde aufgrund seiner Feinheit gewählt. Zudem wurde er bei Fa. SCHUMACHER schon eingehend untersucht und die Staubdaten sind bekannt (siehe **Tabelle 3-9**).

Es wurde sowohl der Normalbetrieb, als auch der Störfallbetrieb getestet. Im Normalbetrieb waren 6 intakte Filterkerzen vorhanden. Für den Störfallbetrieb wurde eine Kerze abgesägt, um den Kerzenbruch zu simulieren. Als Sicherheitsfilter kamen die beiden hitzebeständigen Mate-

rialien Schaumkeramik (PPI 60) und Kornkeramik (SCHUMATHERM 60) zum Einsatz. Als Schaltelement wurde die Schaumkeramikplatte PPI 20 verwendet.

### 5.2.1 Schaumkeramik als Sicherheitsfilter

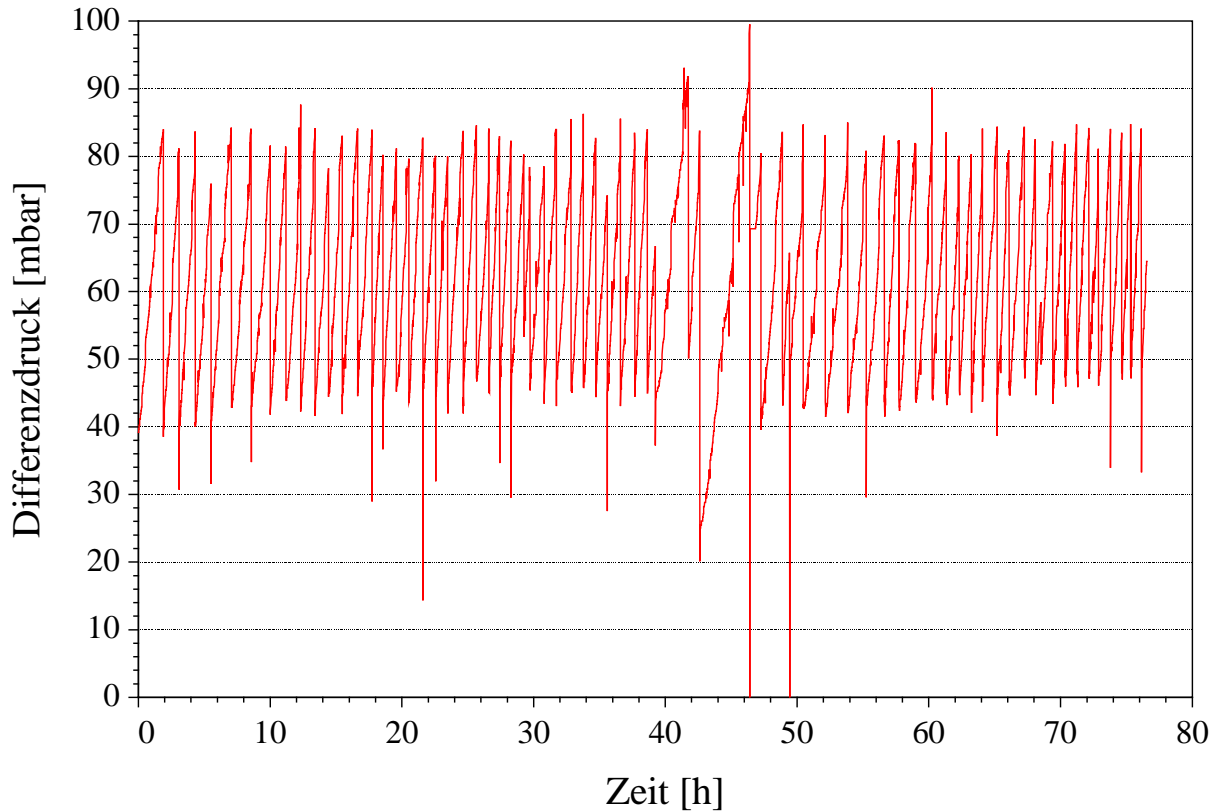
Da die Schaumkeramik bei den Messungen zur Abreinigungsintensität an der Filterkerze bessere Ergebnisse lieferte als die Kornkeramik (siehe **Abbildung 5-6**), wurde sie als Sicherheitsfilter zunächst favorisiert. Ebenso, weil sie einen geringeren Differenzdruck aufwies (siehe **Abbildung 3-3**) und somit den Gesamtdruckverlust der Anlage niedrig hielt. Ein Problem dieser Schaumkeramik ist allerdings ihre geringe mechanische Festigkeit, was Schwierigkeiten beim Einbau der Sicherheitsfilter verursachte.

#### Normalbetrieb

Vor den hier beschriebenen Untersuchungen bei 600 °C fanden untergeordnete Abreinigungsuntersuchungen bei niedrigeren Temperaturen und einer Anströmgeschwindigkeit von 2,5 cm/s statt. Der rechnerische Anfangsdruckverlust der unbestaubten Filterkerzen liegt für die aktuellen Betriebsbedingungen bei 35,7 mbar. Der **Abbildung 5-11** ist ein Anfangsdruckverlust von 40 mbar zu entnehmen. Somit waren die Filterkerzen bereits bestaubt.

Im Normalbetrieb konnte mit dem neuen Abreinigungsverfahren trotz der Anströmgeschwindigkeit von 5 cm/s und dem Abreinigungsüberdruck von nur 0,5 bar ein sehr gutes Abreinigungsergebnis erzielt werden. Der Restdruckverlust lag nur knapp oberhalb vom Anfangsdruckverlust des Filters (siehe **Abbildung 5-11**). Innerhalb der Versuchszeit von ca. 80 Stunden konnte das Filter stabil betrieben werden.

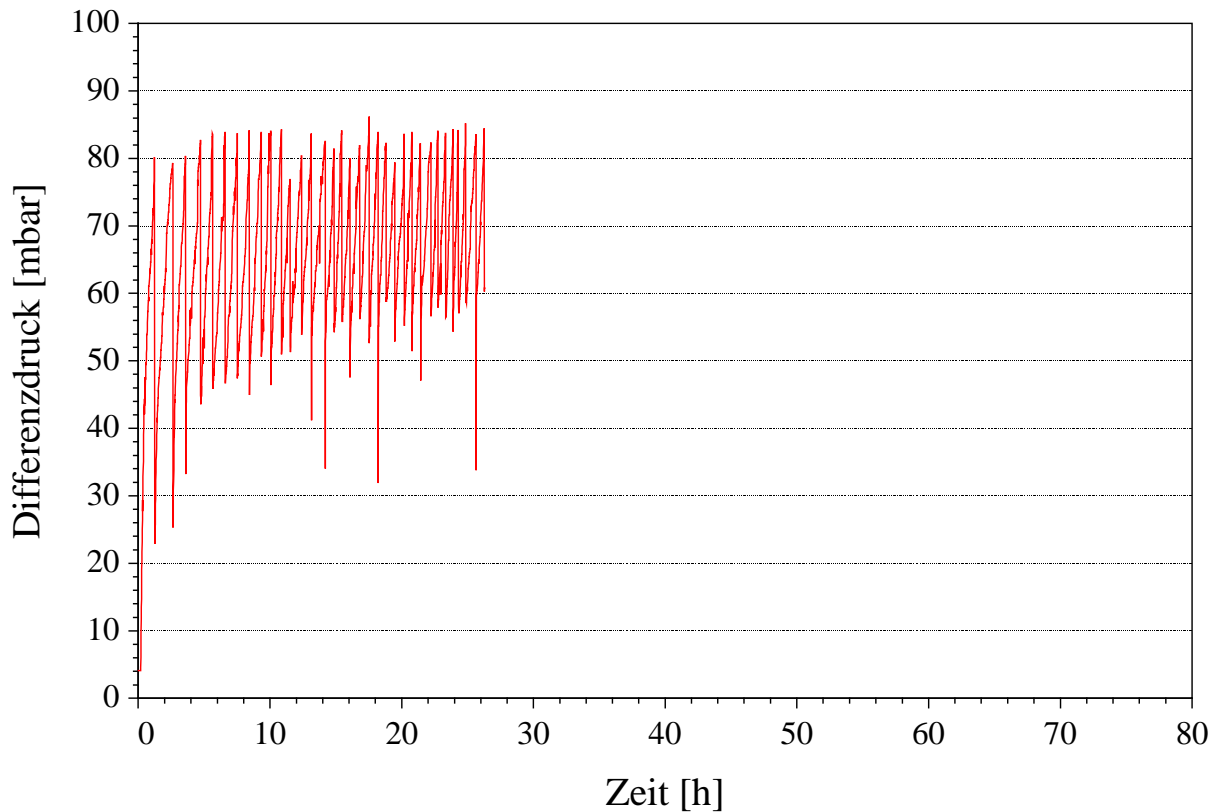
Nach jeder Abreinigung verläuft der erneute Druckanstieg linear, was auf eine sehr gleichmäßige und vollständige Abreinigung entlang der Filterkerze schließen lässt. Auf den ausgebauten Filterkerzen ist eine gleichmäßige Reststaubschicht zu sehen. Das genaue Aussehen der Staubschicht kann aber schlecht beurteilt werden, da die Kerzen nur durch Herausziehen aus der Lochplatte über einen dünnen Spalt ausgebaut werden können. Durch dieses Verfahren wird die Staubschicht größtenteils abgestreift und somit zerstört.



**Abbildung 5-11:** Betriebsverhalten im Normalbetrieb (6 intakte Filterkerzen)  
 Betriebstemperatur: 600 °C  
 Filtrationsgeschwindigkeit: 5 cm/s

### Störfallbetrieb

Um den Störfallbetrieb zu simulieren wurde eine Filterkerze abgesägt. Da während des Normalbetriebs geringe Leckagen an der Dichtung von der Kerze zur Lochplatte aufgetreten waren, wurden diese Dichtungen gewechselt. Durch den dazu notwendigen Ausbau aller Filterelemente wurde die vorhandene Reststaubschicht entfernt. Daher liegt der Anfangsdifferenzdruck beim Störfallbetrieb mit 4 mbar im Vergleich zu den vorherigen Messungen sehr niedrig (siehe **Abbildung 5-12**). Außerdem wurde die Gewichtsbelastung zur Verspannung von Kerzen und Sicherheitsfiltern erhöht. Sie war aufgrund der mechanischen Empfindlichkeit der Schaumkeramik zunächst niedriger als gewöhnlich gewählt worden. Durch diese Maßnahmen konnte eine vollständig partikeldichte Einspannung erreicht werden.



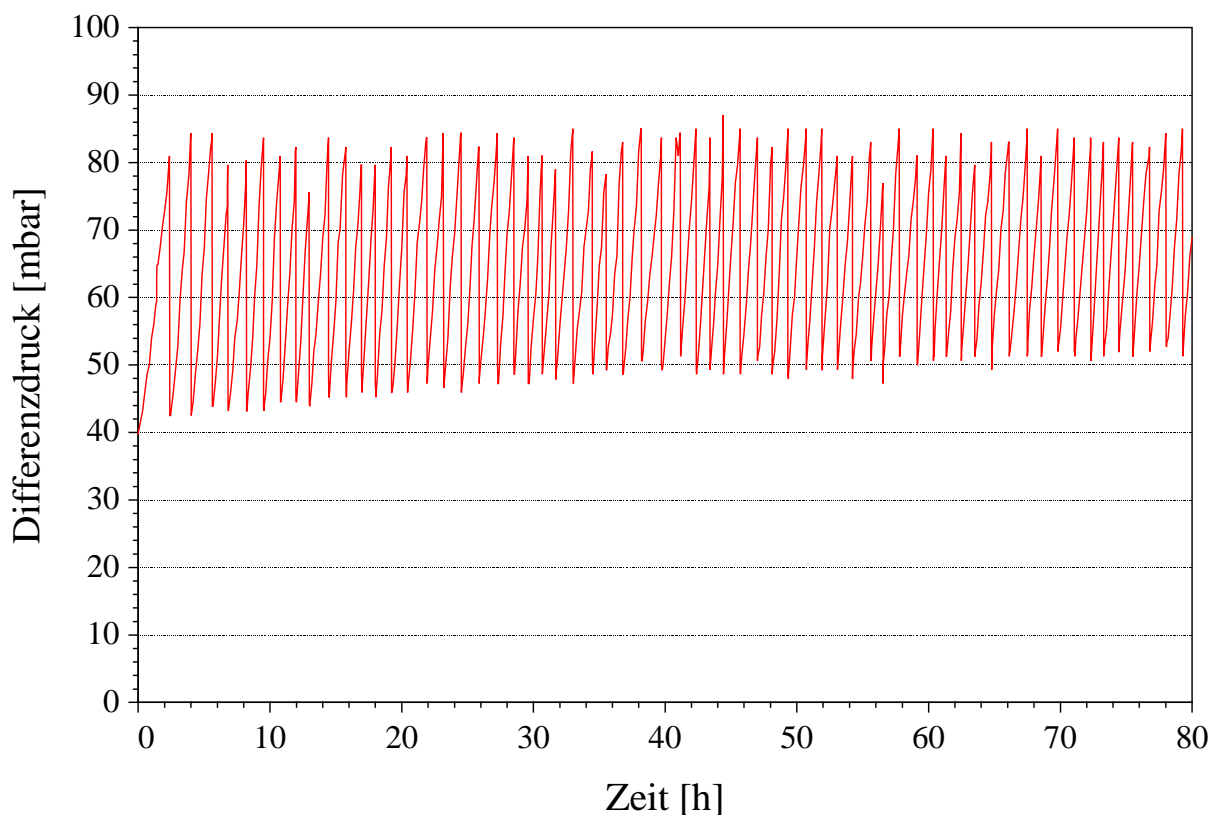
**Abbildung 5-12:** Betriebsverhalten im Störfall (1 Filterkerze defekt)  
 Betriebstemperatur: 600 °C  
 Filtrationsgeschwindigkeit: 5 cm/s

Ausgehend von dem niedrigen Anfangsdruckverlust stieg der Druckverlust mit der erneuten Bestäubung der Filterkerzen schnell wieder an. Mit der einschichtigen Schaumkeramik als Sicherheitsfilter konnte der Staub nicht ausreichend zurückgehalten werden, so daß sich eine rein-gasseitige Verschmutzung der intakten Kerzen ergab. Der Restdruckverlust stieg nach jeder Abreinigung weiter an. Ein stabiler Betrieb konnte nicht erreicht werden. Der Versuch wurde nach etwa 25 Stunden Betriebszeit abgebrochen, da der Sicherheitsfilter nicht irreversibel verstopfte. Die bei den Versuchen als Sicherheitsfilter eingesetzte Schaumkeramik ist hinsichtlich ihrer Staubabscheideleistung und ihres Verstopfungsverhaltens nicht geeignet. Abhilfe könnte bspw. eine dünne, feinporige Beschichtung der Schaumkeramik auf der Außenseite schaffen. Entsprechende Überlegungen werden mit Schaumkeramikherstellern diskutiert.

### 5.2.2 Kornkeramik als Sicherheitsfilter

Als zweites wurde die Kornkeramik SCHUMATHERM 60, die Fa. SCHUMACHER selbst herstellt, auf ihre Eignung als Sicherheitsfilter überprüft. Der Differenzdruck dieser Elemente liegt im Vergleich zur Schaumkeramik sehr hoch (siehe **Abbildung 3-3**). Bei den Messungen zur Abreinigungsintensität schnitt das Material an dieser Anlage jedoch nur geringfügig schlechter ab, als die Schaumkeramik (siehe **Abbildung 5-6**). Ein wesentlicher Vorteil der Kornkeramik ist ihre höhere Festigkeit und damit bessere mechanische Belastbarkeit.

#### Normalbetrieb



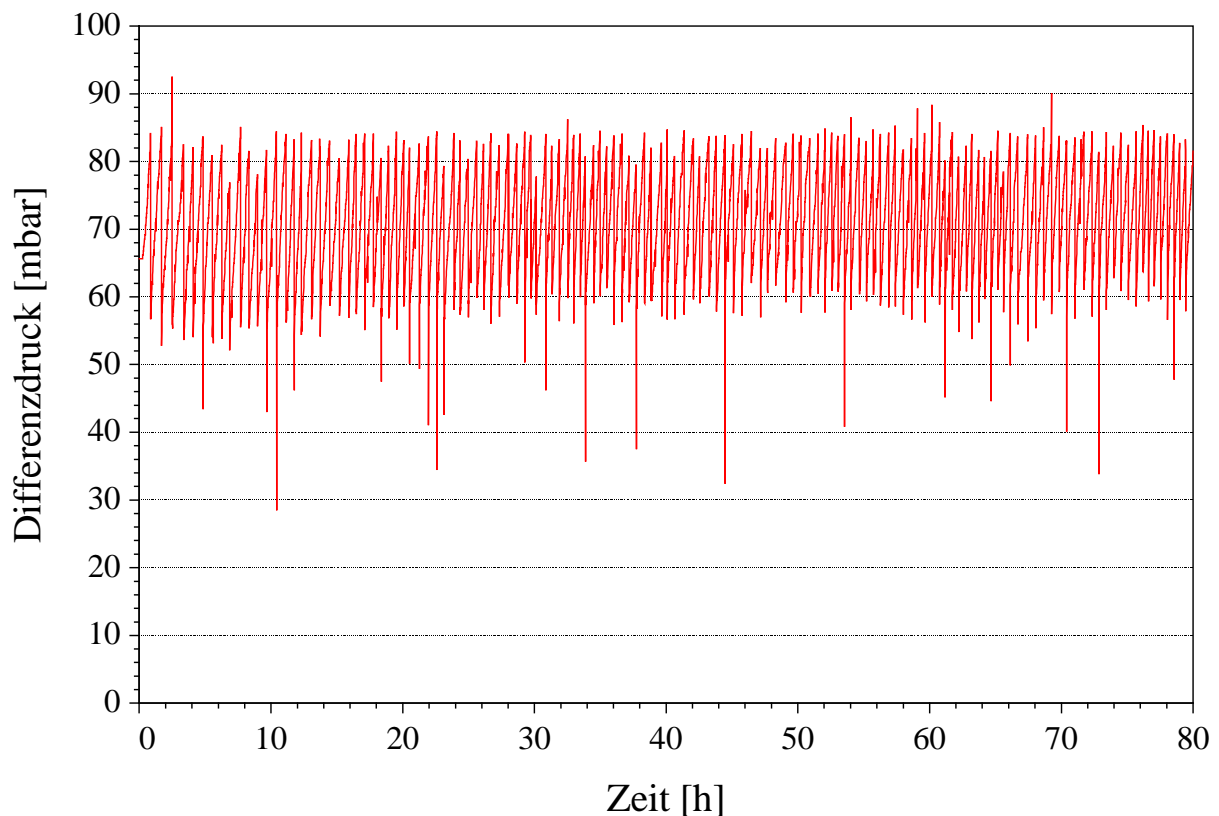
**Abbildung 5-13:** Betriebsverhalten im Normalbetrieb  
 Betriebstemperatur: 600 °C  
 Filtrationsgeschwindigkeit: 5 cm/s

Das Filter war im Gegensatz zu den Versuchen mit der Schaumkeramik als Sicherheitsfilter zu Beginn der Versuchsreihe neuwertig (die Filterkerzen wurden zwischenzeitlich manuell gereinigt) und wurde nur bei 600 °C betrieben. Im Normalbetrieb stellte sich ausgehend von einem Anfangsdruckverlust von 39 mbar nach einer kurzen Konditionierphase von ca. 30 Stunden ein stabiler Betrieb mit einem Restdruckverlust von 50 mbar ein (siehe **Abbildung 5-13**). Nach

80 Betriebsstunden wurde der Versuch abgebrochen. Im Vergleich zu den Versuchen mit der Schaumkeramik als Sicherheitsfilter liegt dieser Wert bei sonst unveränderten Bedingungen um 5 mbar höher (50 statt 45 mbar), was auf den höheren Widerstand des Kornkeramik-Sicherheitsfilters zurückzuführen ist. Die mittlere Dauer eines Filtrationszyklus lag bei 65 min.

### **Störfallbetrieb**

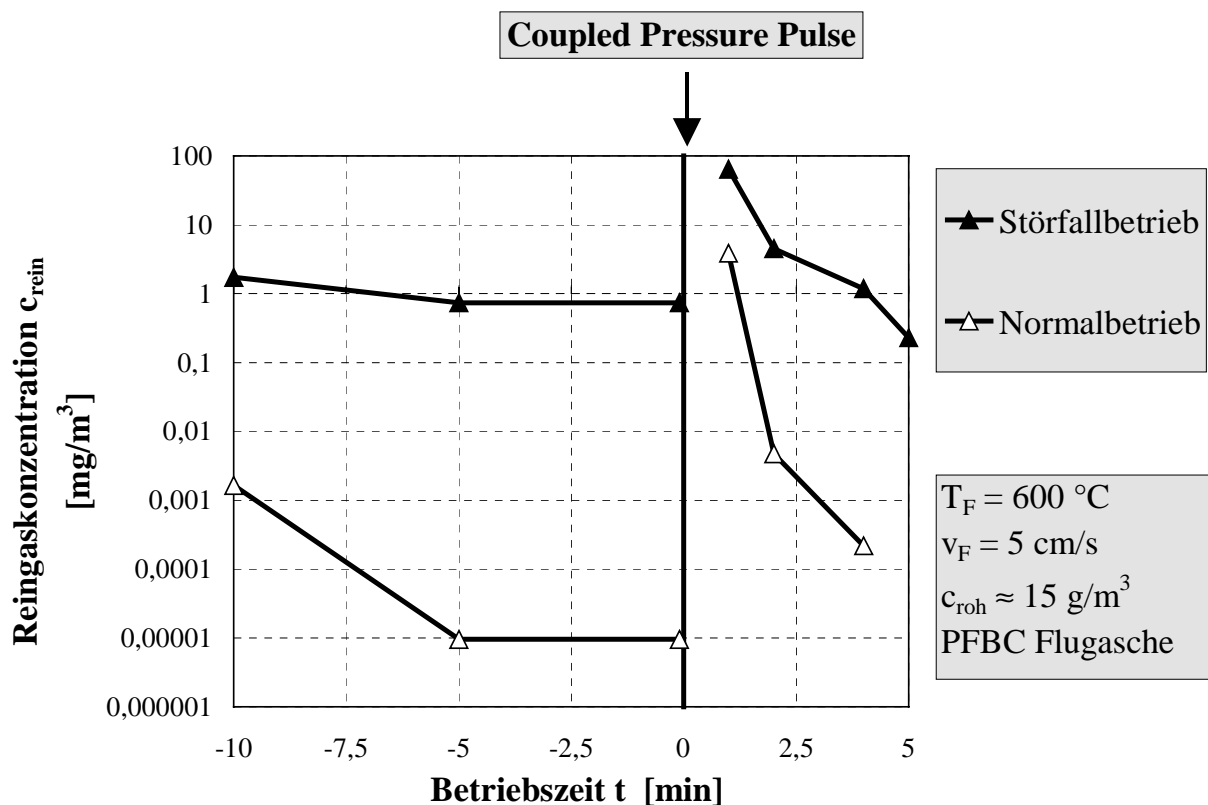
Für den Störfallbetrieb wurde wiederum eine Filterkerze entfernt. Bei unverändertem Volumenstrom stellte sich praktisch von Anfang an ein stabiler Betrieb mit einem Restdruckverlust um 60 mbar ein (siehe **Abbildung 5-14**). Der gegenüber dem Normalbetrieb erhöhte Restdruckverlust ist durch die erhöhte Anströmgeschwindigkeit zu erklären. Nach Verstopfen des Sicherheitsfilters stellte sich an den intakten Filterkerzen eine um 20 % erhöhte Anströmgeschwindigkeit ein. Die mittlere Dauer eines Filtrationszyklus ging auf ca. 35 min zurück. Dies ist zum einen auf die erhöhte Anströmgeschwindigkeit als auch auf den eingeschränkten Arbeitsbereich zurückzuführen.



**Abbildung 5-14:** Betriebsverhalten im Störfall  
 Betriebstemperatur: 600 °C  
 Filtrationsgeschwindigkeit: 5 cm/s

### Reingasstaubgehalt

Während des Normal- und Störfallbetriebs mit der Kornkeramik als Sicherheitsfilter wurde mittels eines Laserpartikelzählers die Reingaskonzentration bestimmt. **Abbildung 5-15** zeigt den zeitlichen Verlauf der Reingaskonzentration jeweils vor und nach einer Abreinigung. Vor der Abreinigung verlaufen die Werte weitgehend konstant, nach einer Abreinigung kommt es kurzzeitig zu einem Staubdurchbruch mit deutlich höheren Werten, die jedoch schnell auf den Wert vor der Abreinigung abklingen. Im Normalbetrieb liegt die Reingaskonzentration bis auf die kurze Phase nach der Abreinigung praktisch ständig weit unter  $1 \text{ mg/m}^3$ . Im Störfallbetrieb liegen die Werte etwa 3 Größenordnungen darüber, sind aber immer noch mit etwa  $1 \text{ mg/m}^3$  sehr niedrig. Die höheren Werte im Störfallbetrieb zeigen auf, daß die als Sicherheitsfilter eingesetzte Kornkeramik nicht wie gewünscht irreversibel verstopft und somit hinsichtlich ihrer Staubrückhalteeigenschaften noch weiterentwickelt werden muß.



**Abbildung 5-15:** Reingasstaubgehalt vor und nach der CPP – Abreinigung bei Normal- und Störfallbetrieb, Kornkeramik als Sicherheitsfilter

### **Fazit**

Die Kornkeramik erwies sich nach diesen Versuchsreihen, als das besser geeignete Sicherheitsfiltermaterial. Aufzuführen sind hierbei die höhere Abscheideleistung und stärkere Verstopfungsneigung sowie die deutlich höhere mechanische Festigkeit des Materials gegenüber der Schaumkeramik. Der im Vergleich zur Schaumkeramik höhere Anfangsdruckverlust relativiert sich im Betrieb sehr schnell, da Restdruckverluste nahe am Anfangsdifferenzdruck erreicht werden.

## **6 Zusammenfassung und Ausblick**

Keramische Filterkerzen für den Temperaturbereich bis 850 °C spielen eine Schlüsselrolle bei Kohleverstromungsprozessen mit kombiniertem Gas- und Dampfturbinenkreislauf. Bei erhöhtem Feinstaubanteil, der für Hochtemperaturprozesse typisch ist, neigen kommerziell erhältliche Filtersysteme jedoch zu frühzeitigem Verstopfen, wodurch die geforderte Standzeit von 10.000 Stunden nicht gewährleistet werden kann. Eine der wesentlichen Ursachen ist die zu geringe Abreinigungsintensität des konventionellen Druckimpuls – Abreinigungsverfahrens. Bedingt durch das Abreinigungsprinzip sind hohe Abreinigungsdrücke nötig, die i.d.R. etwa das 2-fache des Systemdrucks betragen. Insbesondere bei Hochdruckanwendungen ist damit ein enormer energetischer und apparativer Aufwand verbunden. Dennoch wird im Einströmbereich einer Kerze meist nur eine Abreinigungsintensität erreicht, die wegen des ausgeprägten Druckprofils auch nur geringfügig erhöht werden kann. Weiterhin unterliegen die Filterelemente im Betrieb einer hohen mechanischen, thermischen und chemischen Beanspruchung, die im Extremfall zum Bruch der Filterkerze führen kann. Bei Kerzenbruch gelangt staubbeladenes Rohgas ungereinigt auf die Reingasseite der Filterstufe, verbunden mit einer Schädigung der nachgeschalteten Gasturbine. Der Markt verlangt deshalb nach Lösungen, die einen wirksamen Schutz der Gasturbine auch bei Kerzenbruch und die Aufrechterhaltung des Anlagenbetriebs erlauben.

Zielsetzung des Vorhabens war die Entwicklung eines verbesserten Abreinigungssystems für keramische Filterkerzen, das außerdem bei Kerzenbruch durch ein integriertes Sicherheitsfilter die selbsttätige Blockade des schadhaften Filterelements hervorruft, so daß die übrigen Filterelemente der Kerzengruppe ohne zusätzliche Maßnahmen weiter betrieben werden können. Durch die direkte Ankoppelung der Abreinigungseinheit über das Sicherheitsfilter an die Filterkerze ermöglicht das optimierte Verfahren eine deutlich höhere Abreinigungsintensität, weitgehend unabhängig vom Systemdruck, bei geringerem energetischen und anlagentechnischen Aufwand. Sie kann darüber hinaus an bereits bestehenden Anlagen nachgerüstet werden.



Das Vorhaben, das zusammen mit dem Kooperationspartner Fa. SCHUMACHER Umwelt- und Trenntechnik, Crailsheim, bearbeitet wurde, konnte zum 31.12.1998 erfolgreich abgeschlossen werden. Das Vorhaben beinhaltete folgende Untersuchungen:

- A) Einzelelementuntersuchungen bei Raumtemperatur und Systemdrücken bis 6 bar
  - Bestimmung der Abreinigungsintensität
  - Untersuchungen zum Zeitverhalten im Normalbetrieb
- B) Technische Umsetzung des verbesserten Systems zur Abreinigung von Mehrkerzenanordnungen bei Temperaturen bis 600 °C und atmosphärischem Betrieb
  - Bestimmung der Abreinigungsintensität
  - Untersuchungen zum Zeitverhalten im Normalbetrieb und simuliertem Störfallbetrieb

Für strömungsdynamische und filtertechnische Untersuchungen bei Systemdrücken bis 6 bar wurde eine Filteranlage zur Aufnahme einer einzelnen Filterkerze aufgebaut und in Betrieb genommen. Die experimentellen Ergebnisse belegen die Vorteile des verbesserten Konzepts, wonach für atmosphärische Bedingungen bereits bei 2,0 bar Abreinigungsdruck im kritischen Einlaufbereich der Filterkerze Abreinigungsintensitäten erreicht werden, die für das konventionelle Verfahren erst mit 7,0 bar Vordruck möglich sind. Bei höheren Systemdrücken ist der Vorteil noch deutlicher, da der Abreinigungsdruck lediglich ca. 1 bar über dem Systemdruck liegt und nicht das 2-fache des Systemdrucks betragen muß. On-line Abreinigungsuntersuchungen an der Einzelkerzen-Filteranlage ergaben bei atmosphärischem und druckaufgeladenem Betrieb (6 bar) ein stabiles Filtrationsverhalten mit nahezu vollständig abgereinigten Filterkerzen. Auf der Kerzenoberfläche verbleiben lediglich geringfügige Staubkuchenreste. Der Vordruck des benötigten Abreinigungsgases lag dabei konstant lediglich 1 bar über dem Systemdruck.

Abreinigungsuntersuchungen mit einem Cluster von 6 Filterkerzen, bei Umgebungsdruck und Temperaturen bis 600 °C, mit Staub aus der Druckwirbelschichtanlage Grimethorpe, GB, führten an einer umgerüsteten Pilotanlage selbst bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 5 cm/s, die weit über den in der Praxis üblichen Werten liegt, und einem Abreinigungsvordruck von nur 1,5 bar zu Restdruckverlusten nahe dem Anfangsdruckverlust. Der bisher typische Anstieg des Restdruckverlustes durch nicht abreinigbaren Staub wurde nicht mehr beobachtet. Bei der Simulation eines Kerzenbruchs konnte mit einer kommerziell verfügbaren, einschichtigen Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Kornkeramik als Sicherheitsfilter ebenfalls der Funktionsnachweis erbracht werden. Der Druckverlust des hier verwendeten Sicherheitsfilters während des Filtrationsbetriebs ist jedoch noch zu hoch und muß im nächsten Entwicklungsschritt reduziert werden.

Das CPP – Abreinigungsverfahren wurde im April 1999 gemeinsam vom Forschungszentrum Karlsruhe und vom Kooperationspartner Fa. SCHUMACHER zum Patent angemeldet. Ein direkt anschließendes, zweijähriges Vorhaben verfolgt die Umsetzung zur Marktreife. Zielsetzungen dieses Vorhabens sind die Optimierung von Einzelkomponenten und Gesamtsystem für Filtereinheiten bis 1000 Filterkerzen, entsprechend einem Betriebsvolumenstrom von 40.000 m<sup>3</sup>/h je Filtereinheit.

## 7 Literaturverzeichnis

- Mai 1995      Mai, R., Fronhöfer, M., Leibold, H.:  
 Recleaning of Filter Candles by Fast Pressure Decrease on the Raw Gas Side.  
 in: Ebert F. (Hrsg.), PARTEC 95, 3rd European Symposium Separation of  
 Particles from Gases, Preprints, 21.-23. März 1995, Nürnberg Messe GmbH,  
 Nürnberg, 1995, S.301-310
- Mai 1996      Mai, R., Fronhöfer, M., Leibold, H.:  
 Flow Characteristics of Filter Candles During Recleaning.  
 in: Schmidt E. et al (Hrsg.), High Temperature Gas Cleaning, 18.-20. September  
 1996, Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik der Universität  
 Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 1996, S.193-206
- Leibold 1998      Leibold H., Mai R., Zimmerlin B., Bundschuh W., Fronhöfer M.,  
 Schulz K., Walch A.:  
 Langzeitstabile Feinstaubabscheidung mit keramischen Filterkerzen bei fort-  
 geschrittenen Kohleverstromungsverfahren.  
 Abschlußbericht Stiftung Energieforschung Baden-Württemberg, Forschungs-  
 zentrum Karlsruhe, FZKA 6055, Juni 1998
- Mitchell 1997      Mitchell, Stuart C.:  
 Hot gas particulate filtration.  
 IEACR/95, IEA Coal Research, London, UK, Juli 1997
- Shell 1993      Shell Internationale Research Maatschappij B.V.:  
 An apparatus for filtering solid particles from a fluid.  
 Patentnummer 0 551 951 B1, 1993