ILK, Dresden IUTA, Duisburg	11127 BG / 2
Name der Forschungsstelle(n)	AiF-Vorhaben-Nr. / GAG
	01.03.97-31.08.99
	Bewilligungszeitraum

Schlussbericht für den Zeitraum : 1997-1999

zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWA über die

AiF Otto von Guericke

geförderten IGF-Forschungsvorhaben

☒ Normalverfahren

☐ Fördervariante ZUTECH

Forschungsthema :

Selbstoptimierendes Abreinigungsverfahren für filternde Abscheider

Für ein ZUTECH-Vorhaben sind folgende zusätzliche Angaben zu machen:

Der fortgeschriebene Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

☐ ist beigefügt

☐ liegt bereits vor

☐ wird fristgerecht nachgereicht

Ort, Datum	Unterschrift der/des Projektleiter(s)

2

Abschlußbericht 1999 des AiF-Projektes

Selbstoptimierendes Abreinigungssystem für filternde Abscheider

Dr.-Ing. Wolf-Peter Frenzel, ILK

Dipl.-Ing. Peter Schluppkothen, IUTA

Inhalt

1 Einleitung ____ 3

2 Industrieuntersuchungen ____ 5

2.1 Aufbau und Randbedingungen des Filtermoduls im Industrieeinsatz ____ 5

2.2 Werkstoffauswahl und Einbau der Blähschläuche im Industrieeinsatz ____ 11

2.3 Durchführung und Auswertung der Industrieuntersuchungen zum Blähschlauchverfahren ____ 14

2.3.1 Versuche zur Pulse-Jet-Abreinigung ____ 16

2.3.2 Versuche zur Blähschlauch-Abreinigung ____ 23

2.4 Ergebnisse der Industrieuntersuchungen zum Blähschlauchverfahren ____ 29

2.4.1 Filtertuchverschleiß bei der Blähschlauchabreinigung ____ 32

2.4.2 Reingasemissionen bei der Blähschlauchabreinigung ____ 34

2.4.3 Energieverbrauch bei der Blähschlauchabreinigung ____ 35

2.4.4 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zum Blähschlauchverfahren ____ 37

3 Technikumsuntersuchungen ____ 39

3.1 Aufbau des Filtermoduls im Technikum ____ 39

3.2 Durchführung der Technikumsuntersuchungen ____ 50

3.3 Ergebnisse der Technikumsuntersuchungen ____ 57

4 Gesamtkonzept der speicherprogrammierbaren Mikroprozessorsteuerung ____ 89

4.1 Die Neuro-Fuzzy-Regelung der selbstoptimierenden Abreinigung ____ 93

4.2 Testbetrieb des selbstoptimierenden Abreinigungssystems ____ 98

5 Zusammenfassung ____ 105

6 Ausblick ____ 108

7 Verzeichnis der Formelzeichen ____ 110

8 Literatur ____ 113

Anhang: Schaltplan der Hardware-Baugruppen der Abreinigungssteuerung ____ 115

1 Einleitung

Die Regenerierung von Filterschläuchen in filternden Abscheidern erfolgt gegenwärtig meist mit dem Druckluftimpulsverfahren (Pulse-Jet). In der Filtrationsphase durchströmt die staubhaltige Luft die Filterschläuche von außen nach innen. Die Staubpartikel werden dabei an der Schlauchoberfläche abgeschieden und bilden dort eine Staubschicht. Mit wachsender Dicke der Staubschicht steigt der Filterdruckverlust der Filterschläuche und eine Abreinigung der Staubschicht vom Filterschlauch wird notwendig. Bei der Druckluftimpulsregenerierung wird über ein Druckluftdüsensystem kurzzeitig ein Druckluftstoß (Druckluftimpuls) in das Schlauchinnere eingeleitet. Die Staubluftströmung wird unterbrochen und durch entgegengesetzt wirkende Druck-, Strömungs- und Trägheitskräfte der Filterkuchen vom Filterschlauch abgereinigt. Der abgereinigte Staub sinkt in den Staubbunker ab und kann entsorgt werden. Die Druckluftimpulsregenerierung bewirkt eine intensive Reinigung der Filterschläuche. Dabei treten jedoch mehrere unerwünschte Nebenwirkungen auf.

- Starke mechanische Beanspruchung des Filtermaterials in der Regenerierungsphase durch das schlagartige Aufblähen und Zurückschlagen des Filterschlauches an den Stützkorb und dem damit verbundenen erhöhten Verschleiß des Filtermaterials.
- Erhöhter Staubdurchtritt nach dem Impuls durch den fehlenden Filterkuchen und das Zurückschlagen des Filterschlauches auf den Stützkorb.
- Ungenügendes Sedimentieren des abgereinigten Staubes durch die Zerstörung des Filterkuchens in feine Einzelteile und damit eine schnelle Wiederanlagerung des abgereinigten Staubes.

Durch das Blähschlauchverfahren sollen die Nachteile der Druckluftimpulsregenerierung weitestgehend aufgehoben werden /1/, /2/. Durch die Integration eines den Druckluftstoß aufnehmenden Schlauches aus elastischem und verschleißfestem Material (Blähschlauch) im Inneren des Textilfilterschlauches werden die Strömungskräfte durch den Druckluftimpuls reduziert und eine totale Desagglomeration des abgereinigten Staubes verhindert. Die Abreinigung des Filterkuchens erfolgt im wesentlichen durch Trägheitskräfte, die beim Aufblähen und Anlegen des Blähschlauches an den Filterschlauch auftreten. Die Regenerierung mittels Blähschlauch wirkt als indirekte Druckluftimpulsregenerierung im Gegensatz zu der herkömmlichen direkten Druckluftimpulsregenerierung.

Im Rahmen des Projekts wurden Untersuchungen zur Blähschlauchregenerierung und zur konventionellen Druckluftimpulsregenerierung im Technikum und in einem Industriebetrieb durchgeführt. Dabei wurde vor allem der Einfluß der regenerierungstechnischen Parameter untersucht.

Für die Filtration und die Regenerierung wird am filternden Abscheider Energie benötigt, die durch einen Ventilator für den Staubluftstrom und einen Kompressor für die Druckluft bereitgestellt wird. Der Energieverbrauch pro Zeit kann für die Filtration als Filtrationsleistung und für die Regenerierung als Regenerierungsleistung dargestellt werden. Die filtertechnische Gesamtleistung des Abscheiders ist dann gleich der Summe aus Filtrations- und Regenerierungsleistung. Im Arbeitsbereich eines filternden Abscheiders ergibt sich ein Leistungsminimum, in dem der Abscheider die geringste Energie verbraucht. Das Aufsuchen, Einstellen und Überwachen des Leistungsminimums sowie die Kontrolle der reingasseitigen Staubemission ist die Aufgabe der Regelung, die unter dem Begriff „Selbstoptimierendes Abreinigungssystem für filternde Abscheider" entwickelt und erprobt wurde.

Ausgehend von einem erarbeiteten Systemmodell für den Steuer-/Regelungsprozeß /4/ wurde im Rahmen des Projekts ein Neuro-Fuzzy-Regler zur Regelung der selbstoptimierenden Abreinigung konzeptioniert und in den Industrieuntersuchungen im Vergleich zu den herkömmlichen Abreinigungssteuerungen getestet.

Die beiden Teilaufgaben zum Forschungsthema „Blähschlauchregenerierung und selbstoptimierendes Abreinigungssystem" wurden in einer Gemeinschaftsarbeit zwischen dem Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V., Duisburg (IUTA) und dem Institut für Luft- und Kältetechnik gGmbH, Dresden (ILK) gelöst.

2 Industrieuntersuchungen

2.1 Aufbau und Randbedingungen des Filtermoduls im Industrieeinsatz

IUTA stand für die Industrieuntersuchungen ein mobiles Versuchsfiltermodul auf Basis einer Schlauch-Impulsfilteranlage der Fa. ESR-Entstaubungstechnik, Typ SPGT 90/14-6/6, mit folgenden technischen Daten zur Verfügung:

Luftmenge:	1000- 3500 Bm³/h
Gehäuse ausgelegt für:	500 daPa Unterdruck
Temperatur:	160°C je nach Filtermaterial
Werkstoff-Dichtungen:	Silikon beständig bis 220°C
Filterschläuche:	optional 6 x 6 = 36 Stück à 0,9 m²; Durchmesser 145 mm x 1980 mm lang
Filterfläche gesamt:	32,4 m²
Filtermedium:	PE-Nadelfilz, zweifach kalandriert
Filterstützkörbe:	aus verzinktem Draht mit Alu-Injektordüse bei Pulse-Jet-Abreinigung bzw. ohne Alu-Injektordüse bei Blähschlauch-Abreinigung
Volumen Druckluftank:	ca. 19 Liter
Druckluftdüse:	Düsenbohrung d_d=12 mm
Anzahl der Ventile:	6 Stück R 1" Membranventile
Ventilsteuergerät:	Δt-Steuerung (Impulszeit, Taktzeit, Nachlaufreinigung einstellbar) Δp-Steuerung (oberer/unterer Schaltpunkt und Alarmpunkte einstellbar)
Rohluftrohrleitung:	NW 190
Reinluftrohrleitung:	NW 280
Volumenstromregelung:	manuell über Drosselklappen
Volumenstrommessung:	Prandtl-Staurohr mit Drucksensoren (Fa. Jumo)
Staubmessung:	2 Staub-Emissions-Monitore vom Typ DT-770 von Bühler Meß- und Regeltechnik GmbH für Roh- und Reingas (triboelektrisches Meßprinzip)
Staubaustrag:	wahlweise über Zellenradschleuse oder Sammelbehälter
Datenerfassung- und	

Auswertetechnik:	Meßwerterfassungssystem Hydra Data-Logger bzw. Simatic S7 314 FM/WinCC Fa. Siemens
Steuerung/Regelung:	Simatic S7 314 FM/WinCC Fa. Siemens

Für den Betrieb im Bypass der Raumentstaubung der Sinteranlage eines Industriebetriebes wurden in diese Versuchsanlage

- 20 Textilfilterschläuche in 5 Reihen (4 Schläuche pro Membranventil)
- mit einer Einzelfilterfläche von 0,90 m^2
- und einer Gesamtfilterfläche von 18,00 m^2
- aus dem Filtermaterial Polyester-Nadelfilz, 2-fach kalandriert, Durchmesser 145 mm x 1980 mm lang Flächenmasse: 500 gm^{-2}, Luftdurchlässigkeit: 150 l/dm^2/min bei 196 Pa

implementiert, um eine

- erhöhte Filterflächenbelastung von ca. 110 $m^3/h/m^2$
- bei einem vorgesehenen Standardvolumenstrom von ca. 2000 Bm^3/h

für den Versuchsbetrieb zu realisieren. Die restlichen Bohrungen für den Einsatz weiterer Filterschläuche in der Trennwand zwischen Roh- und Reingaskammer wurden mit Hilfe von Blindstopfen verschlossen.

Für den Betrieb des IUTA-Filtermoduls in dem ausgewählten Industrieunternehmen wurde der Anschluß des Moduls an die Rohgasleitung vor den betriebsinternen Elektrofiltern mittels Bypass realisiert (Abb. 2.1). Die Rohgasleitung des IUTA-Filtermoduls wurde an die Rohgasleitung (NW 1117) der Raumentstaubung der Sinteranlage im Bypass (NW 200) angeschlossen. Das Versuchsfiltermodul des IUTA wurde im Industriebetrieb so aufgebaut, daß über manuelle Umstellung wahlweise eine Zeitsteuerung oder eine Druckverluststeuerung der Abreinigung sowie alternativ eine Regelung der Abreinigung über den Neuro-Fuzzy-Regler möglich ist. Die Anordnung der Filterschläuche und der Regelung der Filteranlage sind in Abb. 2.2, 2.3, 2.4 und 2.5 dargestellt.

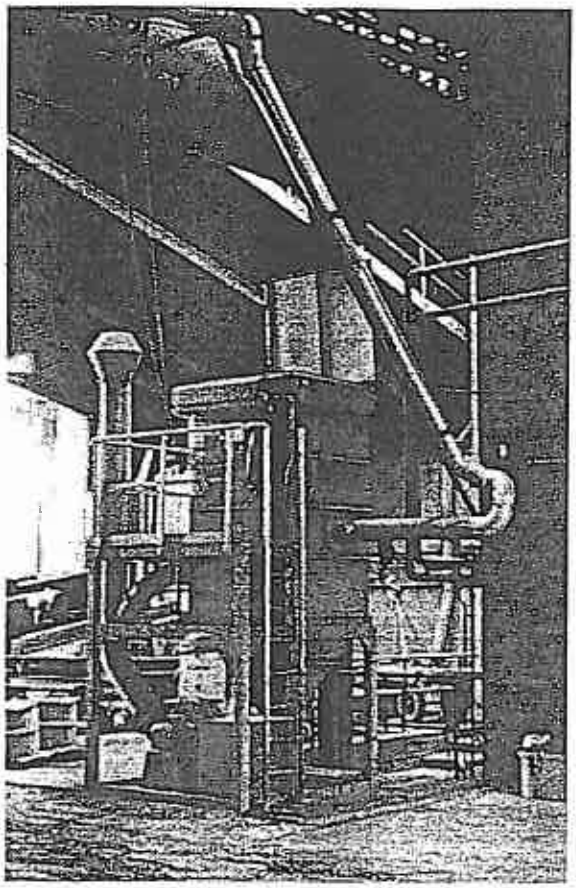


Abb. 2.1 Das IUTA-Filtermodul im Industriebetrieb

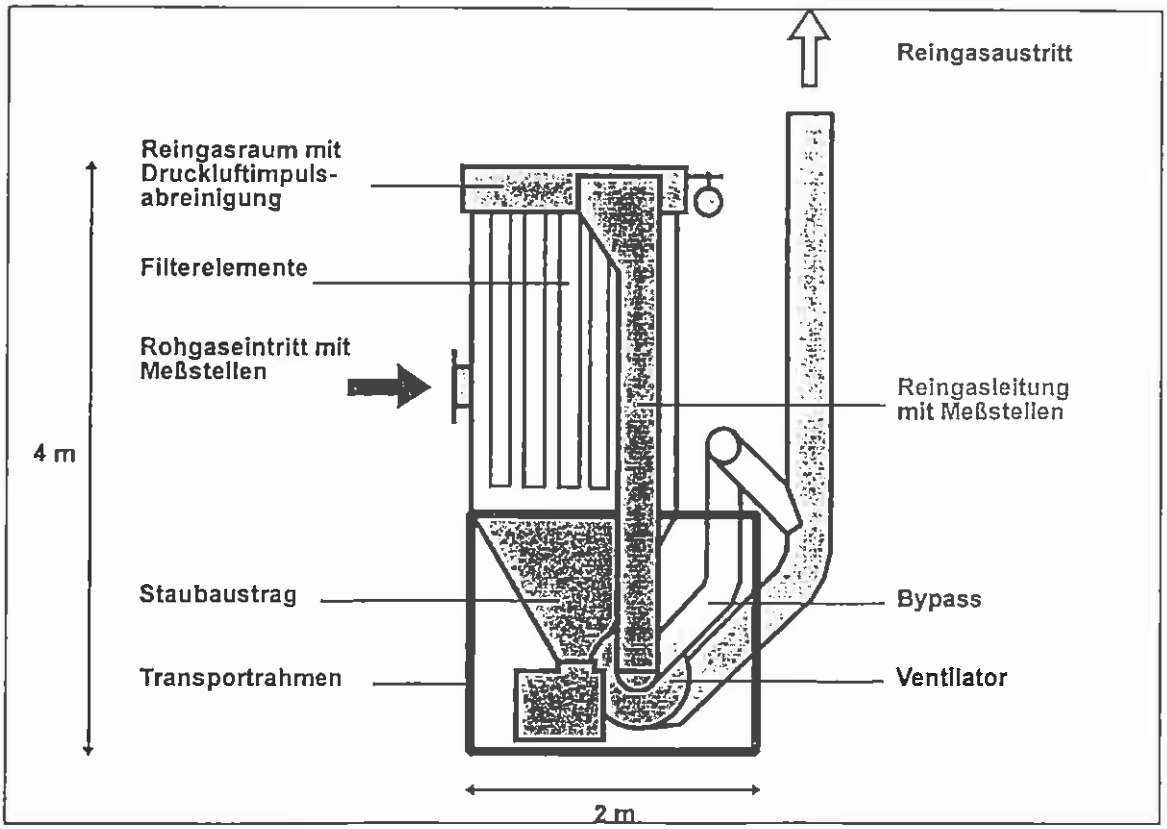


Abb. 2.2 Aufbau des IUTA-Filtermoduls

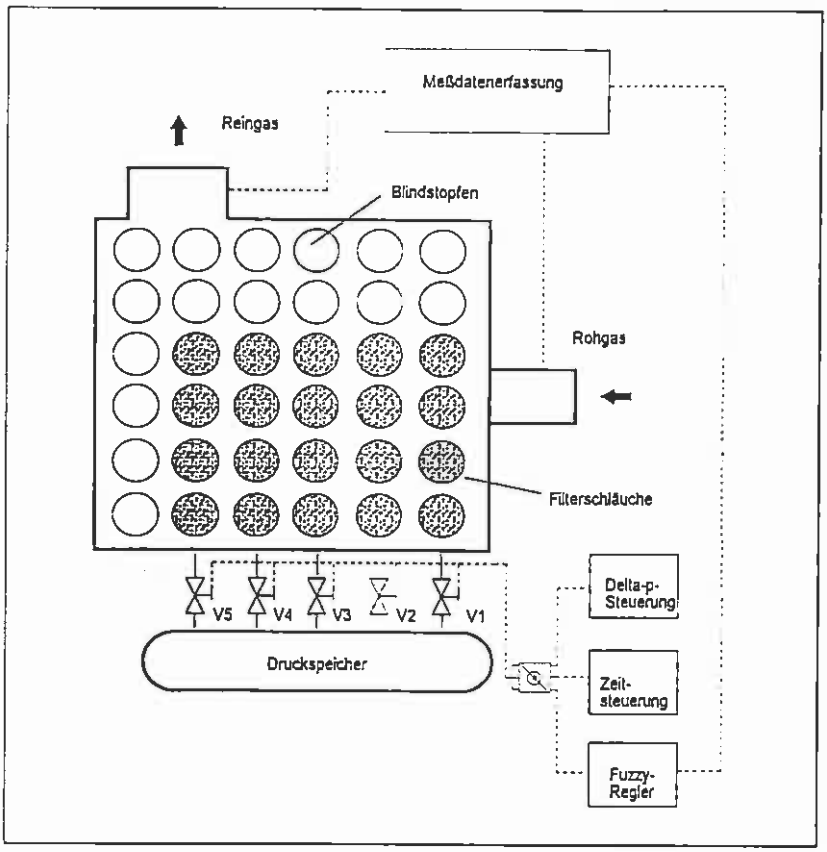


Abb. 2.3 Aufbau des IUTA-Filtermoduls

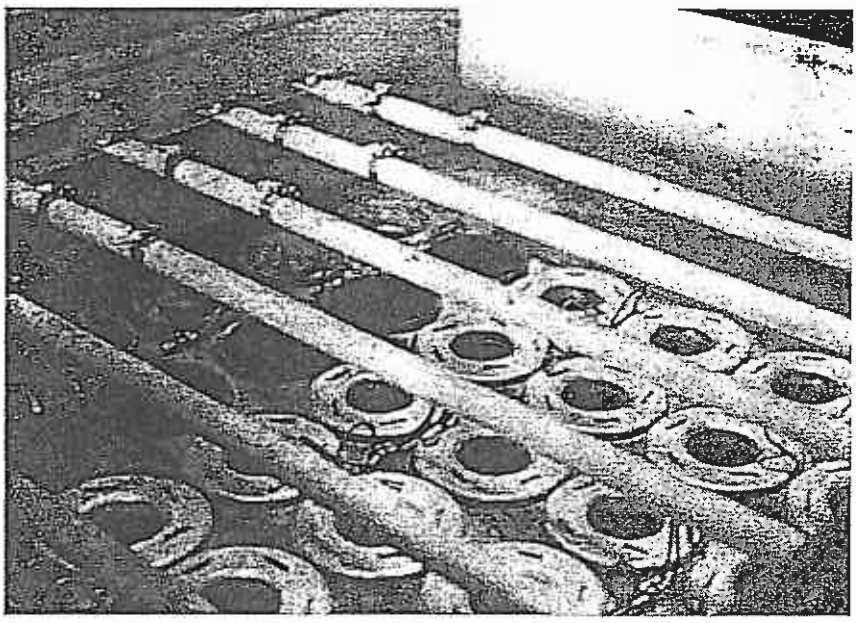


Abb. 2.4 Reingaskammer des IUTA-Filtermoduls mit Pulse-Jet-Abreinigung

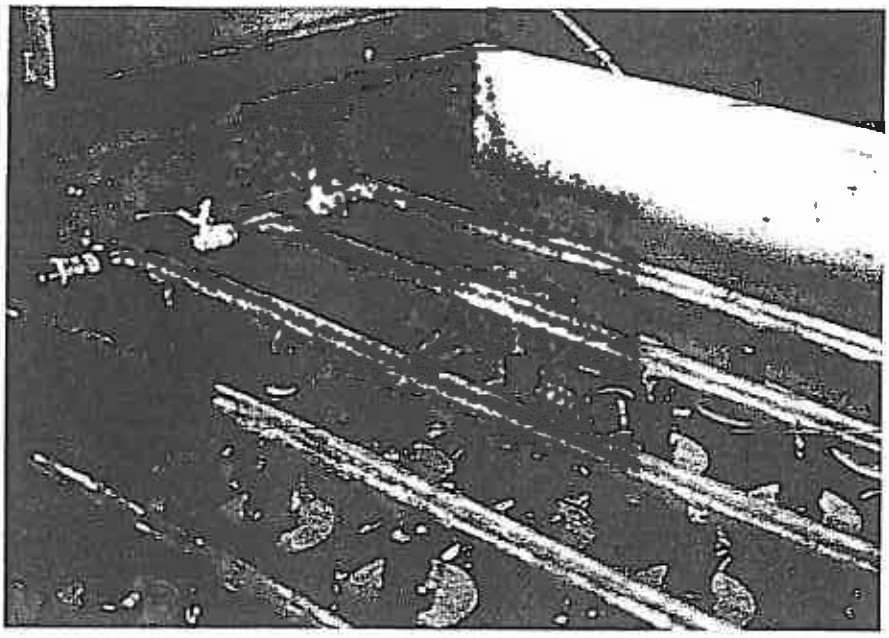


Abb. 2.5 Reingaskammer des IUTA-Filtermoduls mit Blähschlauch-Abreinigung

Da aus betrieblichen Gründen eine isokinetische Teilentnahme des Rohgases nicht möglich war, wurde der Bypass mit einem an der Wandung der Rohgasleitung abschließenden Y-Rohrleitungsflansch DN 200 realisiert. Demzufolge stellte sich die Rohgasstaubkonzentration und die Partikelgrößenverteilung des Staubes im Feedgas des IUTA-Filtermoduls als Funktion der gewählten Ventilatorleistung und der mittleren Rohgasstaubkonzentration in der Rohgasleitung der Raumentstaubung der Sinteranlage ein (Abb. 2.6).

Das Reingas des Filtermoduls wurde über eine Rohrleitung in die Umgebung abgeführt. Der sich bei der Abreinigung im Trichter des Filtermoduls sammelnde Staub wurde über eine Zellenradschleuse auf ein Förderband gefördert und im Betrieb weiterverarbeitet. Um nach einer Unterbrechung bzw. einer betriebsbedingten Stillstandszeit beim Anfahren der Raumentstaubung nicht unerwünschte Ablagerungen aus der Rohrleitung in das Rohgas des Filtermoduls einzubringen, wurde im Bypass ein Absperrschieber installiert. Ebenso wurde für diesen Fall eine automatische Unterbrechung der online-Messung der Parameter des Filtermoduls vorgesehen.

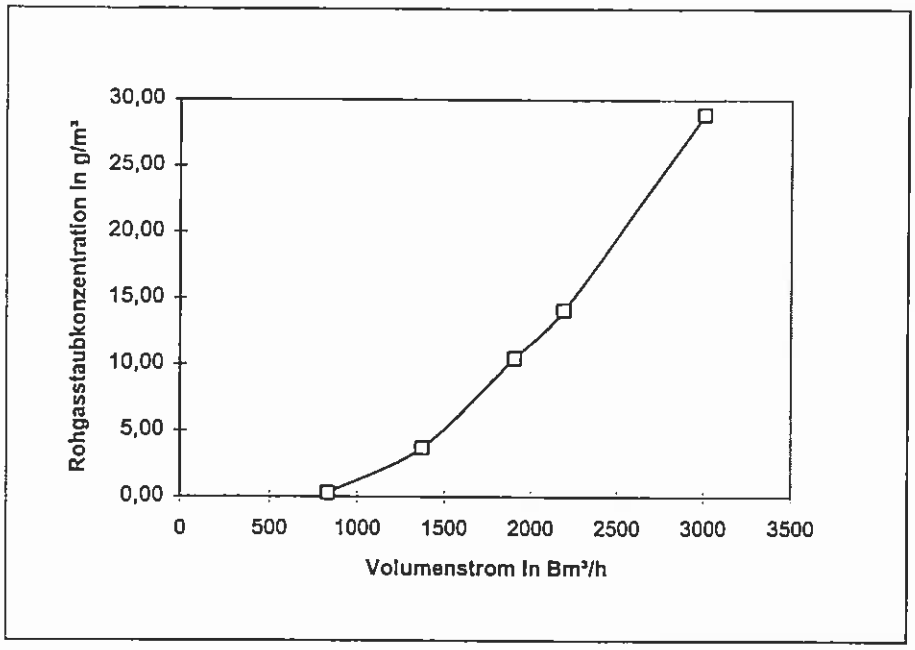


Abb. 2.6 Mittlere Rohgasstaubkonzentration im Bypass als Funktion des eingestellten Volumenstroms des IUTA-Filtermoduls

Die charakteristischen Parameter des Sinterstaubes des Industriebetriebes im Feedgas des Filtermoduls bei einem Volumenstrom von 2000 Bm³/h wurden mittels einer Partikelgrößenanalyse (Abb. 2.7) von zwei separaten Staubproben aus dem Staubbunker des Filtermoduls ermittelt und sind in Tab. 2.1 als Mittelwerte im Vergleich zum Prüfstaub (nach VDI 3926) Mikro-Calcilin dargestellt.

Tab. 2.1 Charakteristische Parameter des Sinterstaubes aus der Raumentstaubung des Industriebetriebes im Vergleich zum Prüfstaub Mikro-Calcilin

Staubart	$d(Q_3)_{50}$	Dichte
Mikro-Calcilin	3,28 µm	2,75 kg/dm³
Sinterstaubprobe 1	5,83 µm	4,37 kg/dm³
Sinterstaubprobe 2	4,88 µm	4,37 kg/dm³

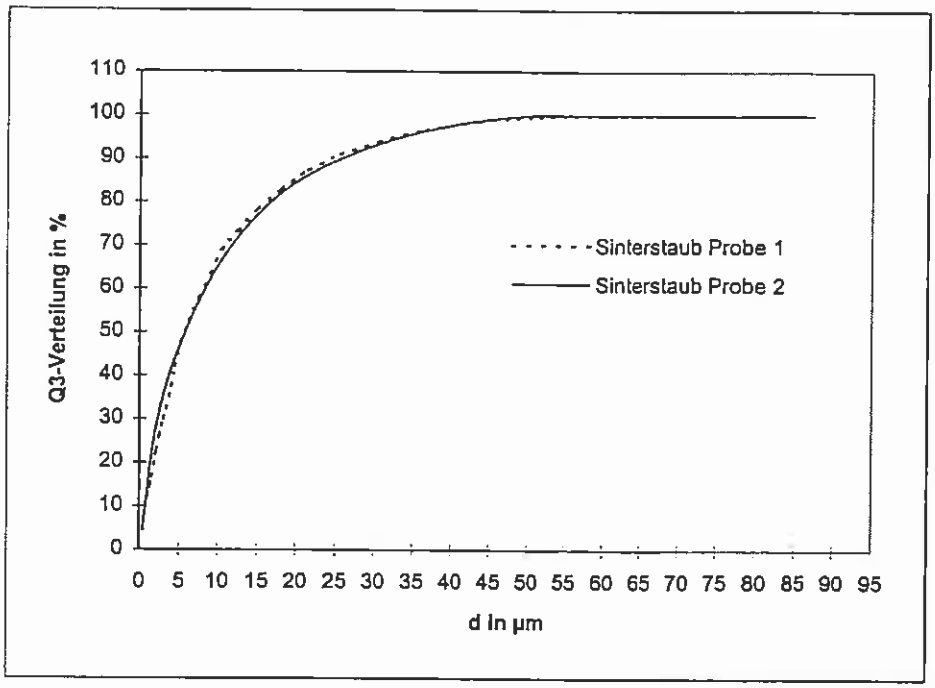


Abb. 2.7 Partikelgrößenverteilung des Sinterstaubes im Feedgas

2.2 Werkstoffauswahl und Einbau der Blähschläuche im Industrieeinsatz

Zur Werkstoffauswahl für das Material der Blähschläuche für die Industrieuntersuchungen wurde auf die Erfahrungen von dem Ingenieurbüro Dr. van Ackeren /1/, /2/, /16/ in Zusammenarbeit mit der Fa. MSR Schlauchtechnik /17/ und auf die Empfehlungen von der Fa. Sahlberg /18/ sowie der Produktentwicklung der Fa. Continental /19/ zurückgegriffen und den Industriebedingungen angepaßt.
Folgende Materialien wurden auf eine Eignung für den Industrieeinsatz als Blähschlauch hinsichtlich Abreinigungserfolg und Standzeit ausgewählt und untersucht:

- Polyurethan-Folie (PU), 0,6 mm Wandstärke,
  mit Blähschlauchdurchmesser DN_{BS}=110 mm

- Styrol-Butadien-Kautschuk-Folie (SBR), 0,6 mm Wandstärke,
  mit Blähschlauchdurchmesser DN_{BS}=110 mm

- Styrol-Butadien-Kautschuk-Folie (SBR), 1,0 mm Wandstärke,
  mit Blähschlauchdurchmesser DN_{BS}=120 mm

- Naturkautschuk-Folie (NK), 1,0 mm Wandstärke,
  mit Blähschlauchdurchmesser DN_{BS}=120 mm

Nachdem sich die PU-Folie in den Voruntersuchungen aufgrund mangelnder Elastizität, einer großen, bleibenden Dehnung und Rißbildung nach wenigen Abreinigungszyklen als ungeeignet erwiesen hatte, wurden die Industrieversuche am Filtermodul mit Blähschläuchen aus SBR- und NK-Folie gefahren, die in Voruntersuchungen ein geeignetes Verhalten für den Industrieeinsatz zeigten (Abb.2.8). Dabei waren für die einzelnen Materialien folgende werkstofftechnischen Kenndaten bekannt.

Tab. 2.2 Werkstofftechnische Material-Kenndaten der Hersteller

Material/ Eigenschaften	[redacted]	[redacted]	**PU**	**SBR**	**NK**
Hersteller			Schauenburg	Sahlberg	Sahlberg
Hersteller-Bezeichnung			ICI-PU: PH 4485 AB	SBR-Manchon	NK-Manchon NR 0450
	Prüf-methode	Einheit			
Dichte	ISO 2781	G/cm³	1,2		1,07
Shore-Härte A	ISO 868	Sh A	86	52	43
Zugfestigkeit	ISO37	MPa	44	10	
Zugfestigkeit bei 350 %	ISO37			3	
Bruchdehnung	ISO37	%	550	350	541
Spannungsmodul 100%	ISO 37	MPa	6,3		
Spannungsmodul 300%	ISO 37	MPa	12		
Reißdehnung	DIN 53504	%			451
Reißfestigkeit	ISO 34(B)	KN/m	123,3		14,5
Weiterreißwiderstand	DIN 53507	N/mm			5,4
Abriebfestigkeit	ISO 4649	mm³	20		
Rückstellfestigkeit	ISO 4662	%	46		60
Druckverformungstest Methode A (70°C)	ISO 815	%	36		
Druckverformungstest Methode B (70°C)	ISO 815	%	14		
Gehmann Test	ISO1432	T10	-41 C		
Temperaturbest.		°C		-40/+80	-50/80
Beständigkeit				gute Ozon-, Alterungs- und UV - Beständigkeit	
Bemerkung			spiralförmig gewickelt	extrudiert und vorvulkanisiert mit Fertigungs-Liege-Falte	spiralförmig gewickelt

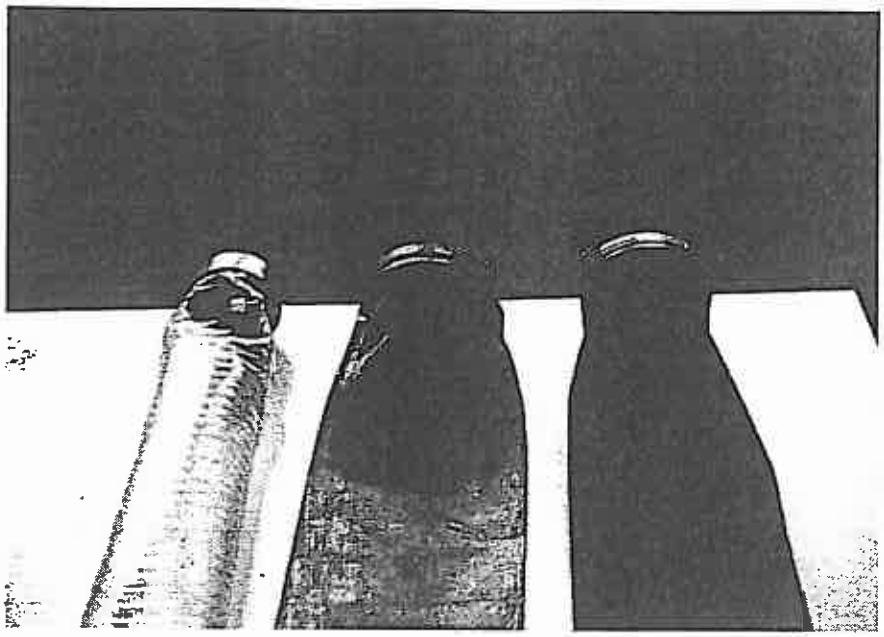


Abb. 2.8 PU-, SBR- und NK-Blähschläuche

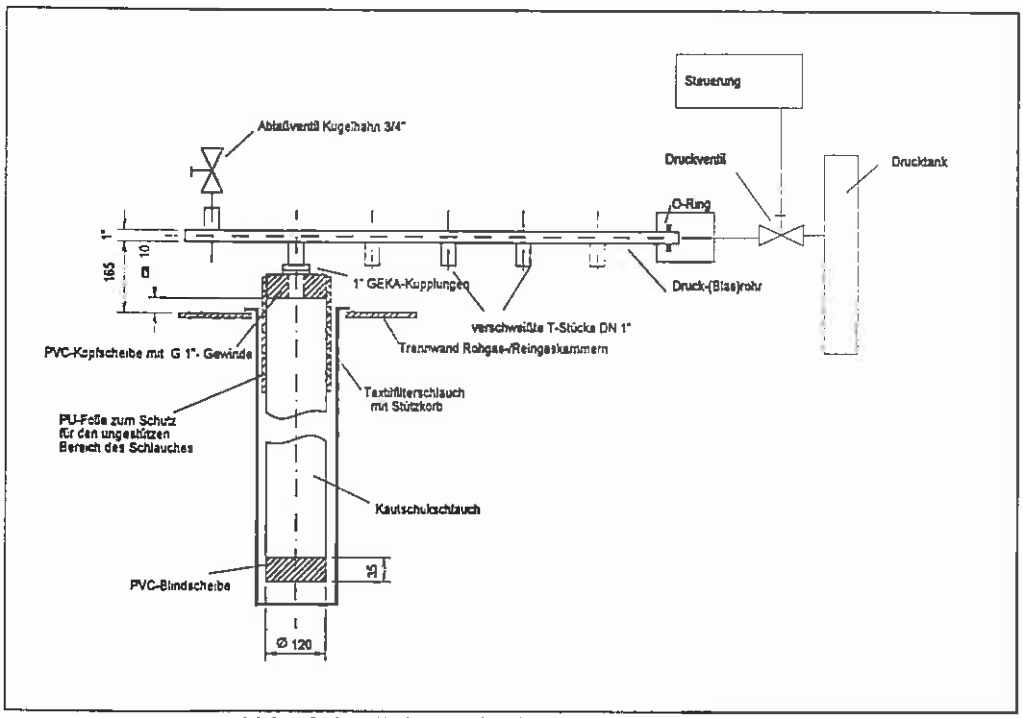


Abb. 2.9 Einbauprinzip der Blähschläuche

Die Blähschläuche wurden auf eine Länge von 2 m konfektioniert und am oberen Ende mit einer Kopfscheibe aus PVC als Druckluftein-/auslaß und am unteren Ende mit einer Blindscheibe als Gewicht versehen und luftdicht verschlossen. In der Kopfscheibe wurde mittels einer eingeschraubten 1" GEKA-Kupplung die Einlaß-/Auslaßöffnung für die Druckluft realisiert. Beim Einbau der Blähschläuche wurde die GEKA-Kupplung der Kopfscheibe mit der GEKA-Kupplung an der Drucklanze luftdicht verbunden. Als Öffnung zum langsamen Entweichen der Druckluft nach dem Aufblähen des Blähschlauches war als Ablaßventil ein

3/4" Kugelhahn am Ende der Drucklanze eingebaut, der minimal geöffnet war (Abb. 2.9, 2.10). Entspannt wurde in die Reingaskammer.

Abb. 2.10 Blähschlauch aus SBR mit Stützung für den Einsatz im Industriefiltermodul

2.3 Durchführung und Auswertung der Industrieuntersuchungen zum Blähschlauchverfahren

Die Industrieuntersuchungen im Sinterbetrieb einer Industrieanlage wurden in zwei Schritten mit Variation des Abreinigungsverfahrens und der Steuerung der Abreinigung durchgeführt.

a) Versuche mit Pulse-Jet-Abreinigung und druckverlustgetakteter Steuerung

b) Versuche mit Blähschlauch-Abreinigung und zeitgetakteter Steuerung

Das Modul wurde dabei ausgehend von folgenden Standardeinstellungen für das Blähschlauchverfahren bzw. für das Pulse-Jet-Verfahren betrieben:

- einem Volumenstrom von ca. 2000 Bm^3/h
- einer mittleren Rohgasstaubkonzentration von ca. 10 g/Bm^3
- 20 eingebauten Textilschlauchfiltern in 5 Reihen (4 Schläuche pro Druckventil),
- Impulszeiten von 160 ms,
- Umlaufzeiten von 150 s bis 7000 s,
- einem Speicherdruck bzw. Regenerierungsdruck im Druckbehälter von 6,5 bar abs. beim Blähschlauchverfahren, bzw. 6,3 bar abs. beim Pulse-Jet-Verfahren.

Nach der Kalibrierung der Meßgeräte vor Ort wurden bei allen Versuchen folgende Parameter online gemessen:

• die Staubkonzentration des Rohgases,	Meßbereich 0-50 g/ Bm^3
• die Staubkonzentration des Reingases,	Meßbereich 0-30 mg/ Bm^3
• die Zeiten und die Dauer der Abreinigung,	Meßbereich 0-10000 s
• der Filterdruckverlust des Abscheiders,	Meßbereich 0-40 mbar
• der reingasseitige dynamische Druck (Prandl-Rohr),	Meßbereich 0-5 mbar
• die reingasseitige Temperatur,	Meßbereich 0-80 °C.

Die Meßgrößen wurden über die automatische Meßdatenerfassung aufgenommen. Folgende Bewertungsgrößen wurden auf dieser Basis berechnet:

- die Filterflächenbelastung
- der zeitliche Gradient des Druckverlustes am Filter
- die Impulszahl der Abreinigung pro Zeiteinheit bzw. die Umlaufzeit
- der Druckluftbedarf der Abreinigung pro Stunde
- die Filtrationsleistung
- die Regenerierungsleistung
- die Gesamtleistung
- der Energieverbrauch pro abgeschiedenem Massenanteil Staub
- der Staubmassenstrom des Roh-/ und Reingases
- der Gesamtabscheidegrad.

Es wurde zunächst der stabile, für die Versuchsreihen relevante Arbeitsbereich des Filtermoduls mit Werten des mittleren Filterdruckverlustes von 2 bis 20 mbar ermittelt. Ein instabiles Verhalten des Abscheiders trat ab einem mittleren Filterdruckverlust von ca. 21 mbar ein.

Um gleiche Versuchsbedingungen für die verschiedenen Abreinigungsverfahren zu realisieren, wurden zwischen den Versuchsreihen mit Pulse-Jet-Abreinigung und Blähschlauch-Abreinigung neue Filtertücher gleichen Typs (Polyester-Nadelfilz, 2-fach kalandriert) in das Filtermodul eingesetzt und einer jeweiligen Grundbestaubung von 3 Stunden unterzogen. Zwischen den einzelnen Versuchsreihen wurde bei Veränderung der Abreinigungsparameter jeweils eine dreistündige Grundabreinigung der Filterelemente mit erhöhter Abreinigungsfrequenz (Umlaufzeit: 100 s) vorgenommen.

2.3.1 Versuche zur Pulse-Jet-Abreinigung

Um auf die wechselnden Betriebsbedingungen im Industriebetrieb flexibel in der Meßwerterfassung reagieren zu können, wurde das Filtermodul in Versuchsreihe a) bei der Abreinigung mit Pulse-Jet zunächst druckverlustgetaktet betrieben. Beim Erreichen des oberen Druckverlustschaltpunktes wurde ein Abreinigungszyklus eingeleitet. Falls die Abreinigung mehrerer Filterreihen zum Erreichen des unteren Druckverlustschaltpunktes in einem Abreinigungszyklus notwendig waren, wurde mit einer voreingestellten Taktzeit t_T von 30 Sekunden zwischen den Druckluftimpulsen gereinigt. Aus den Meßwerten der sich einstellenden Pausenzeiten zwischen den Abreinigungszyklen und der Anzahl der benötigten Druckluftimpulse für einen Abreinigungszyklus wurde die Taktzeit $\overline{t_T}$ und der mittlere Filterdruckverlust $\overline{\Delta p_{FE}}$ ermittelt. Über Multiplikation der mittleren Taktzeit mit dem Faktor 5 (5 Filterreihen á 4 Filterelemente) konnte die mittlere Umlaufzeit $\overline{t_U}$ der Abreinigung ermittelt werden /4/. Für die Abreinigungsparameter gelten dabei folgende Definitionen:

- mittlere Taktzeit $\overline{t_T}$

  Die mittlere Taktzeit ist das arithmetische Mittel aller zeitlichen Abstände zwischen jeweils zwei Abreinigungsimpulsen.

- mittlere Umlaufzeit $\overline{t_U}$

  Die mittlere Umlaufzeit $\overline{t_U}$ ist das Produkt aus der mittleren Taktzeit und der Anzahl der Filterreihen.

- mittlerer Druckverlust $\overline{\Delta p_{FE}}$

  Der mittlere Druckverlust $\overline{\Delta p_{FE}}$ ist das arithmetische Mittel aller gemessenen Druckverlustwerte im stabilen Meßbereich.

- mittlere Reinluftstaubkonzentration $\overline{K_{Re}}$

  Die mittlere Reinluftstaubkonzentration $\overline{K_{Re}}$ ist das arithmetische Mittel aller gemessenen Reinluftstaubkonzentrationswerte im stabilen Meßbereich.

- maximale Reinluftstaubkonzentration $K_{Re,max}$.

  Die maximale Reinluftstaubkonzentration $K_{Re,max}$ ist der Maximalwert aller gemessenen Reinluftstaubkonzentrationen im stabilen Meßbereich.

Beim Betrieb des Filtermoduls mit einem Speicherruhedruck von 6,3 bar abs. bei der druckverlustgetakteten Pulse-Jet-Abreinigung in Versuchsreihe a) wurde zunächst der Betriebsbereich des Filters in Abhängigkeit von einer errechneten mittleren Takt- bzw. Umlaufzeit ermittelt. Dadurch wurde das Systemverhalten des Abscheiders bei verschiedenen Einstellungen der Filterdruckverlustschaltpunktpaare mit Versuchsdauern von 72 bis 130 Stunden erfaßt. Die Scanzeit der Meßdatenerfassung betrug dabei 1 Sekunde. Diese Vorgehensweise eignete sich insbesondere für den industriellen Bypass-Betrieb mit schwankenden Rohgaskonzentrationen. Die Versuche wurden bei mittleren Rohgaskonzentrationen k_{Roh} von 7,5 bis 13,7 g/Bm³ und Filterflächenbelastungen q von 104 bis 129 m³/m²/h durchgeführt. Der Verlauf des mittleren Filterdruckverlustes $\overline{\Delta p_{FE}}$ wie auch der Reingasstaubkonzentration $\overline{k_{Re}}$ wurden über die Meßdatenerfassung ermittelt und daraus die mittlere Taktzeit $\overline{t_T}$ bzw. mittlere Umlaufzeit $\overline{t_U}$ der Abreinigung sowie der mittlere zeitliche Filterdruckverlustgradient $\delta\,\overline{\Delta p_{FE}}\,/\delta t$ und der Gesamtabscheidegrad R_G des Abscheiders (ausgehend von quasi konstanter Staubdichte) des Moduls bestimmt. Der Gesamtabscheidegrad R_G ergibt sich durch:

$$R_G = (k_{Roh} - \overline{k_{Re}}) / k_{Roh} \quad .$$

Im weiteren wurden die für den Abscheiderbetrieb benötigte Regenierungsleistung P_R, die Filtrationsleistung P_F und die Gesamtleistung P_G sowie der Druckluftverbrauch/1000 Bm³ Abluft ermittelt. Für die drei Leistungen gelten die folgenden Zusammenhänge / 4/:

- Filtertechnische Gesamtleistung

$P_G = P_F + P_R$

P_G - filtertechnische Gesamtleistung

P_F - Filtrationsleistung

P_R - Regenerierungsleistung

- Filtrationsleistung

$P_F = \overline{\Delta p_{FE}} \cdot V_A$

$\overline{\Delta p_{FE}}$ - arithmetisches Mittel aller gemessenen Druckverlustwerte im stabilen Meßbereich.

V_A - Abscheidervolumenstrom

mit dem mittleren Druckverlust für eine einzelne Abreinigung

$$\Delta p_{FE} = \frac{\Delta p_{FE,1} + \Delta p_{FE,2}}{2}$$

- Regenerierungsleistung

$m_{D,A}$ - mittlerer Druckluftverbrauch des filternden Abscheiders

$P_R = m_{D,A} \cdot e$ e - spezifische Arbeitsübertragung bei der Bereitstellung der Druckluft

- spezifische Arbeitsübertragung

$$e = \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot R \cdot T_{R1} \left[\left(\frac{p_{R1}}{p_b} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right]$$

- Druckluftmenge pro Impuls und Druckluftventil

$$m_I = \frac{V_K \cdot p_{R1}}{R \cdot T_{R1}} \left[1 - \left(\frac{p_{R2}}{p_{R1}} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \right]$$

aus einer Massenbilanz am Druckluftspeicher

Annahme: isentrope Zustandsänderung, geschlossene Zuleitung,

- mittlerer Druckluftverbrauch des filternden Abscheiders

$$m_{D,A} = N_V \cdot \frac{m_I}{t_U}$$

mit

$t_u = N_V \cdot t_T$

- Regenerierungsleistung

$$P_R = \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot N_V \cdot V_K \cdot p_{R1} \left[\left(\frac{p_{R1}}{p_b} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right] \left[1 - \left(\frac{p_{R2}}{p_{R1}} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \right] \cdot \frac{1}{t_U}$$

κ - Isentropenexponent, $\kappa = 1{,}4$ für Luft

N_V - Anzahl der Druckluftventile (Filterelementreihen) am filternden Abscheider

V_K - Volumen des Druckluftspeichers (Druckkessel)

p_{R1} - Ruhedruck im Druckluftspeicher vor dem Impuls
= Abreinigungsdruck p_R (Speicherruhedruck)

p_{R2} - Ruhedruck im Druckluftspeicher nach dem Impuls

p_{R1} und p_{R2} - gemessen bei geschlossener Druckluftleitung zum Druckluftspeicher

p_b - Umgebungsdruck

t_U - Umlaufzeit der Druckluftimpulse, bei druckverlustgetakteter Abreinigung $\overline{t_U}$

t_T - Taktzeit der Druckluftimpulse, bei druckverlustgetakteter Abreinigung $\overline{t_T}$

R - Gaskonstante, $R_G = 287\ m^2 s^{-2} k^{-1}$ für Luft

T_{R1} - Ruhetemperatur im Druckluftspeicher vor dem Impuls

In Tab. 2.3 sind die eingestellten Versuchsbedingungen von Versuchsreihe a) dargestellt. In Tab. 2.4, 2.5, 2.6 und Abb. 2.11, 2.12, 2.13, 2.14 sind die Abreinigungsparameter als Funktion der Umlaufzeit bzw. des mittleren Druckverlusts aus Versuchsreihe a) dargestellt. Im weiteren wurden zur Erfassung des Systemverhaltens und als Grundlage für die spätere SPS-Programmierung multiple lineare bzw. potentielle Regressionen durchgeführt, die die Abhängigkeit der Abreinigungsparameter als Funktionen der Umlaufzeit beschreiben. Die ermittelten Funktionen sind in Tab. 2.6 zusammen mit ihrem Bestimmtheitsmaß (Summe der Fehlerquadrate R^2 des Pearsonschen Korrelationskoeffizienten) dargestellt. Sie beschreiben die jeweiligen Parameterbeziehungen im untersuchten Meßbereich weitgehend. Für die Regenierungsleistung und die Gesamtleistung beschreiben die aus den Regressionen ermittelten Funktionen die mathematische Abhängigkeit nur bis zu Umlaufzeiten von ca. 1500 s befriedigend und es wurde deshalb in den nachfolgenden Abbildungen auf eine Darstellung dieser Regression verzichtet.

Tab. 2.3 Abreinigungsparameter der Pulse-Jet-Abreinigung mit der druckverlustgetakteten Steuerung in Versuchsreihe a)

Parameter/Versuchsreihe	a)	
Anzahl Filterelemente		20
	Einheit	
Betriebsstunden gesamt	h	1075
Untersuchungsbereich Filterdruckverlust oberer Schaltpunkt, Beginn der Abreinigung	mbar	3 bis 16
Untersuchungsbereich Filterdruckverlust unterer Schaltpunkt, Ende der Abreinigung	mbar	2 bis 14
Summe Anzahl Abreinigungs-Zyklen		7188
Speicherruhedruck p_{R1} abs.	bar	6,3
Speicherruhedruck p_{R2} abs.		2,7
Rechnerisch maximaler Abreinigungsdruck im Filterelement abs. (Annahme isentrope ZA)	bar	1,60
Impulszeit	ms	160
Temperatur Reingas	°C	19-23
Zustand Textilfilter visuell		in Ordnung, keine Risse

Tab. 2.4 Ergebnisse der druckverlustgetakteten Pulse-Jet-Abreinigung, Versuchsreihe a)

$\overline{\Delta p_{FE}}$	q	$\overline{\delta \Delta p_{FE}/\delta t}$	$\overline{t_T}$	$\overline{t_U}$	k_{Roh}	$\overline{k_{Re}}$	$k_{Re,max}$	R_G
mbar	m³/h/m²	mbar/min	s	s	g/m³	mg/m³	mg/m³	
17,0	104	0,09	1327	6637	7,5	0,001	0,533	0,9999999
13,5	102	0,11	1065	5323	7,8	0,011	0,792	0,9999986
11,0	110	0,21	863	4314	8,2	0,021	0,812	0,9999974
9,0	111	0,23	647	3236	8,8	0,041	1,325	0,9999953
7,0	116	0,24	453	2265	10,5	0,084	2,315	0,9999920
5,0	121	0,52	231	1155	14,1	0,267	4,625	0,9999811
4,0	125	0,81	148	740	12,9	0,315	7,036	0,9999756
2,9	127	1,46	82	410	13,0	1,635	14,100	0,9998742
2,3	127	2,00	30	150	13,7	4,322	21,534	0,9996846

Tab. 2.5 Ergebnisse der druckverlustgetakteten Pulse-Jet-Abreinigung, Versuchsreihe a)

$\overline{\Delta p_{FE}}$	$\overline{t_T}$	$\overline{t_U}$	P_R	P_F	P_G	Druckluftbedarf/ 1000 m³ Abluft
mbar	s	s	W	W	W	in dm_N^3
17,0	1327	6637	7	782	789	49
13,5	1065	5323	11	665	676	80
11,0	863	4314	13	577	590	90
9,0	647	3236	17	473	489	115
7,0	453	2265	36	389	425	233
5,0	231	1155	50	278	328	318
4,0	148	740	72	222	295	448
2,9	82	410	143	167	309	855
2,3	30	150	424	139	563	2471

Tab. 2.6 Aus Regressionen ermittelte Funktionen der Abreinigungsparameter, Pulse-Jet-Abreinigung, Versuchsreihe a)

x	y	Funktion	R^2
$\overline{t_u}$ /[s]	$\overline{\Delta p_{FE}}$ /[mbar]	$y = 4E\text{-}11x^3 - 3E\text{-}07x^2 + 0{,}0029x + 1{,}9158$	0,9994
$\overline{t_u}$ /[s]	$\delta\,\overline{\Delta p_{FE}}\,/\delta t$ /[mbar/min]	$y = 176{,}63x^{-0{,}8362}$	0,9976
$\overline{t_u}$ /[s]	$\overline{k_{Re}}$ /[mg/m³]	$y = 133604x^{-1{,}9291}$	0,9037
$\overline{t_u}$ /[s]	$k_{Re,\,max}$ /[mg/m³]	$y = 5426{,}5x^{-1{,}0287}$	0,9750
$\overline{t_u}$ /[s]	P_R /[W]	$y = 1E\text{-}18x^6 - 3E\text{-}14x^5 + 2E\text{-}10x^4 - 9E\text{-}07x^3 + 0{,}0019x^2 - 1{,}7285x + 629{,}78$	0,9820
$\overline{t_u}$ /[s]	P_G /[W]	$y = 2E\text{-}18x^6 - 3E\text{-}14x^5 + 3E\text{-}10x^4 - 1E\text{-}06x^3 + 0{,}002x^2 - 1{,}6416x + 751{,}67$	0,9866

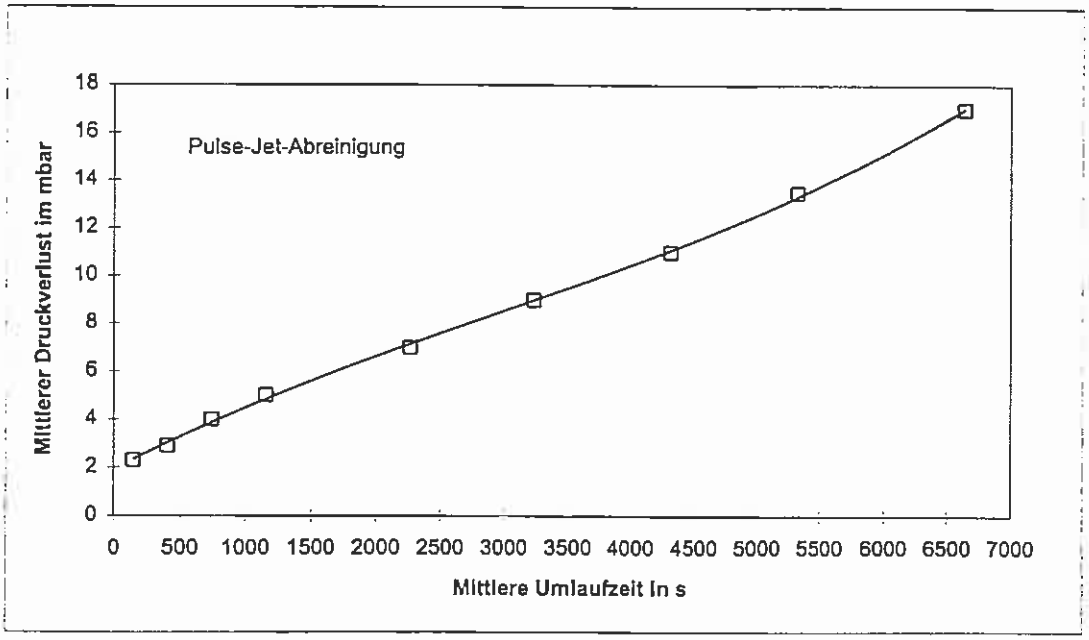


Abb. 2.11 Mittlerer Filterdruckverlust in Abhängigkeit von der mittleren Umlaufzeit, Pulse-Jet-Abreinigung

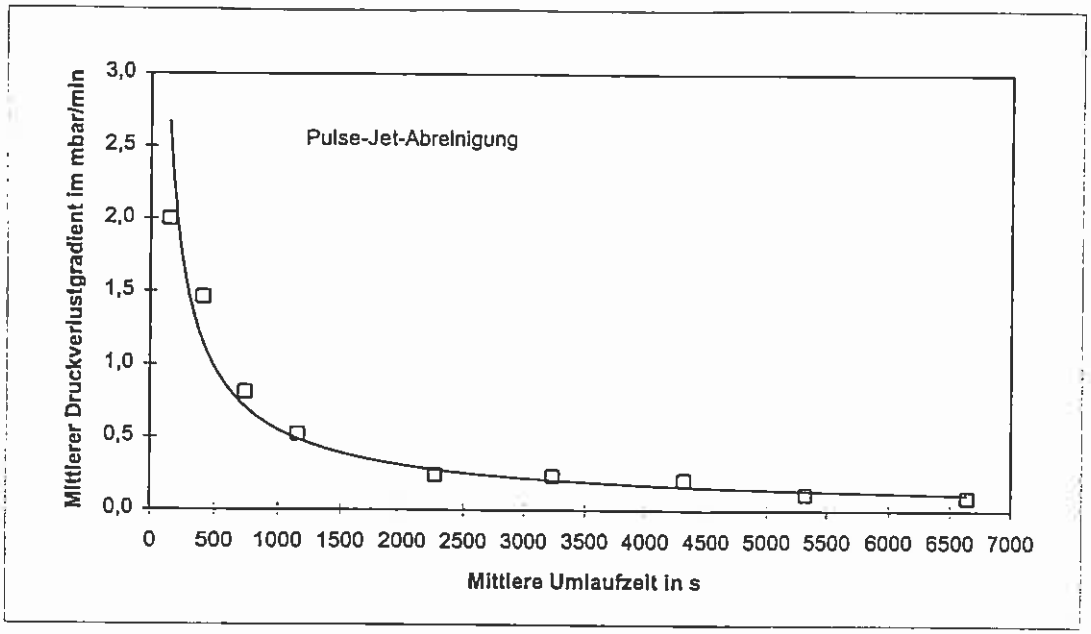


Abb. 2.12 Mittlerer zeitlicher Filterdruckverlustgradient in Abhängigkeit von der mittleren Umlaufzeit, Pulse-Jet-Abreinigung

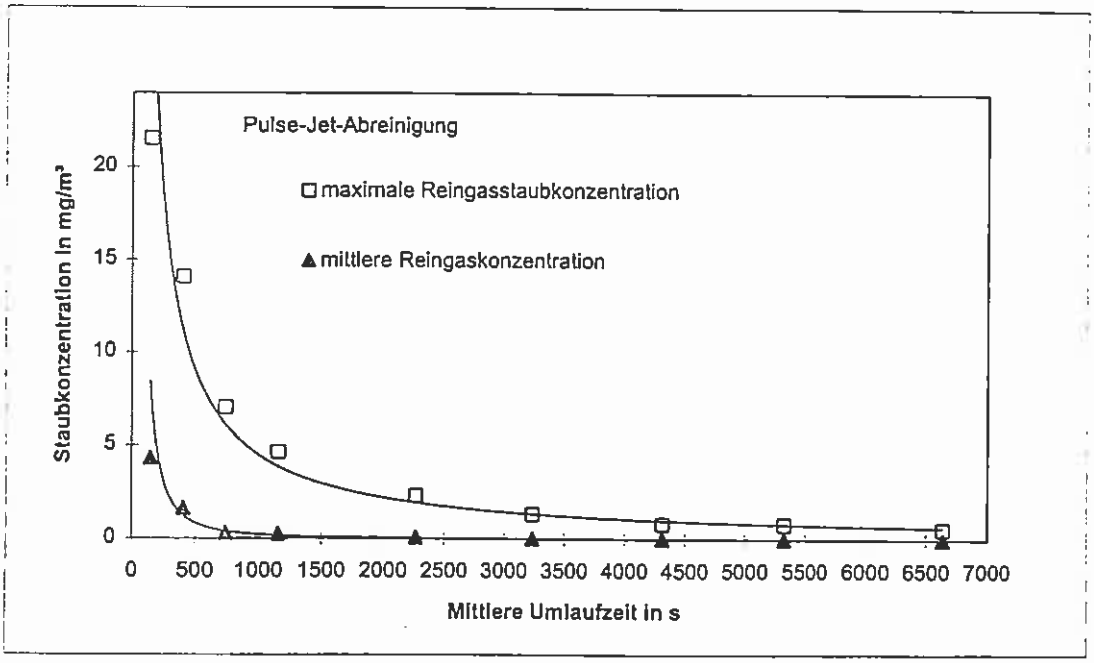


Abb. 2.13 Maximale und mittlere Reingasstaubkonzentration in Abhängigkeit von der mittleren Umlaufzeit, Pulse-Jet-Abreinigung

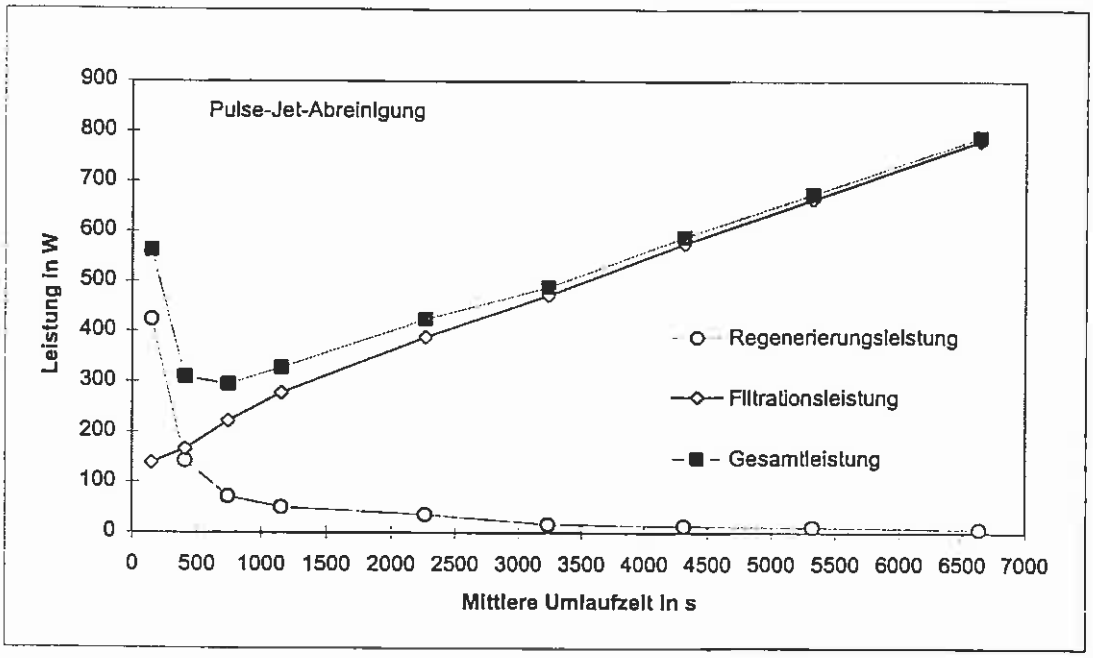


Abb. 2.14 Regenerierungs-, Filtrations- und Gesamtleistung in Abhängigkeit von der mittleren Umlaufzeit, Pulse-Jet-Abreinigung

2.3.2 Versuche zur Blähschlauch-Abreinigung

Um das Blähschlauchverfahren an die Industriebedingungen anzupassen, wurde in Vorversuchen zur Versuchsreihe b) eine erste Standzeitermittlung des Blähschlauchmaterials bei einer Umlaufzeit von 150 Sekunden durchgeführt. Um für die Industriebedingungen geeignete Einstellungen für die Abreinigungsparameter zu finden und die Standzeitermittlung durchzuführen, wurden ausgehend von den Standardeinstellungen mit einer Filterflächenbelastung von 110 $m^3/h/m^2$ und Impulszeiten von 160 ms der Speicherruhedruck der Abreinigung variiert.

In den Voruntersuchungen zeigte sich, daß die Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR)-Schläuche mit einer Nennweite von 110 mm grundsätzlich für den Einsatz als Blähschlauchmaterial im Industriefiltermodul geeignet sind. Ab einem Speicherdruck von 6,0 bar abs. preßten sich die Schläuche durch die Gitterstruktur des Metall-Stützkorbes und übertrugen auf den Textilfilter einen mechanischen Impuls, wodurch der anhaftende Staub abgelöst wurde. Allerdings waren die Ausdehnungsgeschwindigkeit und damit die Impulsstärke sowie die Abreinigungsleistung, zu erkennen anhand des sich einstellenden Filterdruckverlustes, beim Aufblähen unbefriedigend. Dies führte zu einer mangelhaften Abreinigung der Textilfilter und der Filterdruckverlust stieg trotz der Abreinigung mit einer relativ niedrigen Taktzeit in den instabilen Bereich an. Außerdem erwies sich die eingesetzte SBR-Folie mit einer Wandstärke von 0,6 mm als zu dünnwandig.

Bei täglichen Überprüfungen der Textilfilter und der Blähschläuche wurden nach 500 Betriebsstunden im Kopfbereich der Blähschläuche parallel zur Längsachse der Schläuche verlaufende Risse bei 6 Schläuchen festgestellt. Als Ursache dieser Risse wurde neben einer fertigungsbedingten Falte, bedingt durch das Herstellungsverfahren der extrudierten Styrol-Butadien-Kautschuk-(SBR)-Schläuche auch eine unzureichende Stützung der Schläuche im oberen Bereich festgestellt. In diesem Bereich unterlagen die Schläuche beim Aufblähen über den Stützkorbrand einer zu hohen Scherbelastung, die zu Rissen führte.
Die Blähschläuche wurden ausgebaut und in Zusammenarbeit mit einem Schlauchkonfektionär modifiziert. Der unzulänglich gestützte Bereich der Blähschläuche wurde mit einer weiteren stützenden PU-Schicht (Wandstärke 0,6 mm) auf etwa 20 cm Länge in Längsachse überzogen. Diese Maßnahme beeinflußte die Elastizität und die Lebensdauer der Blähschläuche im Kopfbereich positiv. Die Risse an der herstellungsbedingten Fertigungsfalte der Schläuche bildeten sich aber weiterhin. (Abb. 2.15).

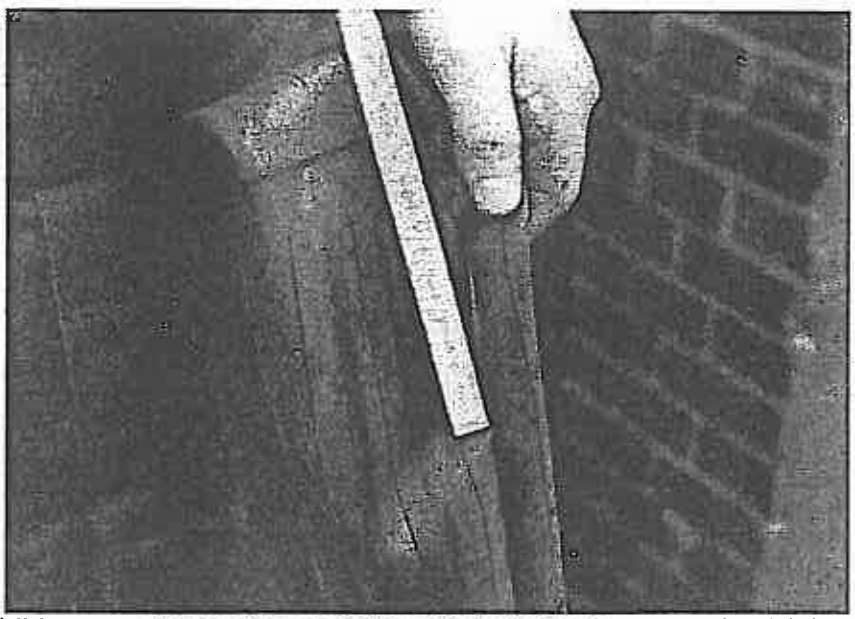


Abb. 2.15 Rißbildung an der Fertigungsfalte unterhalb der Stützung des Blähschlauches aus SBR nach dem Einsatz im Industriefiltermodul

Daraufhin wurde neben einer Vergrößerung der Nennweite der Blähschläuche auf 120 mm zur Verbesserung der Abreinigungsleistung und des dynamischen Verhaltens beim Aufblähen, die Wandstärke der SBR-Folie auf 1,0 mm bei einem neuen Blähschlauchsatz erhöht (Kosten: 3,9 EUR/m). Alternativ dazu wurden 4 Blähschläuche aus teuerem Naturkautschuk (32,- EUR/ m) in eine Schlauchfilterreihe neben 16 SBR-Blähschläuchen in 4 Reihen für Versuchsreihe b) implementiert. Die Abreinigung erfolgte mit den aus Versuchsreihe a) bei Pulse-Jet-Abreinigung ermittelten Umlaufzeiten.

Die Variation der Nennweite auf 120 mm und die Erhöhung der Wandstärke der SBR-Folie auf 1,0 mm führten in Versuchsreihe b) zu einer dem Pulse-Jet-Verfahren vergleichbaren Abreinigungsleistung. Die Lebensdauer der SBR- sowie der NK-Blähschläuche erhöhte sich auf 1002 Betriebsstunden in den Industrieuntersuchungen. Nach 1002 Betriebsstunden waren Risse von ca. 0,5 cm Länge, auf dem gesamtem Umfang sowie im Kopf- und Fußbereich der Blähschläuche (an den Einspannungen von Kopf- bzw. Blindscheibe) zu erkennen. Bei den SBR-Blähschläuchen traten diese Risse bevorzugt an der Fertigungsfalte auf, bei den NK-Schläuchen im Bereich der spiralförmigen Wickelnaht.

Im direkten Vergleich liefern die NK-Blähschläuche aufgrund ihrer höheren Elastizität, des Impulsaustausches mit dem Textilfilter und des benötigten Speicherruhedrucks deutlich bessere Ergebnisse als die SBR-Blähschläuche, erreichen allerdings nur die gleiche Standzeit. Vorteilhaft ist, daß sie den Textilfilter bereits ab einem Speicherruhedruck von 4,5 bar abs. mit einem ausreichenden Impuls für die Abreinigung erreichen, während die SBR-Blähschläuche dafür einen Speicherruhedruck von 6,5 bar abs. benötigen. Sie zeigen auch ein besseres Durchtrittsverhalten am Stützkorb. Für den beschriebenen gemeinsamen Betrieb von SBR- und NK- Blähschläuchen bei einen Speicherruhedruck von 6,5 bar abs. wurde der Kugelhahn der Drucklanze, an dem die NK-Blähschläuche angeschlossen waren, soweit geöffnet, bis sich eine weitgehend gleiche Abreinigungsleistung wie bei den SBR-Blähschlauchreihen einstellte.

In Tab. 2.7 sind die eingestellten Versuchsbedingungen von Versuchsreihe b) dargestellt. In Tab. 2.8, 2.9 und Abb. 2.16, 2.17, 2.18, 2.19 sind die Abreinigungsparameter als Funktion der Umlaufzeit bzw. des mittleren Druckverlusts aus Versuchsreihe b) dargestellt. Im weiteren wurden Regressionsanalysen durchgeführt. Die ermittelten Funktionen sind in Tab. 2.10 zusammen mit ihrem Bestimmtheitsmaß, wie unter Versuchsreihe a) dargestellt.

Tab. 2.7 Abreinigungsparameter der Blähschlauch-Abreinigung mit der zeitgetakteten Steuerung in Versuchsreihe b)

Parameter/Versuchsreihe	b)	
Anzahl Filterelemente		20
Durchmesser Blähschlauch DN	mm	120
Wandstärke Blähschlauch	mm	1,0
Material Blähschlauch		SBR/NK
	Einheit	
Betriebsstunden gesamt	h	1002
Untersuchungsbereich Umlaufzeit	s	150 bis 3236
Summe Anzahl Abreinigungs-Zyklen		6699
Speicherruhedruck p_{R1} abs.	bar	6,5
Speicherruhedruck p_{RZ} abs.		3,0
rechnerisch maximaler Abreinigungsdruck im Filterelement abs. (Annahme isentrope ZA)	bar	1,54
Impulszeit	ms	160
Temperatur Reingas	°C	17-21
Zustand Blähschläuche visuell		Rißbildung auf gesamten Umfang
Zustand Textilfilter visuell		in Ordnung, keine Risse

Tab. 2.8 Ergebnisse der zeitgetakteten Blähschlauch-Abreinigung, Versuchsreihe b)

$\overline{\Delta p_{FE}}$	q	$\overline{\delta_1 \Delta p_{FE}}/\delta t$	t_T	t_U	k_{Roh}	$\overline{k_{Re}}$	$k_{Re,max}$	R_G
mbar	m³/h/m²	mbar/min	s	s	g/m³	mg/m³	mg/m³	
19,5	113	0,12	647	3236	9,3	0,027	1,133	0,9999971
14,2	117	0,17	453	2265	11,2	0,084	1,925	0,9999925
10,4	124	0,36	231	1155	11,8	0,267	2,340	0,9999774
8,5	126	0,53	148	740	10,5	0,326	3,600	0,9999739
6,7	128	1,10	82	410	13,1	0,536	5,200	0,9999591
4,9	127	0,85	30	150	13,9	1,990	9,400	0,9998569

Tab. 2.9 Ergebnisse der zeitgetakteten Blähschlauch-Abreinigung, Versuchsreihe b)

$\overline{\Delta p_{FE}}$	t_T	t_U	P_R	P_F	P_G	Druckluftbedarf/ 1000 m³ Abluft
mbar	s	s	W	W	W	in dm_N^3
19,5	647	3236	19	1950	1969	128
14,2	453	2265	36	1420	1456	235
10,4	231	1155	54	1040	1094	324
8,5	148	740	84	845	929	499
6,7	82	410	152	665	817	888
4,9	30	150	435	490	925	2357

Tab. 2.10 Aus Regressionen ermittelte Funktionen der Abreinigungsparameter, Blähschlauch-Abreinigung, Versuchsreihe b)

x	y	Funktion	R^2
t_U /[s]	$\overline{\Delta p_{FE}}$ /[mbar]	$y = 6E\text{-}10x^3 - 3E\text{-}06x^2 + 0{,}0085x + 3{,}669$	0,9999
t_U /[s]	$\delta\overline{\Delta p_{FE}}/\delta t$ /[mbar/min]	$y = 441{,}07x^{-1{,}0129}$	0,9974
t_U /[s]	$\overline{k_{Re}}$ /[mg/m³]	$y = 1412{,}1x^{-1{,}2839}$	0,9500
t_U /[s]	$k_{Re,\,max}$ /[mg/m³]	$y = 265{,}98x^{-0{,}6594}$	0,9801
t_U /[s]	P_R /[W]	$y = -2E\text{-}13x^5 + 1E\text{-}09x^4 - 4E\text{-}06x^3 + 0{,}0053x^2 - 3{,}1464x + 801{,}6$	1,0000
t_U /[s]	P_G /[W]	$y = -2E\text{-}13x^5 + 1E\text{-}09x^4 - 4E\text{-}06x^3 + 0{,}0047x^2 - 2{,}2358x + 1166{,}8$	1,0000

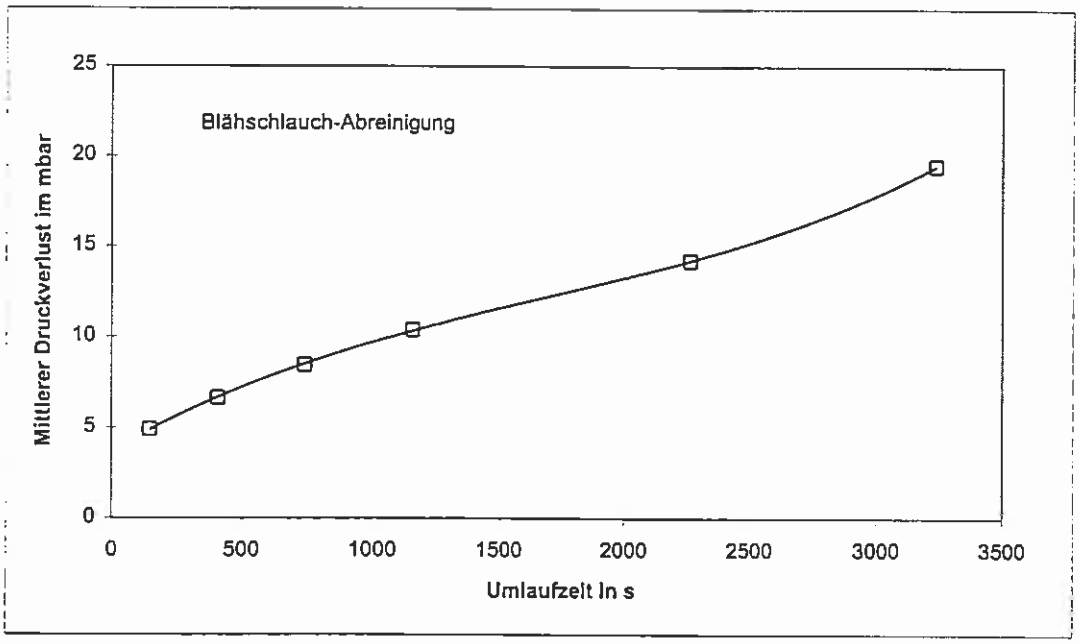


Abb. 2.16 Mittlerer Druckverlust in Abhängigkeit von der Umlaufzeit, Blähschlauch-Abreinigung

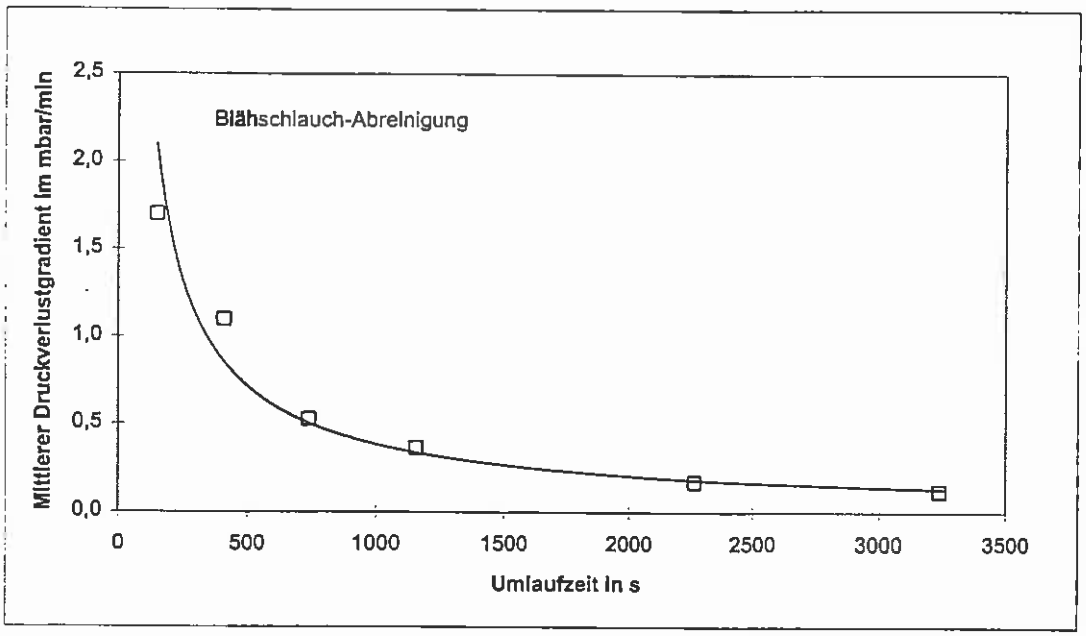


Abb. 2.17 Mittlerer zeitlicher Filterdruckverlustgradient in Abhängigkeit der Umlaufzeit, Blähschlauch Abreinigung

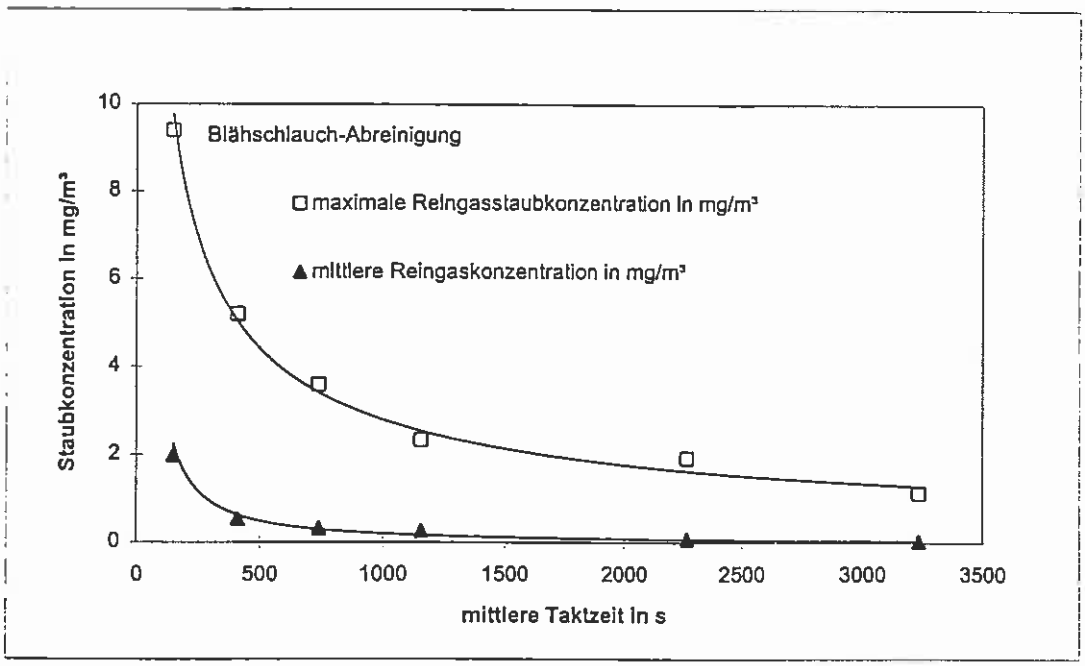


Abb. 2.18 Maximale und mittlere Reingasstaubkonzentration in Abhängigkeit von der Umlaufzeit, Blähschlauch-Abreinigung

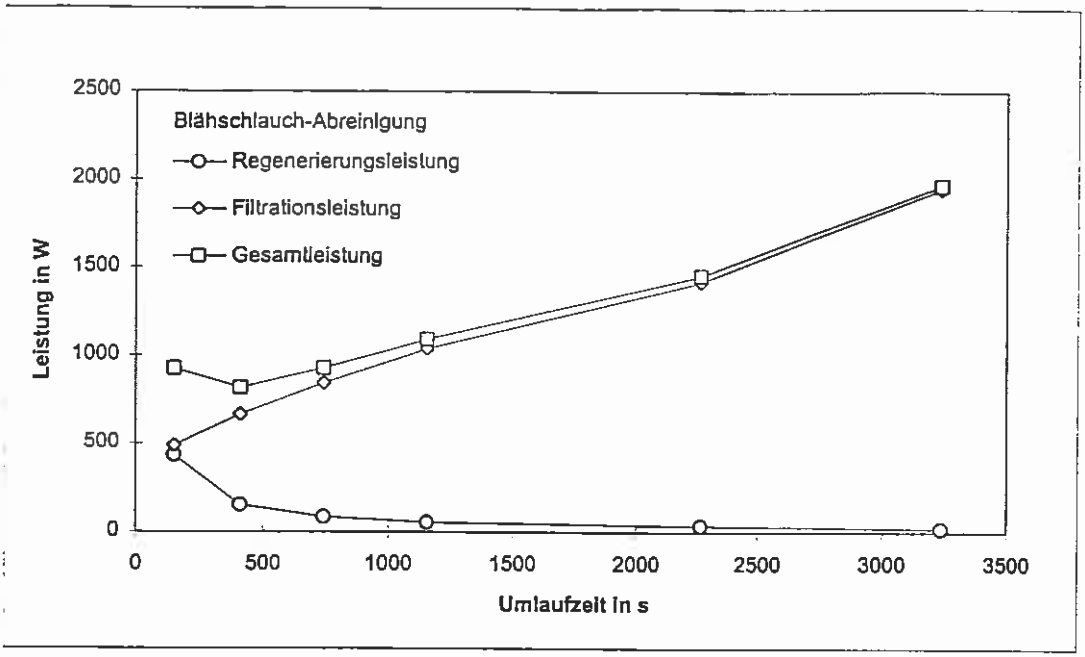


Abb. 2.19 Regenerierungs-, Filtrations- und Gesamtleistung in Abhängigkeit von der Umlaufzeit, Blähschlauch-Abreinigung

2.4 Ergebnisse der Industrieuntersuchungen zum Blähschlauchverfahren

Die Industrieuntersuchungen mit dem IUTA-Filterprüfstand zeigen, daß sich sowohl bei der Pulse-Jet- wie bei der Blähschlauch-Abreinigung ein Leistungsminimum des Gesamtenergieverbrauchs bei Umlaufzeiten im Bereich von ca. 400 bis 500 Sekunden einstellt. Bei kleineren Umlaufzeiten steigen die benötigte Gesamtleistung zur Abscheidung sowie die Reingasemissionen exponentiell an, so daß dieser Bereich für einen effizienten Betrieb des Abscheiders zu meiden ist. Ein günstiger Betrieb des Abscheiders unter diesen beiden Kriterien liegt deshalb bei der Pulse-Jet-Abreinigung im Bereich von Umlaufzeiten von 400 bis 1000 Sekunden mit mittleren Filterdruckverlusten von 3,5 bis 4,5 mbar und bei der Blähschlauch-Abreinigung im Bereich von Umlaufzeiten von 400 bis 600 Sekunden mit mittleren Filterdruckverlusten von 6 bis 7 mbar (Abb. 2.20, 2.21).

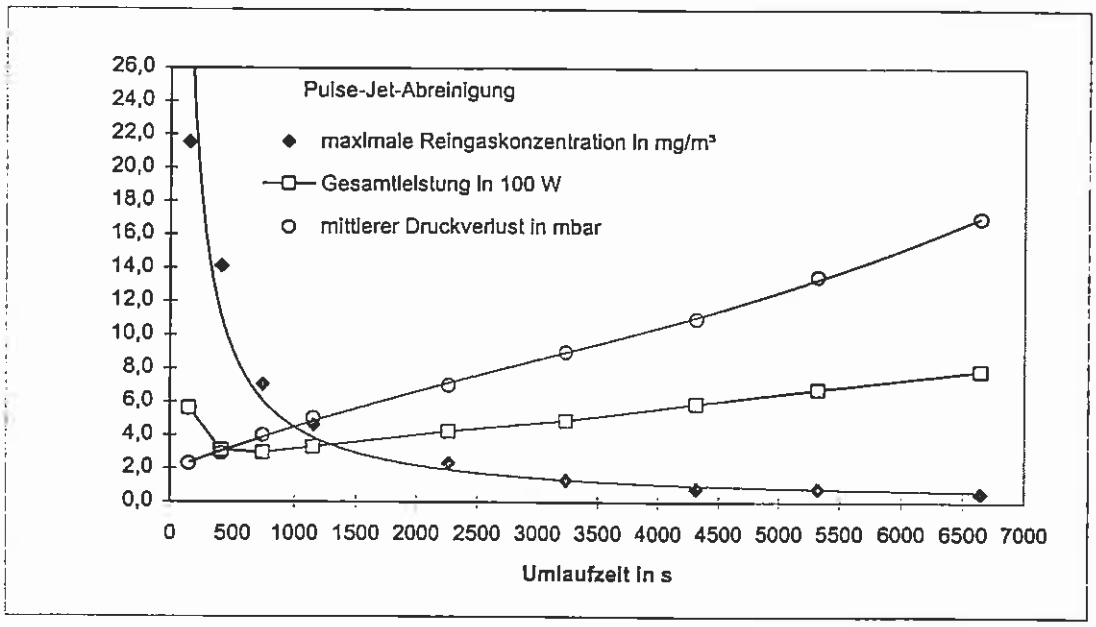


Abb. 2.20 Maximale Reingasstaubkonzentration, filtertechnische Gesamtleistung und mittlerer Filterdruckverlust in Abhängigkeit von der Umlaufzeit, Pulse-Jet-Abreinigung

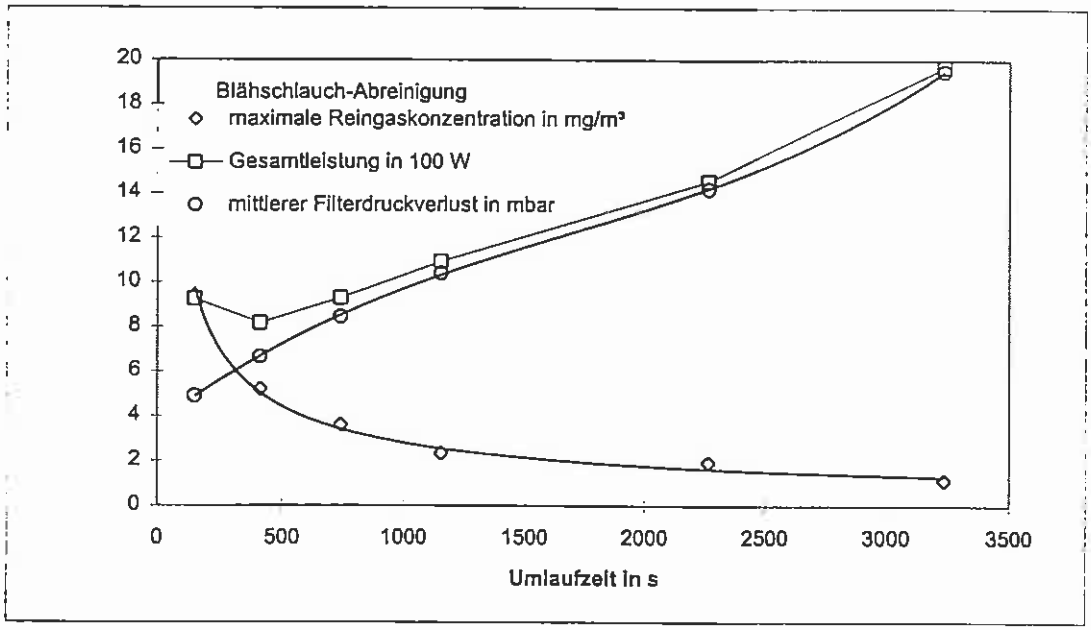


Abb. 2.21 Maximale Reingasstaubkonzentration, filtertechnische Gesamtleistung und mittlerer Filterdruckverlust in Abhängigkeit von der Umlaufzeit, Blähschlauch-Abreinigung

Die Industrie-Untersuchungen am IUTA-Filterprüfstand liefern im weiteren folgende Kernaussagen zum Blähschlauchverfahren im Vergleich zum Pulse-Jet-Verfahren:

- Der mittlere Filterdruckverlust nach der Abreinigung liegt in Abhängigkeit von der Umlaufzeit um 100 bis 130 % höher als bei der konventionellen Druckstoß- bzw. Pulse-Jet-Abreinigung, da eine Filterhilfsschicht aus Staub auf dem Textilschlauchfilter weitgehend

erhalten bleibt. Dadurch bleibt das Textilmaterial vor Staubeinlagerungen, Porenrissen und Durchtritten von Staubpartikeln weitgehend geschützt.

- Bei der Blähschlauchabreinigung ergibt sich ein kleinerer zeitlicher Druckgradient am Filter aufgrund des günstigeren Wiederanlagerungs- und Einlagerungsverhaltens des Staubes an und in das Filtertuch durch Erhalt der Filterhilfsschicht während der Abreinigung.

- Durch die schnelle Staubabführung und günstige Sedimentation der abgereinigten Staub-Agglomerate des Filterkuchens wird die Wiederanlagerung von dispergierten Staub an benachbarte Filterelemente und damit der "Teppichklopfeffekt" der Pulse-Jet-Abreinigung vermieden.

- Es ergeben sich beim Blähschlauchverfahren ähnlich lange Filtrationszeiten wie bei der konventionellen Druckstoßabreinigung.

- Der Energieverbrauch bei der Blähschlauchabreinigung liegt in Abhängigkeit von der Umlaufzeit entsprechend dem sich einstellenden höheren Filterdruckverlustniveau und der entsprechend höheren Filtrationsleistung um 60 bis 300 % höher als bei der Pulse-Jet-Abreinigung.

- Die Reingasstaubgehalte sowohl als Maximal- wie auch als Mittelwerte liegen mit abnehmender Umlauf- bzw. Taktzeit bei Blähschlauch-Abreinigung um bis zu 50% niedriger als beim Pulse-Jet-Verfahren.

- Es wurden innerhalb einer dreimonatigen Betriebsdauer keine Risse an den Textilfiltern festgestellt. Die Staubeinlagerung im Filtertuch im Vergleich zur Druckstoßregenerierung war deutlich geringer. Die gewebeschonende Abreinigung läßt anhand der überprüften Staubeinlagerung erheblich längere Filtertuchstandzeiten beim Blähschlauchverfahren im Vergleich zum Pulse-Jet-Verfahren erwarten, was in Langzeituntersuchungen über 1-2 Jahren unter erhöhter Filterflächenbelastung zu überprüfen wäre.

- Das Blähschlauchverfahren im Stadium des Prototyps zeigt im Vergleich zur Druckstoßregenerierung ein empfindlicheres Verhalten des Abreinigungssystems. Die Abreinigungsparameter Speicherruhedruck, Impulszeit und Umlaufzeit der Druckluftimpulse sowie die Schlauchgeometrie und Druckluftversorgung müssen sehr

genau auf Rohgasstaubgehalte und betriebliche Randbedingungen abgestimmt werden, um eine Schädigung der Blähschläuche auszuschließen.

- Das Blähschlauchmaterial erreicht als Prototyp bei geeigneter Einstellung der Abreinigungsparameter Standzeiten von ca. 1000 Betriebsstunden bis zur Rißbildung aufgrund von fertigungsbedingten Material-Inhomogenitäten. Eine weitere Optimierung des Materials ist diesbezüglich notwendig, um konkurrenzfähige Standzeiten von ca. 3-5 Jahren bei Standardbetrieb zu erreichen. Der Einsatz kostengünstiger modifizierter Verbundwerkstoffe mit Styrol-Butadien-Folie als einer Materialkomponente und eine Modifizierung der Folien-Fertigung in Absprache mit den Folien-Herstellern läßt eine für den Langzeitbetrieb ausreichende Standzeiterhöhung erwarten.

2.4.1 Filtertuchverschleiß bei der Blähschlauchabreinigung

Die Staubeinlagerung ist ein Indikator für die Alterung und den Verschleiß von Filtertüchern. Durch den Vergleich des Flächengewichts und der Luftdurchlässigkeit (Tab. 2.11) zeigt sich deutlich, daß die Blähschlauchabreinigung die für das Filtermaterial schonendere Abreinigung im Vergleich zu Pulse-Jet-Abreinigung ist. Dies bestätigt sich auch im Vergleich der visuellen Prüfung und der REM-Aufnahmen von Filtertüchern. Es ist eine deutlich kleinere Staubeinlagerung in das Filtertuch bei den mit dem Blähschlauchverfahren abgereinigten Filtertüchern festzustellen (Abb. 2.22, 2.23, 2.24, 2.25).

Tab. 2.11 Kenndaten der verwendeten Filtertücher

Kenndaten Filtertücher nach ca. 1000 Betriebs-stunden	Einheit	Blähschlauch-Abreinigung	Pulse-Jet-Abreinigung
Flächengewicht (DIN 53887)			
neu	g/m²	500	500
verschmutzt	g/m²	537	650
abgesaugt	g/m²	514	568
Luftdurchlässigkeit (DIN 53857) bei 196 Pa			
neu	l/dm² *min	150	150
verschmutzt	l/dm² *min	27	15
abgesaugt	l/dm² *min	134	63

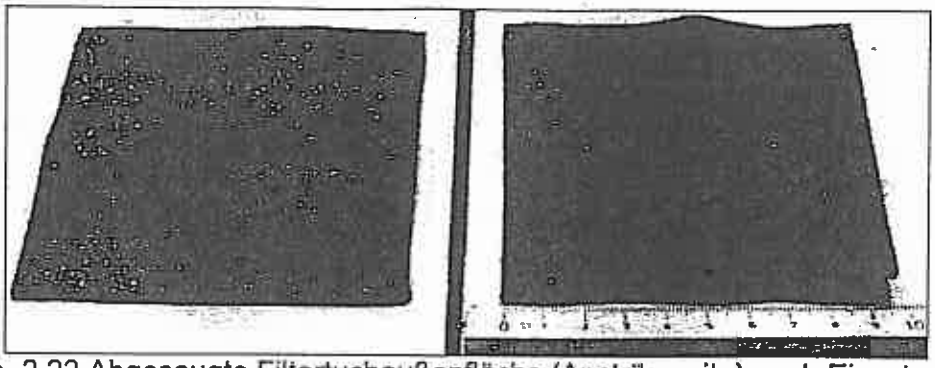


Abb. 2.22 Abgesaugte Filtertuchaußenfläche (Anströmseite) nach Einsatz mit: Blähschlauchverfahren, links - Pulse-Jet-Verfahren, rechts

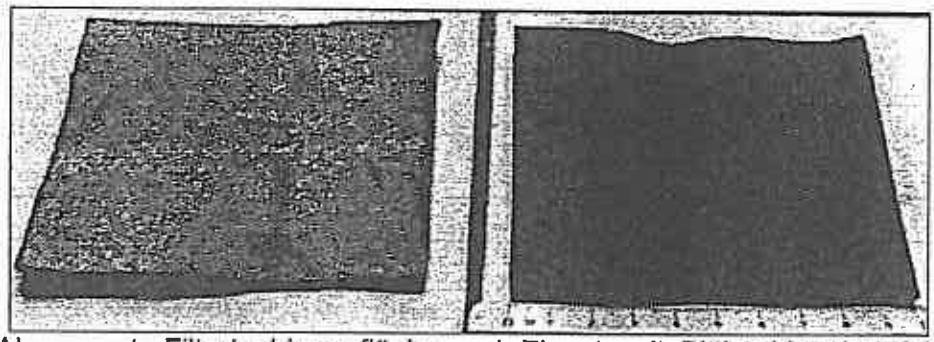


Abb. 2.23 Abgesaugte Filtertuchinnenfläche nach Einsatz mit: Blähschlauchverfahren, links - Pulse-Jet-Verfahren, rechts

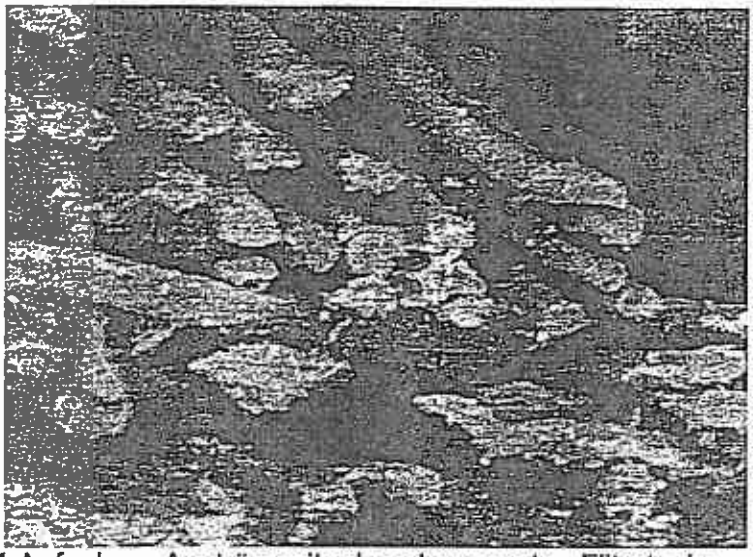


Abb. 2.24 REM-Aufnahme Anströmseite des abgesaugten Filtertuchs nach Einsatz mit Pulse-Jet-Verfahren (1000-fache Vergrößerung)

Abb. 2.25 REM-Aufnahme Anströmseite des abgesaugten Filtertuchs nach Einsatz mit Blähschlauch-Verfahren (1000-fache Vergrößerung)

2.4.2 Reingasemissionen bei der Blähschlauchabreinigung

Die Reingasstaubgehalte sowohl als Maximal- wie auch als Mittelwerte liegen bei der Blähschlauchabreinigung um bis zu 50% niedriger als beim Pulse-Jet-Verfahren (Abb. 2.26, 2.27). Diese Differenz wird bei steigenden Umlaufzeiten kleiner und bei einer Umlaufzeit von ca. 1000 s für die Mittelwerte bzw. 3000 s für die Maximalwerte zu null, da bei größeren Umlaufzeiten auch beim Pulse-Jet-Verfahren die schützende Filterhilfsschicht bei der Abreinigung erhalten bleibt.

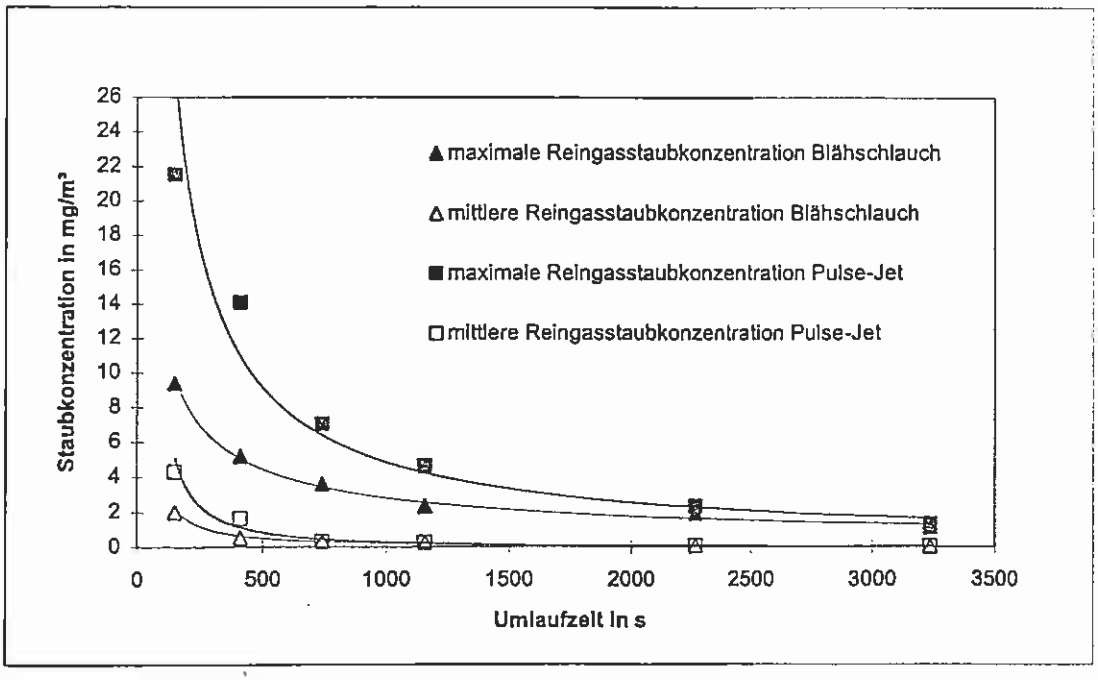


Abb. 2.26 Maximale und mittlere Reingasstaubkonzentration in Abhängigkeit von der Umlaufzeit bei Blähschlauch- und Pulse-Jet-Abreinigung

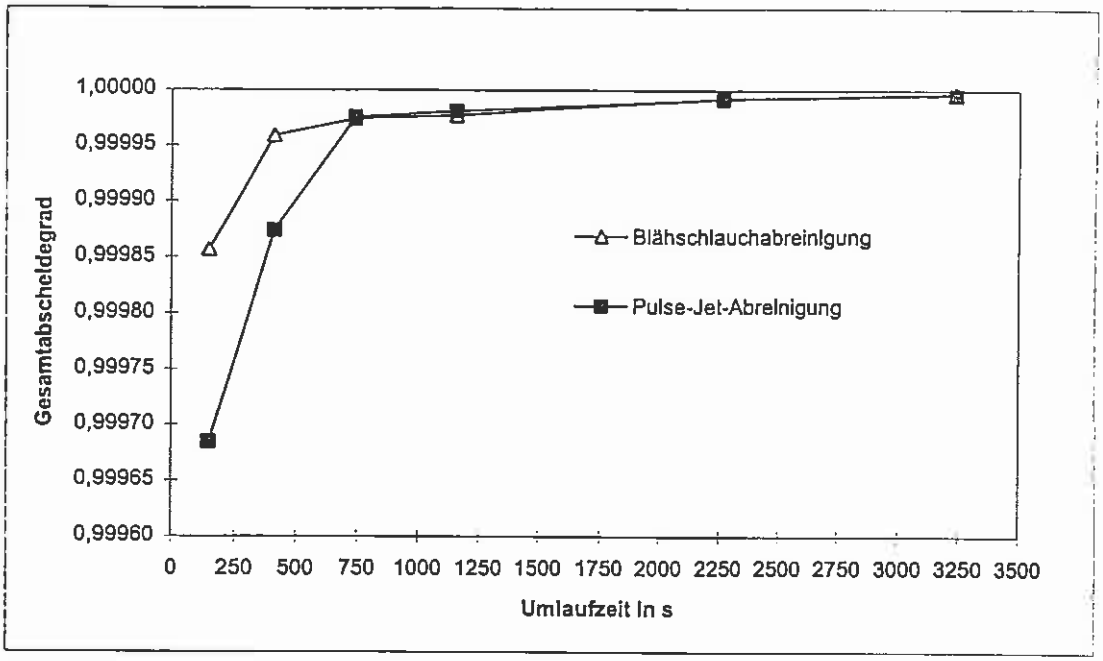


Abb. 2.27 Gesamtabscheidegrad in Abhängigkeit von der Umlaufzeit bei Blähschlauch- und Pulse-Jet-Abreinigung

2.4.3 Energieverbrauch bei der Blähschlauchabreinigung

Der Energieverbrauch bei der Blähschlauchabreinigung liegt in Abhängigkeit von der Umlaufzeit, entsprechend dem sich einstellenden höheren Filterdruckverlustniveau bei geringerem Druckverlustgradienten und der entsprechend höheren Filtrationsleistung, um 60 bis 300 % höher als bei der Pulse-Jet-Abreinigung (Abb. 27, 28, 29). Die Regenerierungsleistung könnte durch den Einsatz von hochelastischen Schläuchen aus kostengünstigen, synthetischen und verschleißfesten Material, das im Vergleich zu SBR-Folie einen niedrigeren Druck zum Aufblähen benötigt, gesenkt werden.

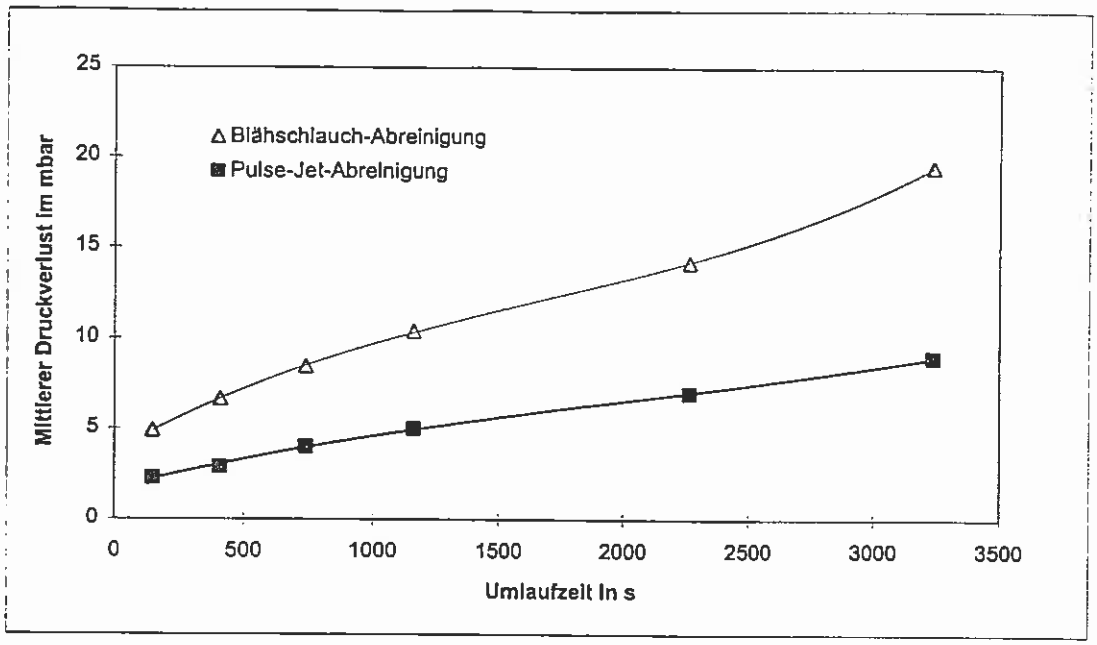


Abb. 2.28 Mittlerer Filterdruckverlust in Abhängigkeit von der Umlaufzeit bei Blähschlauch- und Pulse-Jet-Abreinigung

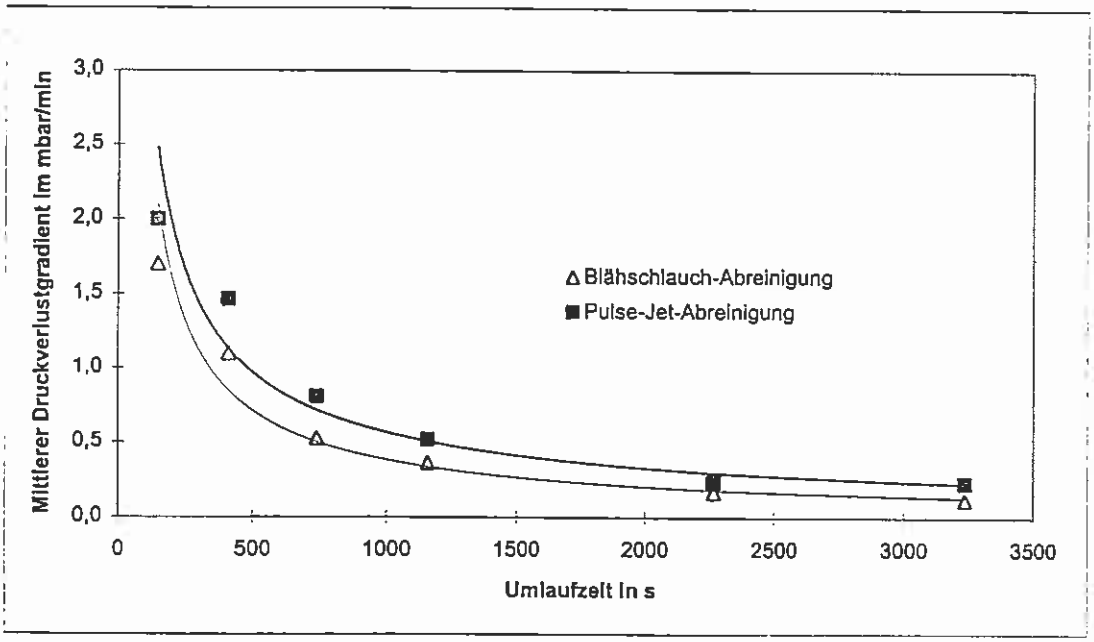


Abb. 2.29 Mittlerer zeitlicher Druckverlustgradient in Abhängigkeit von der Umlaufzeit bei Blähschlauch- und Pulse-Jet-Abreinigung

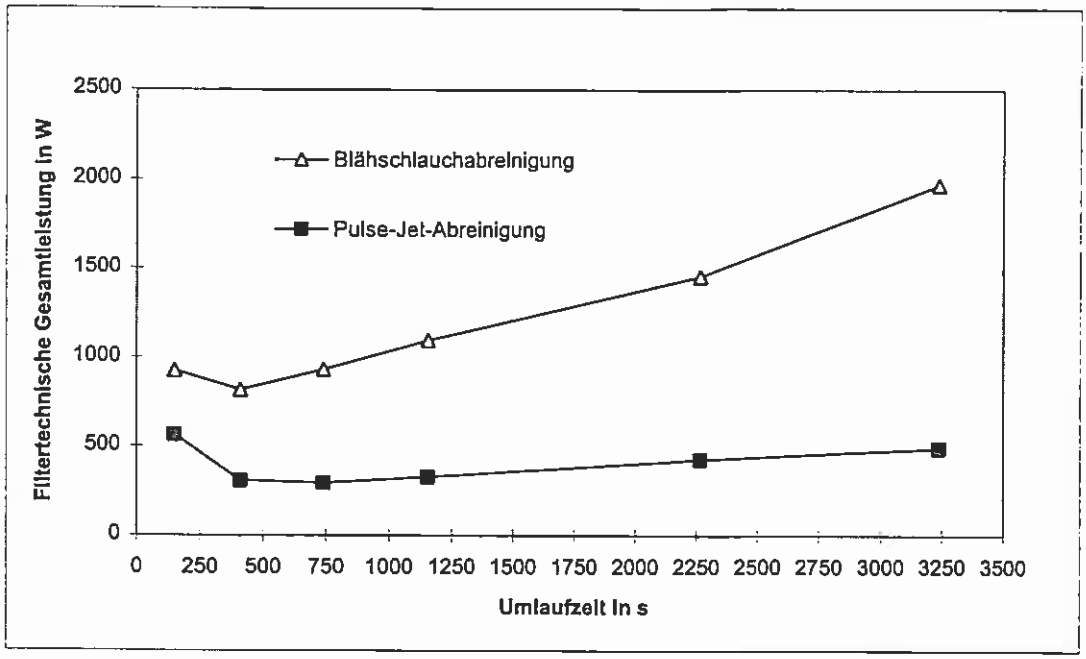


Abb. 2.30 Filtertechnische Gesamtleistung in Abhängigkeit von der Umlaufzeit bei Blähschlauch- und Pulse-Jet-Abreinigung

2.4.4 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zum Blähschlauchverfahren

Der zu erwartende Investitionsaufwand für die Umrüstung auf die Blähschlauchabreinigung bei einem dem IUTA-Filtermodul vergleichbaren Standardfiltermodul mit extrudierter Styrol-Butadien-Folie, liegt ausgehend von den Versuchsblähschläuchen bei 3,9 EUR/m Schlauchlänge. Zusätzlich treten Kosten für die Kopf- und Blindscheibe von ca. 15,3 EUR sowie Kosten für die Modifikation der Drucklanze von 4,4 EUR pro Blähschlauch auf. Durch den Erhalt der Filterhilfsschicht bei der Blähschlauchabreinigung können für den Standardeinsatz (Raumtemperatur, Sinterstaub) einfache Textilschlauchfilter aus 2-fach kalandriertem Polyester-Nadelfilz mit einem Marktpreis von ca. 8,- EUR/m eingesetzt werden. Zusätzlich sind die höheren Energiekosten für den Abscheiderbetrieb mit der Blähschlauchabreinigung bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zu berücksichtigen.

Dabei ergeben sich für einen entsprechenden 2 m langen Schlauchfilter mit einem Durchmesser von 145 mm und integriertem Blächschlauch, ausgehend von dem verwendeten Materialien der Untersuchungen, die teilweise in kostenintensiver Einzelanfertigung produziert werden mußten, Gesamtkosten von ca. 36,- EUR. Bei einer Serienfertigung würde sich die Gesamtkosten auf geschätzte 25,- EUR/Filterschlauch reduzieren lassen.

Mit einer zu erwartenden Standzeiterhöhung der Textilschlauchfilter um ca. 70% würden sich die fixen Wartungskosten für den Wechsel von Textilschlauchfiltern an Abscheidern nach ersten Schätzungen um ca. 20 bis 50%, in Abhängigkeit der Anlagengröße sowie der Staubart und -belastung, reduzieren lassen.

3. Technikumsuntersuchungen

3.1 Aufbau des Filtermoduls im Technikum

Vergleichende Untersuchungen zur Druckluftimpulsregenerierung und zur Blähschlauchregenerierung erfolgten im Versuchsfeld des Institutes für Luft- und Kältetechnik Dresden (ILK) an einem Prüfstand unter definierten und reproduzierbaren Versuchsbedingungen. Zentrales Bauteil des Prüfsandes ist ein filtemder Abscheider in runder Bauform der Firma Maschinen- und Mühlenbau, Wittenberg, mit Filterschläuchen als Filterelemente. Abb. 3.1 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Rundkammerabscheiders.

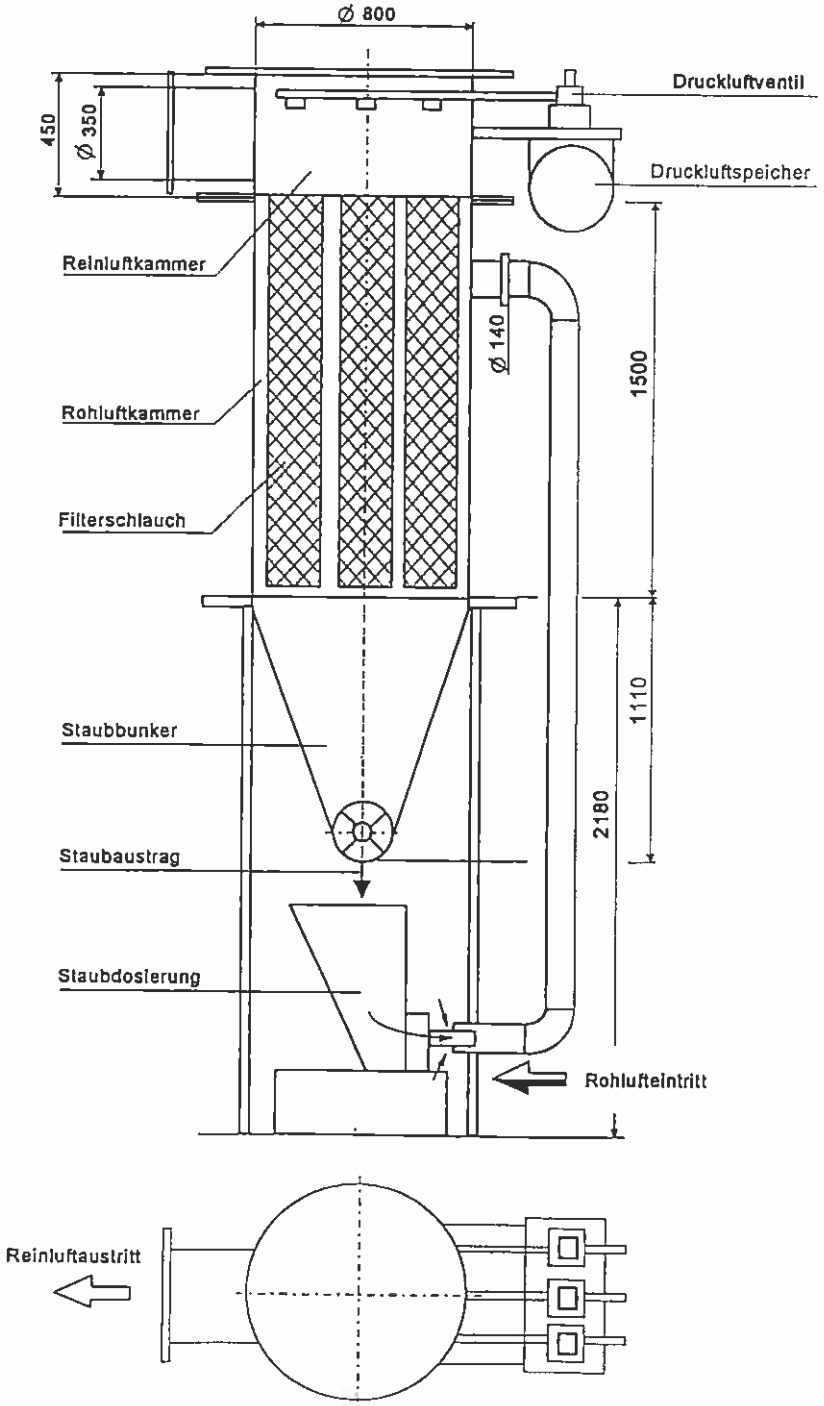


Abb. 3.1 Rundkammerabscheider mit Filterschläuchen

Die gerätetechnischen Daten des Rundkammerabscheiders werden im folgenden zusammengefaßt.

Filtertechnische Daten

- Filtermaterial der Filterschläuche: Polyesternadelvlies, 2fach kalandriert
- Filterschlauchabmessungen:

Schlauchlänge:	l_S	=	1480 mm
Schlauchdurchmesser:	d_S	=	145 mm
Filterfläche je Schlauch:	$A_{F,S}$	=	0,674 m²
Gesamtfilterfläche des Abscheiders:	A_F	=	6,07 m²

- Filterschlauchanordnung:

Schlauchanzahl je Schlauchreihe:	$N_{S,R}$	=	3
Anzahl der Schlauchreihen:	N_R	=	3
Gesamtanzahl der Schläuche:	N_S	=	9
Filterschlauchteilung:	a_S	=	180 mm
(Mittenabstand der Filterschläuche)			

- Filterstützkorb

  Stützkorb ∅ 140 mm x 1470 mm lang

  10 Längsstäbe an 6 Querringen verschweißt

  1 Boden

  Längsstäbe zur Auflage auf den Filterboden oben abgewinkelt

Die Filterschläuche und Stützkörbe wurden von der Firma ESR Entstaubungstechnik GmbH, Bebra, bezogen. Abb. 3.2 zeigt den Polyesternadelvliesschlauch mit eingesetztem Stützkorb.

Gemeinsame Daten zur Druckluftimpulsregenerierung und zur Blähschlauchregenerierung

- Druckluftspeicher:

Volumen des Druckluftspeichers:	V_K	=	0,025 m²

- Druckluftventil:

  Druckluftmembranventil der Firma ASCO JOUCOMATIC GmbH & Co.,

  Ölbronn-Dürrn, Eckausführung, vorgesteuert

  Ventilgröße: NW 40

Ventilanzahl: N_V = 3

ein Ventil je Schlauchreihe und Düsenstock

- Düsenstock:

  Anzahl der Düsenstöcke: N_{DS} = 3

  Düsenstockgröße: NW 40

  ein Düsenstock je Schlauchreihe und Ventil

- Steuerung der Druckluftventile:

  elektronische Steuerung mit schrittweiser Einstellung der Impulsdauer (Impulszeit) und Impulsfrequenz (Umlaufzeit der Impulse)

Jeweils eine Schlauchreihe mit 3 Filterschläuchen wird über ein Druckluftventil und einen Düsenstock gleichzeitig abgereinigt. Dazu sind jeweils 3 Regenerierungselemente am Düsenstock zentral über den 3 Filterschläuchen angeordnet. Für die Druckluftimpulsregenerierung befinden sich am Düsenstock 3 Düsenbohrungen zur Erzeugung des Druckluftimpulses. Für die Blähschlauchregenerierung sind am Düsenstock 3 Düsenrohre mit Kupplungen zum Anschluß der Blähschläuche angeordnet.

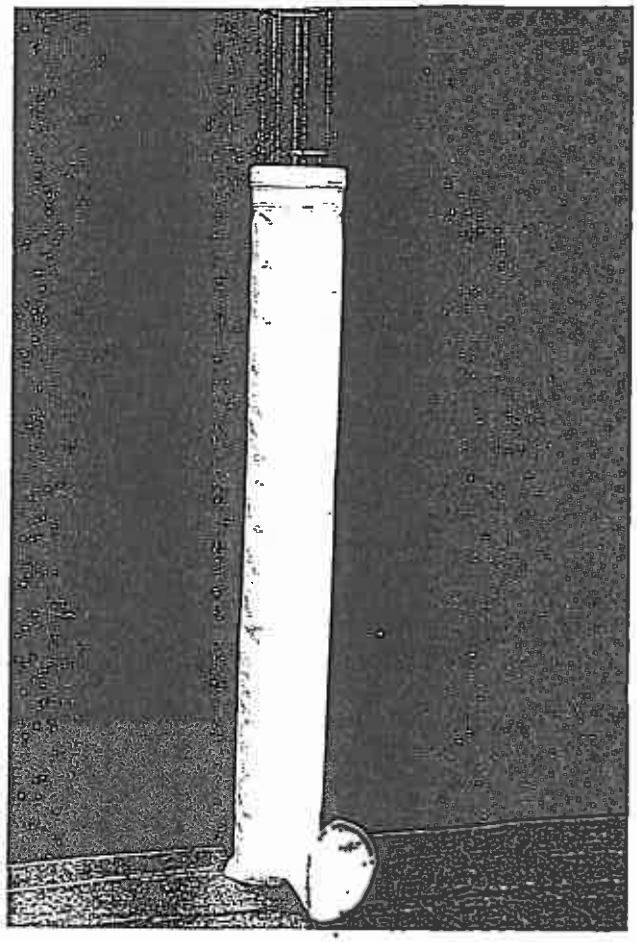


Abb. 3.2 Polyesternadelvliesschlauch mit Stützkorb

Daten zur Druckluftimpulsregenerierung

- Druckluftdüsen

Düsenbohrung:	d_D	=	8 mm
Düsenanzahl:	N_D	=	9 (3x3)
Abstand Düsenbohrung – Filterboden:	a_D	=	300 mm

- Funktionsprinzip

  Über Druckluftventil, Düsenstock und Düsenbohrung wird in der Regenerierungsphase ein Druckluftimpuls als Freistrahl in den Filterschlauch eingeleitet, der zu einer kurzzeitigen Unterbrechung der Filtrationsphase, zu einer Umkehr der Strömungsrichtung am Filtermaterial und zu einem Aufblähen des Filterschlauches führt. Die dabei auftretenden Strömungs-, Druck- und Trägheitskräfte bewirken eine Abreinigung des abgeschiedenen Staubes vom Filterschlauch.

Abb. 3.3 zeigt die 3 Düsenstöcke, ihre Anordnung in der Reinluftkammer und den Filterboden mit den 9 Filterschläuchen und Stützkörben. Die Düsenbohrungen befinden sich auf der verdeckten Unterseite der Düsenstöcke und sind dabei zentral über den Filterschlauchquerschnitten angeordnet.

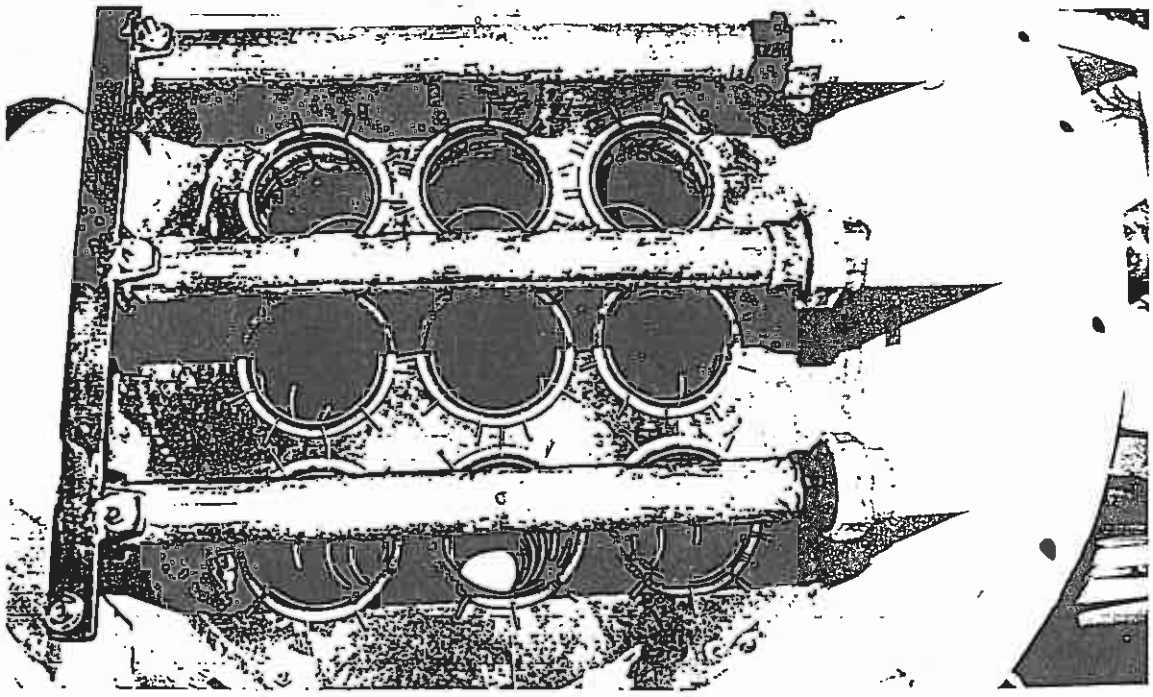


Abb. 3.3 Reinluftkammer mit 3 Düsenstöcken zur Druckluftimpulsregenerierung

Daten zur Blähschlauchregenerierung

- Blähschlauchmaterial:

  SBR-Styrol-Butadien-Kautschuk, Fa. Sahlberg, Feldkirchen

- Blähschlauchabmessungen

Flachschlauch DN 110 mm x 0,6 mm dick

Länge des Blähschlauches: l_{BS} = 1525 mm

Der Blähschlauch reicht damit aus dem Filterschlauch heraus. Er ist an einer Boden- und Kopfscheibe mittels Schlauchbändern abgedichtet. Die Kopfscheibe besitzt eine Schlauchkupplung zum Anschluß an das Düsenrohr des Düsenstockes. Durch den Anschluß an das Düsenrohr wird der Blähschlauch gehalten und hängt lose im Filterschlauch. Durch das Gewicht der Bodenscheibe hängt der Blähschlauch straff im Filterschlauch.

- Düsenstock mit Düsenrohren und Entspannungsventil

  Düsenrohrgröße: NW 25

  Anzahl der Düsenrohre je Düsenstock: N_{DR} = 3

  Entspannungsventil: Kugelhahn NW 20, teilweise geöffnet

  Anzahl je Düsenstock: N_{EV} = 1

- Schlauchkupplung

  Größe der Schlauchkupplung: NW 25

  kleinster Innendurchmesser der Schlauchkupplung: d_{SK} = 15 mm

- Funktionsprinzip

  Über Druckluftventil, Düsenstock, Düsenrohr und Schlauchkupplung wird in der Regenerierungsphase ein Druckluftimpuls als geführter Luftstrahl in den Blähschlauch eingeleitet. Der Druckluftimpuls führt zu einem Aufblähen des elastischen Blähschlauches, zu einem Anlegen des Blähschlauches an den Filterschlauch und danach zu einem Aufblähen des Filterschlauches. Die Filtration wird kurzzeitig unterbrochen. Auftretende Trägheitskräfte und im geringeren Maße Strömungs- und Druckkräfte erreichen eine Abreinigung des abgeschiedenen Staubes vom Filterschlauch. Der Blähschlauch wirkt bei der Regenerierung als eine Art Dämpfungsglied zwischen Druckluftimpuls und Filterschlauch. Nach Schließen des Druckluftventiles wird der Blähschlauch über das Entspannungsventil am Düsenstock entlastet und in seine ursprüngliche Form zurückgedrängt.

Abb. 3.4 zeigt den Filterschlauch mit Stützkorb und Blähschlauch. Die Anordnung entspricht dabei etwa dem Zustand in der Filtrationsphase. Abb. 3.5 zeigt die 3 Düsenstöcke mit jeweils 3 Düsenrohren und einem Kugelhahn (Entspannungsventil). An den Düsenrohren ist mit einer Schlauchkupplung der Blähschlauch befestigt. Der Blähschlauch hängt mittig im Filterschlauch und innerhalb des Stützkorbes. Zwischen Filterschlauch und Blähschlauch ergibt sich in der Filtrationsphase ein Ringspalt, der ein Abströmen der Filtrationsluft in die Reinluftkammer ermöglicht.

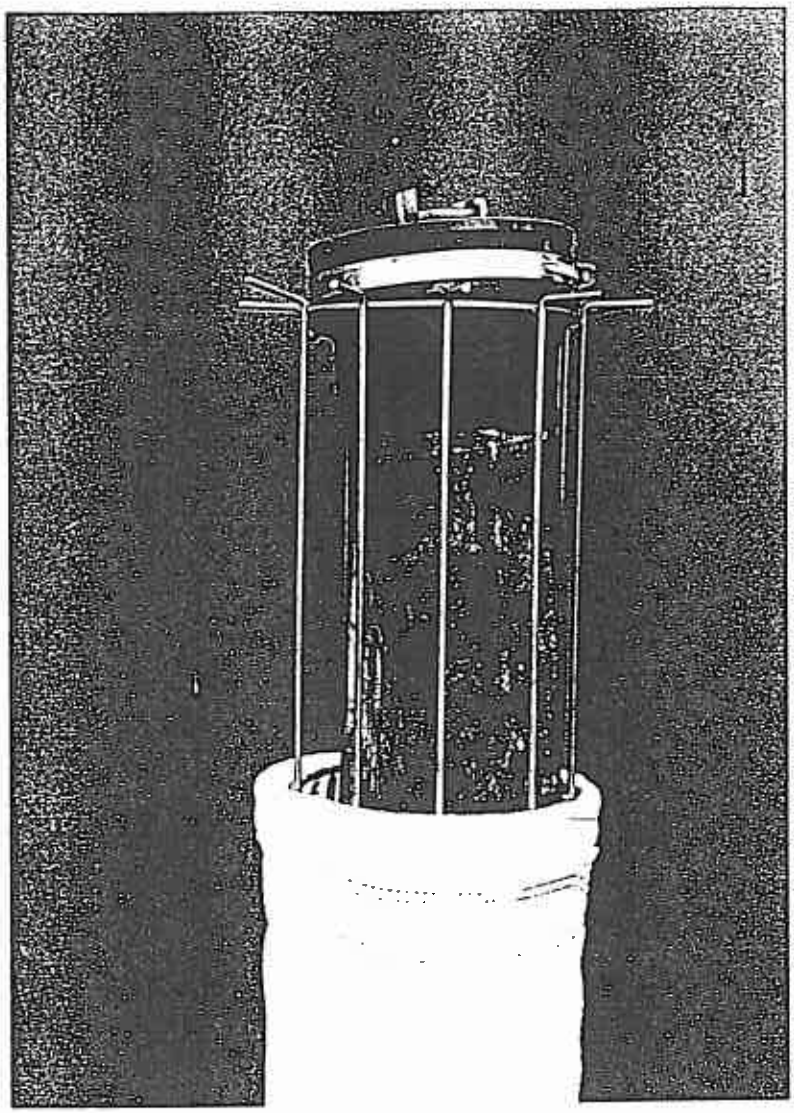


Abb. 3.4

Filterschlauch mit Stützkorb und Blähschlauch

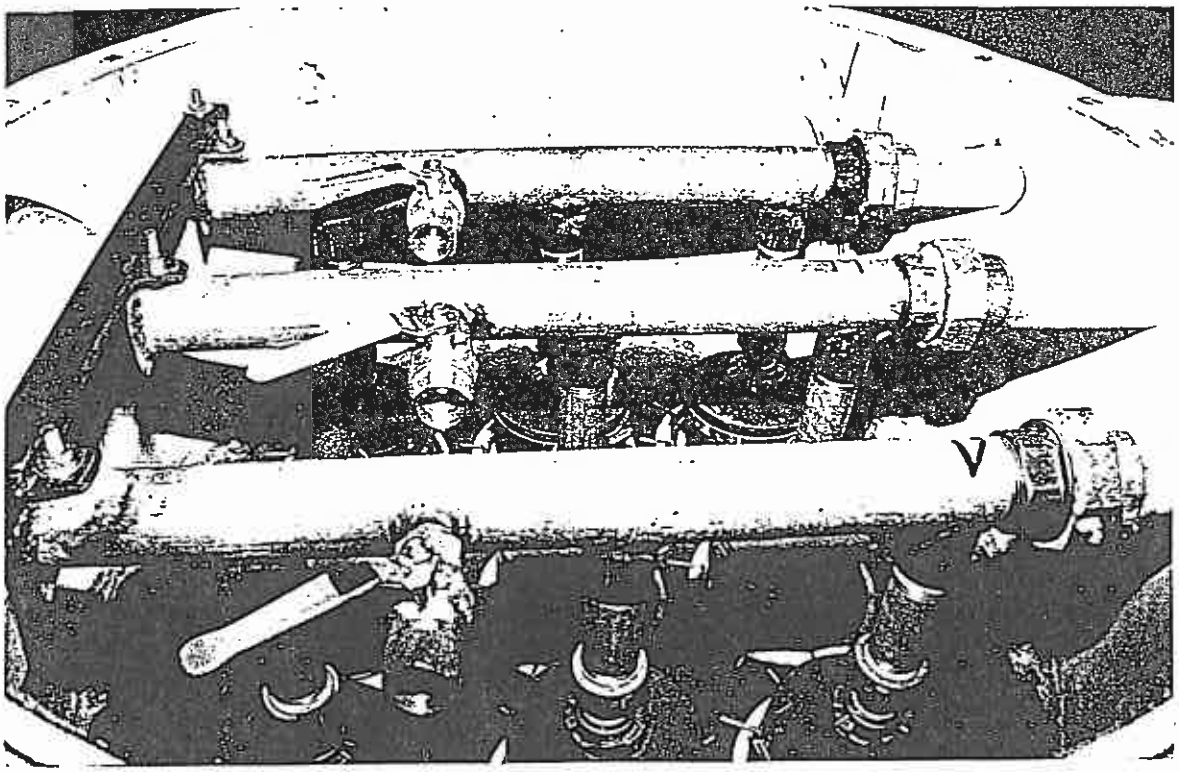


Abb. 3.5 Reinluftkammer mit 3 Düsenstöcken zur Blähschlauchregenerierung

Für den Versuchsabscheider der Technikumsuntersuchungen und das Filtermodul der Industrieuntersuchungen wurden möglichst gleiche filter- und regenerierungstechnische Bedingungen geschaffen. Abweichungen wie z. B. in der Filterschlauchlänge und in der Schlauchanzahl waren vor allem gerätebedingt. Die Technikumsuntersuchungen zum Vergleich der beiden Regenerierungsverfahren erfolgten im ILK Dresden an einem Prüfstand unter definierten und reproduzierbaren Versuchsbedingungen. Die Hauptbauteile des Versuchsstandes sind:

- der Rundkammerabscheider,
- das Roh- und Reinluftrohrleitungssystem,
- die Volumenstrommeß- und –regeltechnik,
- die Staubdosierung,
- die Druckmeßtechnik,
- die Staubmeßtechnik,
- das automatische Meßwerterfassungssystem.

Abb. 3.6 zeigt das Anlagenschema zum Versuchsstand mit dem zentralen Bauteil Rundkammerabscheider.

Der Filtrationsvolumenstrom am Rundkammerabscheider und die Druckluft für die Regenerierung der Filterschläuche werden durch die zentrale Luft- und Druckluftversorgung des Versuchsfeldes bereitgestellt. Für die oben angeführten Bauteile des Versuchsstandes gelten folgende Bedingungen.

- Roh- und Reinluftrohrleitungssystem

Rohluftrohrleitung:	NW 40
Reinluftrohrleitung:	NW 250

- Volumenstrommeß- und -regeltechnik:

Volumenstrommessung:	Volumenstrommeßdüse ND 250, Fa. Gebr. TROX GmbH, Neukirchen-Vluyn
Volumenstromregelung:	Bypassregelung mit automatischen Stellklappen Fa. Gebr. TROX GmbH, Neukirchen-Vluyn

  Die Volumenstrommeßdüse wurde vor den Untersuchungen durch eine Volumenstrommessung mittels Prandtlrohr kalibriert.

- Staubdosierung:

  Schneckendosierer K-TRON T 20, Fa. K-TRON SODER GmbH, Gelnhausen

  Die Staubdosierung wurde vor den Untersuchungen für beide Versuchsstäube mit einer Wägung des dosierten Staubes pro Zeiteinheit kalibriert.

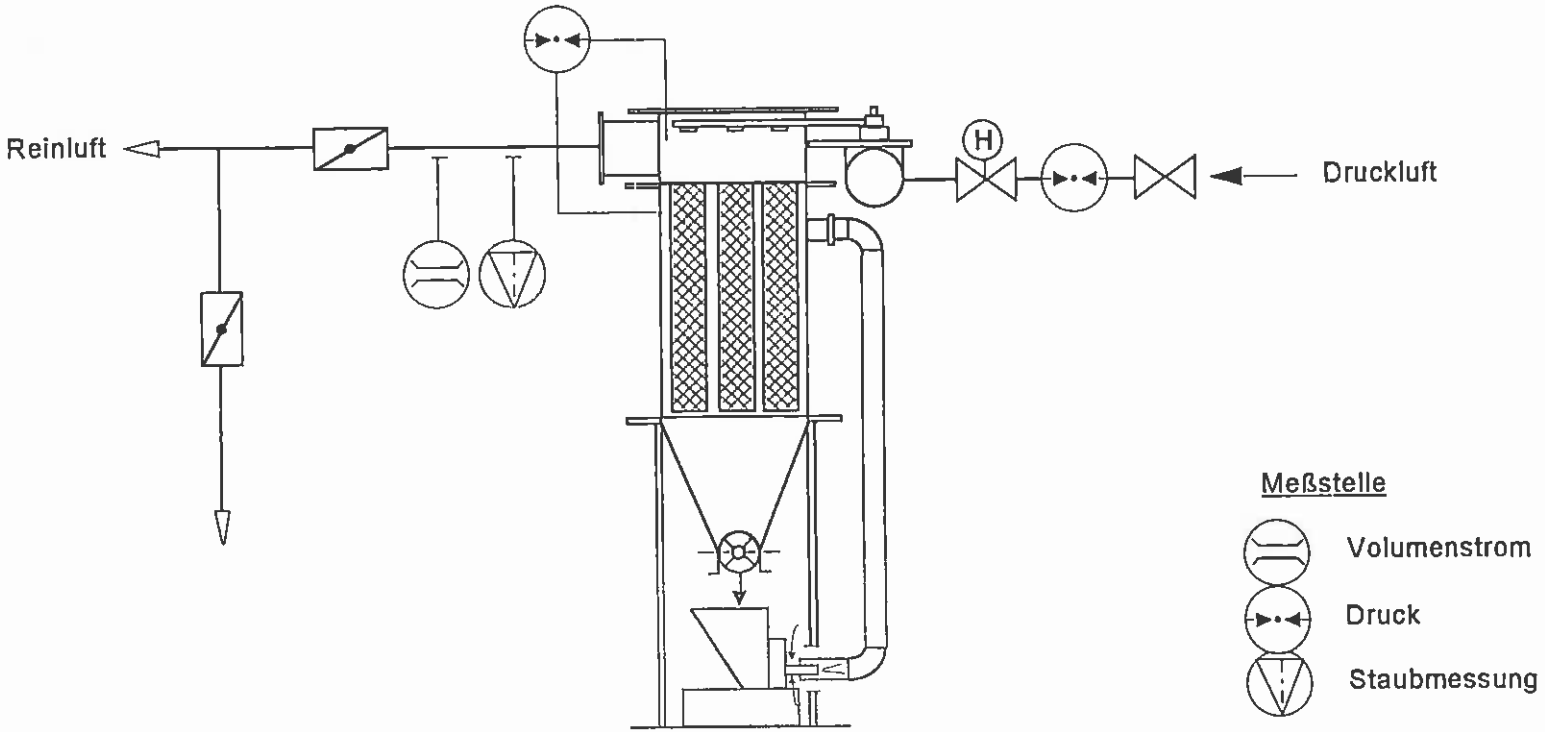


Abb. 3.6 Anlagenschema zum Versuchsstand Rundkammerabscheider

- Druckmeßtechnik:
  Wirkdruck Volumenstrommeßdüse/Druckverlust Filterschlauch:
  Drucksensoren, Fa. ASHCROFT Dresser EUROPE S.A., Baesweiler
  Abreinigungsdruck: Feinmeßmanometer
- Staubmeßtechnik:
  Reinluftstaubkonzentration: Staubsensor TM-E,
  Fa. Helmut Hund GmbH, Wetzlar
- automatisches Meßwerterfassungssystem:
  Meßwerterfassung: MEDANA-Meßwerterfassungssystem
  Fa. Delphin Systeme, Kürten
  Meßwertspeicherung: PC
  Meßwertauswertung: Computerprogramme ORIGIN V. 4.1 und V. 5
  Fa. Microcal Software, Inc., Northampton

Abb. 3.7 zeigt den Versuchsstand in einer Gesamtansicht mit dem Meßcomputerschrank im Vordergrund und dem Rundkammerabscheider im Hintergrund. Auf dem Computerschrank befindet sich eine transportable Meßeinheit mit dem integrierten Meßwerterfassungssystem.

In Abb. 3.8 ist die Reinluftkammer und der obere Teil der Rohluftkammer des Versuchsabscheiders erfaßt. An der Reinluftkammer befinden sich links der Reinluftaustritt und rechts ein Teil des Regenerierungssystems mit dem Druckluftspeicher und den Druckluftventilen. Über den Deckel der Reinluftkammer erfolgte der Wechsel der Filterschläuche und der Einsatz der Blähschläuche. An der Rohluftkammer ist rechts der Rohlufteintritt erkennbar.

Abb. 3.9 zeigt den unteren Teil des Versuchsabscheiders mit der Staubdosierung und der Schalttafel für die elektronische Steuerung und die Drucktaster zur Volumenstromklappenregelung. Die Schalttafel verdeckt den unteren Teil des Staubbunkers und die Zellenradschleuse als Austragsorgan für den abgereinigten Staub. Die Zellenradschleuse befördert den im Staubbunker gesammelten Staub direkt in den Vorratsbehälter des Staubdosierers. Von dort gelangt der Staub über die Dosierschnecken in den Ansaugstutzen der Rohluftrohrleitung. Für die Untersuchungen wird somit ein Umlaufbetrieb für die Versuchsstäube realisiert.

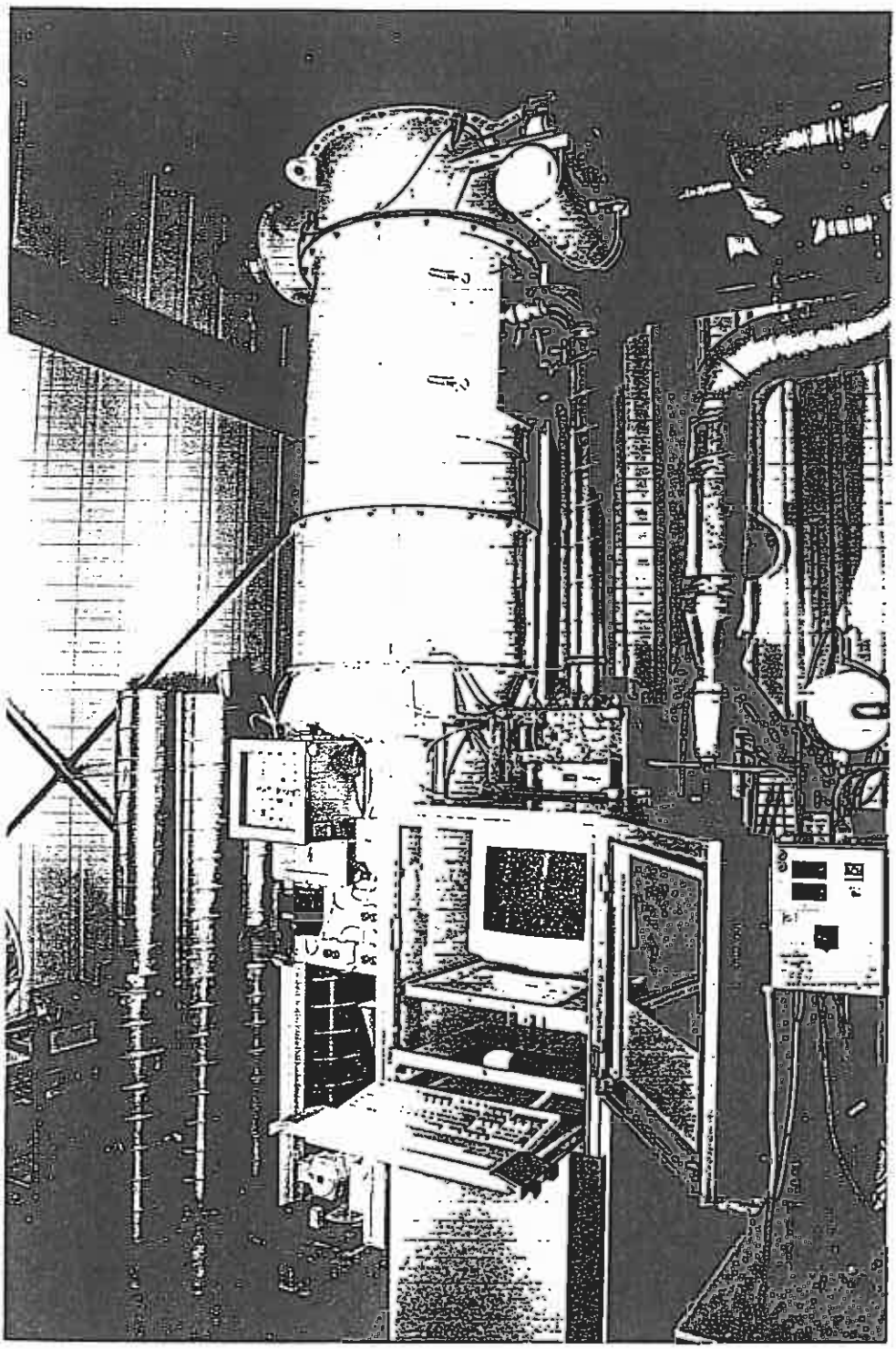


Abb. 3.7 Gesamtansicht des Versuchsstandes

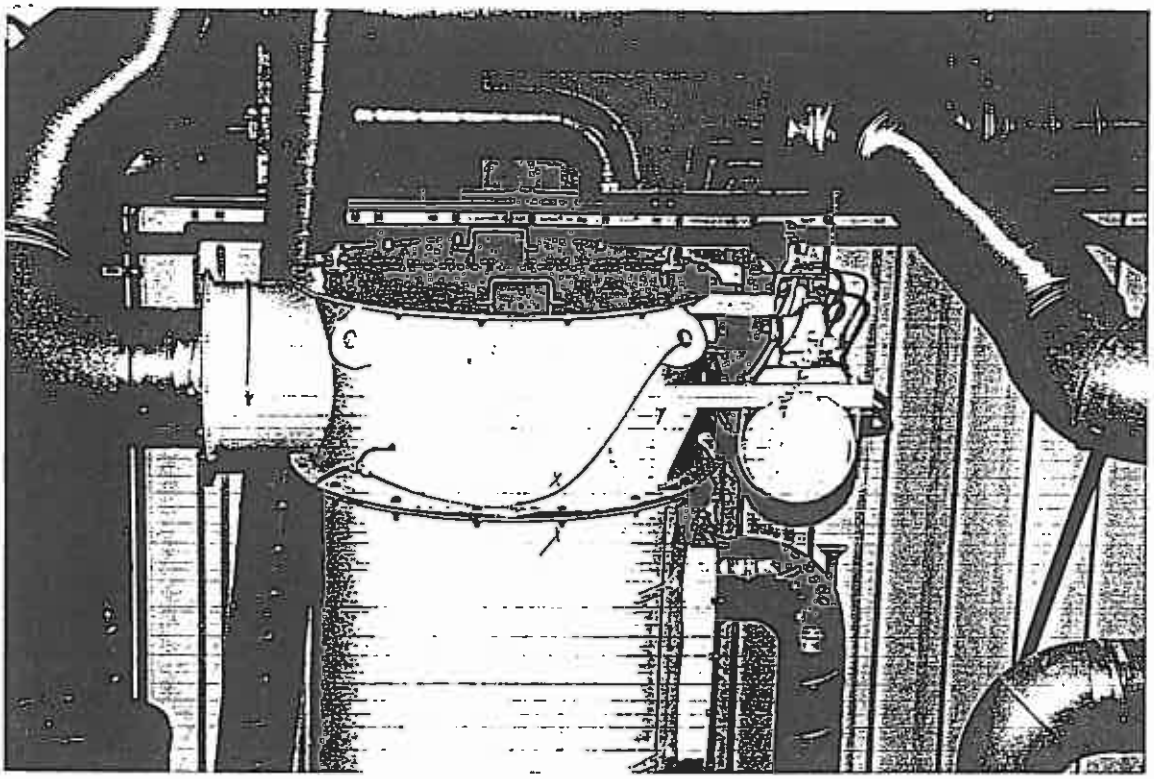


Abb. 3.8 Teilansicht des Rundkammerabscheiders

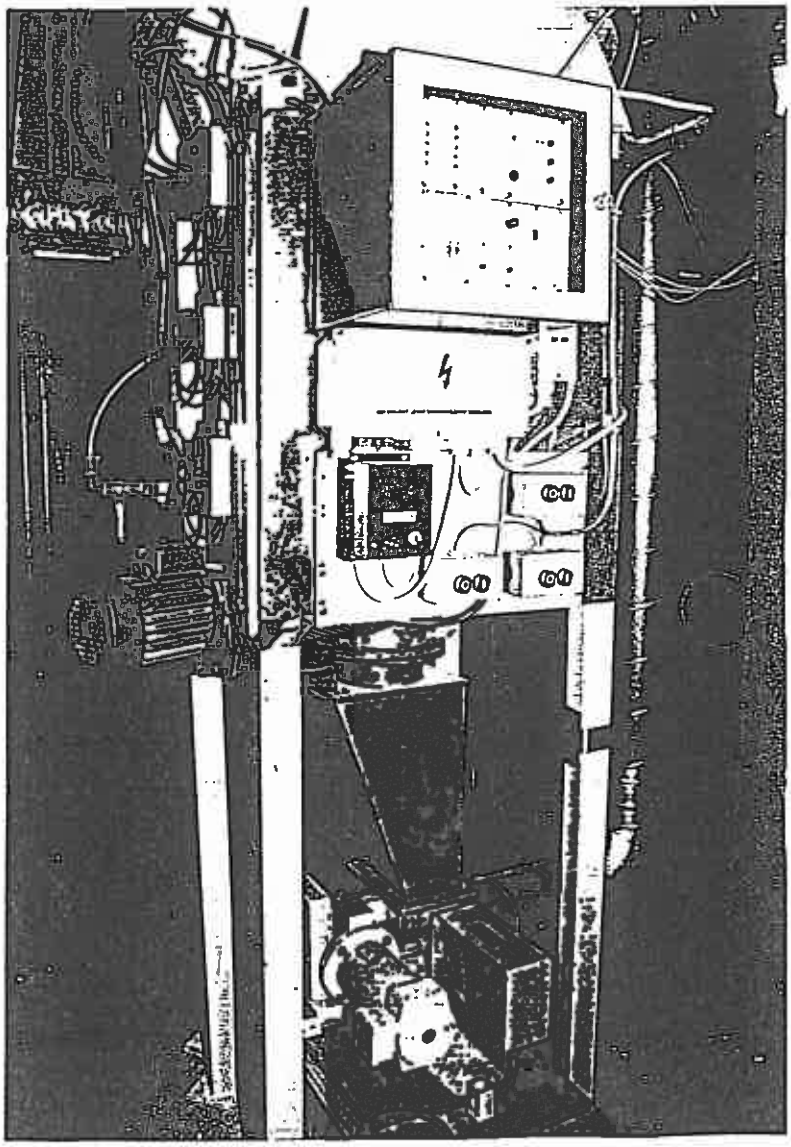


Abb. 3.9

Staubdosierung und elektronische Steuerung

3.2 Durchführung der Technikumsuntersuchungen

Die Technikumsuntersuchungen zum Vergleich der beiden Regenerierungssysteme im Versuchsfeld des ILK Dresden erforderten folgende Maßnahmen:

- die Umrüstung des Rundkammerabscheiders auf die neue Filter- und Regenerierungstechnik
- die Aufrüstung des Versuchsstandes mit der neuen Geräte- und Meßtechnik
- die Voruntersuchungen
- die Hauptuntersuchungen zum Vergleich der beiden Regenerierungssysteme
- die Auswertung und Analyse der Untersuchungsergebnisse.

Die Umrüstung des Rundkammerabscheiders beinhaltete die Auslegung und Konstruktion, die Herstellung bzw. den Bezug der neuen Filter- und Regenerierungstechnik, sowie deren Einbau in den Abscheider und deren Erprobung. Umrüstungen waren auch während des Versuchsbetriebes notwendig, wie z. B. beim Wechsel des Regenerierungssystems. Zur Aufrüstung des Versuchsstandes zählten die Bereitstellung der neuen Geräte-, Meß- und Auswertetechnik und deren Erprobung. In den Voruntersuchungen wurden vorbereitende und ergänzende Messungen zu den Hauptuntersuchungen durchgeführt. Hierzu gehörten:

- die Kalibrierungen zu den Meßgeräten
- die Kalibrierung der Staubdosierung
- die Staubanalysen zu den Versuchsstäuben
- die Messungen zum Druckabfall im Druckluftspeicher zur Bestimmung des Druckluftverbrauches für die Druckluftimpulse
- die Grundbestaubungen der neuen Filterschläuche bis zum Erreichen eines quasistationären Druckverlust- und Abscheideverhaltens.

Die Untersuchungen zum Vergleich der beiden Regenerierungssysteme (Hauptuntersuchungen) erfolgten mit den Versuchsstäuben Mikro-Calcilin und Metallsinterstaub. Mikro-Calcilin ist ein Kalkstaub und wird zur Prüfung von textilen Filtermedien für filternde Abscheider verwendet /14/. Mikro-Calcilin besitzt eine Dichte von 2,8 gcm^{-3} und eine mittlere Partikelgröße von 3,5 µm. Der Metallsinterstaub wurde aus dem Filtermodul der Industrieuntersuchungen entnommen. Er hat eine Dichte von 4,4 gcm^{-3} und eine mittlere Partikelgröße von 4,5 µm. Mikro-Calcilin und Metallsinterstaub können nach /15/ der Staubklasse extra fein zugeordnet werden. Stäube der Klasse extra fein bilden in der Regel sehr dichte Staubkuchen auf der Filtermaterialoberfläche und lassen sich schwer abreinigen. Die Filterflächenbelastungen für die Filterschläuche sind dementsprechend für die beiden Versuchsstäube gering zu halten. Die Staubabscheidung von Mikro-Calcilin und Metall-

sinterstaub können unter dem filtertechnischen Aspekt als schwierige Einsatzfälle eingeordnet werden. Abb. 3.10 zeigt die Partikelgrößenanalyen der beiden Versuchsstäube.

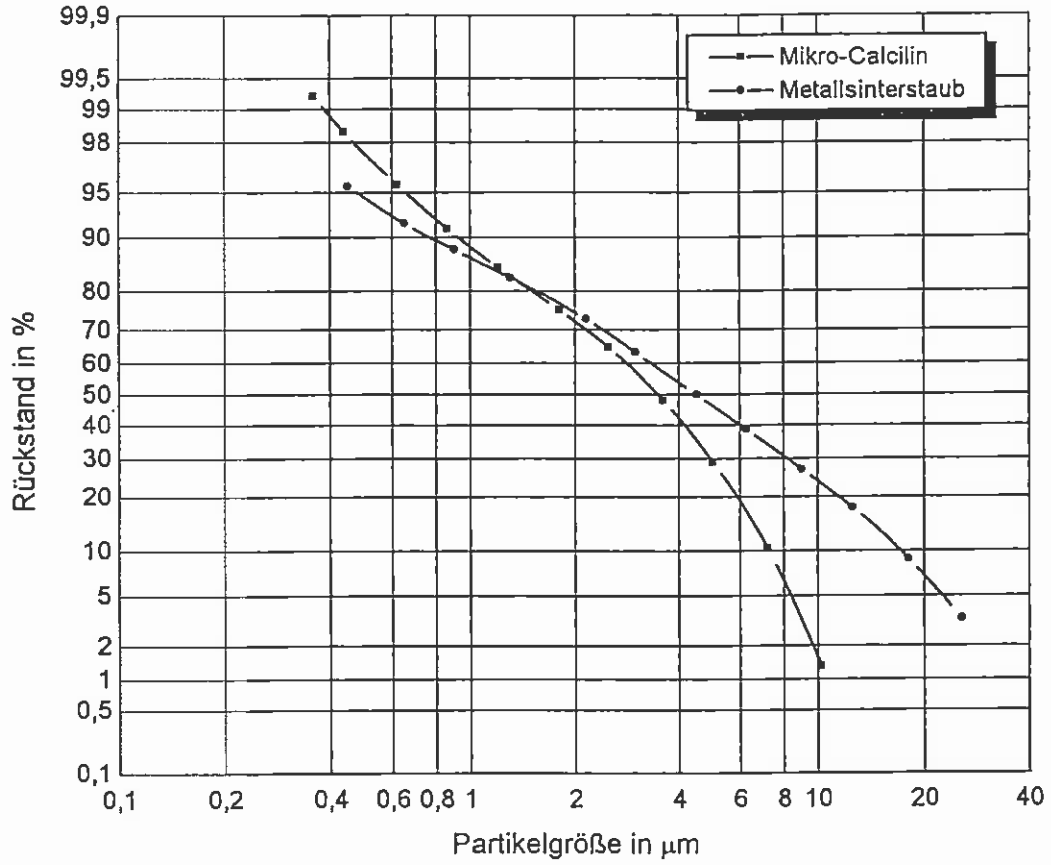


Abb. 3.10 Partikelgrößenanalysen der Versuchsstäube Mikro-Calcilin und Metallsinterstaub

Der Vergleich der beiden Regenerierungssysteme beinhaltete Untersuchungen zum Druckverlust-, Abscheide- und Energieverhalten der Filterschläuche in Abhängigkeit folgender filter- und regenerierungstechnischer Parameter.

- filtertechnische Parameter
  - Filterflächenbelastung q
  - Rohluftstaubkonzentration k_{Roh}
- regenerierungstechnische Parameter
  - Regenerierungsdruck p_R
  - Impulszeit t_i
  - Umlaufzeit t_U

Die Einflußgrößen Filterflächenbelastung und Rohluftstaubkonzentration sind ein Maß für die filtertechnische Beanspruchung der Filterschläuche. Beim Einsatzfall in der Praxis sind die filtertechnischen Parameter in der Regel vorgegeben und nur wenig veränderbar. Sie unterliegen aber meist Schwankungen während der Betriebszeit. Die regenerierungstechnischen Parameter Abreinigungsdruck und Impulszeit beeinflussen vor allem die Impulsstärke des Regenerierungsimpulses. Der Parameter Umlaufzeit der Druckluftimpulse ist ein Maß für die Häufigkeit der Abreinigung der Filterschläuche und hat einen wesentlichen Einfluß auf den Druckluftverbrauch der beiden Regenerierungssysteme. Die regenerierungstechnischen Einflußgrößen können nur in einem begrenzten Arbeitsbereich sinnvoll verändert werden. Der Arbeitsbereich wird dabei vor allem durch die Einsatzbedingungen und die Gerätetechnik begrenzt. Für den Regenerierungsdruck und die Impulszeit ergeben sich dabei nur geringe Variationsmöglichkeiten im Vergleich zu den wesentlich größeren Variationsmöglichkeiten bei der Umlaufzeit. Die Umlaufzeit wurde deshalb als Hauptparameter bei den Untersuchungen zum Vergleich der beiden Regenerierungssysteme ausgewählt. Die Untersuchungen erfolgten dabei in Versuchsreihen, bei denen jeweils ein Parameter verändert und die anderen Parameter auf festgelegten Standardwerten konstant gehalten wurden. Tab. 3.1 zeigt für die Parameter eine Zusammenstellung der maximalen Arbeitsbereiche und der Standardwerte.

Parameter	max. Arbeitsbereich	Standardwert	
		Druckluftimpuls-regenerierung	Blähschlauch-regenerierung
Filterflächenbelastung	(90-150) $m^3m^{-2}h^{-1}$	105/120 $m^3m^{-2}h^{-1}$ [1)]	105/120 $m^3m^{-2}h^{-1}$ [1)]
Rohluftstaubkonzentration	(4- 40) gm^{-3}	10 gm^{-3}	10 gm^{-3}
Regenerierungsdruck	(3 - 7) bar	5 bar	4,5 bar
Impulszeit	(40-200) ms	160 ms	160 ms
Umlaufzeit	(60-1200) s	240 s	240 s

[1)] je nach Einsatzfall beträgt die Standardfilterflächenbelastung 105 $m^3m^{-2}h^{-1}$ oder 120 $m^3m^{-2}h^{-1}$

Tab. 3.1 maximaler Arbeitsbereich und Standardwert für die filter- und regenerierungstechnischen Parameter

Der Ablauf der Versuche in den einzelnen Versuchsreihen erfolgte meistens von der geringeren zur höheren filtertechnischen Belastung bzw. von der größeren zur kleineren Regenerierungsintensität. Bei Erreichen der Stabilitätsgrenze im Druckverlustverhalten wurde die Versuchsreihe abgebrochen. Für einige Versuchsreihen konnte dadurch der maximale Arbeitsbereich, wie in Tab. 3.1 angegeben, nicht realisiert werden.

Eine weitere Einschränkung des Arbeitsbereiches bei der Blähschlauchregenerierung ergab sich bei Regenerierungsdrücken größer und gleich 6 bar durch Zerstörung der Bläh-

schläuche. Abb. 3.11 zeigt den Druckverlustverlauf der Filterschläuche in Abhängigkeit der Meßzeit für einen stabilen Betriebsdruck des filternden Abscheiders. In der Filtrationsphase steigt der Druckverlust durch den abgeschiedenen Staub bis zu einem Endwert an. In der anschließenden Regenerierungsphase wird ein Teil des Staubes vom Filterschlauch abgereinigt und der Druckverlust sinkt schlagartig auf einen unteren Wert ab. Der untere Wert des Druckverlustes nach der Regenerierung ist der Ausgangswert für eine erneute Filtrationsphase. Der kontinuierliche Wechsel von Filtration und Regenerierung führt am filternden Abscheider zu einem „sägezahnartigen" Verlauf des Druckverlustes. Ein stabiler Betriebspunkt des Abscheiders ist durch konstante Werte für den Enddruckverlust vor der Regenerierung und den Anfangsdruckverlust nach der Regenerierung (unterer Wert) gekennzeichnet, der Druckverlustrückgewinn durch die Regenerierung bleibt konstant. Bei dem Beispiel in Abb. 3.11 wird der stabile Arbeitspunkt des Abscheiders nach einer Meßzeit von ca. 1500 s erreicht. Der stabile Betriebspunkt stellt sich damit beim filternden Abscheider erst nach einer Einfahrphase ein, die durch steigende Druckverlustwerte gekennzeichnet ist. Der filternde Abscheider reagiert damit nicht sofort auf eine Änderung der Betriebsparameter. Er besitzt eine bestimmte Trägheit in seinem Druckverlustverhalten. Abb. 3.12 zeigt den Druckverlustverlauf für einen instabilen Betriebspunkt. Ein instabiler Betriebspunkt des Abscheiders ist durch ansteigende Werte für End- und Anfangsdruckverlust und durch eine Abnahme des Druckverlustrückgewinnes durch die Regenerierung gekennzeichnet. Die Stärke des Regenerierungsimpulses reicht nicht mehr zur Abreinigung des abgeschiedenen Staubes aus. Der Filterschlauch setzt sich mit Staub zu. Der ansteigende Druckverlust führt zu einer Verringerung des Luftdurchsatzes und zum Zusammenbruch der Filtration.

Das Druckverlust- und Abscheideverhalten des filternden Abscheiders wurde in den Untersuchungen durch die Meßgrößen Druckverlust bzw. Reinluftstaubkonzentration charakterisiert, das Energieverhalten aus Meßgrößen bestimmt. Hauptmeßgrößen waren in den Versuchen deshalb der Druckverlust der Filterschläuche und die Reinluftstaubkonzentration. Für die Berechnung des Druckluft- und Energieverbrauches der Regenerierungsimpulse wurden in Voruntersuchungen der Druckabfall im Druckluftspeicher infolge der Regenerierungsimpulse gemessen. Der zeitliche Verlauf der Meßwerte für den Druckverlust und die Reinluftstaubkonzentration wurde in den Versuchen durch das Meßwerterfassungssystem MEDANA aufgenommen, kontinuierlich gespeichert und am Meßcomputer sofort dargestellt. Die Meßdateien bildeten die Grundlage für die Auswertung der Untersuchungsergebnisse in Diagrammform mit Hilfe der Computerprogramme ORIGIN 4.1 und 5.

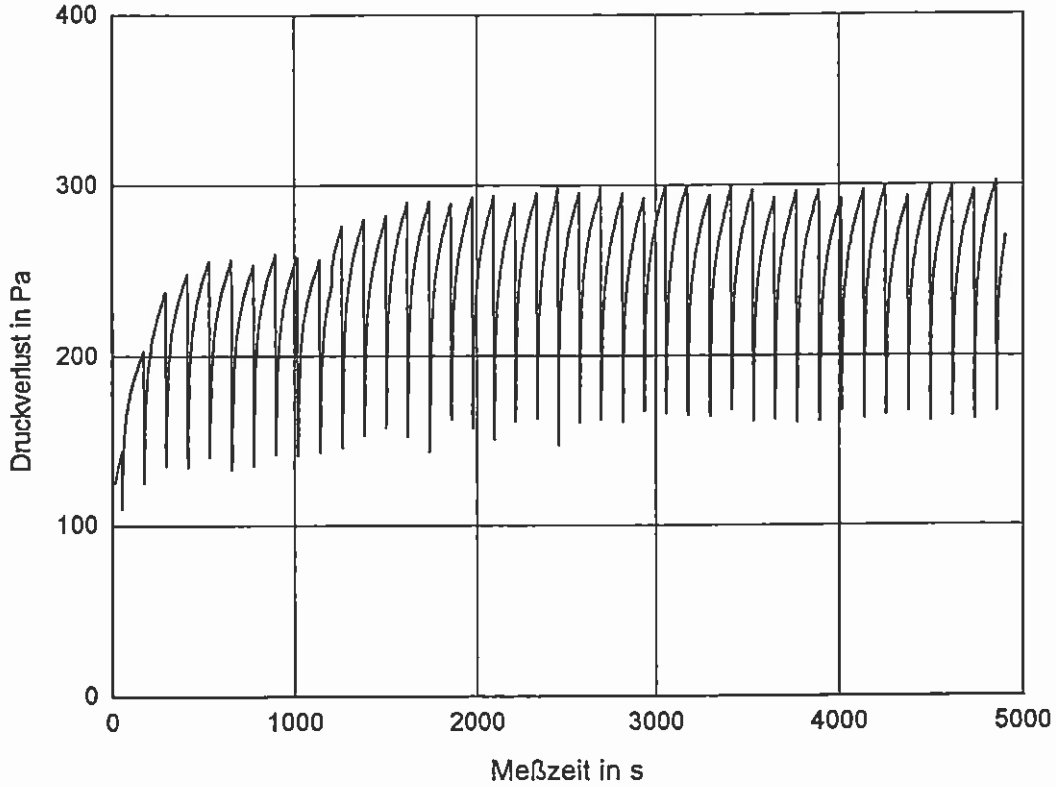


Abb. 3.11 Druckverlustverlauf für einen stabilen Betriebspunkt bei geringer Umlaufzeit der Druckluftimpulse

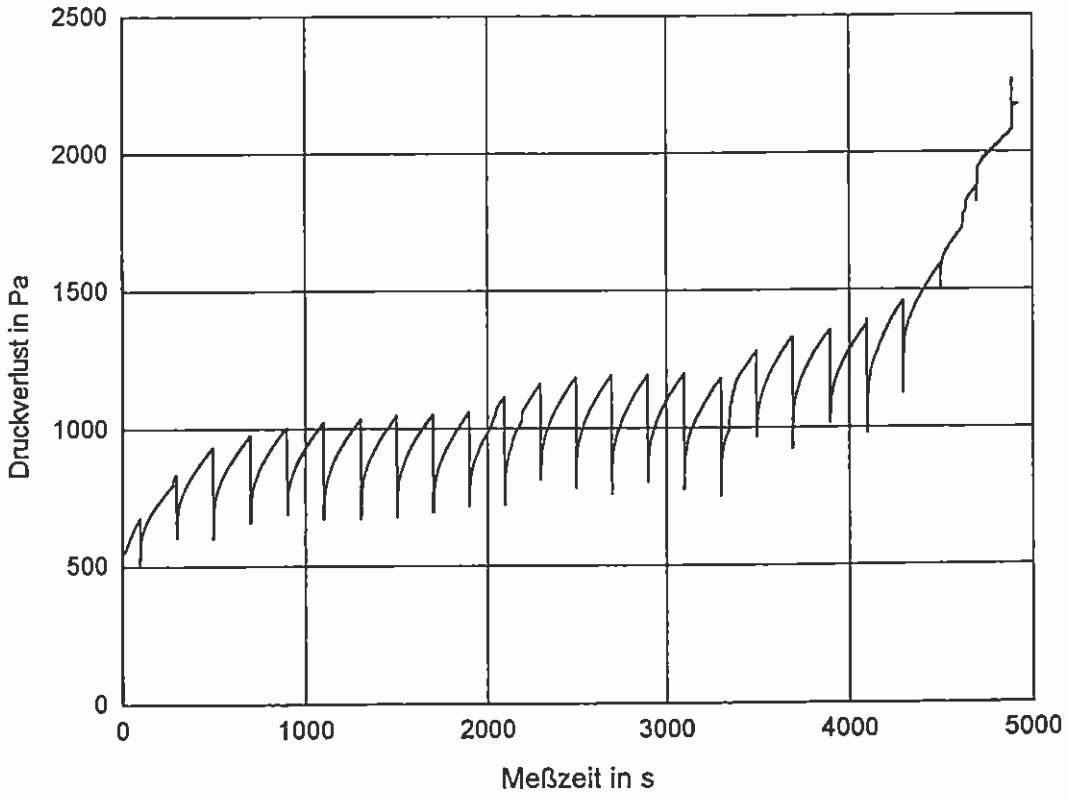
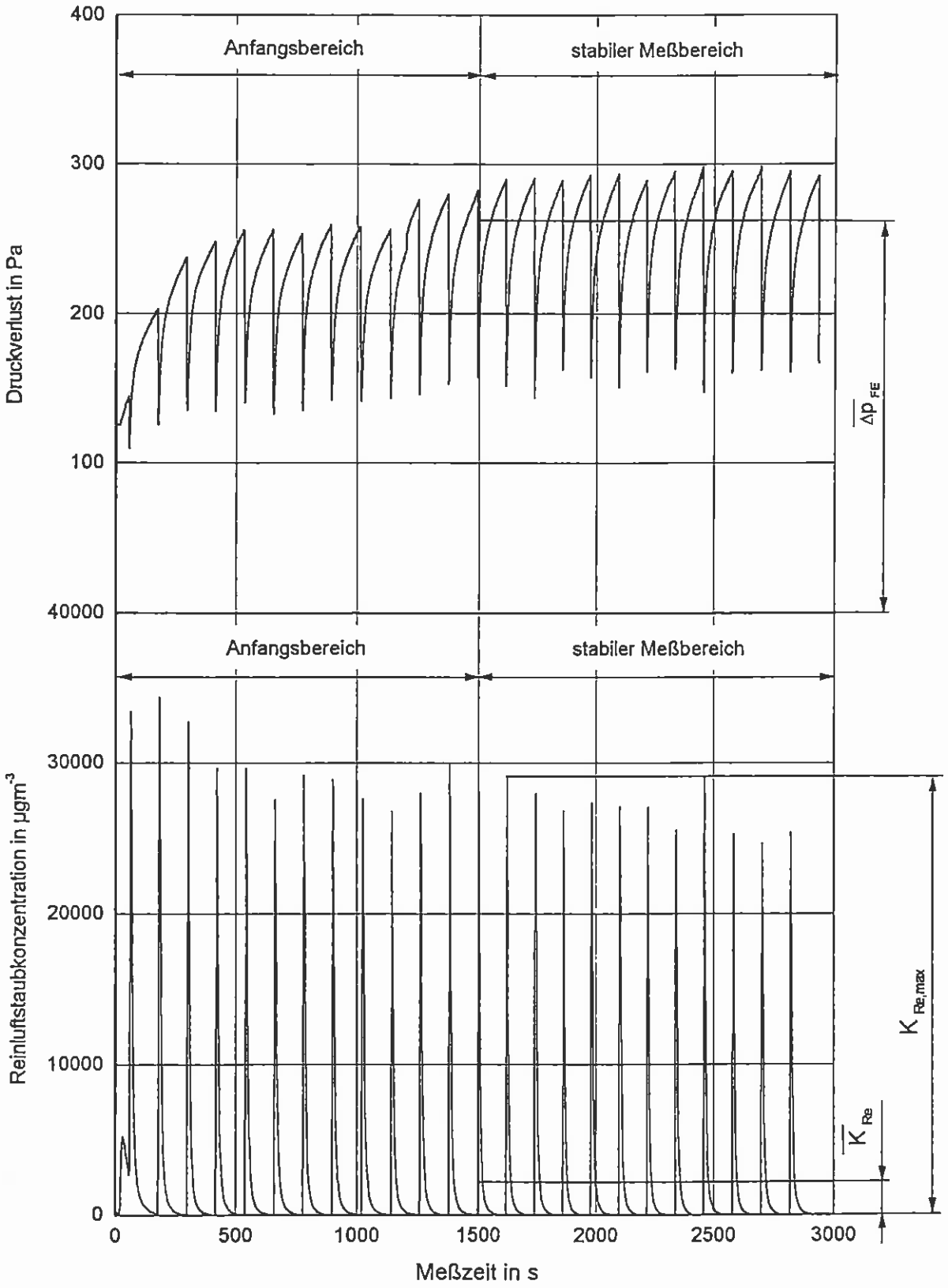


Abb. 3.12 Druckverlustverlauf für einen instabilen Betriebspunkt bei großer Umlaufzeit der Druckluftimpulse



$\overline{\Delta p}_{FE}$ - mittlerer Druckverlust im stabilen Meßbereich

$\overline{K}_{Re}$ - mittlere Reinluftstaubkonzentration im stabilen Meßbereich

$K_{Re,max}$ - max. Reinluftstaubkonzentration im stabilen Meßbereich

Abb. 3.13 Verlauf des Druckverlustes und der Reinluftstaubkonzentration im Anfangsbereich und im stabilen Meßbereich

Abb. 3.13 zeigt den typischen Verlauf des Druckverlustes und der Reinluftstaubkonzentration über die Meßzeit eines Versuchspunktes für einen stabilen Betriebspunkt. Der Meßbereich wird in einem Anfangsbereich und einen stabilen Meßbereich unterteilt. Im Anfangsbereich (Einfahrphase) erfolgt die Anpassung des Druckverlust- und Abscheideverhaltens des filternden Abscheiders an dem neu eingestellten Arbeitspunkt, gekennzeichnet durch den veränderten Wert des entsprechenden filter- oder regenerierungstechnischen Parameters. Im stabilen Meßbereich ergibt sich dann das nahezu konstante Druckverlust- und Abscheideverhalten für den eingestellten Wert des Parameters. Das Druckverlust- und Abscheideverhalten wird im stabilen Meßbereich, wie bereits unter Punkt 2.3.1, aufgeführt, durch folgende Größen charakterisiert:

- mittlerer Druckverlust $\overline{\Delta p_{FE}}$

  Der mittlere Druckverlust $\overline{\Delta p_{FE}}$ ist das arithmetische Mittel aller gemessenen Druckverlustwerte im stabilen Meßbereich.

- mittlere Reinluftstaubkonzentration $\overline{K_{Re}}$

  Die mittlere Reinluftstaubkonzentration $\overline{K_{Re}}$ ist das arithmetische Mittel aller gemessenen Reinluftstaubkonzentrationswerte im stabilen Meßbereich.

- maximale Reinluftstaubkonzentration $K_{Re,max}$

  Die maximale Reinluftstaubkonzentration $K_{Re,max}$ ist der Maximalwert aller gemessenen Reinluftstaubkonzentrationen im stabilen Meßbereich.

Die Versuchszeiten der Einzelversuche lagen in der Regel zwischen 1 und 2 Stunden. Für den stabilen Meßbereich wurde dabei mindestens eine Zeitdauer von 30 Minuten realisiert.

3.3 Ergebnisse der Technikumsuntersuchungen

Die Ergebnisse der Technikumsuntersuchungen werden in den 4 folgenden Unterteilungen zusammengefaßt und diskutiert.

- Druckluftverbrauch und Regenerierungsleistung
- Druckverlustverhalten und Filtrationsleistung
- Gesamtleistung und Abscheideverhalten
- Vergleich der Druckluftimpuls- und der Blähschlauchregenerierung

Druckluftverbrauch und Regenerierungsleistung

Abb. 3.14 zeigt den Druckluftverbrauch pro Impuls und damit pro Ventil und 3 Filterschläuche in Abhängigkeit vom Regenerierungsdruck für die Standardimpulszeit von 160 ms. Bei gleichem Abreinigungsdruck erreichte die Blähschlauchregenerierung einen größeren Druckluftverbrauch pro Impuls im Vergleich zur Druckluftimpulsregenerierung. Ursache hierfür war der größere Durchmesser im engsten Querschnitt des Regenerierungssystems bei der Blähschlauchregenerierung. Dieser Durchmesser beträgt bei der Blähschlauchregenerierung 15 mm und bei der Druckluftimpulsregenerierung 8 mm (siehe hierzu auch die Angaben unter Punkt 3.1). Beim Standardfall der Blähschlauchregenerierung (p_R = 4,5 bar, t_i = 160 ms) wird ein Druckluftverbrauch pro Impuls von etwa 60 l_N (Liter im technischen Normzustand) erzielt. Beim Standardfall der Druckluftimpulsregenerierung (p_R = 5 bar, t_i = 160 ms) beträgt dieser Verbrauch etwa 35 l_N.
In Abb. 3.15 ist der Druckluftverbrauch pro Impuls in Abhängigkeit von der Impulszeit für die Standardregenerierungsdrücke p_R = 4,5 bar (Blähschlauchregenerierung) und p_R = 5 bar (Druckluftimpulsregenerierung) dargestellt.
Abb. 3.16 zeigt den Druckluftverbrauch des Abscheiders in Abhängigkeit von der Umlaufzeit der Druckluftimpulse für die Standardfälle p_R = 4,5 bar; t_i = 160 ms (Blähschlauch-regenerierung und p_R = 5 bar; t_i = 160 ms (Druckluftimpulsregenerierung).

Im allgemeinen gelten folgende Aussagen zum Druckluftverbrauch und zur Wirkung der Druckluft bei der Regenerierung:

- Der Druckluftverbrauch ist bei der Blähschlauchregenerierung etwas höher im Vergleich zur Druckluftimpulsregenerierung.

- Bei der Blähschlauchregenerierung wirkt bei der Regenerierung der Filterschläuche nur die Druckluft aus dem Druckluftspeicher. Sie wird direkt in den Blähschlauch geführt. Bei der Druckluftimpulsregenerierung wirkt der Druckluftimpuls zwischen Düsenaustritt und Eintritt in den Filterschlauch als Freistrahl. Durch die Injektorwirkung am Freistrahl wird zusätzlich noch Luft aus der Reinluftkammer (Sekundärluft) in den Filterschlauch transportiert, die den Reinigungseffekt am Filterschlauch erhöht. Diese Injektorwirkung fehlt bei der Blähschlauchregenerierung.

- Bei der Blähschlauchregenerierung wirkt durch den undurchlässigen Blähschlauch die gesamte Druckluft des Regenerierungsimpulses während der Filtrationsphase (Impulszeit). Erst danach erfolgt die Entspannung über das Entspannungsventil. Bei der Druckluftimpulsregenerierung wird während der gesamten Filtrationsphase und damit auch schon zu Beginn der Regenerierung ein Teil der Druckluft des Regenerierungsimpulses über das durchlässige System Filtermaterial des Filterschlauches und Filterkuchen in die Reinluftkammer abgebaut.

Abb. 3.17 zeigt die Regenerierungsleistung des Abscheiders in Abhängigkeit von der Umlaufzeit der Druckluftimpulse für die Standardfälle p_R = 4,5 bar; t_I = 160 ms (Blähschlauch-regenerierung) und p_R = 5 bar; t_I = 160 ms (Druckluftregenerierung). Auf Grund des größeren Druckluftverbrauches benötigt die Blähschlauchregenerierung im Vergleich zur Druckluftimpulsregenerierung auch eine größere Leistung für die Regenerierung der Filterschläuche.
Für den Druckluftverbrauch und die Regenerierungsleistung gelten folgende Berechnungsgleichungen (Analog zu Abschnitt 2.3.1):

- Druckluftverbrauch pro Impuls $V_{D,I}$

$$V_{D,I} = \frac{V_K \cdot p_{R1}}{R_L \cdot T_{R1} \cdot \rho_{L,N}} \left[1 - \left(\frac{p_{R2}}{p_{R1}} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \right]$$

(3.1)

V_K - Volumen des Druckluftspeichers
p_{R1} - Druck im Druckluftspeicher vor dem Impuls
P_{R2} - Druck im Druckluftspeicher nach dem Impuls
R_L - Gaskonstante für Luft
T_{R1} - Temperatur im Druckluftspeicher vor dem Impuls
$\rho_{L,N}$ - Dichte der Luft beim technischen Normzustand

κ - - Isentropenexponent für Luft

- Druckluftverbrauch des Abscheiders $\dot{V}_D$

$$\dot{V}_D = N_V \frac{V_{D,I}}{t_U}$$

(3.2)

N_V - Anzahl der Druckluftventile

$V_{D,I}$ - Druckluftverbrauch pro Impuls

t_U - Umlaufzeit der Druckluftimpulse

- Regenerierungsleistung P_R

$$P_R = \dot{m}_D \cdot e$$

(3.3)

$\dot{m}_D$ - Druckluftmassenverbrauch des Abscheiders

e - spezifische Leistung

$$\dot{m}_D = \dot{V}_D \cdot \rho_{L,N}$$

(3.4)

$$e = \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot R \cdot T_{R1} \left[\left(\frac{p_{R1}}{p_b} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right]$$

(3.5)

p_b - Umgebungsdruck

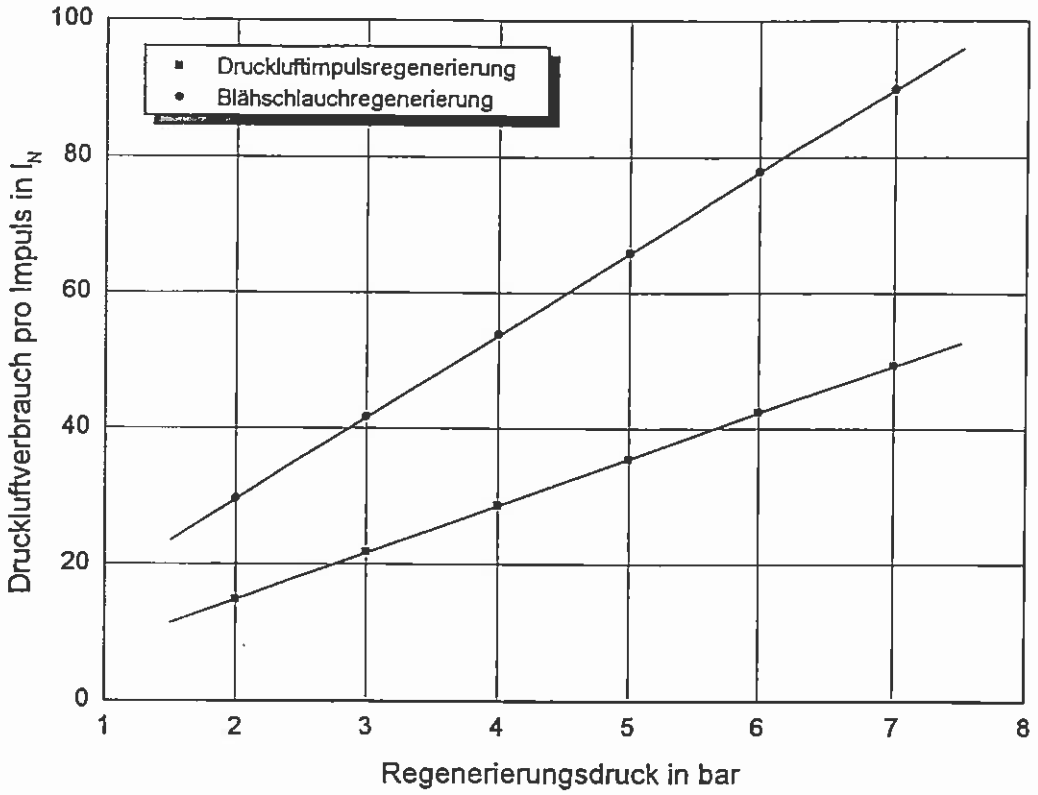


Abb. 3.14 Druckluftverbrauch pro Impuls in Abhängigkeit vom Regenerierungsdruck

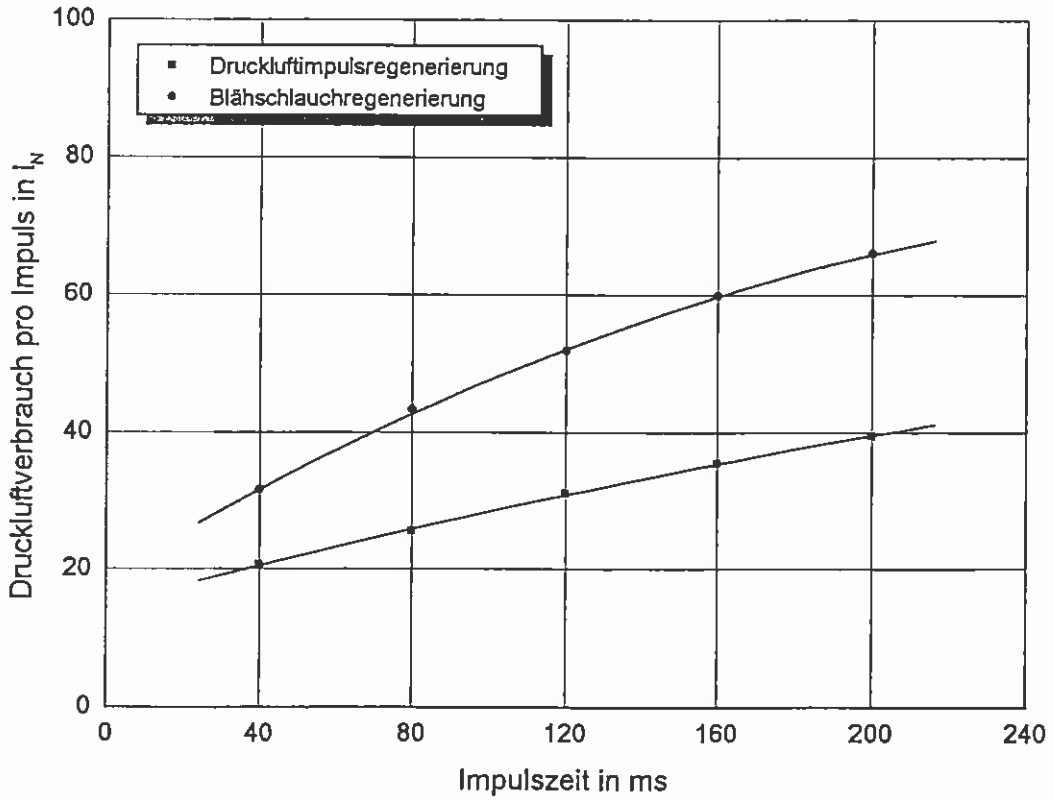


Abb. 3.15 Druckluftverbrauch pro Impuls in Abhängigkeit von der Impulszeit

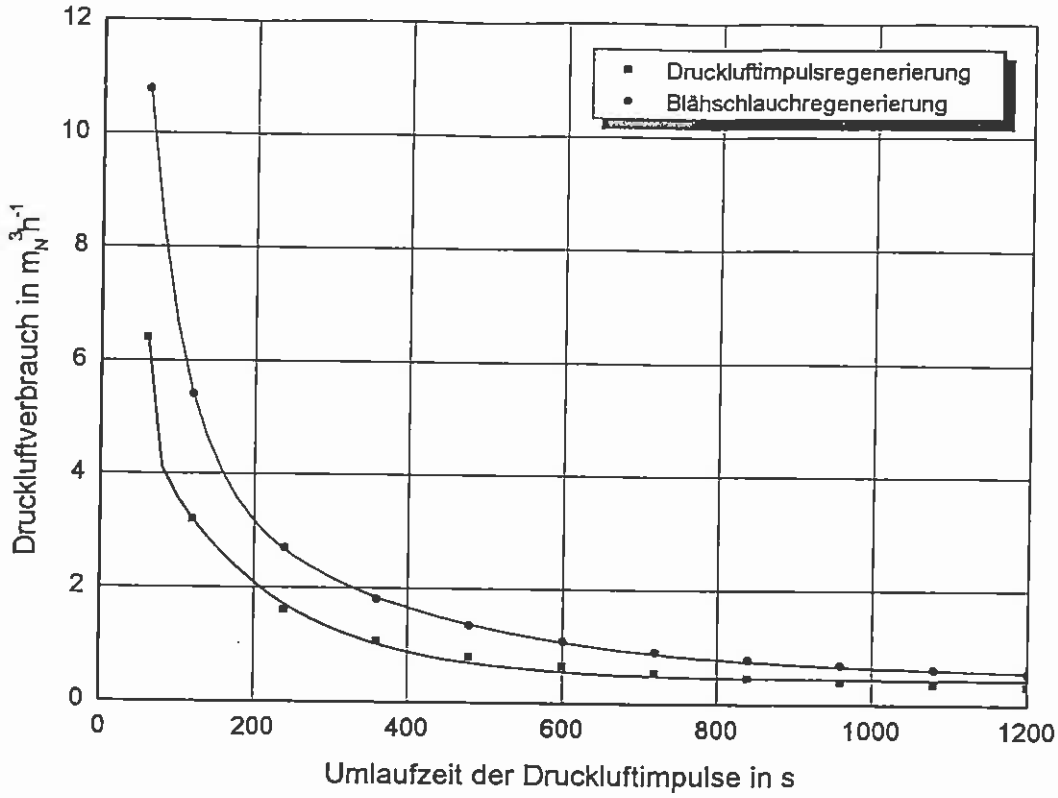


Abb. 3.16 Druckluftverbrauch des Abscheiders in Abhängigkeit von der Umlaufzeit der Druckluftimpulse

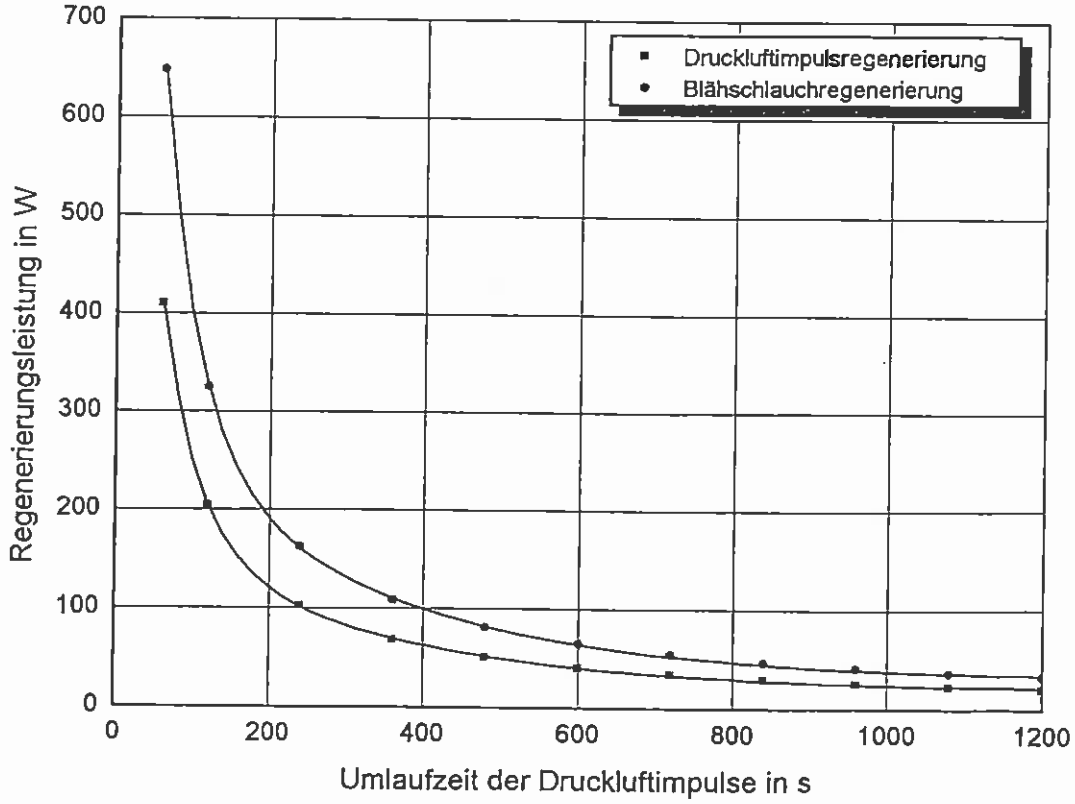


Abb. 3.17 Regenerierungsleistung des Abscheiders in Abhängigkeit von der Umlaufzeit der Druckluftimpulse

Druckverlustverhalten und Filtrationsleistung

In Abb. 3.18 ist der mittlere Druckverlust der Filterschläuche $\overline{\Delta p_{FE}}$ in Abhängigkeit von der Umlaufzeit der Druckluftimpulse für die Standardbedingungen, die Filterflächenbelastung $q = 105\ m^3m^{-2}h^{-1}$, für den Versuchsstaub Mikro-Calcilin im Vergleich der beiden Regenerierungssysteme dargestellt. Die Druckluftimpulsregenerierung erzielte im Vergleich zur Blähschlauchregenerierung das bessere Druckverlustverhalten der Filterschläuche mit geringeren mittleren Druckverlusten infolge einer größeren Regenerierungswirkung.
Abb. 3.19 zeigt analog zur Abb. 3.18 den Vergleich für den Versuchsstaub Metallsinterstaub. Auch hier erzielte die Druckluftimpulsregenerierung das bessere Druckverlustverhalten durch die größere Regenerierungswirkung. Der Metallsinterstaub ließ sich im Vergleich zu Mikro-Calcilin schlechter abreinigen und erzielte höhere mittlere Druckverluste bei sonst gleichen Versuchsbedingungen. Während für Mikro-Calcilin auch bei der maximalen Umlaufzeit der Druckluftimpulse von 1200 s ein stabiles Druckverlustverhalten für beide Regenerierungssysteme erreicht wurde, war für den Metallsinterstaub bei Umlaufzeiten von 1080 s (Druckluftimpulsregenerierung) und 600 s (Blähschlauchregenerierung) die Stabilitätsgrenze erreicht.
In den Abb. 3.20 bis 3.23 ist das Druckverlustverhalten der Filterschläuche bei Standardbedingungen für den Versuchsstaub Mikro-Calcilin und die beiden Regenerierungssysteme in Abhängigkeit der folgenden filter- und regenerierungstechnischen Parameter dargestellt:

- Abb. 3.20 - Filterflächenbelastung,
- Abb. 3.21 - Rohluftstaubkonzentration,
- Abb. 3.22 - Regenerierungsdruck,
- Abb. 3.23 - Impulszeit.

Die Untersuchungen erfolgten mit der höheren Standardfilterflächenbelastung $q = 120\ m^3m^{-2}h^{-1}$. Auch bei diesen Vergleichen erzielte das Druckluftimpulsregenerierungssystem das bessere Druckverlustverhalten der Filterschläuche infolge einer größeren Regenerierungswirkung. Auf eine Darstellung der Ergebnisse in Diagrammform für den Versuchsstaub Metallsinterstaub wurde wegen der geringen Anzahl möglicher Meßpunkte infolge der großen Filterflächenbelastung, des schlechteren Regenerierungsverhaltens und eines schlechten Dosierverhaltens des Metallsinterstaubes verzichtet. Bei der Dosierung des Metallsinterstaubes traten vor allem bei kleineren Dosiermengen Unregelmäßigkeiten auf, die eine gleichmäßige und reproduzierbare Rohluftstaubkonzentration im Luftstrom verhinderten.

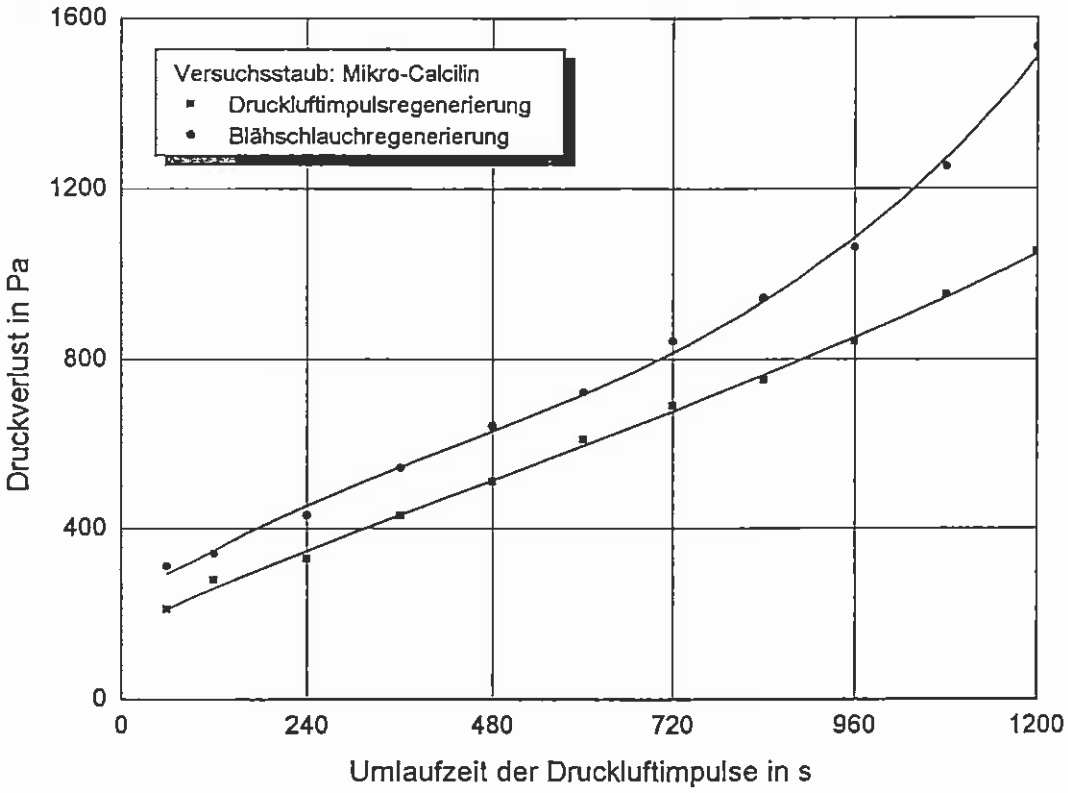


Abb. 3.18 Druckverlust der Filterschläuche in Abhängigkeit von der Umlaufzeit für Mikro-Calcilin

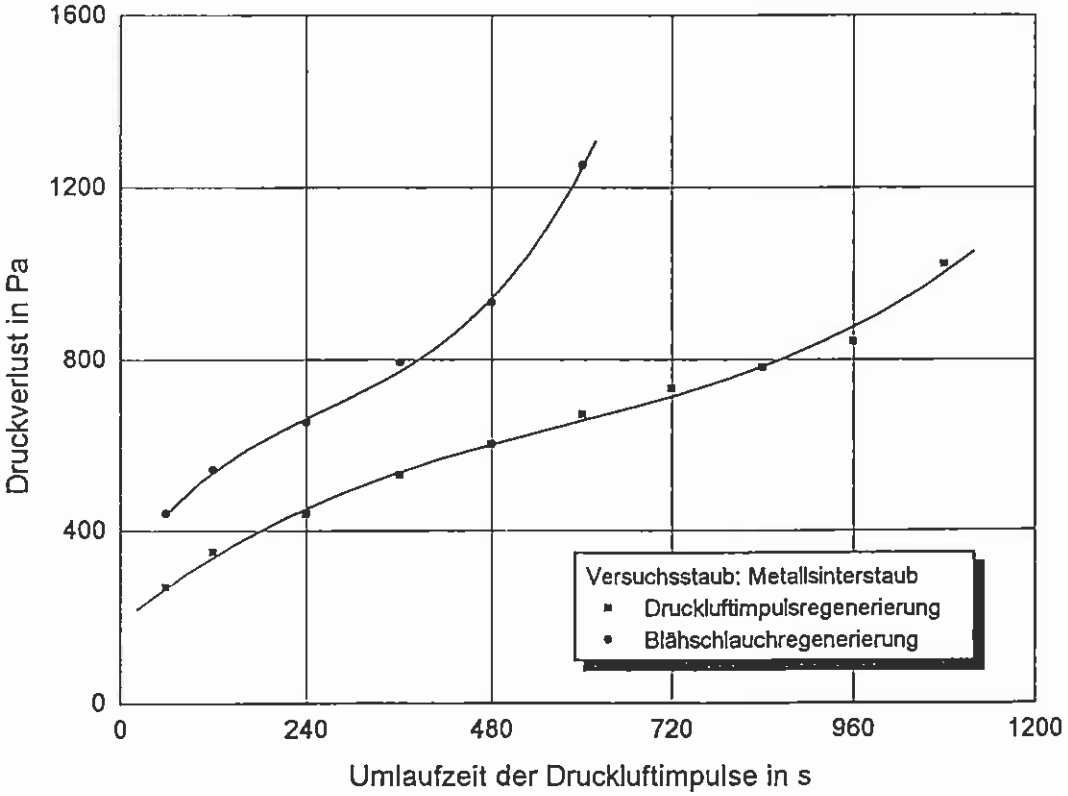


Abb. 3.19 Druckverlust der Filterschläuche in Abhängigkeit von der Umlaufzeit für Metallsinterstaub

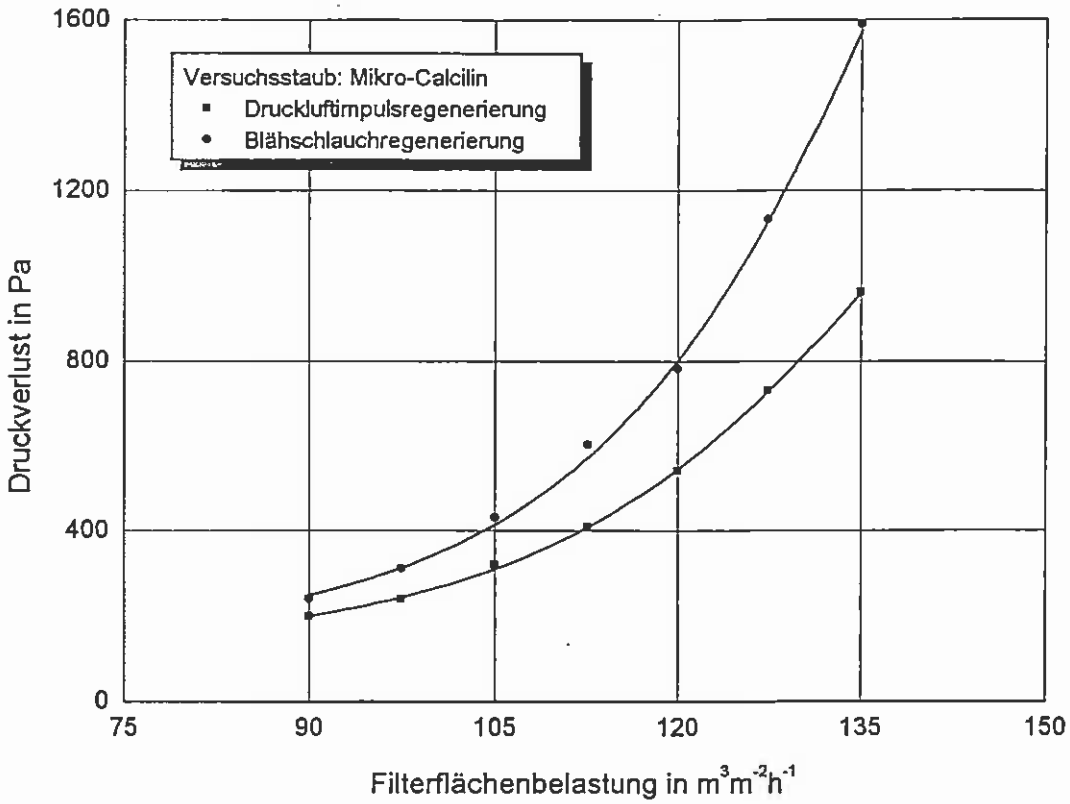


Abb. 3.20 Druckverlust der Filterschläuche in Abhängigkeit von der Filterflächenbelastung für Mikro-Calcilin

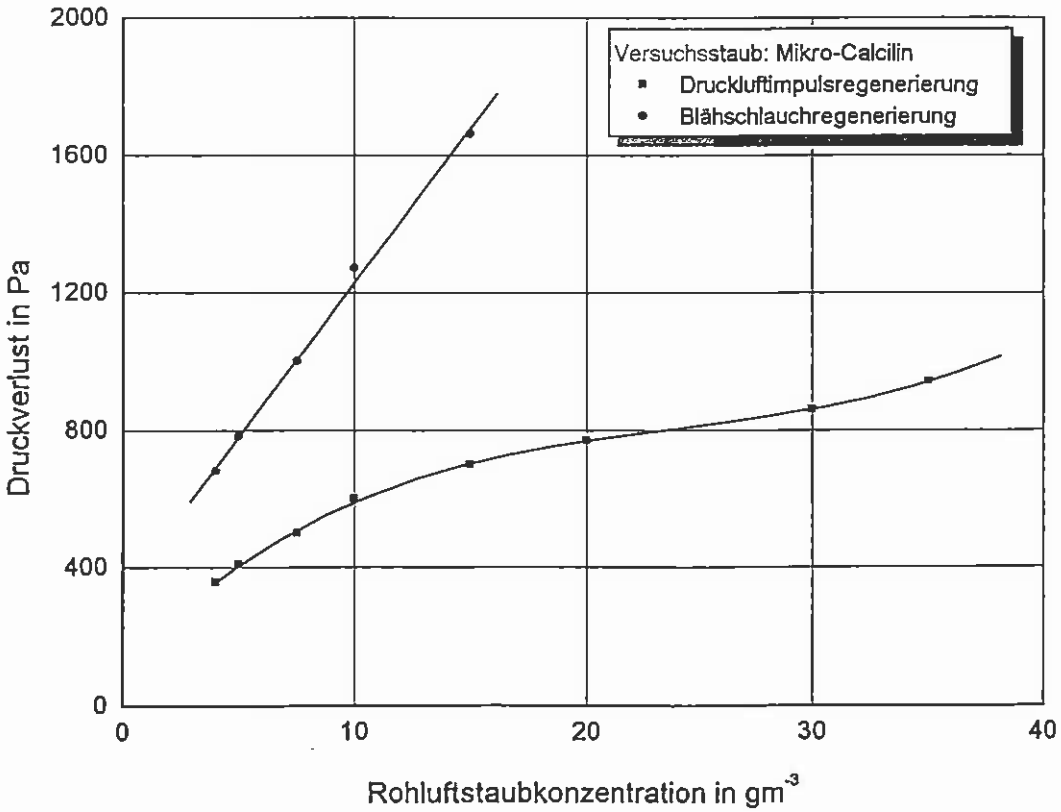


Abb. 3.21 Druckverlust der Filterschläuche in Abhängigkeit von der Rohluftstaubkonzentration für Mikro-Calcilin

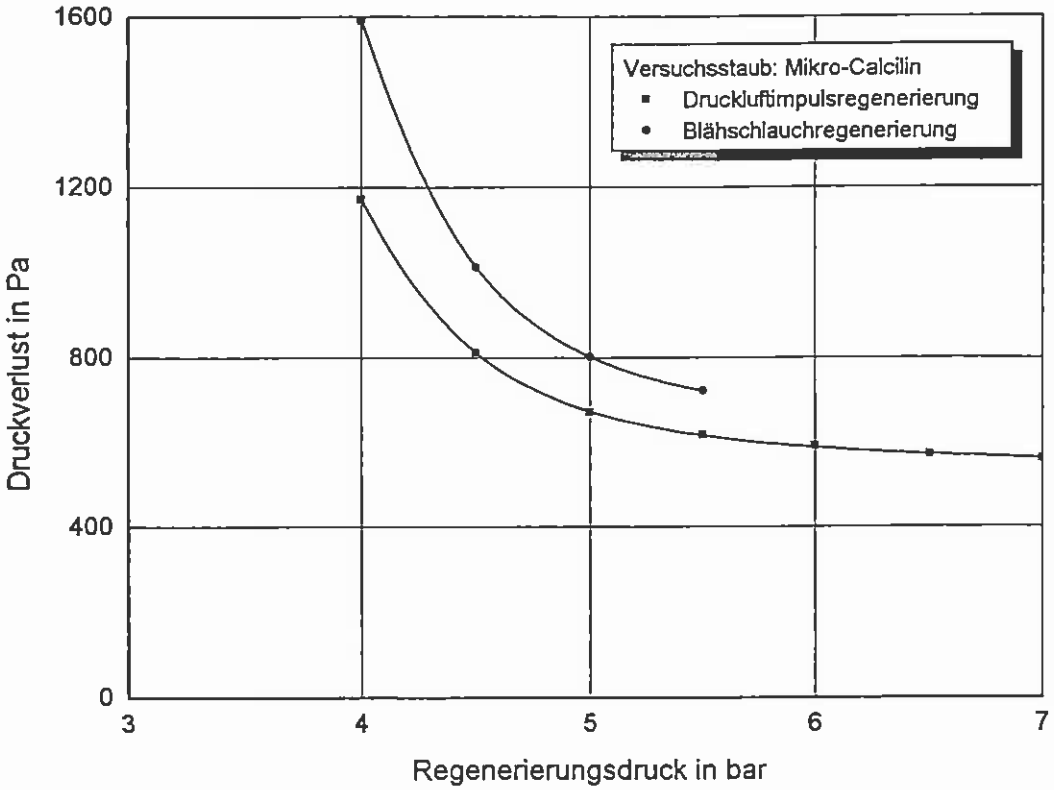


Abb. 3.22 Druckverlust der Filterschläuche in Abhängigkeit vom Regenerierungsdruck für Mikro-Calcilin

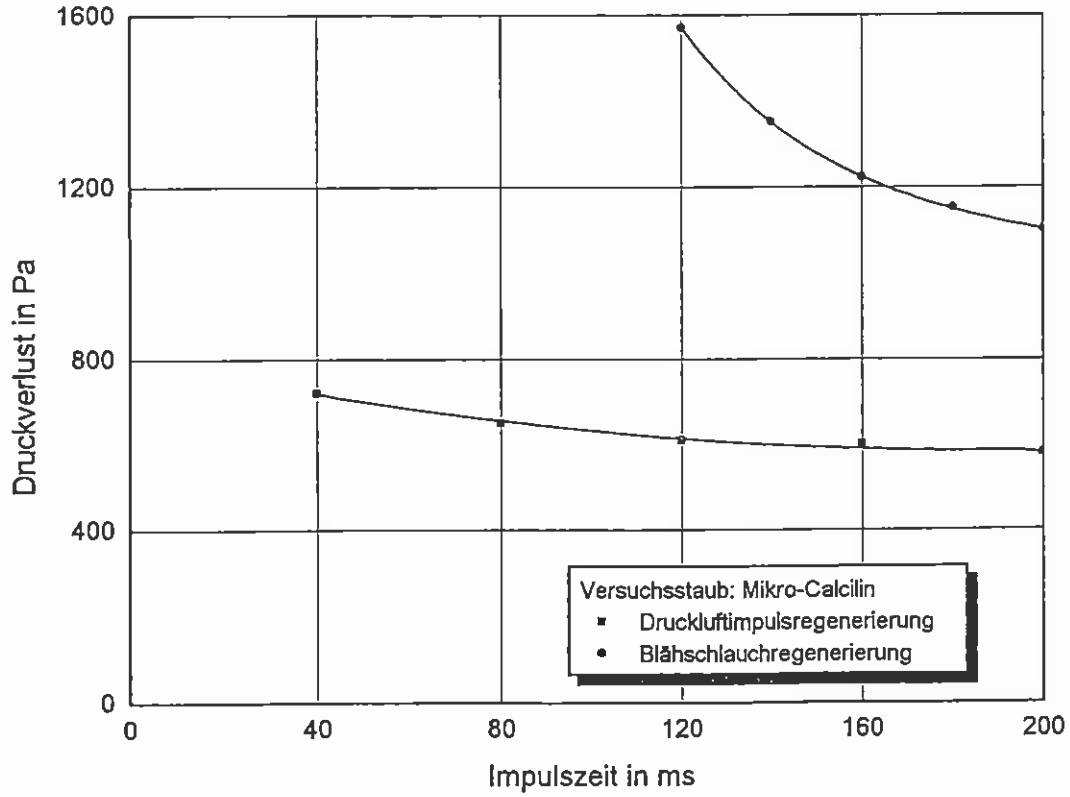


Abb. 3.23 Druckverlust der Filterschläuche in Abhängigkeit von der Impulszeit für Mikro-Calcilin

In Abb. 3.24 ist der Druckverlust der Filterschläuche in Abhängigkeit vom Regenerierungsdruck bei gleichem Druckluftverbrauch pro Impuls für 2 Einsatzfälle der Blähschlauchregenerierung dargestellt. Der konstante Druckluftverbrauch entsprach bei allen Meßpunkten dem Standardwert für die Blähschlauchregenerierung von 60 l_N pro Impuls. Dementsprechend wurde neben dem Regenerierungsdruck auch die Impulszeit in jedem Meßpunkt verändert. Bei großem Regenerierungsdruck wurde eine kleine Impulszeit und bei kleinem Regenerierungsdruck eine große Impulszeit eingestellt. Tab. 3.2 gibt einen Überblick über die Meßpunkte.

p_R	bar	4,05	4,25	4,5	4,8	5,3	5,8
t_I	ms	200	180	160	140	120	100

Tab. 3.2 Regenerierungsdruck und zugehörige Impulszeit bei einem konstanten Druckluftverbrauch von 60 l_N pro Impuls für die Blähschlauchregenerierung

Bei gleichem Druckluftverbrauch pro Impuls erzielte am Blähschlauch ein hoher Regenerierungsdruck bei kleiner Impulszeit eine bessere Regenerierungswirkung als ein kleiner Regenerierungsdruck und eine große Impulszeit. Die Regenerierungswirkung kann bei der Blähschlauchregenerierung damit durch einen schnellen Füllvorgang durch große Regenerierungsdrücke verbessert werden. Bei großen Drücken besteht allerdings auch die Gefahr einer Zerstörung des Blähschlauches.
Abb. 3.25 zeigt den Druckverlust der Filterschläuche für die Blähschlauchregenerierung in Abhängigkeit von der Spaltbreite und damit von der Größe des Öffnungsquerschnittes des Entspannungsventils. Die Untersuchungen erfolgten mit dem Metallsinterstaub bei Standardbedingungen und der Filterflächenbelastung q = 105 $m^3m^{-2}h^{-1}$. Die Größe des Querschnittes des Entspannungsventils und damit der zeitliche Ablauf des Entspannungsvorganges des Blähschlauches besitzt ebenfalls einen Einfluß auf die Regenerierungswirkung des Blähschlauches. Der Einfluß des Entspannungsvorganges ist allerdings geringer als der Einfluß des Füllvorganges. Zusammenfassend werden folgende Aussagen zum Druckverlustverhalten und damit zur Regenerierungswirkung getroffen.

- Die Druckluftimpulsregenerierung erzielte ein besseres Druckverlustverhalten der Filterschläuche durch eine größere Regenerierungswirkung im Vergleich zur Blähschlauchregenerierung.

- Die Blähschlauchregenerierung ist im Vergleich zur Druckluftimpulsregenerierung auch noch bei größeren Druckverlusten wirksam. Mit der Blähschlauchregenerierung konnten in den Versuchen Druckverluste bis 1600 Pa, mit der Druckluftimpulsregenerierung bis 1200 Pa realisiert werden.

- Der zeitliche Ablauf des Füll- und Entspannungsvorganges am Blähschlauch bestimmt wesentlich dessen Regenerierungswirkung.

In Abb. 3.26 ist die Filtrationsleistung P_F in Abhängigkeit von der Umlaufzeit der Druckluftimpulse für die Standardbedingungen, die Filterflächenbelastung q = 105 $m^3m^{-2}h^{-1}$, den Versuchsstaub Mikro-Calcilin im Vergleich der beiden Regenerierungssysteme dargestellt. Die Druckluftimpulsregenerierung benötigte im Vergleich zur Blähschlauchregenerierung geringere Filtrationsleistungen infolge der geringeren Druckverluste durch eine größere Regenerierungswirkung.
Abb. 3.27 zeigt analog zu Abb. 3.26 wiederum den Vergleich für den Versuchsstaub Metallsinterstaub. Hierbei erreichte die Druckluftimpulsregenerierung ebenfalls geringere Filtrationsleistungen. Im Vergleich der beiden Stäube wurde bei Mikro-Calcilin eine geringere Filtrationsleistung benötigt. In den Abbildungen 3.28 bis 3.31 ist die Filtrationsleistung bei Standardbedingungen für den Versuchsstaub Mikro-Calcilin und die beiden Regenerierungssysteme in Abhängigkeit der folgenden Parameter dargestellt:

- Abb. 3.28 - Filterflächenbelastung,
- Abb. 3.29 - Rohluftstaubkonzentration,
- Abb. 3.30 - Regenerierungsdruck,
- Abb. 3.31 - Impulszeit.

Für die dargestellten Ergebnisse gilt wiederum die Filterflächenbelastung q = 120 $m^3m^{-2}h^{-1}$. Auch hier benötigte bei allen Versuchen die Druckluftimpulsregenerierung die geringe Filtrati-onsleistung gegenüber der Blähschlauchregenerierung. Für die Filtrationsleistung P_F gilt folgende Berechnungsgleichung:

$$P_F = \overline{\Delta p_{Fe}} \cdot V$$

$\overline{\Delta p_{FE}}$ - mittlerer Druckverlust der Filterschläuche

V - Luftdurchsatz des filternden Abscheiders

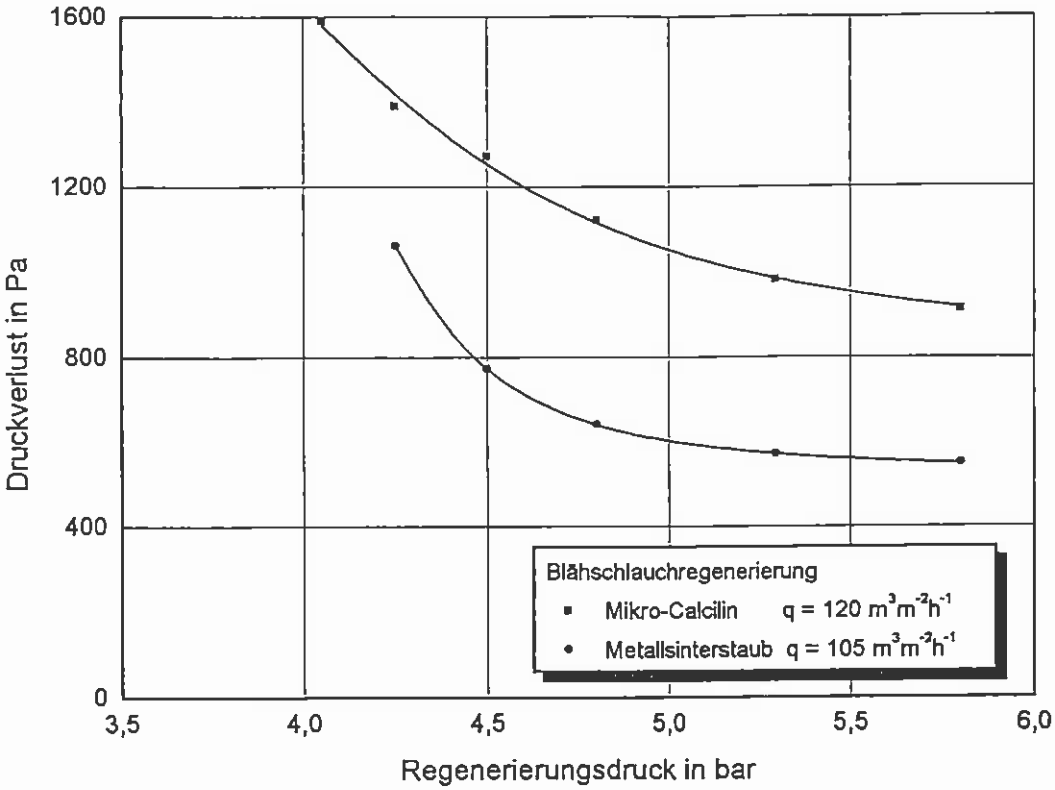


Abb. 3.24 Druckverlust der Filterschläuche in Abhängigkeit vom Regenerierngsdruck bei gleichem Druckluftverbrauch

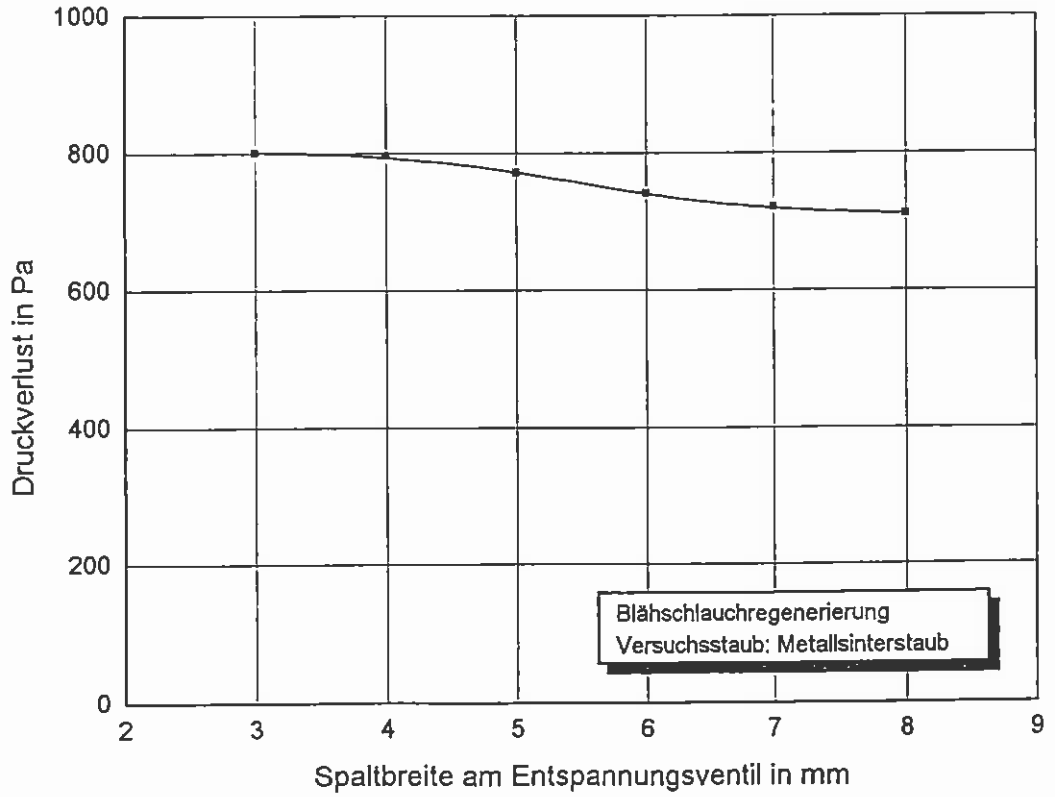


Abb. 3.25 Druckverlust der Filterschläuche in Abhängigkeit von der Spaltbreite am Entspannungsventil

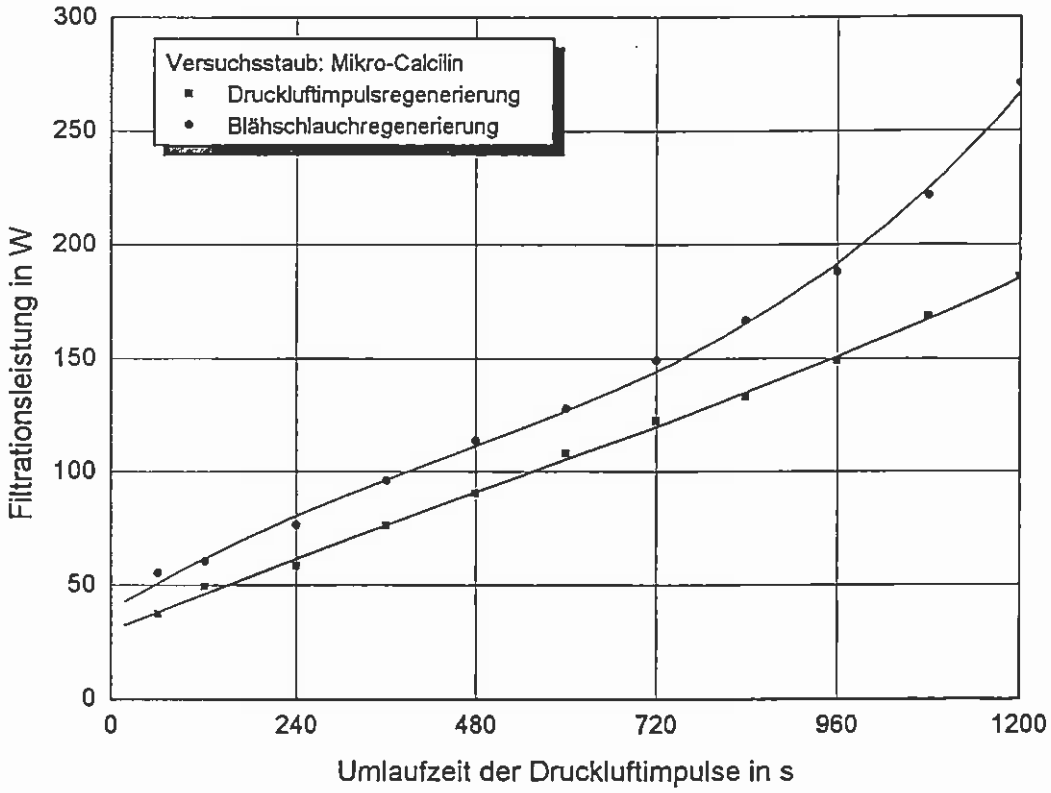


Abb. 3.26 Filtrationsleistung in Abhängigkeit von der Umlaufzeit für Mikro-Calcilin

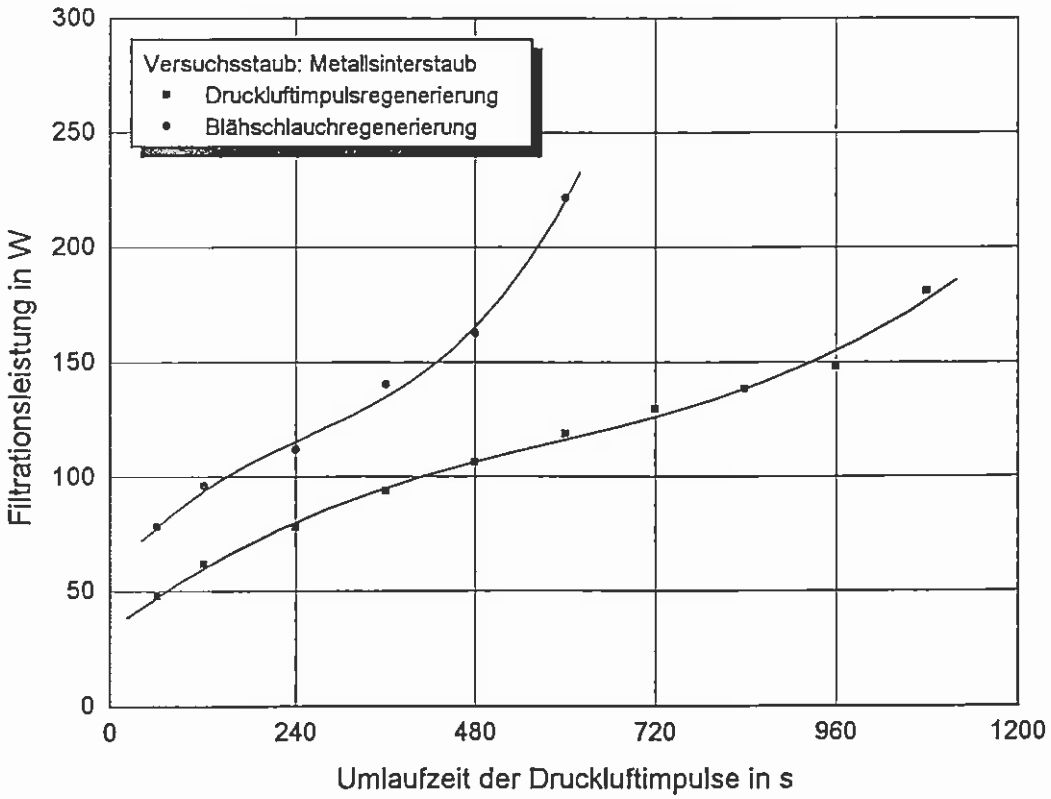


Abb. 3.27 Filtrationsleistung in Abhängigkeit von der Umlaufzeit für Metallsinterstaub

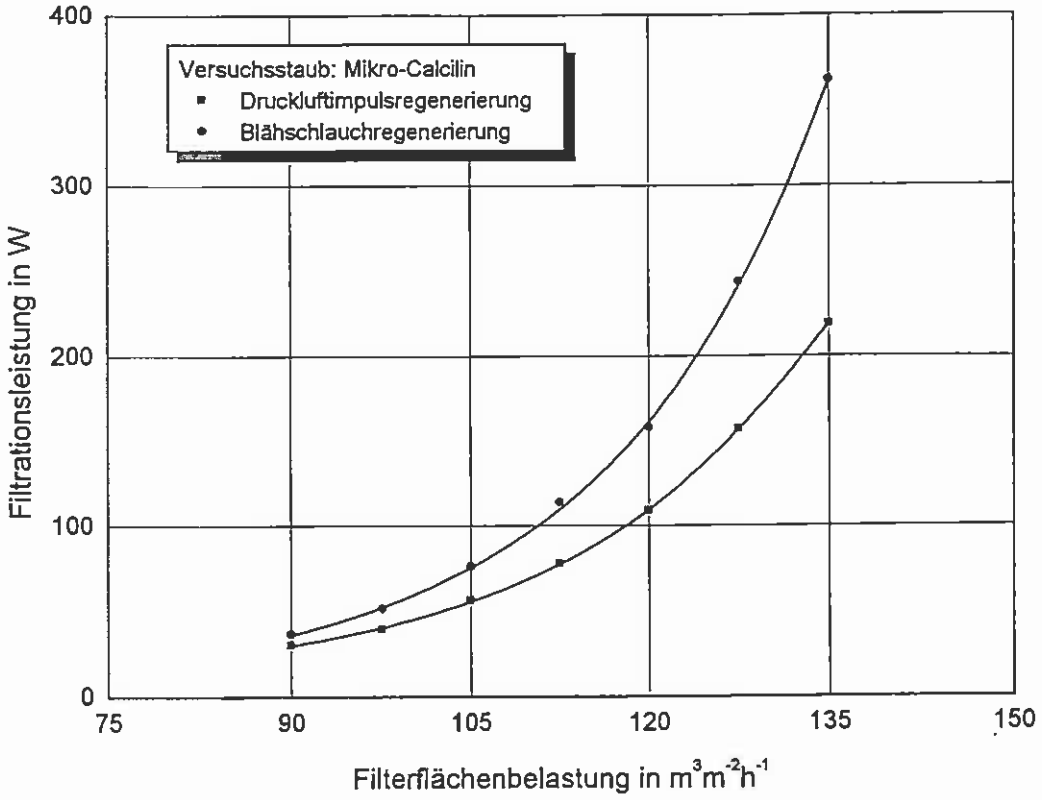


Abb. 3.28 Filtrationsleistung in Abhängigkeit von der Filterflächenbelastung für Mikro-Calcilin

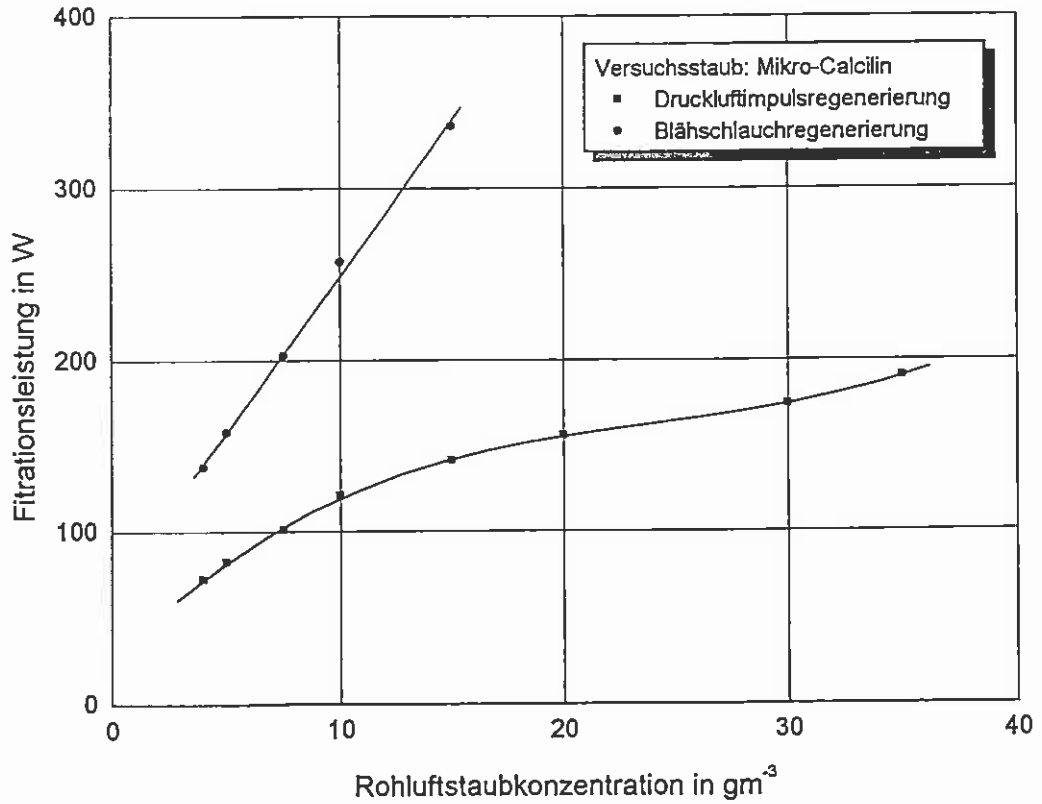


Abb. 3.29 Filtrationsleistung in Abhängigkeit von der Rohluftstaubkonzentration für Mikro-Calcilin

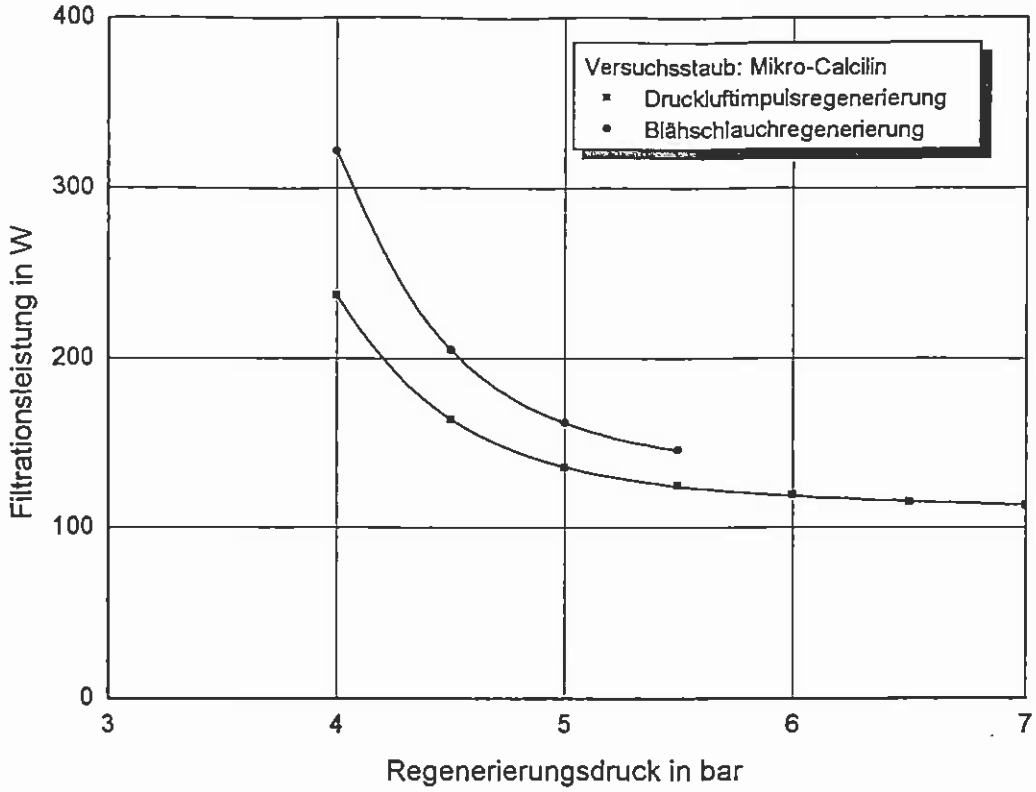


Abb. 3.30 Filtrationsleistung in Abhängigkeit vom Regenerierungsdruck für Mikro-Calcilin

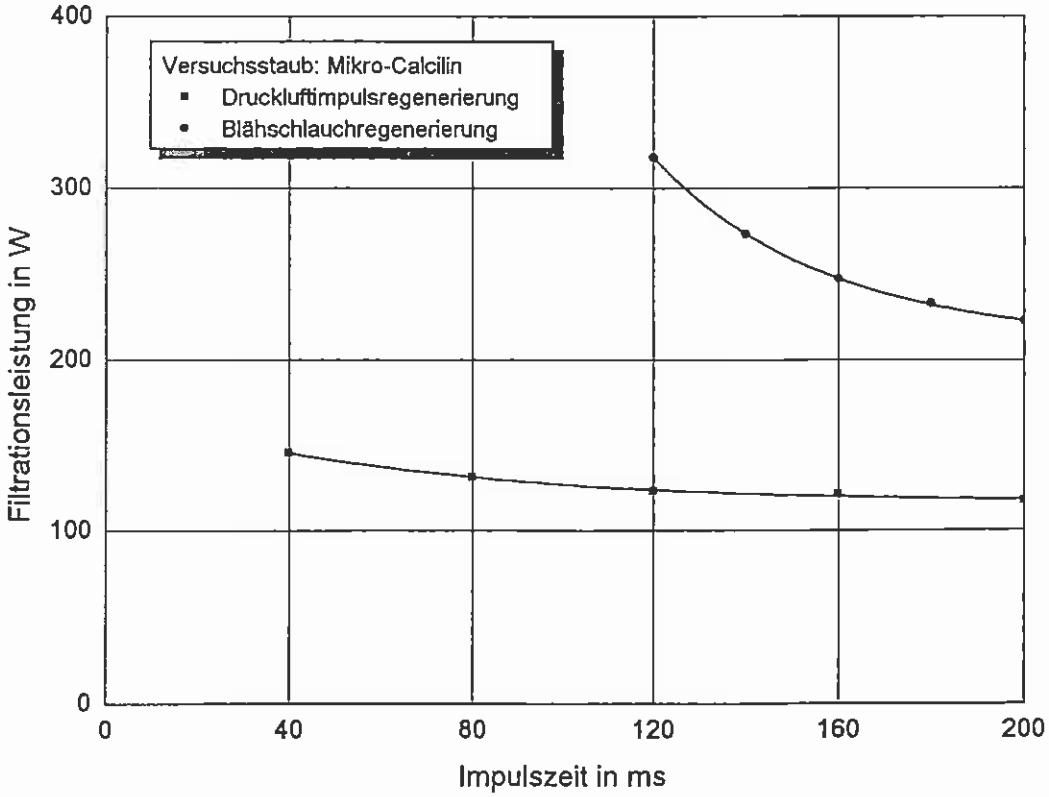


Abb. 3.31 Filtrationsleistung in Abhängigkeit von der Impulszeit für Mikro-Calcilin

Gesamtleistung und Abscheideverhalten

In Abb. 3.32 sind die Regenerierungs-, die Filtrations- und die Gesamtleistung des filternden Abscheiders in Abhängigkeit von der Umlaufzeit der Druckluftimpulse für die Druckluftimpulsregenerierung, den Versuchsstaub Mikro-Calcilin bei Standardbedingungen und einer Filterflächenbelastung von 105 $m^3m^{-2}h^{-1}$ dargestellt. Abb. 3.33 zeigt analog zu Abb. 3.32 diese Abhängigkeit für die Blähschlauchregenerierung. Die Gesamtleistung ergibt sich dabei aus der Summe der beiden Einzelleistungen. Es gilt:

- Gesamtleistung des filternden Abscheiders P_G
  $P_G = P_R + P_F$
  P_R - Regenerierungsleistung des filternden Abscheiders
  P_F - Filtrationsleistung des filternden Abscheiders

Es werden folgende Aussagen getroffen:

- Die Gesamtleistung besitzt bei beiden Regenerierungssystemen im untersuchten Arbeitsbereich der Umlaufzeit ein Minimum. Dieses liegt bei der Druckluftimpulsregenerierung bei etwa 480 s, bei der Blähschlauchregenerierung bei 600 s. Der Minimalwert der Gesamtleistung für diesen Einsatzfall betrug bei der Druckluftimpulsregenerierung etwa 142 W, für die Blähschlauchregenerierung 192 W.
- Über den gesamten Bereich der Umlaufzeit erzielte die Druckluftimpulsregenerierung im Vergleich zur Blähschlauchregenerierung das bessere Energieverhalten mit geringeren Werten für die Gesamtleistung. Ursache hierfür ist die geringere Filtrationsleistung bei geringerer Regenerierungsleistung. Der elastische Blähschlauch wirkt in der Regenerierungsphase als Dämpfungsglied zwischen Druckluftimpuls und Filterschlauch. Beim Aufblähen des Elastikschlauches geht ein Teil der Energie des Druckluftimpulses verloren. Die Gesamtleistung der filternden Abscheiders bei der Blähschlauchregenerierung lag bei den Untersuchungen 20 % bis 40 % über der Gesamtleistung bei der Druckluftimpulsregenerierung.
- Bei geringer Umlaufzeit der Druckluftimpulse stellt die Regenerierungsleistung einen größeren Anteil an der Gesamtleistung, bei großer Umlaufzeit die Filtrationsleistung. Bei sehr kleinen Umlaufzeiten steigt die Regenerierungsleistung stark an. Bei sehr großen Umlaufzeiten besteht die Gefahr eines instabilen Druckverlustverhaltens mit dem Zusammenbruch der Filtration durch eine ungenügende Regenerierungswirkung.

In Abb. 3.34 ist für Mikro-Calcilin die Gesamtleistung in Abhängigkeit von der Umlaufzeit und den Standardbedingungen (q = 105 $m^3m^{-2}h^{-1}$) für der beiden Regenerierungssysteme dargestellt. Abb. 3.35 bringt diesen Vergleich für den Metallsinterstaub. Die Abb. 3.36 und 3.37 zeigen die bezogene Gesamtleistung $P_G/P_{G,min}$ für die gleichen Untersuchungsfälle wie in den Abb. 3.34 und 3.35. Die minimale Gesamtleistung $P_{G,min}$ entsprach dabei jeweils dem Minimalwert der Gesamtleistung bei der Druckluftimpulsregenerierung und betrug 142 W für den Einsatzfall Mikro-Calcilin und 157 W für den Fall Metallsinterstaub. Die in den Abb. 3.34 bis 3.37 dargestellten Ergebnisse bestätigen die oben angeführten Aussagen zum Vergleich des Energieverhaltens von Druckluftimpuls- und Blähschlauchregenerierung. Für die Abscheidung des Metallsinterstaubes wird im Vergleich zu Mikro-Calcilin mehr Energie benötigt. Der Mehraufwand liegt bei rund 10 %.

In den Abb. 3.38 und 3.39 ist die Gesamtleistung in Abhängigkeit der Umlaufzeit für Mikro-Calcilin und Standardbedingungen bei 3 Filterflächenbelastungen q = 90 $m^3m^{-2}h^{-1}$; 105 $m^3m^{-2}h^{-1}$ und 120 $m^3m^{-2}h^{-1}$ für die Druckluft- bzw. Blähschlauchregenerierung dargestellt. Mit zunehmender Filterflächenbelastung wird der Anstieg der Gesamtleistung auf beiden Seiten des Minimums steiler. Die Flanken der Gesamtleistungskurven werden zusammengedrängt. Der mögliche Arbeitsbereich für die Umlaufzeit der Druckluftimpulse wird geringer und das Minimum der Gesamtleistung verschiebt sich zu geringeren Umlaufzeiten. Tab. 3.3 zeigt eine Zusammenstellung der Werte für die Leistungsminima der dargestellten Ergebnisse. Die optimale Umlaufzeit entspricht der Umlaufzeit am Energieminimum.

Regenerierungs-system	Filterflächen-belastung	Minimale Gesamtleistung	Optimale Umlaufzeit
	$m^3m^{-2}h^{-1}$	W	s
Druckluftimpuls-regenerierung	90	83	720
	105	142	480
	120	210	300
Blähschlauch-regenererierung	90	113	840
	105	192	600
	120	298	360

Tab. 3.3 Minimale Gesamtleistung und optimale Umlaufzeit für die Druckluftimpuls- und Blähschlauchregenerierung und den Versuchsstaub Mikro-Calcilin

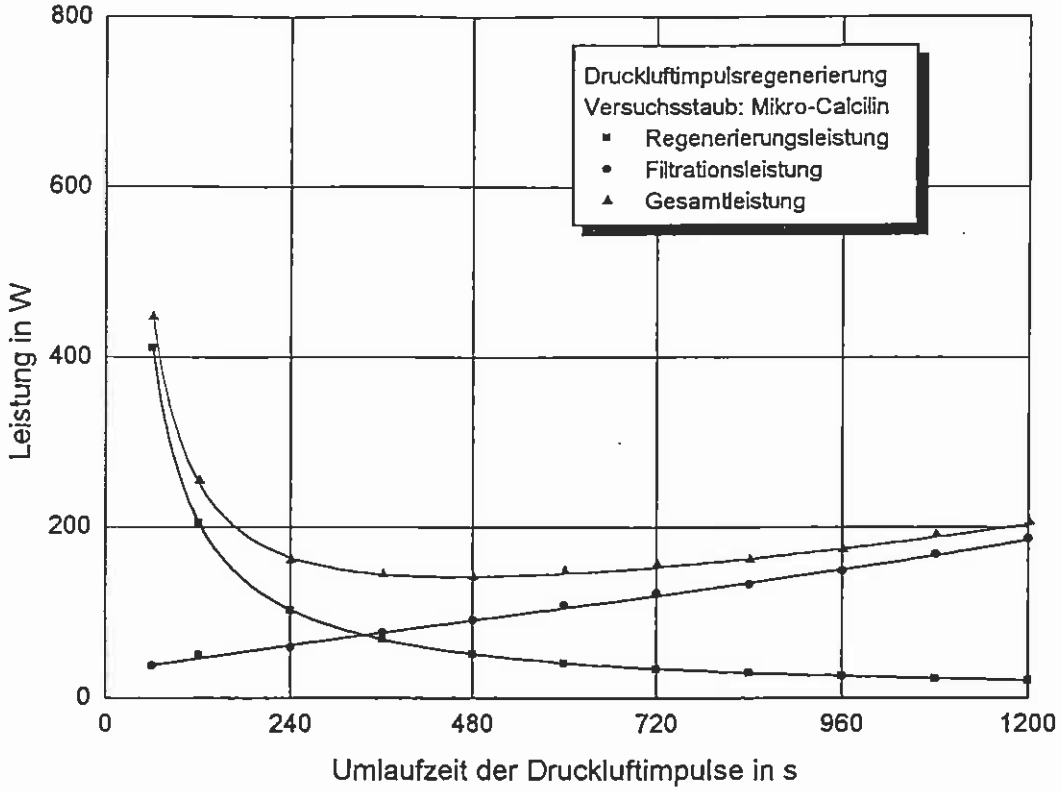


Abb. 3.32 Regenerierungs-, Filtrations-, und Gesamtleistung in Abhängigkeit von der Umlaufzeit für die Druckluftimpulsregenerierung und Mikro-Calcilin

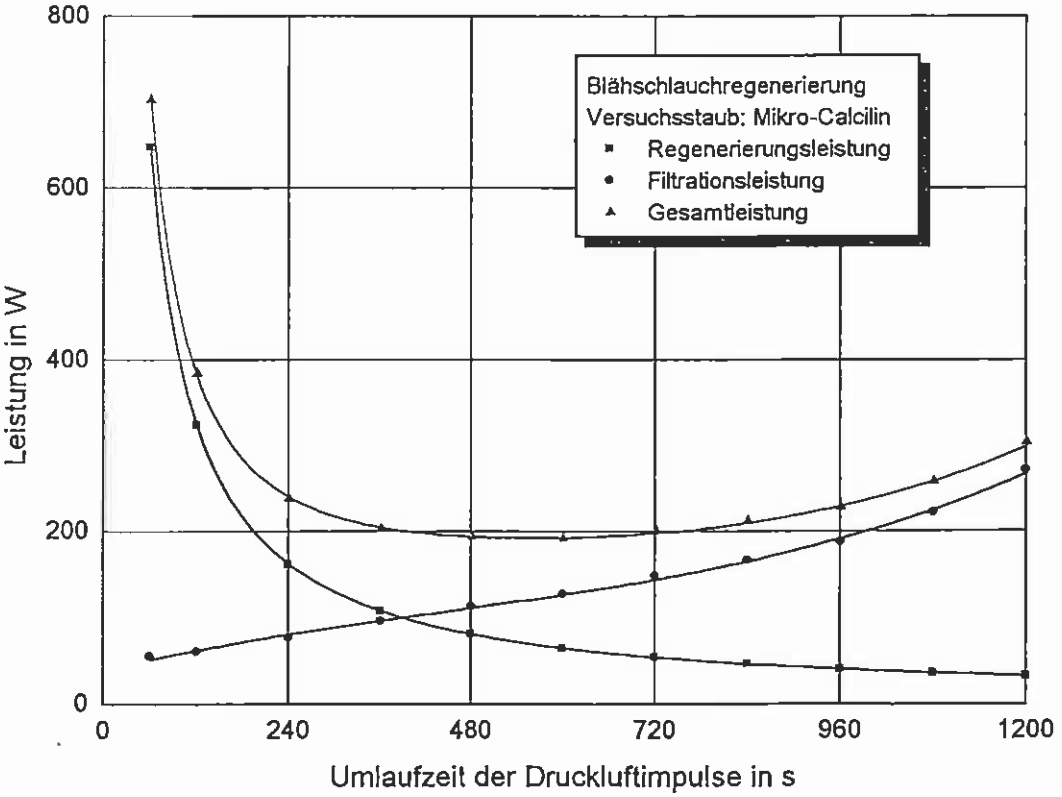


Abb. 3.33 Regenerierungs-, Filtrations-, und Gesamtleistung in Abhängigkeit von der Umlaufzeit für die Blähschlauchregenerierung und Mikro-Calcilin

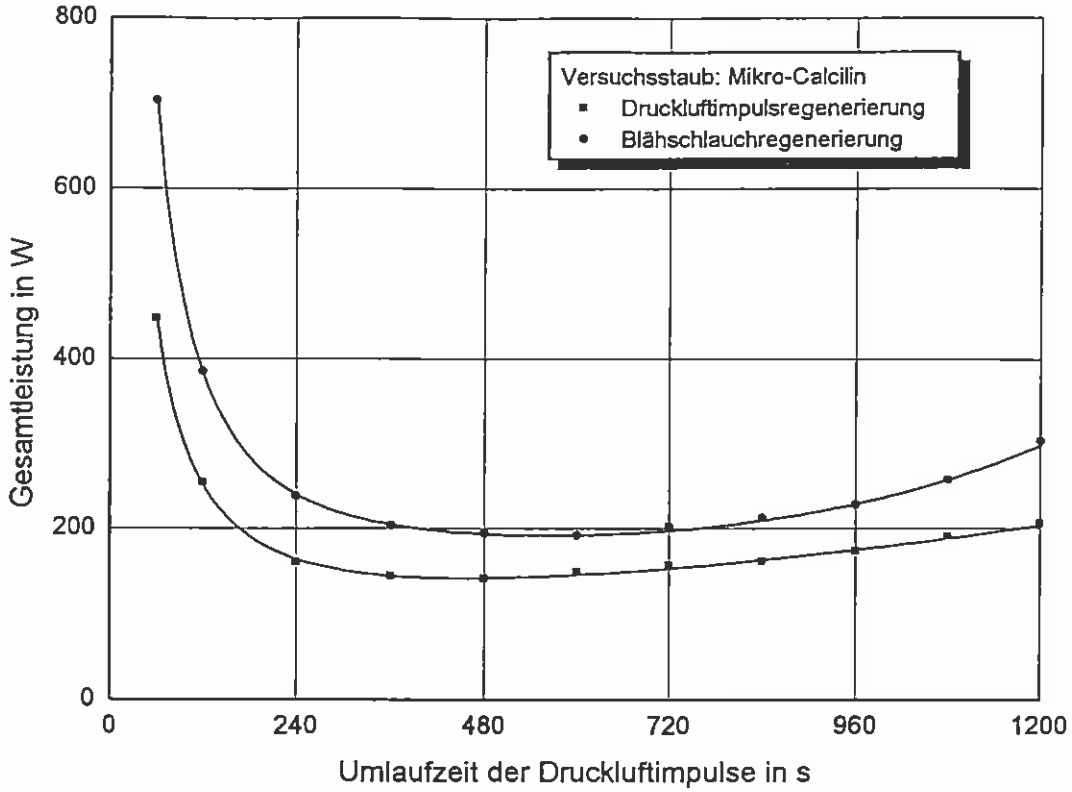


Abb. 3.34 Gesamtleistung in Abhängigkeit von der Umlaufzeit für Mikro-Calcilin

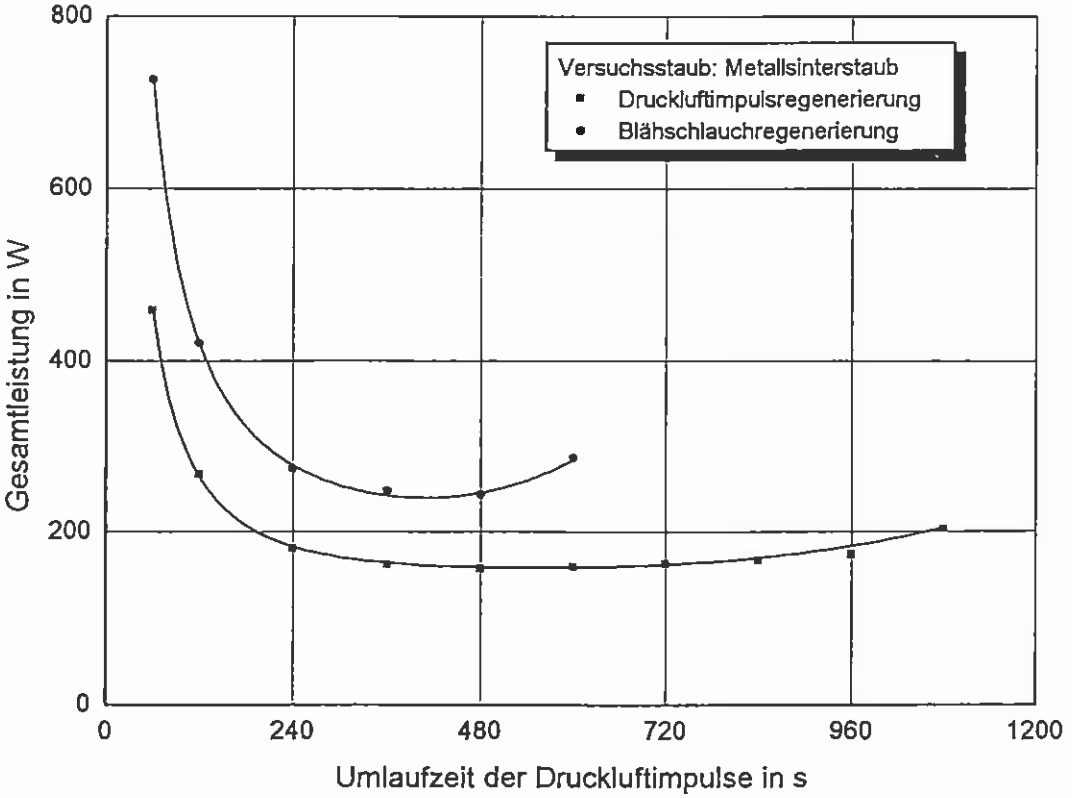


Abb. 3.35 Gesamtleistung in Abhängigkeit von der Umlaufzeit für Metallsinterstaub

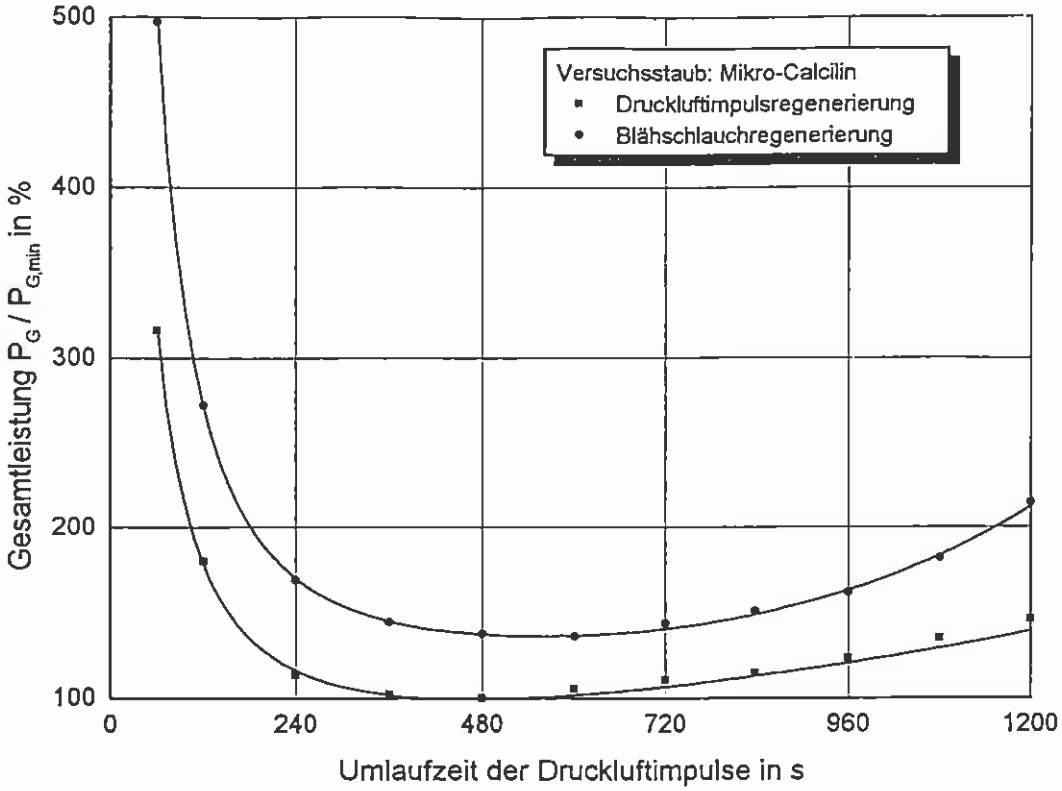


Abb. 3.36 Gesamtleistung P_G / $P_{G,min}$ in Abhängigkeit von der Umlaufzeit für Mikro-Calcilin

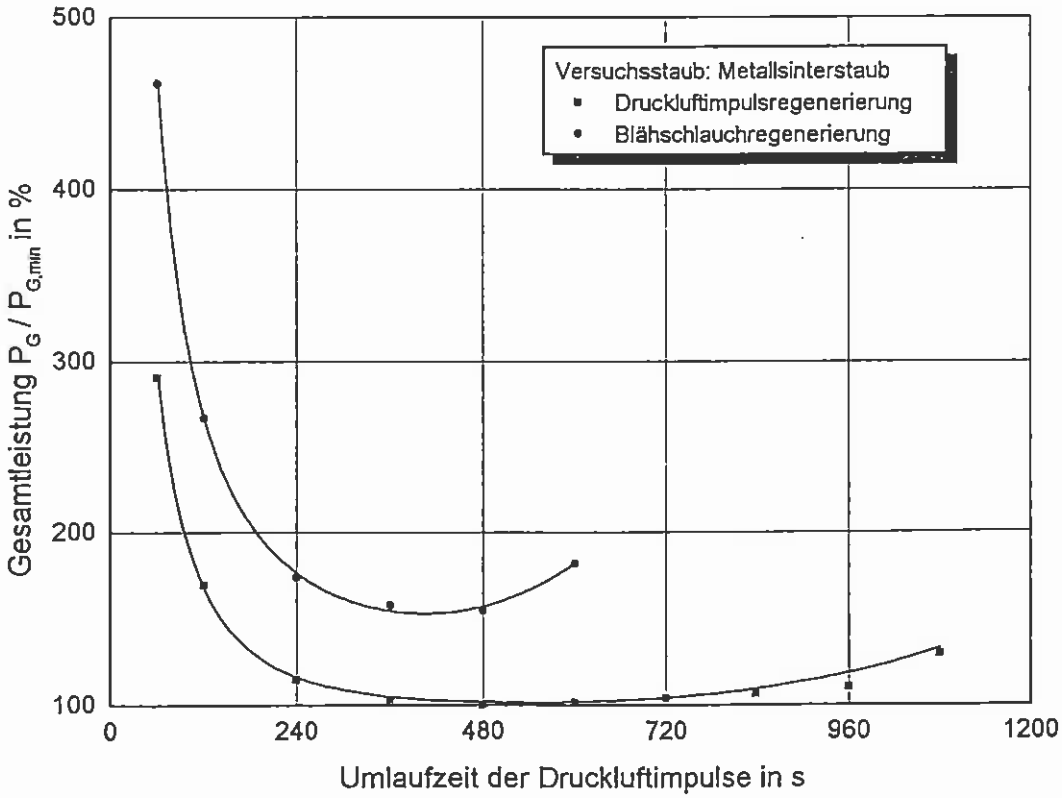


Abb. 3.37 Gesamtleistung P_G / $P_{G,min}$ in Abhängigkeit von der Umlaufzeit für Metallsinterstaub

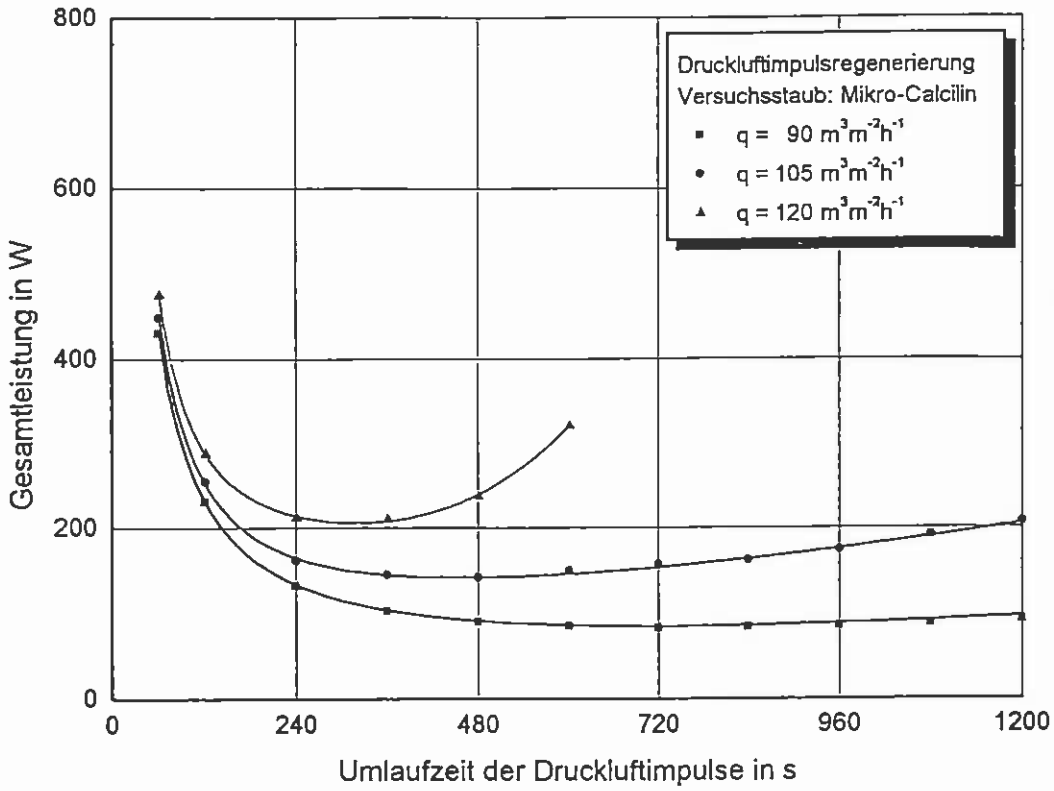


Abb. 3.38 Gesamtleistung in Abhängigkeit von der Umlaufzeit für die Druckluftimpulsregenerierung, Mikro-Calcilin und 3 Filterflächenbelastungen

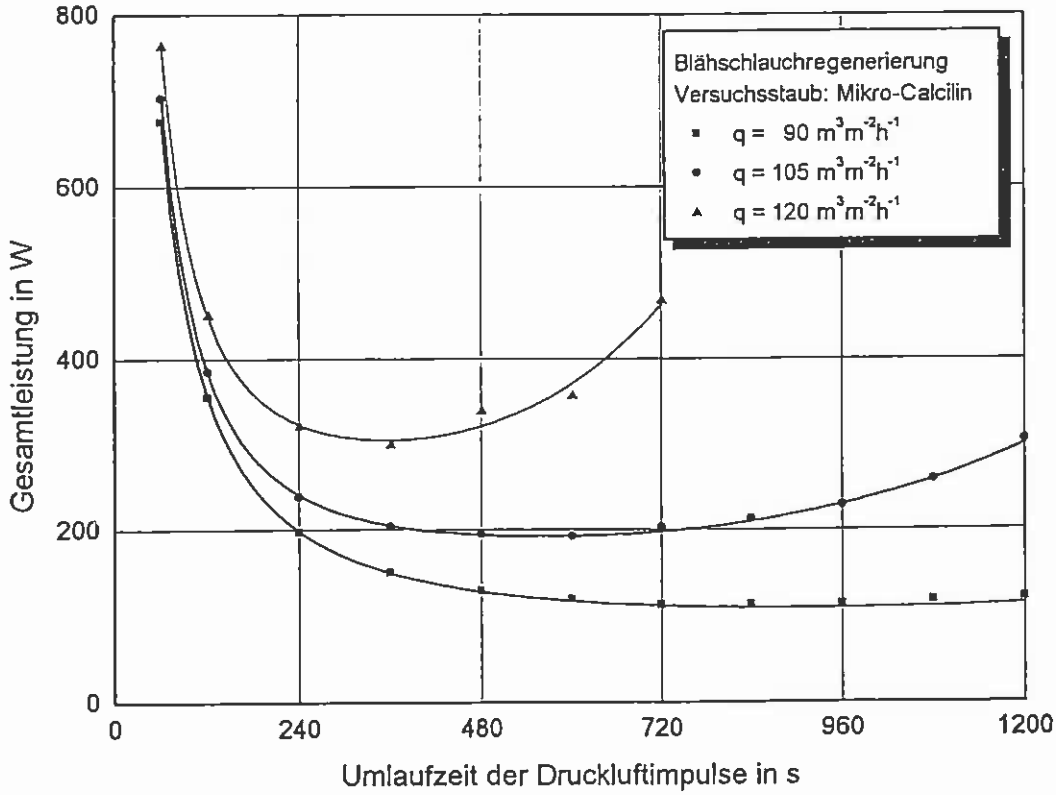


Abb. 3.39 Gesamtleistung in Abhängigkeit von der Umlaufzeit für die Blähschlauchregenerierung, Mikro-Calcilin und 3 Filterflächenbelastungen

Abb. 3.40 zeigt die Gesamtleistung in Abhängigkeit vom Regenerierungsdruck (Überdruck) für Mikro-Calcilin und Standardbedingungen (q = 120 $m^3m^{-2}h^{-1}$) im Vergleich der beiden Regenerierungssysteme. Für beide Systeme ergab sich ein Leistungsminimum bei einem Regenerierungsdruck von 5 bar.

In Abb. 3.41 ist die Gesamtleistung in Abhängigkeit von der Impulszeit für Mikro-Calcilin und Standardbedingungen (q = 120 $m^3m^{-2}h^{-1}$) für die Druckluftimpuls- und die Blähschlauchregenerierung dargestellt. Die Impulszeit und der Regenerierungsdruck besitzen im Vergleich zur Umlaufzeit für beide Regenerierungssysteme einen geringeren Einfluß auf das Energieverhalten. Für die Blähschlauchregenerierung besteht bei kleinen Impulszeiten und damit kleinen Druckluftverbräuchen pro Impuls die Gefahr eines geringen Aufblähens des Elastikschlauches, verbunden mit einer geringen Regenerierungswirkung und bei großen Regenerierungsdrücken die Gefahr der Zerstörung des Blähschlauches.

In Abb. 3.42 ist die maximale Reinluftstaubkonzentration in Abhängigkeit von der Umlaufzeit für Mikro-Calcilin und Standardbedingungen (q = 105 $m^3m^{-2}h^{-1}$) im Vergleich der beiden Regenerierungssysteme dargestellt. Abb. 3.43 bringt diesen Vergleich für die mittlere Reinluftstaubkonzentration. Die Abb. 3.44 und 3.45 zeigen analog zu den Abb. 3.42 bzw. 3.43 den Vergleich für den Metallsinterstaub. In Abb. 3.46 ist die mittlere Reinluftstaubkonzentration in Abhängigkeit von der Umlaufzeit für Mikro-Calcilin, die Standardbedingungen und 3 Filterflächenbelastungen q = 90 $m^3m^{-2}h^{-1}$; 105 $m^3m^{-2}h^{-1}$ und 120 $m^3m^{-2}h^{-1}$ im Vergleich der Druckluftimpuls- und Blähschlauchregenerierung aufgetragen. Bei kleinen Umlaufzeiten erzielten die Filterschläuche bei der Blähschlauchregenerierung eine bessere Abscheideleistung mit geringeren maximalen und mittleren Reinluftstaubkonzentrationen gegenüber der Druckluftimpulsregenerierung. Mit steigender Umlaufzeit nähern sich die Verläufe der Reinluftstaubkonzentration von beiden Regenerierungssystemen immer mehr an. Diese Annäherung ist bei Mikro-Calcilin wesentlich ausgeprägter im Vergleich zum Metallsinterstaub. Die Druckluftimpulsregenerierung zeigte eine größere Abhängigkeit der Reinluftstaubkonzentration von der Filterflächenbelastung gegenüber der Blähschlauchregenerierung. Besonders bei der kleinen Filterflächenbelastung q = 90 $m^3m^{-2}h^{-1}$ wurden größere mittlere Reinluftstaubkonzentrationen bei der Druckluftimpulsregenerierung gemessen. Die Versuchsstäube Mikro-Calcilin und Metallsinterstaub erzielten ein etwa gleiches Abscheideverhalten am Filterschlauch mit ähnlichen Verläufen der Reinluftstaubkonzentration. Die Polyesternadelvliesschläuche wiesen insgesamt ein gutes Abscheideverhalten auf. In der Regel lagen die mittleren Reinluftstaubkonzentrationen für beide Versuchsstäube und beide Regenerierungssysteme unter 1 mgm^{-3}, bei großen Umlaufzeiten sogar unter 0,1 mgm^{-3}. Die Abscheideleistung war am schlechtesten bei sehr kleinen Umlaufzeiten.

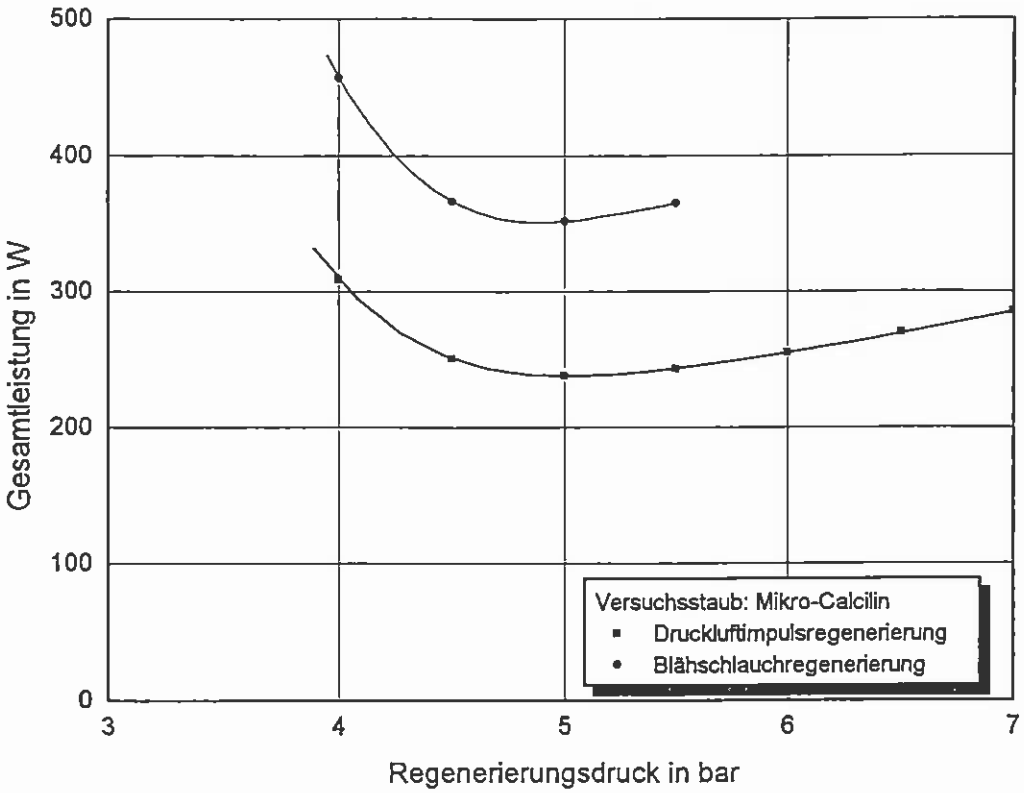


Abb. 3.40 Gesamtleistung in Abhängigkeit vom Regenerierungsdruck für Mikro-Calcilin

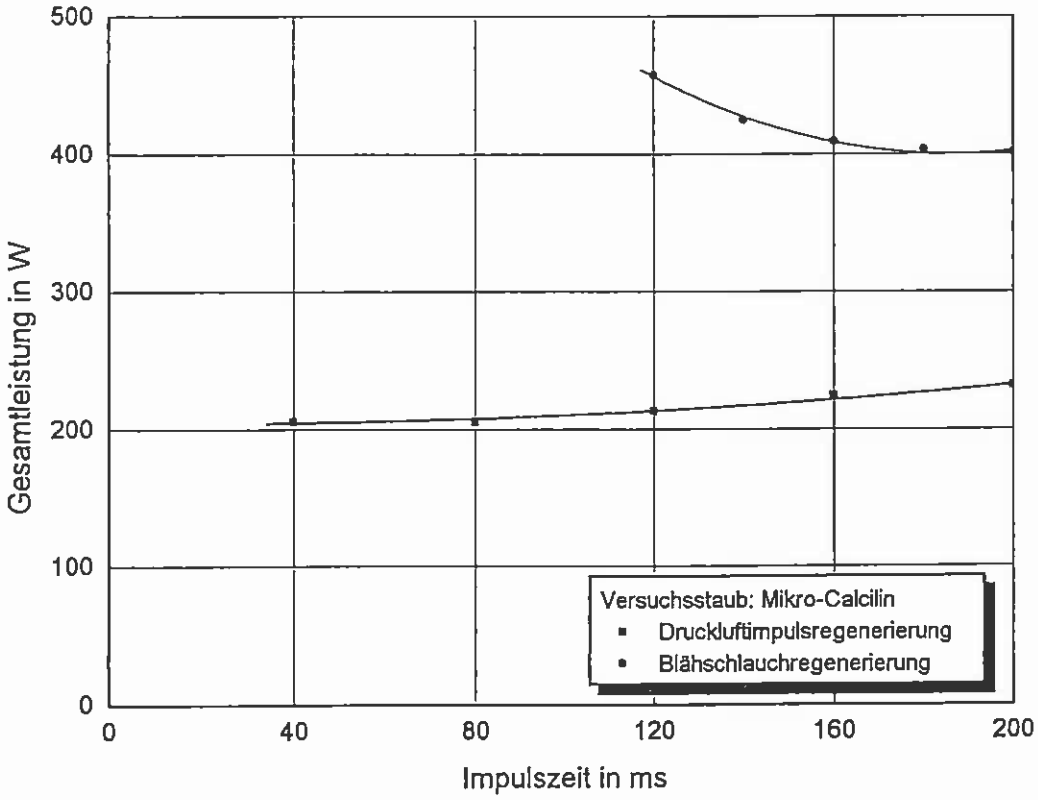


Abb. 3.41 Gesamtleistung in Abhängigkeit von der Impulszeit für Mikro-Calcilin

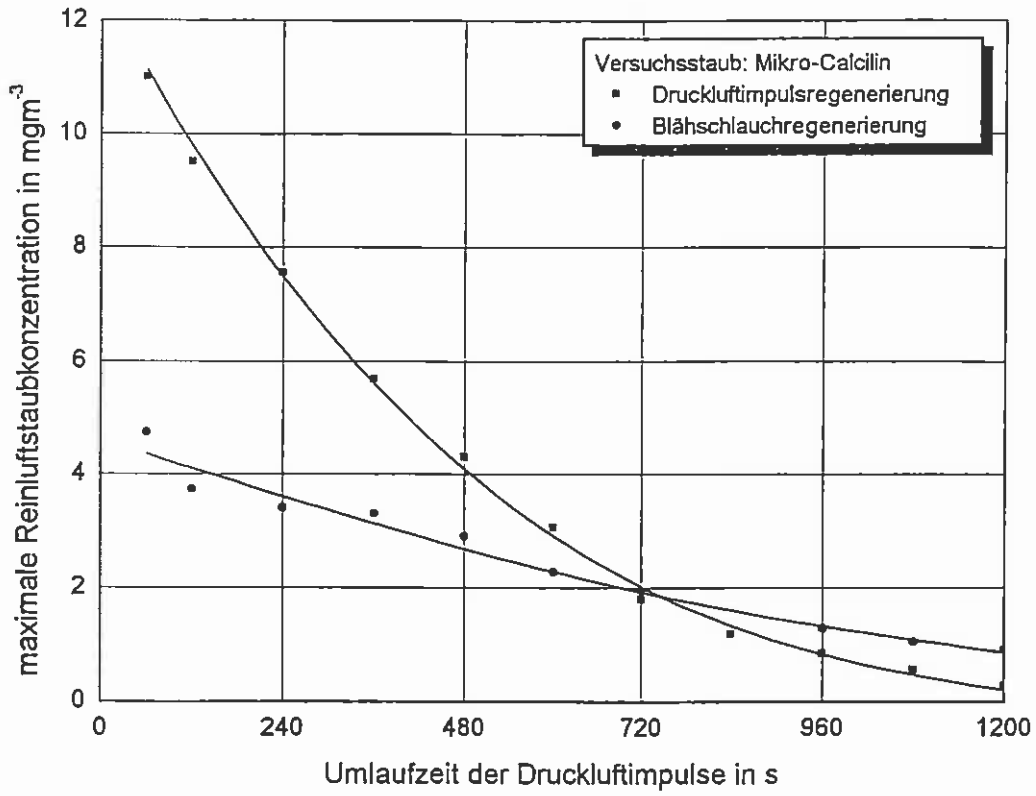


Abb. 3.42 maximale Reinluftstaubkonzentration in Abhängigkeit von der Umlaufzeit für Mikro-Calcilin

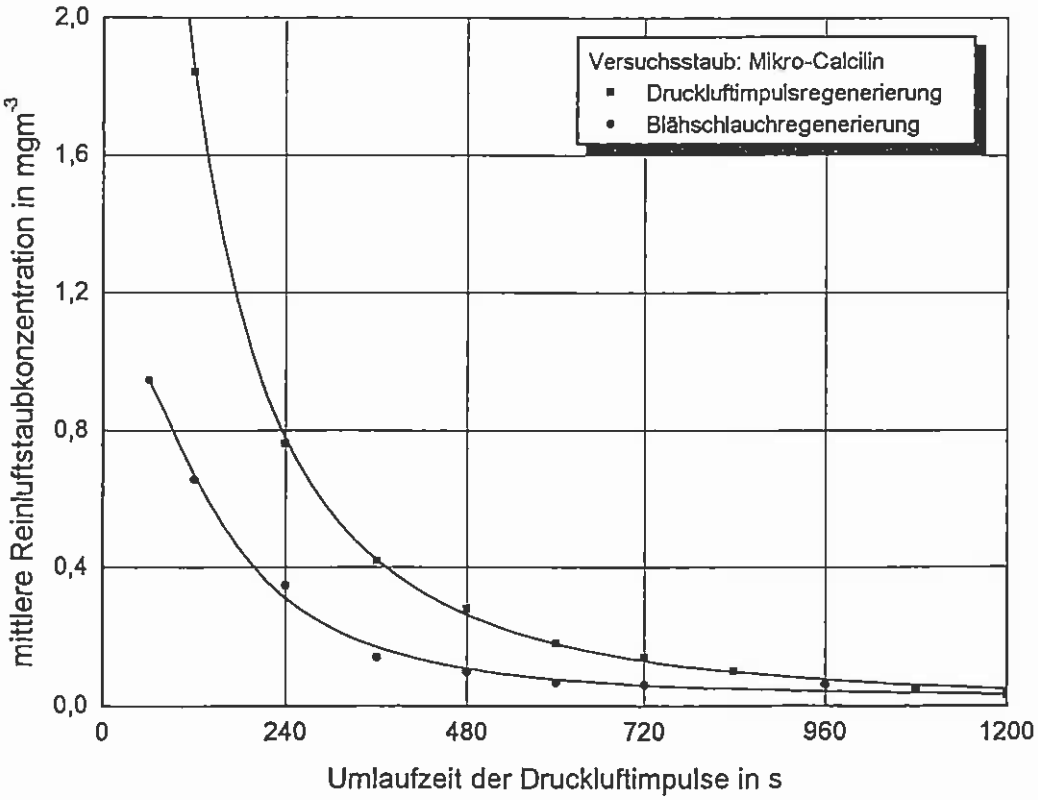


Abb. 3.43 mittlere Reinluftstaubkonzentration in Abhängigkeit von der Umlaufzeit für Mikro-Calcilin

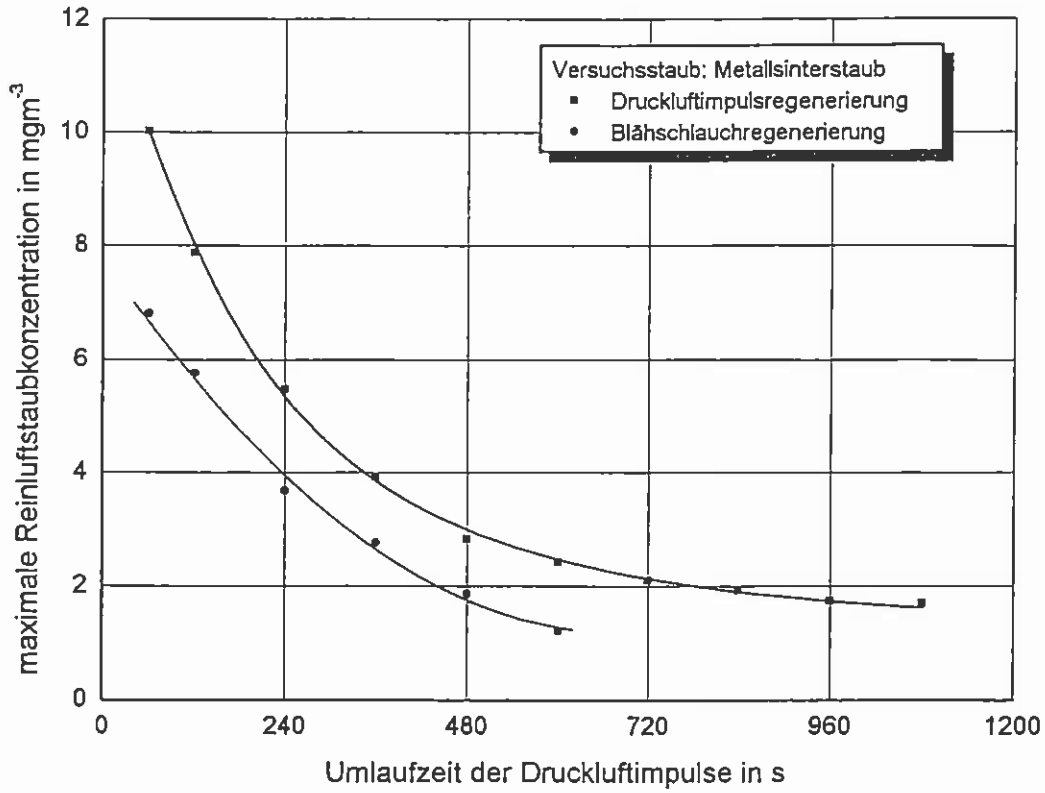


Abb. 3.44 maximale Reinluftstaubkonzentration in Abhängigkeit von der Umlaufzeit für Metallsinterstaub

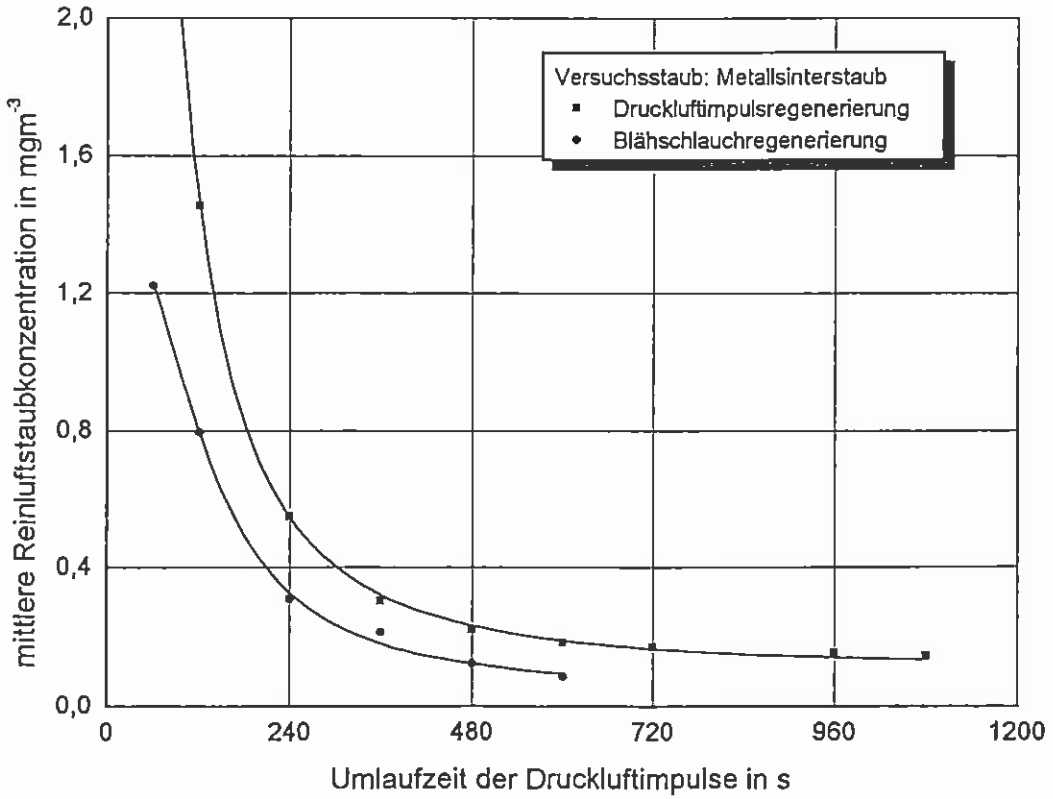


Abb. 3.45 mittlere Reinluftstaubkonzentration in Abhängigkeit von der Umlaufzeit für Metallsinterstaub

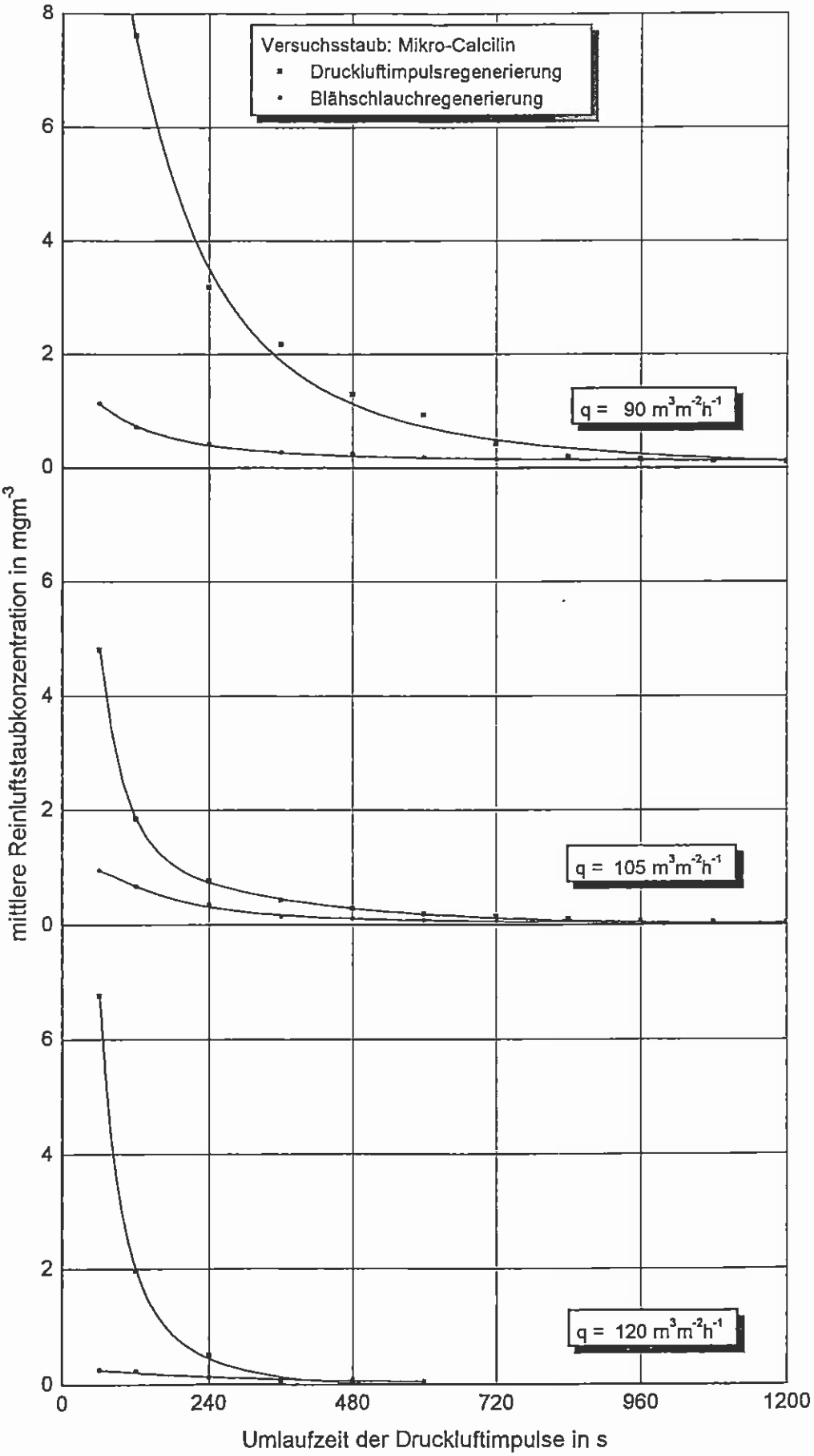


Abb. 3.46 mittlere Reinluftstaubkonzentration in Abhängigkeit von der Umlaufzeit für 3 Filterflächenbelastungen q und Mikro-Calcilin

In den Abb. 3.47 bis 3.50 sind die Gesamtleistung und die Reinluftstaubkonzentration in Abhängigkeit von der Umlaufzeit bei Standardbedingungen ($q = 105\ m^3m^{-2}h^{-1}$) jeweils für die beiden Regenerierungssysteme und Versuchsstäube aufgetragen. In Tab. 3.4 werden für die optimalen Betriebspunkte bei minimaler Gesamtleistung der in den Abb. 3.47 bis 3.50 dargestellten Einsatzfälle die wichtigsten Kenndaten des filternden Abscheiders aufgelistet. Diese Ergebnisse bestätigen die folgenden zusammenfassenden Aussagen zum Energie- und Abscheideverhalten:

- Die Druckluftimpulsregenerierung erzielte im Vergleich zur Blähschlauchregenerierung ein besseres Energieverhalten mit geringeren Gesamtleistungen.
- Bei der Blähschlauchregenerierung wiesen die Filterschläuche ein besseres Abscheideverhalten mit geringeren Reinluftstaubkonzentrationen auf.
- Die Filterschläuche aus Polyesternadelvlies erzielten mit beiden Regenerierungssystemen für die sehr feinen Versuchsstäube Mikro-Calcilin und Metallsinterstaub eine sehr gute Abscheideleistung. Im optimalen Betriebspunkt bei minimaler Gesamtleistung lagen die Werte der maximalen Reinluftstaubkonzentrationen (Staubspitzen) unter $5\ mgm^{-3}$. Ein häufiges Regenerieren mit sehr kleinen Umlaufzeiten der Druckluftimpulse führte bei der Druckluftimpulsregenerierung zu einem wesentlich größeren Anstieg der Reinluftstaubkonzentration im Vergleich zur Blähschlauchregenerierung.
- Ein Arbeitspunkt des filternden Abscheiders mit Umlaufzeiten der Druckluftimpulse wesentlich kleiner als die optimale Umlaufzeit ist aus ökonomischen und filtertechnischen Aspekten zu vermeiden. In diesen Fällen steigen der Energieverbrauch und die Reinluftstaubkonzentration durch ein zu häufiges Regenerieren der Filterschläuche stark an und das Filtermaterial selbst wird stark beansprucht.

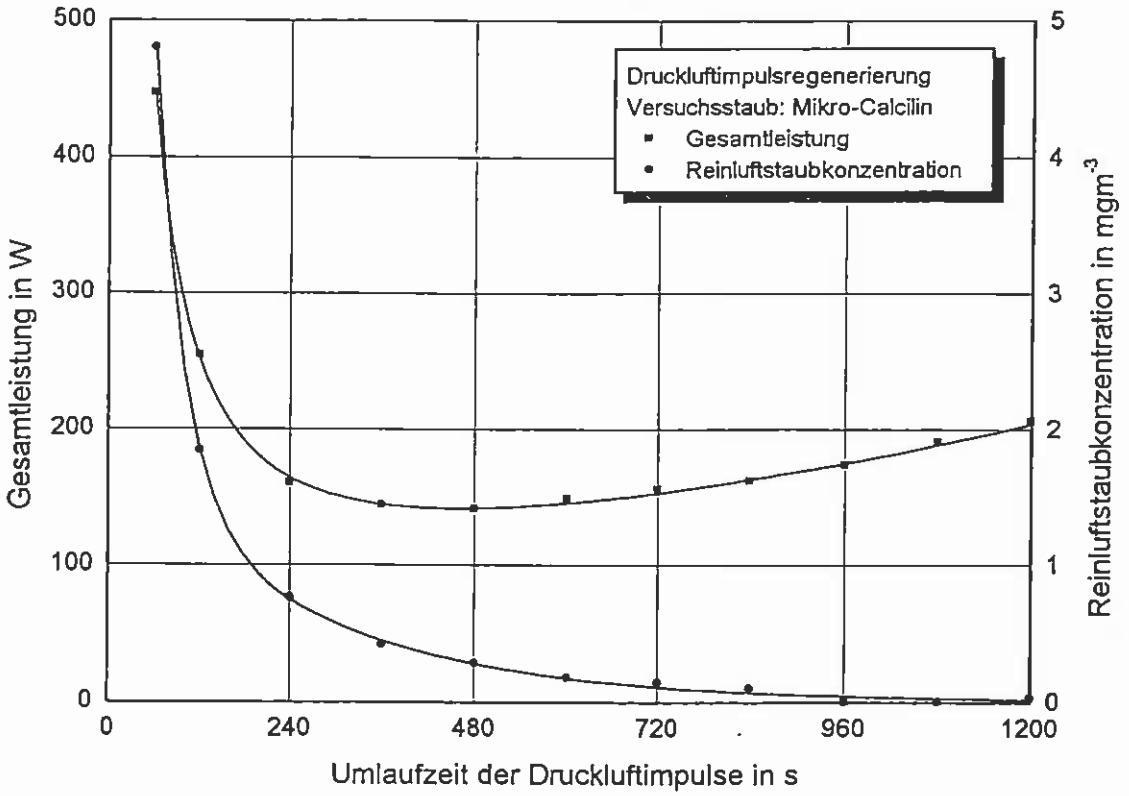


Abb. 3.47 Gesamtleistung und Reinluftstaubkonzentration in Abhängigkeit von der Umlaufzeit für die Druckluftimpulsregenerierung und Mikro-Calcilin

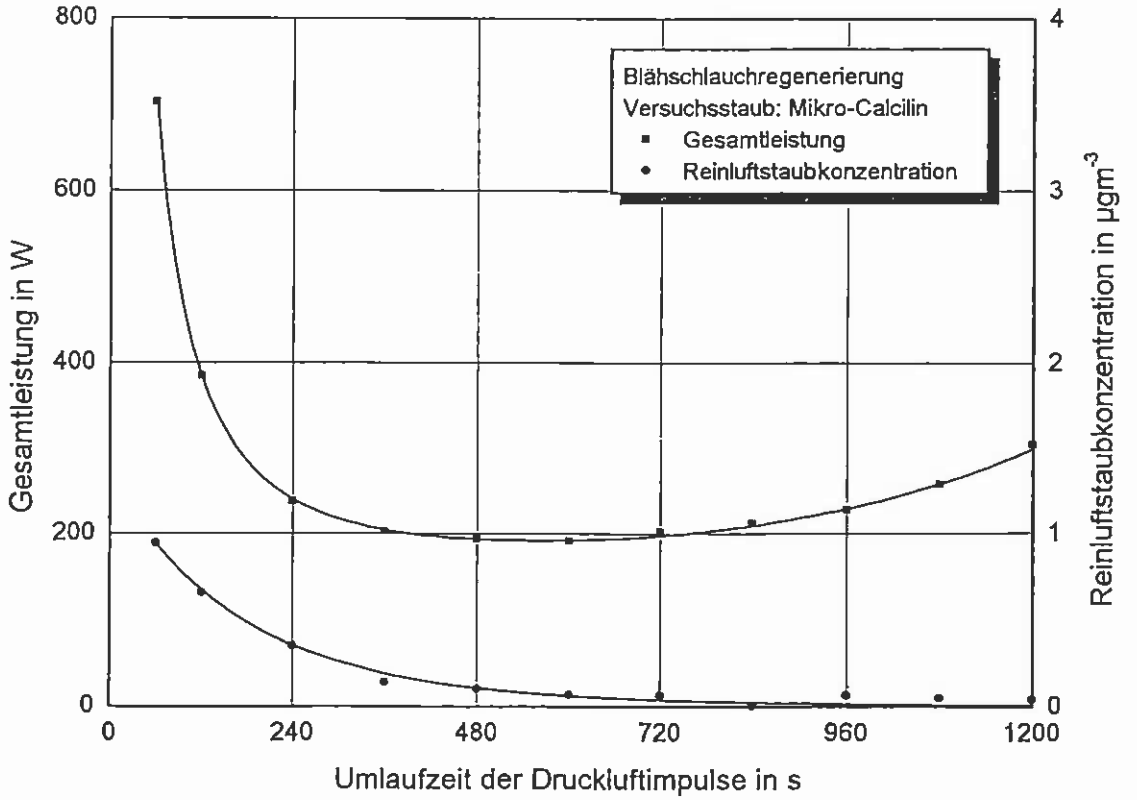


Abb. 3.48 Gesamtleistung und Reinluftstaubkonzentration in Abhängigkeit von der Umlaufzeit für die Blähschlauchregenerierung und Mikro-Calcilin

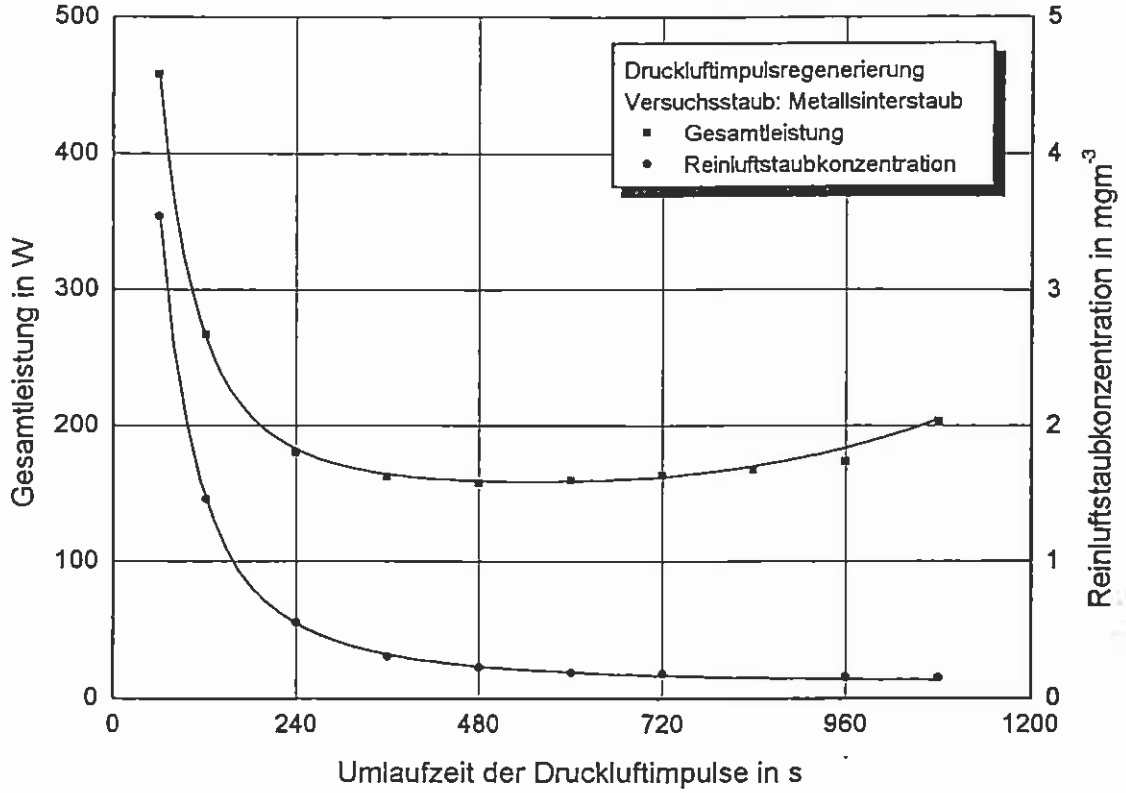


Abb. 3.49 Gesamtleistung und Reinluftstaubkonzentration in Abhängigkeit von der Umlaufzeit für die Druckluftimpulsregenerierung und Metallsinterstaub

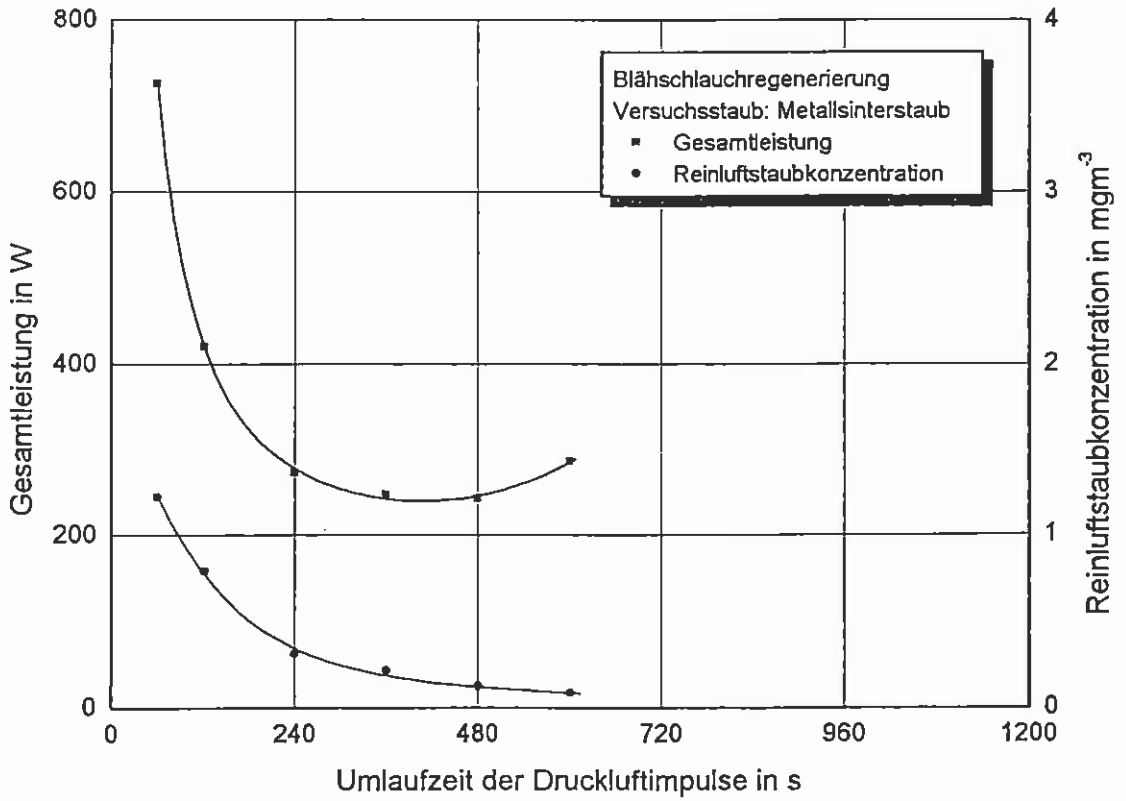


Abb. 3.50 Gesamtleistung und Reinluftstaubkonzentration in Abhängigkeit von der Umlaufzeit für die Blähschlauchregenerierung und Metallsinterstaub

Regenerierungssystem	Staubart	Optimale Umlaufzeit	Mittlerer Druckverlust	Regenerierungsleistung	Filtrationsleistung	minimale Gesamtleistung	max. Reinluftstaubkonzentration	mittlere Reinluftstaubkonzentration
		s	Pa	W	W	W	mgm^{-3}	mgm^{-3}
Druckluftimpuls-Regenerierung	Mikro-Calcilin	480	510	51	90	142	4,3	0,28
	Metallsinterstaub	480	600	51	106	157	2,8	0,22
Blähschlauch-Regenerierung	Mikro-Cacilin	600	720	65	127	192	2,9	0,10
	Metallsinterstaub	480	900	81	159	240	1,9	0,12

Tab. 3.4 Kenndaten des filternden Abscheiders im optimalen Betriebspunkt bei minimaler Gesamtleistung für 4 Einsatzfälle und Standardbedingungen ($q = 105\ m^3m^{-2}h^{-1}$)

Vergleich der Druckluftimpuls- und Blähschlauchregenerierung, Ergebnisse der Technikumsversuche

Die Druckluftimpulsregenerierung ist ein Regenerierungssystem für die Filterelemente des filternden Abscheiders, das sich in der Praxis vielfach bewährt hat und einen abgeschlossenen Entwicklungsstand mit einer gewissen technischen Reife aufweist. Über einen längeren Entwicklungszeitraum konnte die Geräte- und Verfahrenstechnik der Druckluftimpulsregenerierung immer besser an die Filtersysteme des filternden Abscheiders angepaßt werden. Die Blähschlauchregenerierung ist neu und speziell für Filterschläuche entwickeltes Regenerierungssystem, das sich in einem Anfangsstadium der Entwicklung befindet und in der Praxis noch keine Anwendung gefunden hat. Die in diesem Forschungsvorhaben im direkten Vergleich zur Druckluftimpulsregenerierung durchgeführten Untersuchungen unter Technikumsbedingungen stellen erste größere grundlegende verfahrenstechnische Untersuchungen zur Blähschlauchregenerierung dar. Aus diesen Untersuchungen werden für das neu entwickelte Regenerierungssystem der Blähschlauchregenerierung folgende verfahrenstechnische Aussagen getroffen:

- Eine Regenerierung von Filterschläuchen mit der Blähschlauchregenerierung ist prinzipiell und mit guten filter- und regenerierungstechnischen Ergebnissen möglich. Die Blähschlauchregenerierung bewirkte eine erfolgreiche Abreinigung des Staubes mit einem guten Druckverlust- und einem sehr guten Abscheideverhalten der Filterschläuche.

- Im Vergleich zur Druckluftimpulsregenerierung zeigte die Blähschlauchregenerierung ein etwas schlechteres Energieverhalten mit einer höheren Gesamtleistung für Filtration und Regenerierung. Die Druckluftimpulsregenerierung erzielte mit einem geringeren Druckluftverbrauch und damit einer geringeren Regenerierungsleistung einen geringeren Druckverlust der Filterschläuche und damit eine geringere Filtrationsleistung. Ursache für das schlechtere Energieverhalten ist die gewollte dämpfende Wirkung des Blähschlauches auf den Druckluftimpuls Bei den Technikumsuntersuchungen lag der Mehrverbrauch an Leistung für die Blähschlauchregenerierung zwischen 20 % und 40 %.

- Die Filterschläuche erzielten mit der Blähschlauchregenerierung ein besseres Abscheideverhalten mit geringeren Reinluftstaubkonzentrationen im Vergleich mit der Druckluftimpulsregenerierung. Eine Verringerung ergab sich dabei bei den maximalen Konzentrationswerten der Staubspitzen und bei der mittleren Reinluftstaubkonzentration.

- Ein Nachteil der Blähschlauchregenerierung ergab sich bei den Technikumsuntersuchungen durch die Zerstörung einzelner Blähschläuche bei hohen Regenerierungsdrücken. Regenerierungsdrücke größer 6 bar bewirkten eine schnelle Zerstörung der Blähschläuche. Zu kleine Druckluftverbräuche führten dagegen zu einer Wirkungslosigkeit der Blähschlauchregenerierung. Mit Regenerierungsdrücken kleiner 4 bar konnte keine ausreichende Abreinigungswirkung erreicht werden. Für einen effektiven Einsatz der Blähschlauchregenerierung sind für jeden Einsatzfall mit anderen Abmessungen der Filterschläuche und damit auch der Blähschläuche die regenerierungstechnischen Parameter Regenerierungsdruck, Impulszeit und engster Querschnitt im Regenerierungssystem und damit der Druckluftverbrauch pro Impuls und Blähschlauch genau abzustimmen.

- In den Untersuchungen wurden die filtertechnischen Einsatzgrenzen für die Blähschlauchregenerierung ermittelt und eine Abstimmung der regenerierungstechnischen Parameter der Blähschlauchregenerierung auf den speziellen Einsatzfall vorgenommen. Im Vergleich zu einer Druckluftimpulsregenerierung wurde unter definierten und reproduzierbaren Bedingungen die Effektivität der Blähschlauchregenerierung hinsichtlich des Energie- und Abscheideverhaltens bestimmt. Für einen späteren effektiven Einsatz der Blähschlauchregenerierung in der Praxis sind jedoch weitere gezielte verfahrenstechnische Untersuchungen sinnvoll und notwendig.

- Bei weiteren grundlegenden verfahrenstechnischen Untersuchungen sollten folgende Aspekte berücksichtigt werden:

  - Einsatz anderer elastischer Materialien für den Blähschlauch mit dem Ziel einer größeren Elastizität und Haltbarkeit,
  - Abstimmung der Filterschlauch-, Stützkorb- und Blähschlauchabmessungen mit dem Ziel einer optimierten, aufeinander abgestimmten Geometrie der 3 Bauelemente,
  - Anpassung des Regenerierungssystems mit den Parametern Druckluftspeicher, Druckluftventil, engster Querschnitt im Regenerierungssystem, Regenerierungsdruck und Druckluftverbrauch an unterschiedliche Blähschlauchabmessungen.

4 Gesamtkonzept der speicherprogrammierbaren Mikroprozessorsteuerung

Im Rahmen des Projektes war ein Systemmodell für einen Steuer- und Regelungsprozeß zur selbstoptimierenden Filterabreinigung zu entwerfen und in das Filtermodul zu integrieren. Diese Neuro-Fuzzy-Regeleinheit wurde im Industrieeinsatz getestet und weiterentwickelt.

Um für die speicherprogrammierbare Mikroprozessorsteuerung in Verbindung mit einer zuschaltbaren Neuro-Fuzzy-Regelung Industriestandard für die selbstoptimierende Abreinigung der Filtermodule des IUTA und des ILK zu realisieren, wurden folgende Komponenten ausgewählt:

Steuerung/Meßwerterfassung:	Siemens Simatic S7 314 FM
Programmierungs-Tool	Siemens Step 7 V 5.0
Programmiersprachen	FUP/ AWL/ C
Datenbus	MPI
Visualisierung:	Siemens Win CC V 4.02
Regelung:	S7-Standard-Bausteine DB 30, FB30, DB 100, FB 100 (S7-Fuzzy/Neuro-Bibliothek)
Fuzzy-Software-Tool:	Siemens Fuzzy-Control ++ 4.0
Neuro-Software-Tool:	Siemens Neuro Systems 1.0
Fuzzy-Konzept:	Takagi-Sugeno-Methode, Schwerpunkts-Methode, Min- und Max-Methode
Neuro-Konzept:	Neuro-Fuzzy-Netz (NFN)
Netzsoftware:	Simatic-SoftNet Coml S7 für Profibus 2.0
Plattform:	Pentium III (128 MB, 15 GB, 450 MHz)
Betriebssystem:	Windows 95

Dabei waren Kriterien der Kompatibilität zueinander, der Verfügbarkeit, der benutzerfreundlichen Bedienung der einzelnen Komponenten des Gesamtsystems, sowie deren Verbreitung in herkömmlichen Steuerungen in Industrieanlagen und SPS-Netzwerken hinsichtlich einer unproblematischen Adaption und Implementierung für die Auswahl ausschlaggebend. Das Gesamtkonzept der selbstoptimierenden Abreinigungssteuerung ist in Abb. 4.1 dargestellt.

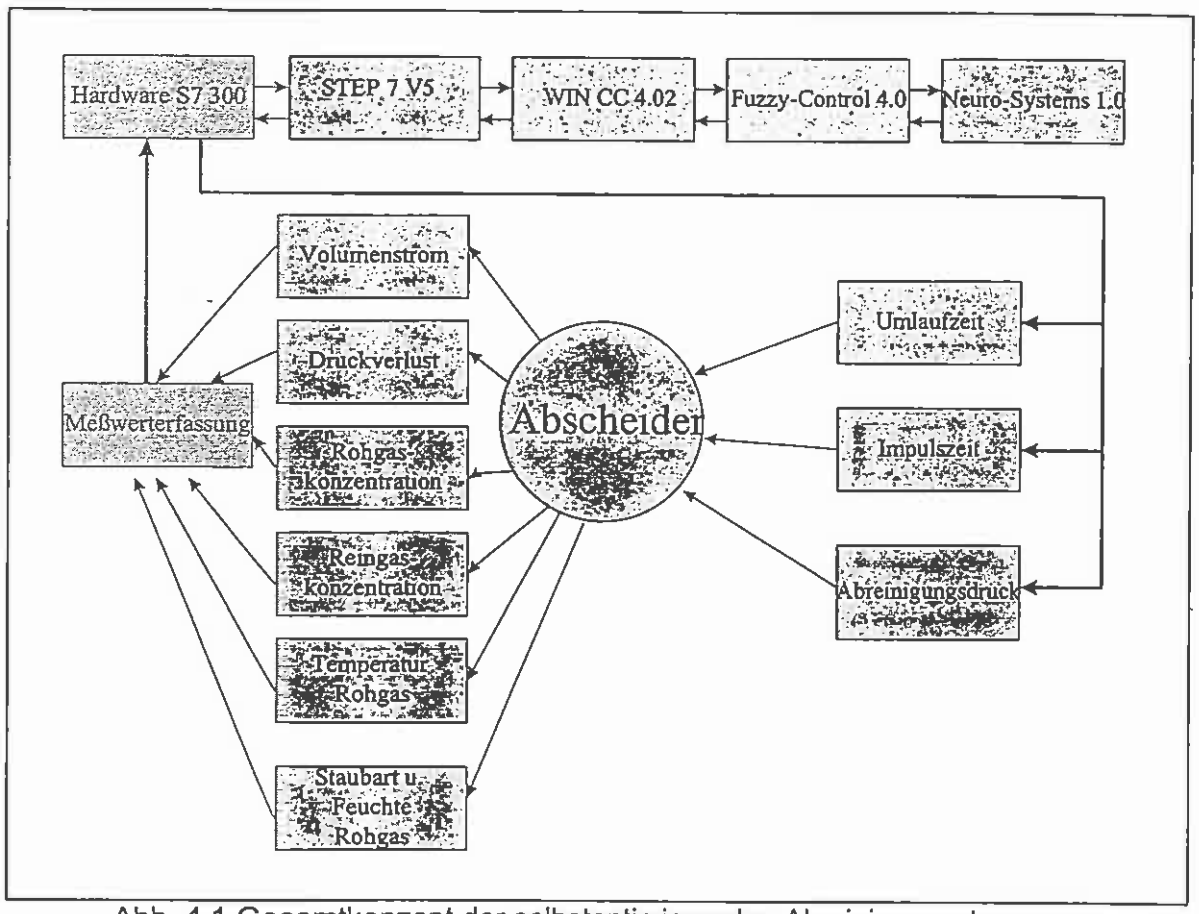


Abb. 4.1 Gesamtkonzept der selbstoptimierenden Abreinigungssteuerung

Durch die Regelungsstrategie mittels Kombination von einem Fuzzy- und einem Neuro-Tool der Fa. Siemens ist die selbstoptimierende Regelung des nichtlinearen Abscheiderverhaltens nach einer Lernphase der Steuerung weitgehend vom Benutzer nachvollziehbar. Die neue Abreinigungssteuerung, läßt sich nach Erfassung des Systemverhaltens und Umsetzung in Fuzzy-Regeln mit Hilfe der Parametrierung der einzelnen Variablen in linguistische Regeln, anhand diskreter Parameterwerte als signifikante Stützstellen des Systemverhaltens, auch für Bediener ohne Vorkenntnisse sehr einfach bedienen.

In Abb. 4.2 und 4.3 sind die Visualisierung und das Bedienfeld der speicherprogrammierbaren Mikroprozessorsteuerung dargestellt. Über entspechende Fenster der Visualisierung werden sämtliche relevanten Systemparameter des Abscheiders angezeigt, erfaßt und archiviert. Bei Über- bzw. Unterschreitung vorgegebener Parametergrenzwerte informiert ein Alarmlogging den Bediener über Störungen.

Für den Versuchsbetrieb wurde neben der Zeitsteuerung mit einstellbarer Takt- und Pausenzeit, eine Druckverluststeuerung mit Einstellung der Abreinigungsschaltpunkte über den Filterdruckverlust realisiert.

Darüber hinaus wurde eine zuschaltbare Fuzzy-Regelung mittels o. g. Software implemententiert. Sie paßt die Taktzeit als Stellgröße über die eingestellten Parameterbeziehungen laufend hinsichtlich des Optimums bezüglich Energieverbrauch und Reingasemission als Regelgrößen in Abhängigkeit von Rohgaskonzentration, Filterdruckverlust sowie Filterdruckverlustgradient als Folgegrößen an. Die Meßwerterfassung über die WinCC-Software der Firma Siemens und die Programmabarbeitung der SPS Siematic S7 der Firma Siemens erfolgt mit Scan- bzw. Zykluszeiten von 30 ms und erreicht somit eine extrem hohe Auflösung. Dies ist bei den sehr kurzzeitigen Peaks der Staubkonzentration im Reingas erforderlich. Die SPS kann damit sehr frühzeitig ein sich veränderndes Systemverhalten und Parametertrends in den vorgebenen Grenzen erkennen und die Stellgröße diesbezüglich anpassen /8/, /9/, /10/, /11/, /12/, /13/.

Die Simatic/WinCC-gestützte Einstellung weiterer Stellgrößen wie Impulszeit und Abreinigungsdruck der Filterabreinigung sowie die Fernabfrage bzw. Remote-Control via Modem bzw. Internet/Intranet mittels einer Profibus-Übertragung sind als optionale Erweiterungsmöglichkeiten vorgesehen. Eine gezielte mehrfache Abreinigung einzelner Filterreihen aufgrund einer inhomogenen Belegung aller Filterreihen bei nicht befriedigender Abreinigung ist in der Programmierung optional vorgesehen. Diesbezüglich ist die Erfassung der durchschnittlichen Abnahme des Filterdruckverlusts von allen Filterelementen im Vergleich zur Druckverlustabnahme der Filterelemente einer Filterreihe nach einer Abreinigung in der Programmierung realisiert. Die in der betrieblichen Praxis auftretendende Problematik der Erfassung und Meldung von Filterrissen ("broken bag") sowie der Identifikation der Filterreihe mit den gerissenen Filtern ist mit der im Rahmen des Projekts realisierten SPS über die Erfassung der durchschnittlichen Reingasstaubkonzentrationen pro Abreinigung und Filterreihe lösbar und optional aufrüstbar. Dies ist besonders bei Abscheideranlagen mit mehreren tausend Filterelementen interessant. O. g. optionale Fähigkeiten des SPS-Protyps sollten in einem Nachfolgeprojekt durch entsprechende Erweiterung der Programmierung realisiert werden.

Als Möglichkeit zur Anpassung des Systems an eine grundsätzliche Änderung des Systemverhaltens des Abscheiders (z. B. bei Änderung des Rohgasstaubes, des Nennvolumenstroms, der Gasfeuchte und der Gastemperatur oder bei einer Revision) wird durch Aktivierung des Neuro-Tools in der Visualisierung der SPS die Fuzzy-Programmierung mit neuen Randbedingungen versorgt und paßt sich dem veränderten Betriebszustand an. Allerdings müssen dann dem Neuro-Tool aus druckverlust- oder zeitgetakteten

Abreinigungsfolgen archivierte Betriebsdaten der Systemparameter als "Lerndaten" für das geänderte Systemverhalten des Abscheiders zur Verfügung stehen. Mit Hilfe von Algorithmen beschreibt das Neuro-Tool aus den Lerndaten das Systemverhalten des Betriebszustands neu und aktualisiert die Randbedingungen der Fuzzy-Regelung. Mit dem Neuro-Tool läßt sich eine Neuro-Programm-Bibliothek der verschiedenen grundsätzlichen Betriebszustände erarbeiten, die der Betreiber der Abscheideranlage nur für den jeweiligen Betriebszustand in der Visualisierung aufrufen bzw. aktualisieren muß.

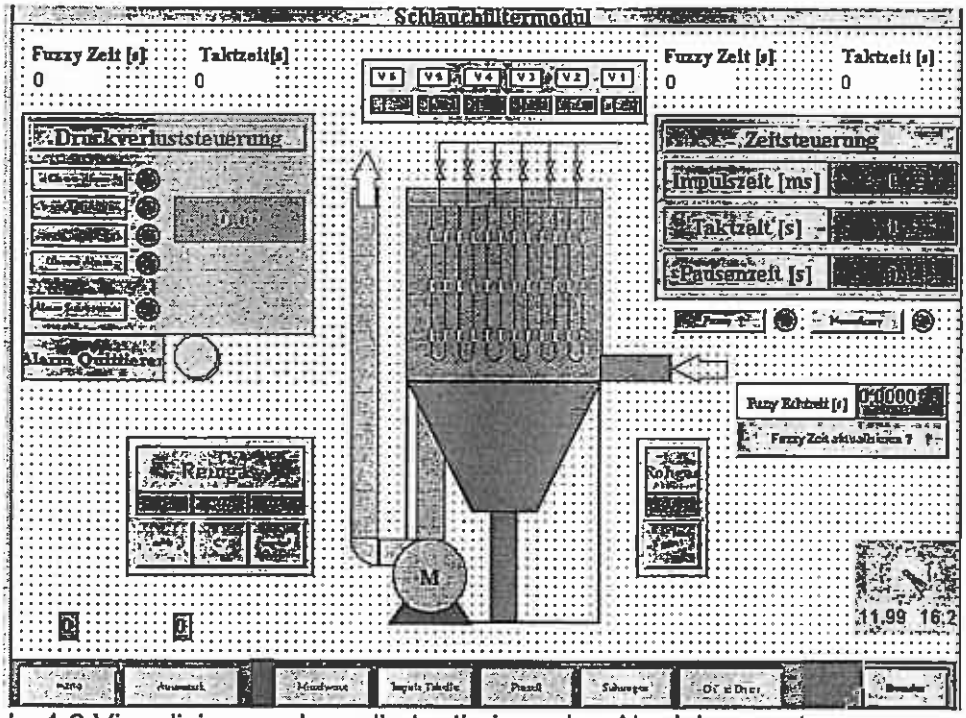


Abb. 4.2 Visualisierung der selbstoptimierenden Abreinigungssteuerung

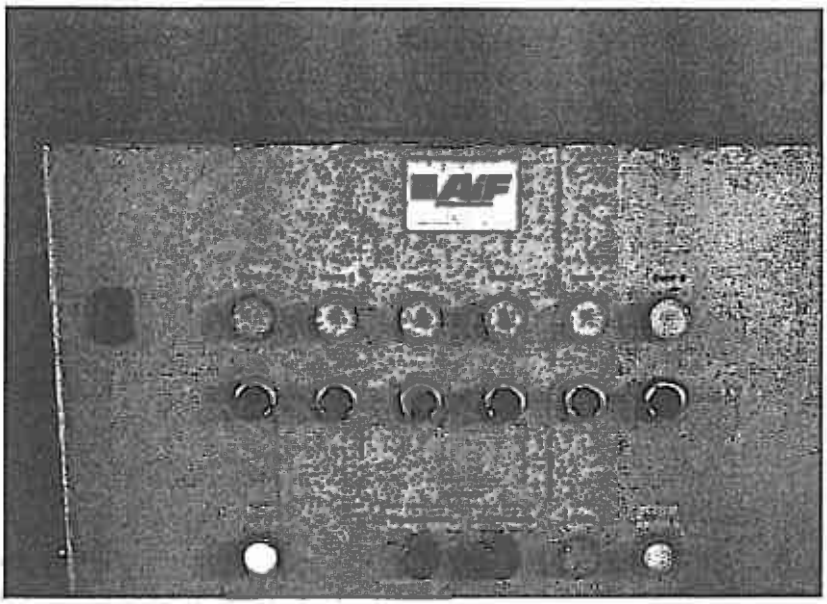


Abb. 4.3 Bedienfeld der selbstoptimierenden Abreinigungssteuerung am Steuerschrank der Versuchsanlage im Industriebetrieb

4.1 Die Neuro-Fuzzy-Regelung der selbstoptimierenden Abreinigung

Für Prozesse mit quasi-stationärem Betrieb wie der Abreinigung von filternden Abscheidern, bei denen eine nichtlineare Abhängigkeit zwischen Prozeßparametern und dem Arbeitspunkt besteht und einzelne Parameter unabhängig vom Arbeitspunkt schwanken können, sind Neuro-Fuzzy-Konzepte mit einer kontinuierlichen Anpassung der Reglerparameter prädestiniert /6/, /7/.
Als insofern geeignetes Instrument für die zu entwickelnde intelligente Filterabreinigung wurden folgende Anforderungen an den Neuro-Fuzzy-Regler für den Einsatz in der selbstoptimierenden Abreinigungssteuerung formuliert /5/:

- Kompatibilität zur bisher eingesetzten MSR-Soft- und Hardware und zu gängigen Industriestandards
- Benutzer- und Wartungsfreundlichkeit sowie Einfachheit der Handhabung und Bedienung
- Übernahme der kompletten Steuerung zur Abreinigung, Einstellung und Kontrolle des optimalen Betriebspunktes unter Berücksichtigung des Energieverbrauchs und der Staubkonzentrationen im Reingas
- Gezielte, mehrfache Ansteuerung einzelner Schlauchreihen und des Gesamtsystems in Abhängigkeit von der Güte der erfolgten Abreinigung und unter Berücksichtigung der Randbedingungen des Systems
- Erkennung wechselnder Betriebsbedingungen und flexible Reaktion durch Änderung der Systemrandbedingungen
- Prognose und automatische Anzeige wann ein Wechsel der Textilfilterschläuche bzw. einzelner Schlauchreihen notwendig wird.

Dabei mußte von der ursprünglich verfolgten Absicht, mit einem adaptiven PID-Fuzzy-Konzept /5/ zu arbeiten, abgegangen werden, da die geeignete Neuro-Software Neuro-Systems 1.0 der Fa. Siemens nur mit der Fuzzy-Software Fuzzy Control 4.0 der Fa. Siemens kommunizieren kann.

Unter Berücksichtigung der Kompatibilität zur gängigen Meß-/Steuer- und Regelsoftware wurden die Neuro-Fuzzy-Tools der Fa. Siemens als Softwarekomponenten modifiziert und für die Industrie- bzw. Technikumsuntersuchungen in die S7-Hardware zur Regelung des Filtersystems in Form von S7-Standardsoftwarebausteinen DB 30, FB30, DB 100, FB 100 aus der S7-Fuzzy- bzw. Neuro-Bibliothek /8/, /9/ implementiert.

Für die Zeitsteuerung läßt sich die Abhängigkeit der Filtrationsleistung von der Stellgröße Umlaufzeit in guter Näherung als Polynom folgendermaßen darstellen.

$$P_F = a_0 + a_1 \cdot t_U + a_2 \cdot t_U^2 + a_3 \cdot t_U^3$$ - für den gesamten Arbeitsbereich

$$P_F = \bar{a}_0 + \bar{a}_1 \cdot t_U$$ - für den linearen Unterbereich

Die Konstanten a_0 bis a_3 bzw. $\bar{a}_0$ und $\bar{a}_1$ sind mit Hilfe der Meßergebnisse der einzelnen Steuerschritte und einem entsprechenden Rechenprogramm zu bestimmen. Für die Bestimmung der Konstanten a_0 bis a_3 sind vier Steuerschritte notwendig, für die Konstanten $\bar{a}_0$ und $\bar{a}_1$ mindestens zwei Steuerschritte und ein Steuerschritt zur Überprüfung der Linearität.

Die filtertechnische Gesamtleistung am filternden Abscheider ist gleich der Summe aus Filtrations- und Regenerierungsleistung (siehe Seite 18, 19).

$$P_G = P_F + P_R$$

$$P_R = \frac{K_1}{t_U}, \text{ mit } K_1 = \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot N_V \cdot V_K \cdot p_{R1} \left[\left(\frac{p_{R1}}{p_b} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right] \left[1 - \left(\frac{p_{R2}}{p_{R1}} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \right]$$

Für die filtertechnische Gesamtleistung folgt dann.

$$P_G = a_0 + a_1 \cdot t_U + a_2 \cdot t_U^2 + a_3 \cdot t_U^3 + \frac{K_1}{t_U}$$ - für den gesamten Arbeitsbereich

$$P_F = \bar{a}_0 + \bar{a}_1 \cdot t_U + \frac{K_1}{t_U}$$ - für den linearen Unterbereich

Um den Neuro-Fuzzy-Regler für den Steuer-/Regelungsprozeß am Filtermodul adaptieren zu können, wurde basierend auf dem im Rahmen des Projektes entwickelten Prozeßmodell /3/, /4/ für

- das Leistungsminimum: $\frac{dP_G}{dt_U} = 0$

- den gesamten Arbeitsbereich:

$$\frac{dP_G}{dt_U} = a_1 + 2a_2 \cdot t_U + 3a_3 \cdot t_U^2 - \frac{K_1}{t_U^2} = 0$$

$t_U = t_{U,opt.}$

$$3a_3\, t_{U,opt}^4 + 2a_2\, t_{U,opt}^3 + a_1\, t_{U,opt}^2 - K_1 = 0$$

in Normalform:

$$t_{U,opt}^4 + b_3\, t_{U,opt}^3 + b_2\, t_{U,opt}^2 + b_o = 0$$

$$\text{mit } b_3 = \frac{2a_2}{3a_3}\ ;\ b_2 = \frac{a_1}{3a_3}\ ;\ b_o = -\frac{K_1}{3a_3}$$

- den linearen Unterbereich:

$$\frac{dP_G}{dt_U} = \bar{a}_1 - \frac{K_1}{t_U^2} = 0 \qquad t_U = t_{U,opt}$$

$$\bar{a}_1 \cdot t_{U,opt}^2 - K_1 = 0$$

$$t_{U,opt} = \sqrt{\frac{K_1}{\bar{a}_1}}$$

mit der Umlaufzeit als Stellgröße das Systemverhalten beschrieben. Mit den Randbedingungen des Betriebsverhaltens der Abscheider in den Industrie- und Technikumsuntersuchungen und aus den Ergebnissen der Regressionsanalysen wurde ein Neuro-Fuzzy-Modell und -Programm zur Regelung der Abreinigung formuliert.

Im ersten Schritt wurden dabei linguistische Variablen bzw. eine Relationsmatrix der Eingangsgrößen und der Ausgangsgröße zur Fuzzifizierung des Prozeßmodells aufgestellt, in die die Abhängigkeiten der Betriebsparameter sowie die Randbedingungen des Filtersystems einfließen (wie zum Beispiel zulässiger maximaler Druckverlust und Grenzen des stabilen Arbeitsbereiches).

Dabei wurden bei der durchgeführten Fuzzifizierung aus den diskreten (scharfen), das Systemverhalten kennzeichnende Werte einzelner Parameter, unscharfe Werte aus einer linguistische Variablen mit zunächst fünf möglichen Zuständen um einen gewählten Arbeitspunkt zugeordnet (Tab. 4.1).

Tab. 4.1 Beispiel der Zuordnung von diskreten Parameterwerten zu linguistischen Werten der Fuzzy-Regelung der Abreinigung des Abscheiders

Parameter	Diskreter Wert	Linguistischer Wert
Filterdruckverlust	8,000 mbar	Positiv groß
Filterdruckverlust	6,775 mbar	Positiv
Filterdruckverlust	6,000 mbar	Null
Filterdruckverlust	5,225 mbar	Negativ
Filterdruckverlust	4,000 mbar	Negativ groß

Mit Hilfe von sich überschneidenden Dreiecks- und Trapez-Zugehörigkeitsfunktionen wird dem gesamten einzustellenden Wertebereich eines Parameters eine prozentuale unscharfe Gewichtung zwischen den linguistischen Werten (bzw. den diskreten Parameterwerten) festgelegt (Abb. 4.4). Die prozentuale Gewichtung wird durch die Flankensteigungen und den Schnittpunkten der Zugehörigkeitsfunktionen eingestellt. Mit der Verknüpfung über "Wenn-dann-und-dann" Regeln in der Relationsmatrix z. B. mit Hilfe der Fuzzy-Schwerpunktmethode, lassen sich die unscharfen Parameterwerte von max. acht Eingangs- und vier Ausgangs-Parametern über Relationen miteinander verknüpfen. Sie liefern nach Fuzzy-Inferenz und Defuzzifizierung mittels Implikation und Komposition scharfe Ausgangswerte für die Stellgröße - im Projekt die Takt- bzw. Umlaufzeit /8/. So wird das nichtlineare, parameterabhängige Systemverhalten des Abscheiders über das Fuzzy-Modell, bestehend aus Zugehörigkeitsfunktionen und Relationsmatrix, näherungsweise beschrieben.

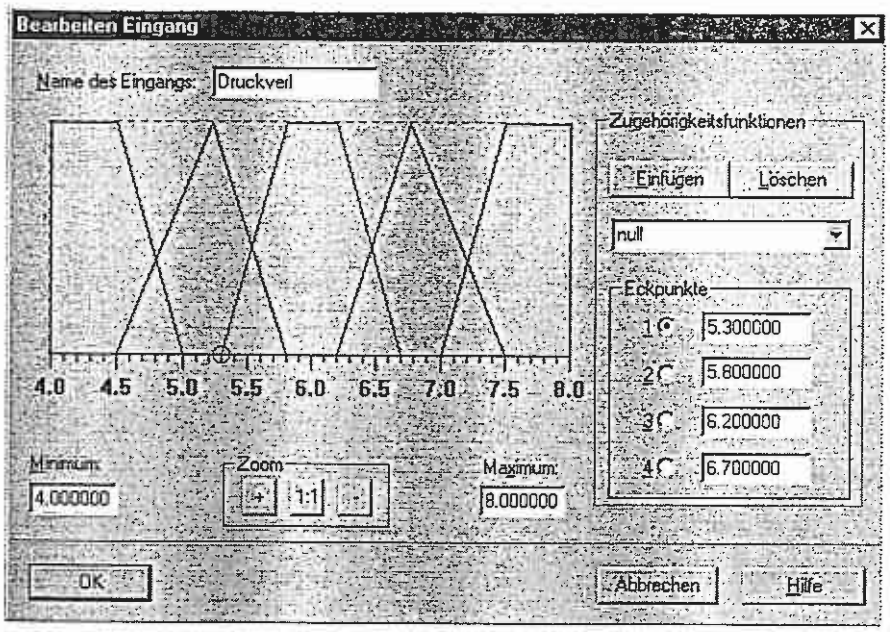


Abb. 4.4 Darstellung der Einstellung der Zugehörigkeitsfunktionen eines Parameters

Mit Hilfe dieses Fuzzy-Modells wurde eine parameterbezogene Verstellstrategie realisiert und die Fuzzy-Regelung an das Filtersystem adaptiert. Die Verstellstrategie wurde auf Basis der Erfahrungen über das Systemverhalten des Filtersystems aus den Industrie- und Technikumsuntersuchungen erstellt und laufend verfeinert.

Mit der in der Mikroprozessorsteuerung der selbstoptimierenden Abreinigung integrierten Neuro-Software-Komponente Neuro Systems 1.0 können anhand von gespeicherten Daten aus der Meßwerterfassung diskreter Betriebszustände die Randbedingungen für die Abreinigung ermittelt werden. Nichtlineare Abhängigkeiten der Betriebsparameter werden in Form von Algorithmen beschrieben und von der SPS "gelernt". Das Neuro-Tool erkennt dabei bestimmte Muster eines Betriebszustandes als Algorithmen (z. B. von Abreinigungszyklen unter konstanten Randbedingungen) und unterstützt die Fuzzy-Komponente in der Entscheidung ob Abweichungen der Regelgröße vorliegen. Gegebenenfalls wird durch Anpassung der Stellgröße, mit dem Ziel der Feinoptimierung reagiert.

Die Tools der Fuzzy- und Neuro-Software werden während des Betriebes der Simatic S7 geöffnet und übertragen die erstellten Fuzzy- bzw. Neuro-Programme (Algorithmen) auf die entsprechenden Neuro-Fuzzy-Daten- und Funktionsbausteine der Simatic S7 mittels der Netzsoftware Simatic-SoftNet Coml S7 für Profibus 2.0. Danach arbeitet die im Schaltschrank des Abscheiders implementierte Simatic S7 selbständig mit den geladenen Algorithmen und ihrer programmierten Grundkonfiguration für Meßwerterfassung und Regelung. Die Fuzzy- und Neuro-Regelungsalgorithmen können über einen MPI-Bus mittels

Ferndatenübertragung zum Leitstand eines Industriebetriebes jederzeit durch Eingabe modifizierter Algorithmen aktualisiert werden.

4.2 Testbetrieb des selbstoptimierenden Abreinigungssystems

Vom Neuro-Fuzzy-Regler des selbstoptimierenden Abreinigungssystems war zunächst ein Steuervorgang einzuleiten, in dem er ausgehend von Erfahrungswerten, den Betriebspunkt der minimalen filtertechnischen Gesamtleistung des Filtersystems in einem gewählten Arbeitsbereich schrittweise über die Variation der Taktzeit als der Stellgröße einstellte. Dabei ist das Filtersystem eines filternden Abscheiders durch eine innere Trägheit gekennzeichnet. Wird das Gleichgewicht zwischen Filtration und Regenerierung durch die Veränderung der Stellgröße gestört, so wird ein gewisser Zeitraum für die Einstellung des neuen Gleichgewichts benötigt /4/. Diese Trägheit ist eine Eigenschaft, die von den speziellen filter- und regenerierungstechnischen Einflußgrößen des Abscheiders bestimmt wird und für die Neuro-Fuzzy-Regelung zur Abreinigung in Randbedingungen formuliert werden muß. Im Steuervorgang (Veränderung der Stellgröße) zeigt sich die Trägheit des Filtersystems in einem kontinuierlichen, nicht sofortigen Anstieg des Filterdruckverlustes bis zum neuen konstanten Filterdruckverlustwert. Dieser konstante Wert stellt sich erst nach einer Reihe von Abreinigungszyklen ein.
Eine Aufgabe des Neuro-Fuzzy-Reglers ist es, in einem Kontrollvorgang /4/ diese Systemträgheit zu berücksichtigen, als weitere Randbedingungen zu berechnen und die Taktzeit zwischen den Abreinigungsimpulsen einzustellen. Das Ergebnis ist mit den Erfahrungswerten (Gütekriterien) der vorangegangenen Abreinigungen zu vergleichen und es ist zu entscheiden, ob die Abreinigung für eine Filterreihe bzw. für das Gesamtfiltersystem den vorgegebenen Gütekriterien der Relationsmatrix entspricht. Dann ist zu entscheiden, ob der Abreinigungsvorgang beendet ist oder fortgesetzt werden muß. Im weiteren entscheidet der Fuzzy-Regler, ob die neue Randbedingungen des Filtersystems, z. B. Änderung der Staubkonzentration im Rohgasstrom, zu berücksichtigen und neu zu berechnen sind. Durch Änderung der Stellgröße wird der Betriebspunkt der minimalen filtertechnischen Gesamtleistung im stabilen Arbeitsbereich neu eingestellt.

Für die weiteren Industrieuntersuchungen waren der

- der Gesamtfilterdruckverlust
- die Anzahl der Abreinigungsimpulse für jede Schlauchreihe pro Zeiteinheit bzw. die Umlaufzeit

- der zeitliche Filterdruckverlustgradient
- die Staubkonzentration im Reingas, als Folge der Abreinigung einer Filterreihe bzw. des Gesamtsystems
- die Rohgasstaubkonzentration
- und der Gesamtvolumenstrom durch den Abscheider

die Eingangsparameter des Fuzzy-Reglers. Dabei wurden die Größen Dauer und Druck des Abreinigungsimpulses als Konstanten vorgegeben. Als Stellgröße des Reglers wurde die

- Taktzeit bzw. die Anzahl der Impulse pro Textilfilterschlauch und Zeiteinheit

als die das Systemverhalten am stärksten beeinflussende Stellgröße für die Abreinigung einer Filterreihe gewählt /4/. Die Verringerung des Filterdruckverlustes pro Impuls und der zeitliche Gradient des Filterdruckverlustes nach der Abreinigung des Gesamtsystems sowie der Gesamtenergieverbrauch pro Massenanteil Staub (für den Filterbetrieb und die Regenerierung des Filters) werden vom Fuzzy-Regler berechnet. Diese Werte werden mit vorgegebenen Gütekriterien der Relationsmatrix verglichen und gegebenenfalls die Stellgröße verändert, um das Optimum von minimaler filtertechnischer Gesamtleistung bei gleichzeitiger minimaler Reingasstaubemission wieder zu erreichen.

In Abb. 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10 sind die Visualisierungen der Neuro-Fuzzy-geregelten Abhängigkeiten der Relationsmatrix zwischen den Parametern Taktzeit, Filterdruckverlust, Reingasstaubkonzentration bzw. Rohgasstaubkonzentration und Volumenstrom für die Pulse-Jet- und Blähschlauch-Abreinigung im Arbeitspunkt des minimalen Energieverbrauchs in 3D-Form für das IUTA-Filtermodul dargestellt. Dabei wurden für die Taktzeit als Minimum 100 Sekunden und als Maximum 500 Sekunden auf Basis der Industrieuntersuchungen für die Pulse-Jet- und Blähschlauch-Abreinigung des IUTA-Filtermoduls eingestellt. Maßgeblich für die Wahl des Bereichs der Parameterwerte war, den mittleren Filterdruckverlust des Abscheiders in einem Bereich um 3,5 mbar für die Pulse-Jet- Abreinigung bzw. 7 mbar für die Blähschlauch-Abreinigung zu halten. Hier stellt sich ein sehr günstiger Energieverbrauch des Abscheiders bei einer relativ kleinen Reingasstaubmaximalkonzentration von 7 bzw. 5 mg/Bm³ ein. Außerdem kann mit dieser Einstellung der Fuzzy-Regelung flexibel auf Staubspitzen im Rohgas durch Senkung der Taktzeit bis auf 100 Sekunden (Untere Grenze) reagiert werden . Bei Taktzeiten kleiner 100 Sekunden steigt der Energieverbrauch des Abscheiders bei erhöhter Reingasstaubkonzentration wieder an, so daß dieser Wert als untere Grenze für die Taktzeit gewählt wurde. Als obere Grenze der Taktzeit wurden 500

Sekunden gewählt, um bei sehr hohen Rohgasstaubkonzentrationen einen Anstieg des mittleren Filterdruckverlustes in den instabilen Bereich zu vermeiden. Da der Abscheidervolumenstrom beim IUTA-Industriefiltermodul nicht elektronisch nachgeregelt wird, lassen sich Trends zur Veränderung des Filterdruckverlustes, der bei der Druckluftabreinigung Schwankungen und einer hohen Trägheit (Einstellung des Filterdruckverlustes auf einen Kontanzwert innerhalb von 10 bis 20 Sekunden nach der Abreinigung) unterliegt, wesentlich früher an einer Veränderung des Volumenstroms erkennen. Deshalb wurde der Abscheidervolumenstrom ausgehend von einem Standardwert von 2000 Bm³/h als zusätzlicher Eingangsparameter in die Relationsmatrix der Regelung eingebunden.

In Abb. 4.11, 4.12, 4.13, 4.14 sind die Ergebnisse des Testbetriebs des selbstoptimierenden Abreinigungssystems mit Neuro-Fuzzy-geregelter Blähschlauch-Abreinigung und die vergleichbare zeitgetaktete Blähschlauch-Abreinigung bei Δp_{FE} =8,5 mbar, t_T=148 s sowie die druckverlustgetaktete Pulse-Jet-Abreinigung bei Δp_{FE} =4 mbar, t_T=148 s aus den Industrieuntersuchungen dargestellt. Die Abreinigungsrandparameter (t_i, P_{R1}, P_{R2}, T_{R1}) haben die gleichen Einstellungen wie in den Industrieuntersuchungen zur Blähschlauchabreinigung. In Abb. 4.11 sieht man deutlich wie die Neuro-Fuzzy-Regelung auf die schwankende Rohgaskonzentration durch die schnelle Einstellung der Taktzeit reagiert, was bei den herkömmlichen Abreinigungsverfahren nur bedingt, mit einer großen Trägheit und erhöhtem Reingasstaubkonzentrationen realisiert wird. Die Neuro-Fuzzy-Regelung hält dabei den mittleren Filterdruckverlust bei etwa 7,5 mbar, die maximale Reingasstaubkonzentration unter 3 mg/Bm³ und den Volumenstrom quasi konstant bei 2000 m³/h.

Somit wurden mit diesen Einstellungen für die Blähschlauch-Abreinigung die geforderten Gütekriterien der Neuro-Fuzzy-Regelung der Abreinigung weitgehend erfüllt.

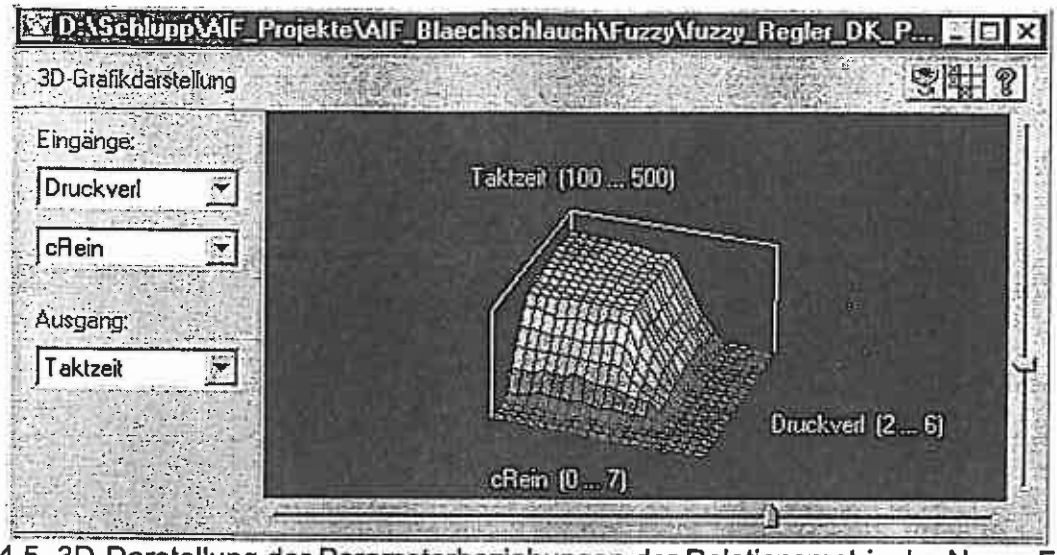


Abb. 4.5 3D-Darstellung der Parameterbeziehungen der Relationsmatrix der Neuro-Fuzzy-Software für die Pulse-Jet-Abreinigung

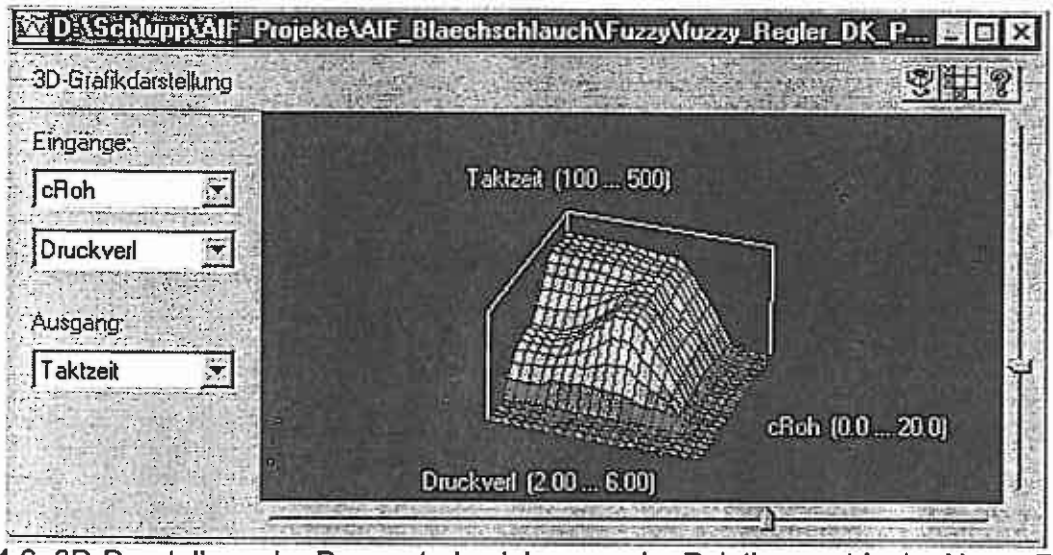


Abb. 4.6 3D-Darstellung der Parameterbeziehungen der Relationsmatrix der Neuro-Fuzzy-Software für die Pulse-Jet-Abreinigung

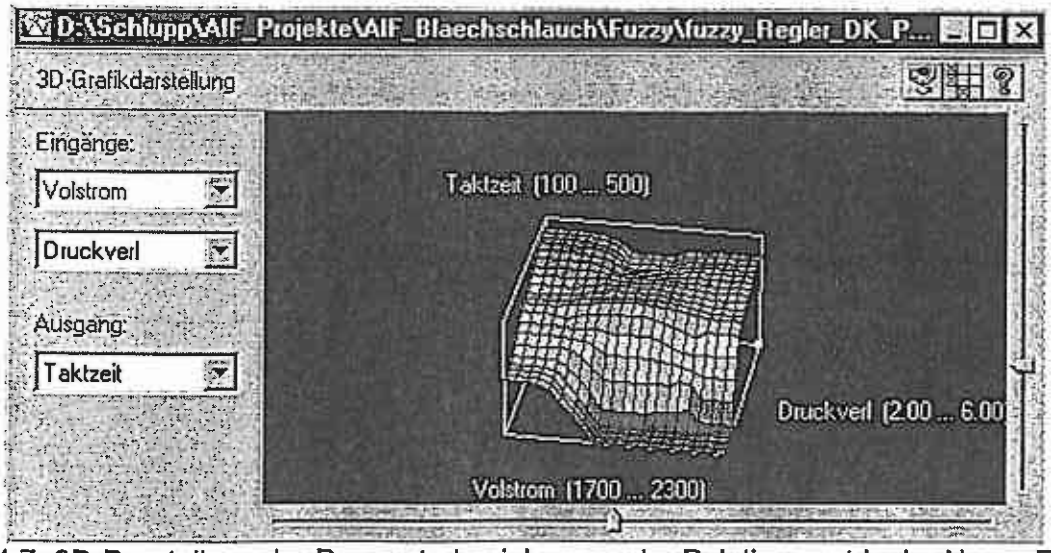


Abb. 4.7 3D-Darstellung der Parameterbeziehungen der Relationsmatrix der Neuro-Fuzzy-Software für die Pulse-Jet-Abreinigung

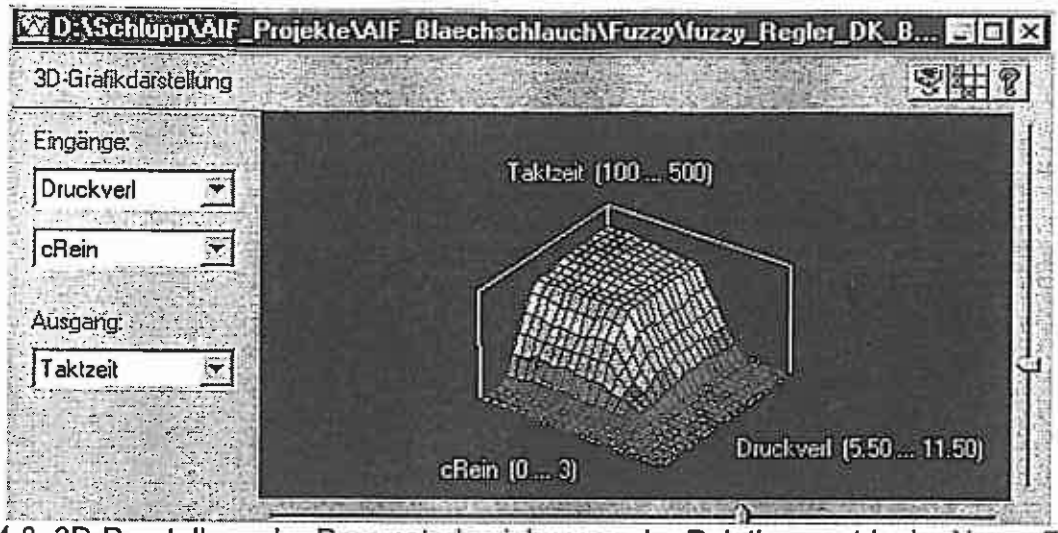


Abb. 4.8 3D-Darstellung der Parameterbeziehungen der Relationsmatrix der Neuro-Fuzzy-Software für die Blähschlauch-Abreinigung

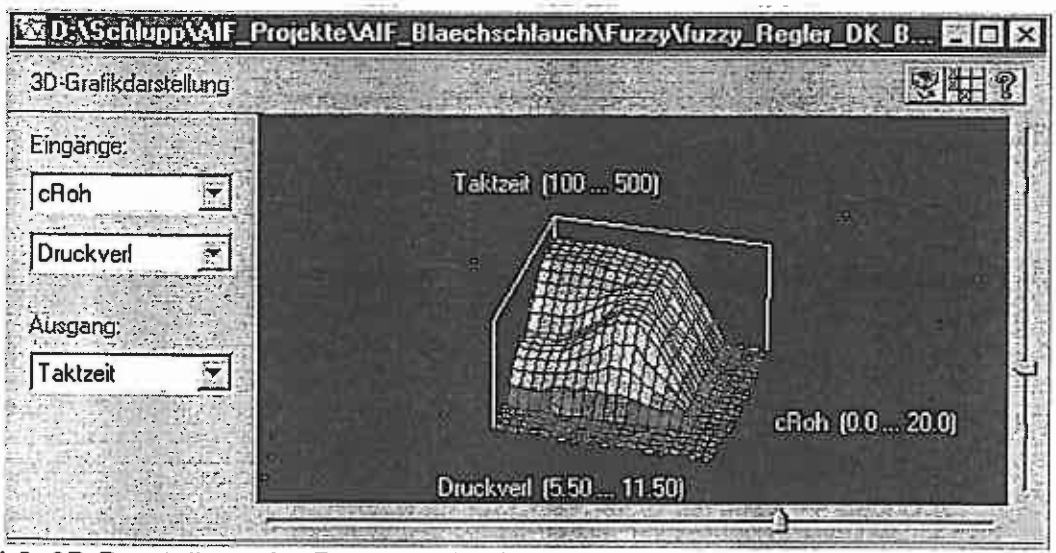


Abb. 4.9 3D-Darstellung der Parameterbeziehungen der Relationsmatrix der Neuro-Fuzzy-Software für die Blähschlauch-Abreinigung

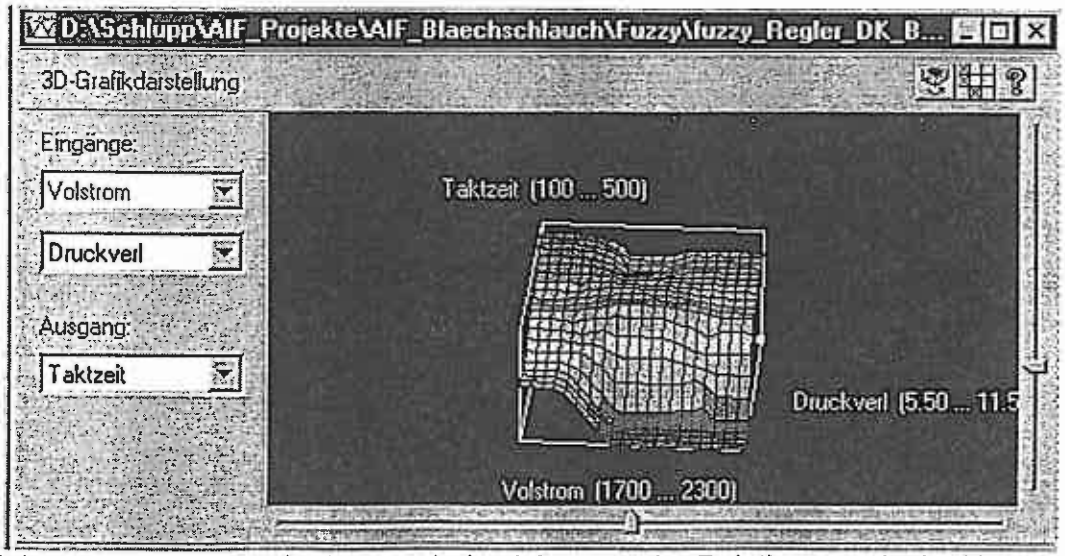


Abb. 4.10 3D-Darstellung der Parameterbeziehungen der Relationsmatrix der Neuro-Fuzzy-Software für die Blähschlauch-Abreinigung

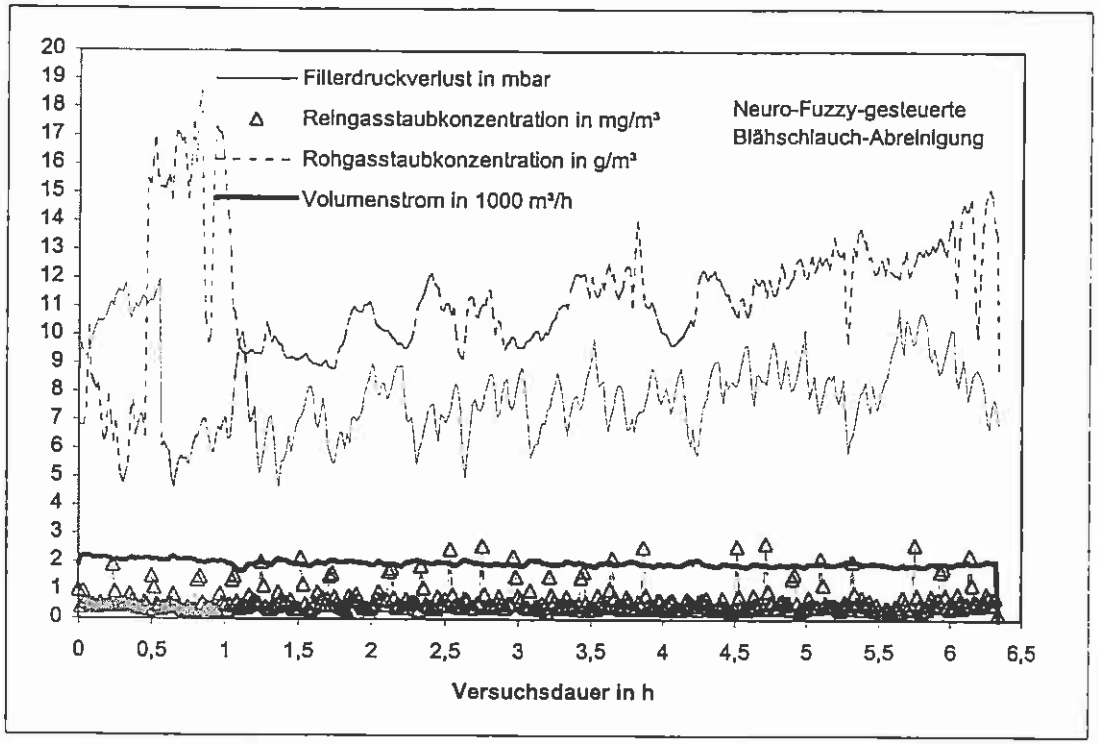


Abb. 4.11 Abreinigungsparameter der Neuro-Fuzzy-gesteuerten Blähschlauch-Abreinigung im Testbetrieb des IUTA-Filtermoduls

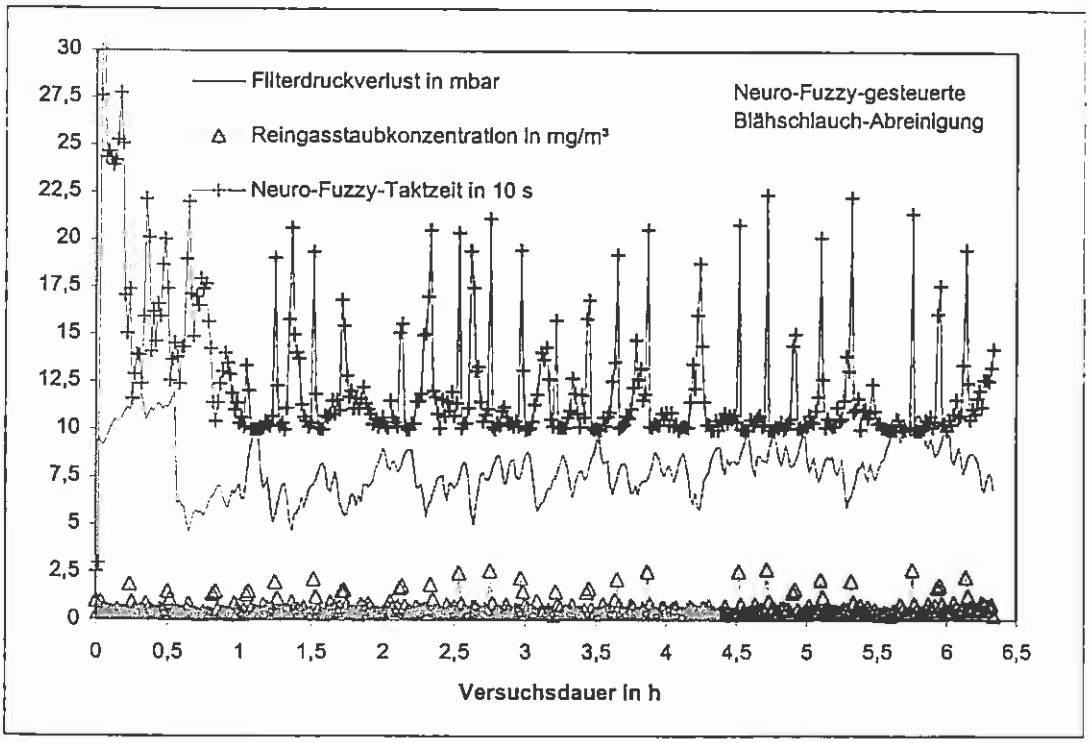


Abb. 4.12 Abreinigungsparameter und Stellgröße Taktzeit der Neuro-Fuzzy-gesteuerten Blähschlauch-Abreinigung im Testbetrieb des IUTA-Filtermoduls

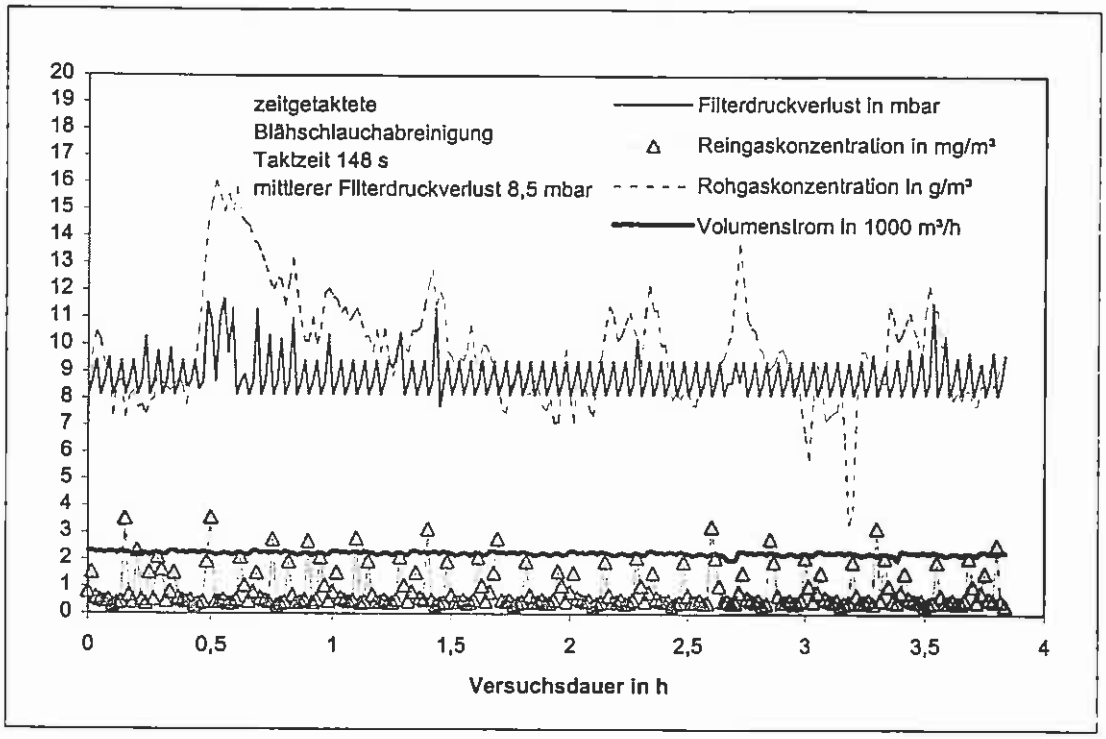


Abb. 4.13 Abreinigungsparameter der zeitgesteuerten Blähschlauch-Abreinigung

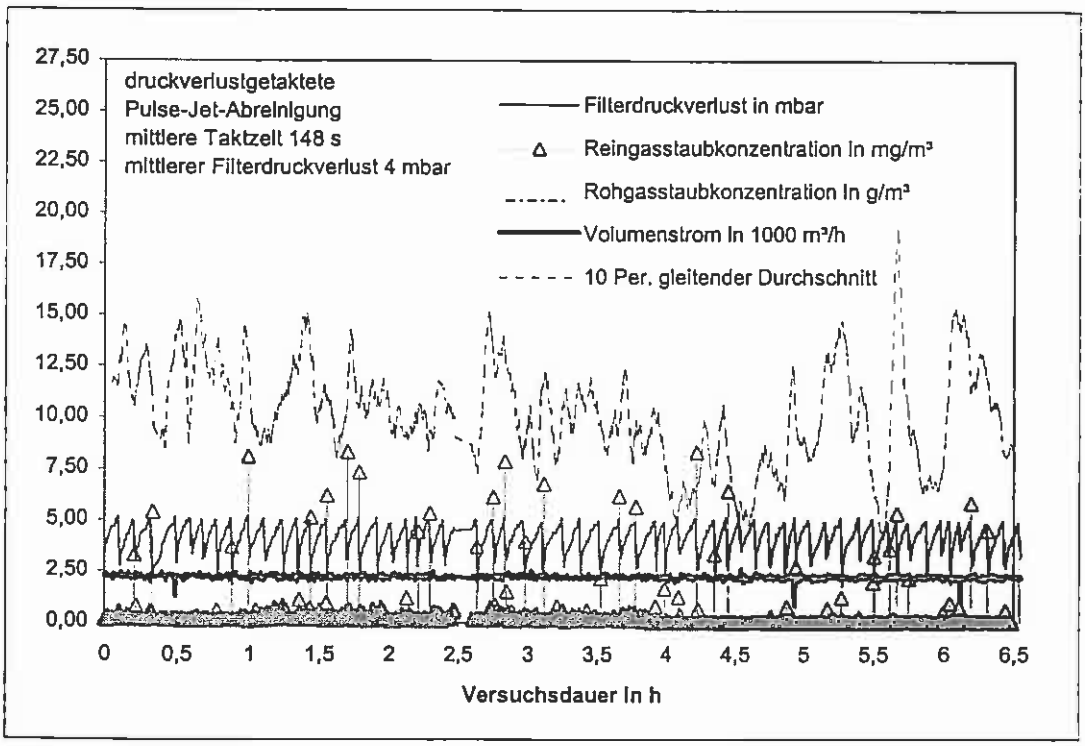


Abb. 4.14 Abreinigungsparameter der druckverlustgesteuerten Pulse-Jet-Abreinigung

5 Zusammenfassung

Das Forschungsvorhaben unterteilte sich in die zwei Hauptaufgaben:

- Erprobung der Blähschlauchregenerierung und deren Vergleich mit der Druckluftimpuls-regenerierung
- Entwicklung und Erprobung einer Mikroprozessorsteuerung, mit deren Hilfe der Energieverbrauch und die Reingasemissionen des filternden Abscheiders gesenkt werden kann.

Die Erprobung der beiden Regenerierungsvarianten erfolgte zum einen im Versuchsfeld des ILK Dresden unter Technikumsbedingungen. Die Versuchsstandsbedingungen und das Versuchsprogramm wurden festgelegt. Die Untersuchungen wurden in Abhängigkeit der folgenden filter- und regenerierungstechnischen Parameter durchgeführt:

- Filterflächenbelastung
- Rohluftstaubkonzentration
- Abreinigungsdruck
- Umlauf- bzw. Taktzeit der Druckluftimpulse
- Impulszeit der Druckluftimpulse.

Zum anderen führte IUTA mit einer mobilen Entstaubungsanlage vergleichende praxisnahe Untersuchungen im Bypass der Raumentstaubung an einer Sinteranlage durch. Neben den o.g. filter- und regenerierungstechnischen Parametern wurden die Filterschläuche bezüglich des Verschleißes untersucht hinsichtlich:

- Flächengewicht
- Luftdurchlässigkeit
- Staubeinlagerung (REM).

Zur Blähschlauchregenerierung wurden die Konstruktionsdetails festgelegt. Blähschlauch-Prototypen wurden an der IUTA-Versuchsanlage bezüglich des Verhaltens während und nach einem Druckluftimpuls getestet und von der Geometrie und dem Material her den Anforderungen angepaßt.
Es ergaben sich folgende Ergebnisse des Projekts zur Blähschlauchabreinigung:

- Der Restfilterdruckverlust nach der Abreinigung lag um 15 bis 40 % beim Prüfstaub Mikro-Calcilin bzw. um 100 bis 130 % beim Sinterstaub höher als bei der konventionellen Druckstoß- bzw. Pulse-Jet-Abreinigung.

- Bei der Blähschlauchabreinigung ergab sich ein kleinerer mittlerer Filterdruckverlustanstieg bzw. mittlerer zeitlicher Druckverlustgradient am Filter.

- Durch die schnelle Staubabführung und günstige Sedimentation der abgereinigten Staub-Agglomerate des Filterkuchens wurde eine Wiederanlagerung von dispergierten Staub an benachbarte Filterelemente und damit der "Teppichklopfeffekt" der Pulse-Jet-Abreinigung vermieden.

- Es ergaben sich beim Blähschlauchverfahren ähnlich lange Filtrationszeiten bis zum nächsten Abreinigungsimpuls wie bei der konventionellen Druckstoßabreinigung.

- Die Reingasstaubgehalte sowohl als Maximal- wie auch als Mittelwerte lagen mit abnehmender Umlauf- bzw. Taktzeit beim Blähschlauch-Verfahren um bis zu 50% deutlich niedriger als beim Pulse-Jet-Verfahren.

- Der Energieverbrauch bei der Blähschlauchabreinigung liegt bei dem sich einstellenden höheren Filterdruckverlustniveau bei geringerem Druckverlustgradienten und der entsprechend höheren Filtrationsleistung um 60 bis 300 % höher als bei der Pulse-Jet-Abreinigung.

- Es wurden innerhalb einer dreimonatigen Dauerbetriebsdauer keine Risse an den Textilfiltern und eine deutlich niedrigere Staubeinlagerung im Filtertuch als beim Druckstoßverfahren festgestellt.

- Das Blähschlauchverfahren zeigte im Vergleich zur Druckstoßregenerierung ein empfindlicheres Verhalten der Abreinigungssystems. Die Abreinigungsparameter müssen bei der Blähschlauchabreinigung auf Schlauchgeometrie, Druckluftversorgung, Rohgasstaubgehalte und betriebliche Randbedingungen abgestimmt werden.

- Das Blähschlauchmaterial erreichte als Prototyp bei geeigneter Einstellung der Abreinigungsparameter Standzeiten von 1000 Betriebsstunden bis zur Rißbildung.

Für die Ausführung der Mikroprozessorsteuerung wurde ein Neuro-Fuzzy-Konzept mit folgenden Festlegungen erarbeitet:

- Steuergröße: filtertechnische Gesamtleistung
- Stellgröße: Umlaufzeit der Druckluftimpulse
- Folge- und Meßgröße: Druckverlust der Filterelemente

Für die Mikroprozessorsteuerung wurde von IUTA ein Programm mit folgenden Elementen innerhalb einer speicherprogrammierbaren Steuerung entwickelt:

- Rechenprogramm zur Bestimmung der filtertechnischen Gesamtleistung
- Meßprogramm zur Ermittlung der Hauptmeßgröße Filterdruckverlust
- Fuzzyprogramm zur Überwachung des optimalen Betriebspunktes bei minimalem Energieverbrauch bei gleichzeitig reduzierten Emissionswerten in Reingas
- Neuroprogramm zur Erkennung unterschiedlicher Betriebszustände und zur Feinoptimierung des Fuzzy-Programms

Die Meßwerterfassung und die Programmabarbeitung der speicherprogrammierbaren Steuerung erreicht durch hohe Meß- und Rechengeschwindigkeiten eine extrem feine Auflösung und erfaßt sehr kurzzeitige Staubkonzentrationsspitzen im Reingas. Die SPS kann nach Auffinden und Einstellung des Betriebsbereichs des minimalen Energieverbrauchs bei sehr geringen Reingasstaubemissionen des Abscheiders sehr frühzeitig ein sich veränderndes Systemverhalten und Parametertrends in den vorgegebenen Grenzen erkennen und die Stellgröße Umlaufzeit nach den programmierten Neuro-Fuzzy-Algorithmen anpassen.

Die Erprobung der Mikroprozessorsteuerung erfolgte am IUTA-Industriefiltermodul und am ILK Dresden am Versuchsstand zur Blähschlauchregenerierung. Die Ziele des F&E-Vorhabens wurden erreicht und eine Weiterentwicklung zur Marktreife des selbstoptimierenden Abreinigungssystems, das für Hersteller, Zulieferer und Betreiber von Abscheideranlagen eine kostensparende und umweltschonende Alternative zur herkömmlichen Abreinigungssystemen darstellt, ist innerhalb von zwei bis drei Jahren erreichbar.

6 Ausblick

Aus den Ergebnissen dieses Forschungsprojektes zum Blähschlauchverfahren läßt sich erkennen, daß die Blähschlauchgeometrie und das Blähschlauchmaterial die wesentlichen Elemente sind, die in einem Nachfolgeprojekt für einen universellen Einsatz in Textilschlauchfiltermodulen optimiert werden sollten.

Eine kostengünstige Beschichtung der verwendeten Styrol-Butadien-Kautschuk-Folie mit einer perforierten Silikonfolie für höhere Betriebstemperaturen sowie eine Kombination aus SBR und weiteren Materialien (z. B. Naturkautschukfolie) um die Elastizität und Verschleißfestigkeit zu steigern, würde das Blähschlauchverfahren zur Marktreife verhelfen.

Ebenso sind Standzeituntersuchungen notwendig, um den Einfluß der Stützkorbgeometrie auf den Energieverbrauch, die Lebensdauer der Blähschläuche und des Textilfiltertuches bei der Blähschlauch-Abreinigung zu untersuchen. Eine Optimierung der bisher eingesetzten, für das Pulse-Jet-Verfahren konstruierten Stützkorbgeometrien hinsichtlich eines optimalen Impulsaustausches zwischen Blähschlauch und Textilfilter, würde den Druckluftverbrauch und den Materialverschleiß der Blähschläuche bei der Blähschlauch-Abreinigung noch weiter senken und die Handhabung des Verfahrens verbessern. Dabei könnten z. B. in das Filtertuch eingenähte Stützelemente vielversprechende Lösungen bieten.

Der Einsatz der selbstoptimierenden Filtersteuerung zeigt, daß mit Hilfe der Fuzzy-technologie beim Betrieb eines Textilschlauchfilters das Optimum von minimalen Energieverbrauch bei sehr geringen Reingasemissionen und gleichzeitig schonender Abreinigung des Textilfilters selbsttätig eingestellt werden kann. Darüber hinaus kann die Mikroprozessorsteuerung auf wechselnde Betriebsbedingungen, wie z. B. Änderung der Staubart, optimal reagieren, wenn durch eine Lernphase mittels eines Neuro-Tools die damit verbundenen Randbedingungen für verschiedene typische Betriebszustände bekannt sind.

Da die dazu notwendigen Neuro-Fuzzy-Algorithmen nur unter Berücksichtigung der Änderung des Systemverhaltens eines Abscheiders bei Langzeitbetrieb gewonnen werden können, ist es auch für diesen Bereich sinnvoll, in einem Nachfolgeprojekt entsprechende weiterführende Untersuchungen zum Langzeitverhalten des Abscheiders durchzuführen, um die Filtersteuerung als marktfähiges Produkt an bestehende Abreinigungssysteme zu adaptieren.

Dabei sollte als ergänzende Forschungsarbeit der Aufbau und den Erhalt der Filterhilfsschicht mit Hilfe der SPS-gesteuerten Abreinigung, um die massenbezogenen Emissionen an Staubpartikeln und die Emissionen an kleinen Partikeln (0,2 bis 0,5 µm) deutlich zu senken, optimiert werden.

7 Verzeichnis der Formelzeichen

A_F - Gesamtfilterfläche des Abscheiders

$A_{F,A}$ - Filterfläche des Abscheiders

$A_{F,S}$ - Filterfläche des Filterschlauches

K_1, K_2, K_3 - Konstanten zur Bestimmung der Regenerierungsleistung

N_{BS} - Anzahl der Blähschläuche

N_D - Gesamtanzahl der Düsenbohrungen

N_{DR} - Anzahl der Düsenrohre je Düsenstock

N_{DS} - Anzahl der Düsenstöcke

N_{EV} - Anzahl der Entspannungsventile je Düsenstock

N_R - Anzahl der Filterschlauchreihen

N_S - Gesamtanzahl der Filterschläuche

$N_{S;R}$ - Anzahl der Filterschläuche je Schlauchreihe

N_V - Anzahl der Druckluftventile

P_F - Filtrationsleistung

P_G - filtertechnische Gesamtleistung

P_R - Regenerierungsleistung

R - Gaskonstante

R^2 - Summe der Fehlerquadrate der Regression

R_G - Gesamtabscheidegrad

R_L - Gaskonstante der Luft

T_{R1} - Ruhetemperatur im Druckluftspeicher vor dem Impuls

V_A - Abscheidervolumenstrom

$V_{A,ST}$ - Abscheidervolumenstrom, Standardwert

V_D - Druckluftverbrauch des Abscheiders

$V_{D,I}$ - Druckluftverbrauch pro Impuls

V_K - Volumen des Druckluftspeichers

a_o - Konstante des Polynomansatzes für die Filtrationsleistung

a_1 - Konstante des Polynomansatzes für die Filtrationsleistung

a_2 - Konstante des Polynomansatzes für die Filtrationsleistung

a_3 - Konstante des Polynomansatzes für die Filtrationsleistung

$\overline{a_0}$ - Konstante des Linearansatzes für die Filtrationsleistung

$\overline{a_1}$ - Konstante des Linearansatzes für die Filtrationsleistung

a_D	- Abstand Düsenbohrung – Filterboden
a_S	- Filterschlauchteilung
b_o, b_2, b_3	- Konstanten der Normalform der 1. Ableitung
$d_{50}(Q_3)$	- mittlerer Partikeldurchmesser der Q_3-Verteilung
d_{BS}	- Durchmesser des Blähschlauches
d_D	- Durchmesser der Druckluftdüse
d_S	- Durchmesser des Filterschlauches
d_{SK}	- kleinster Innendurchmesser der Schlauchkupplung
e	- spezifische Arbeitsübertragung
k_{Re}	- Reinluftstaubkonzentration
$\overline{K_{Re}}$	- mittlere Reinluftstaubkonzentration
$k_{Re,\,max}$	- maximale Reinluftstaubkonzentration nach der Abreinigung
$K_{Re,max}$	- Maximalwert aller gemessenen Reinluftstaubkonzentrationen
k_{Roh}	- Rohluftstaubkonzentration
$k_{Roh,ST}$	- Rohluftstaubkonzentration, Standardwert
l_{BS}	- Länge des Blähschlauches
l_S	- Länge des Filterschlauches
m_D	- Durckluftmassenverbrauch des Abscheiders
$m_{D,A}$	- mittlerer Druckluftverbrauch des Abscheiders
m_I	- Druckluftverbrauch pro Impuls
m_S	- Staubmassenstrom
$m_{S,ST}$	- Staubmassenstrom, Standardwert
p_R	- Regenerierungsdruck (Überdruck)
p_{R1}	- Druck im Druckluftspeicher vor dem Impuls (Absolutdruck)
p_{R2}	- Druck im Druckluftspeicher nach dem Impuls (Absolutdruck)
$p_{R,ST}$	- Abreinigungsdruck, Standardwert
p_{R1}	- Ruhedruck im Druckluftspeicher vor dem Impuls
p_{R2}	- Ruhedruck im Druckluftspeicher nach dem Impuls
p_b	- Umgebungsdruck
$p_{Stat,Reln}$	- statischer Druck in der Reinluftkammer
$p_{Stat,Roh}$	- statischer Druck in der Rohluftkammer
q	- Filterflächenbelastung
q_{ST}	- Filterflächenbelastung, Standardwert
t_I	- Impulszeit
$t_{I,ST}$	- Impulszeit, Standardwert

t_T	- Taktzeit der Druckluftimpulse
$\overline{t_T}$	- mittlere Taktzeit der Druckluftimpulse
$t_{T,min}$	- Taktzeit der Druckluftimpulse, Minimalwert
t_U	- Umlaufzeit der Druckluftimpulse
$\overline{t_T}$	- mittlere Umlaufzeit der Druckluftimpulse
$t_{U,ST}$	- Umlaufzeit der Druckluftimpulse, Standardwert
$t_{U,max}$	- Umlaufzeit der Druckluftimpulse, Maximalwert
$t_{U,min}$	- Umlaufzeit der Druckluftimpulse, Minimalwert
$t_{U,opt}$	- Umlaufzeit der Druckluftimpulse, Optimalwert
x	- Variable für Regression
y	- Variable für Regression
$\overline{\Delta p_{FE}}$	- mittlerer Druckverlust der Filterelemente im stabilen Meßbereich
Δp_{FE}	- Druckverlust der Filterelemente
$\Delta p_{FE,1}$	- Druckverlust der Filterelemente vor dem Impuls
$\Delta p_{FE,2}$	- Druckverlust der Filterelemente nach dem Impuls
Δt_U	- Schrittweite der Umlaufzeit der Druckluftimpulse
$\delta \overline{\Delta p_{FE}} / \delta t$	- mittlerer zeitliche Filterdruckverlustgradient
κ	- Isentropenexponent
$\rho_{L,N}$	- Dichte der Luft beim technischen Normzustand
ρ_S	- Staubdichte

8 Literatur

/1/ Pilz, Löffler, van Ackeren
Filterschlauchabreinigung mittels eines membranumschlossenen Gasdruckstoß-Abreinigungssystems
Staub-Reinhaltung der Luft 54 (1994), S. 175 - 181

/2/ van Ackeren
Vorrichtung zum Abreinigen eines Schlauchfilters
Patentschrift DE 41 14 626 C 2, 30. 4. 91

/3/ Frenzel
Untersuchungen zum Energie- und Abscheideverhalten von Großraum- und Normalfilterpatronen bei unterschiedlichen staub-, filter- und regenerierungstechnischen Bedingungen
ILK Dresden, Forschungsbericht ILK-AB-7/95-516, 30. 06. 1995

/4/ Frenzel, Both
Zwischenbericht 1997 zum AiF-Projektes:
Selbstoptimierendes Abreinigungssystem für filternde Abscheider
IUTA, ILK Dresden, Forschungsbericht 1997

/5/ Frenzel, Schluppkothen
Zwischenbericht 1998 zum AiF-Projektes:
Selbstoptimierendes Abreinigungssystem für filternde Abscheider
IUTA, ILK Dresden, Forschungsbericht 1998

/6/ Kiendl
Fuzzy Control methodenorientiert
R. Oldenbourg Verlag München Wien 1997

/7/ Kahlert
Fuzzy Control für Ingenieure
Analyse, Synthese und Optimierung von Fuzzy-Regelungssystemen
Vieweg Verlag 1995

/8/ Siemens AG
Simatic S7 und Simatic WinCC: Fuzzy Control ++
Benutzerhandbuch
Siemens AG Automation & Drives, Erlangen 1999

/9/ Siemens AG
Simatic S7 und Simatic WinCC: Neuro Systems 1.0
Benutzerhandbuch
Siemens AG Automation & Drives, Erlangen 1999

/10/ Siemens AG
Simatic S7 Step 7 V5.0
Benutzerhandbuch
Siemens AG Automation & Drives, Erlangen 1999

/11/ Siemens AG
WinCC 4.02
Benutzerhandbuch
Siemens AG Automation & Drives, Erlangen 1999

/12/ Siemens AG
S7 134 FM
Benutzerhandbücher
Siemens AG Automation & Drives, Erlangen 1999

/13/ Hans Berger, Siemens AG
Automatisieren mit STEP 7 in FUP-
Speicherprogrammierbare Steuerungen S7-300/400
Publicis MCD Verlag, Erlangen/München 1997

/14/ VDI 3926/ Blatt 1: Prüfung von Filtermedien für Abreinigungsfilter.
Dezember 1994

/15/ INTENSIV-FILTER: Taschenbuch Entstaubungstechnik Filtermedien.
INTENSIV-FILTER GMBH & CO.KG, Velbert, 1989

/16/ Mündliche Auskunft Herr Dr. van Ackeren
Ingenieurbüro Dr. van Ackeren, Duisburg

/17/ Mündliche Auskunft Herr Süßkraut
Fa. MSR Schlauchtechnik, Hünxe

/18/ Mündliche Auskunft Herr Gau und Herr Nappert
Fa. Sahlberg, Feldkirchen

/19/ Mündliche Auskunft Herr Wallmeier
Produktentwicklung der Fa. Continental, Hannover