



Versuchsanlage

<u>TECHNISCHE BESCHREIBUNG DER PFE-VERSUCHSANLAGE</u>	<u>2</u>
<u>1.1 MECHANISCHER AUFBAU</u>	<u>2</u>
<u>1.1.1 PRODUKTAUFGABE</u>	<u>2</u>
<u>1.1.2 FÖRDERGAS:</u>	<u>3</u>
<u>1.1.3 FÖRDERROHRSYSTEM (LEITUNG 1, PFE SCHUBTAKT)</u>	<u>3</u>
<u>1.1.4 FÖRDERROHRSYSTEM (LEITUNG 2)</u>	<u>3</u>
<u>1.2 LEITTECHNIK</u>	<u>4</u>
<u>1.2.1 STEUERUNG</u>	<u>4</u>
<u>1.2.2 VISUALISIERUNG/BEDIENUNG</u>	<u>5</u>
<u>2 VORTEILE DES PFE SCHUBTAKT-SYSTEMS</u>	<u>14</u>
<u>2.1 ANWENDUNGSBEREICHE UND BESONDERE MERKMALE</u>	<u>14</u>
<u>2.2 ZUVERLÄSSIGKEIT, VERFÜGBARKEIT</u>	<u>14</u>
<u>3 BEISPIEL: FÖRDERVERSUCHE MIT SILIZIUMOXID</u>	<u>16</u>
<u>3.1 ERGEBNISSE VERSUCHSREIHE 1</u>	<u>16</u>
<u>3.2 ERGEBNISSE VERSUCHSREIHE 2</u>	<u>17</u>
<u>4 BEISPIEL: FÖRDERVERSUCHE MIT TIERMEHL</u>	<u>19</u>
<u>4.1 ERGEBNISSE VERSUCHSREIHE 1</u>	<u>19</u>
<u>4.2 ERGEBNISSE VERSUCHSREIHE 2</u>	<u>20</u>



Technische Beschreibung der PFE-Versuchsanlage

1.1 Mechanischer Aufbau



1.1.1 Produktaufgabe

System:	PFE Druckgefäßförderer
Bauart:	Untenentleerer
Gefäß Nutzinhalt:	500 l
Austragssystem:	PFE Belüftungskonus (Edelstahlgewebe-Konus) mit separat geschalteter Belüftung
Aufgabesystem:	PFE Aufgabeschuh mit separat geschalteter Aufgabeluft
Nachbeschleunigung:	PFE Ringspaltdüse mit separat geschalteter Düsenluft (nur bei herkömmlichen Förderverfahren aktiv)
Einlaufverschluss:	PFE Zentraleinlauf
Drucküberwachung:	Messumformer 4-20mA mit frontbündiger Membrane



Versuchsanlage

1.1.2 Fördergas:

Druckluft: Werksnetz, 6,0 BarÜ
Regelung: über PFE-Werkluftentnahmestation mit frei einstellbarem Differenzdruckmengenregler 0-300 Nm₃/h
Massenstrommessung: über Thermischen Massenstrommesser DN 50, System Variomass, hochgeschwindigkeitskalibriert bis 190m/s, Aufzeichnung über Massenstromzähler sowie Registrierung der Kurven über Visualisierungssystem ZENON

1.1.3 Förderrohrsystem (Leitung 1, PFE Schubtakt)



Werkstoff: nahtlos gezogenes Stahlrohr DIN 2448
Abmessungen: DN65 (76,1*5.6 mm)
Förderweg: ca. 60 m
davon vertikal: 2 Steigstrecken mit insgesamt ca. 6 m
Anzahl Umlenkungen: 2 x 45°, 5 x 90°, 1 x Siloeinlauf 90°
Umlenkensystem: PFE Förderrohrbögen r=1000 mm
Drucküberwachung: 4 Stk. Messumformer 4-20mA/0-6 bar mit frontbündiger Membrane gleichmäßig über die Leitung verteilt jeweils am Anfang des Überwachungsabschnittes.
Bypasssystem: 42 PFE Rückdruckventile mit 21 einzeln ansteuerbaren 2/2Wege Magnetventilen, in Gruppen den Überwachungsabschnitten zugeordnet.

1.1.4 Förderrohrsystem (Leitung 2)

Werkstoff: nahtlos gezogenes Stahlrohr DIN 2448
Abmessungen: DN65 (76,1*5.6 mm)



Versuchsanlage

Förderweg: ca. 60 m
davon vertikal: 2 Steigstrecken mit insgesamt ca. 6 m
Anzahl Umlenkungen: 2 x 45°, 5 x 90°, 1 x Siloeinlauf 90°
Umlenkensystem: PFE Umlenkstation
Drucküberwachung: 1 Stk. Meßumformer 4-20mA mit frontbündiger Membrane am Anfang der Leitung

Empfangsbehälter:

Werkstoff: St 37
Bauform: zylindrische Schweißkonstruktion mit 60°Konus
Nutzvolumen: 500 l
Auslauf: DN250, Vorabsperung über elektropneumatische Absperrklappe
Entstaubung: Bunkeraufsatzfilter in der Ausführung als Patronenfilter, Abreinigung elektropneumatisch
Förderleitungsanschluss: über Schwerkraftabscheider DN250

1.2 Leittechnik

1.2.1 Steuerung



Die Steuerung erfolgt über eine speicherprogrammierbare Steuerung Fabrikat Siemens, Typ 100U mit einer CPU103. Der Austausch binärer Signale in und aus dem Prozeß erfolgt über Digitale E/A Karten in konventioneller Einzel-Verdrahtung. Sämtliche analogen Signale aus dem Prozeß werden über 4-20 mA Analogeingangskarten in die SPS eingelesen und stehen dort für die Verarbeitung durch die Steuerungssoftware zur Verfügung. Bei Ausfall des Visualisierungssystems bleibt die Anlagenfunktion (Automatik) in vollem Umfang erhalten. Die Bedienung erfolgt in diesem Falle über die Bedienelemente am Steuerschrank der Anlage.



Versuchsanlage

1.2.2 Visualisierung/Bedienung



Die Leitstation der Förderanlage basiert auf einem marktüblichen, leistungsfähigen Personal Computer. Für höhere Umgebungsanforderungen kommen Industrie-PC's zum Einsatz.

Das Softwarepaket ZENON^v für die graphische Bedienoberfläche basiert auf MS-Windows. Die Bedienung erfolgt angelehnt an MS-Windows Standard, das heißt einfache Prozessbedienung mit Maus und Tastatur. Die unter Windows mögliche Überlagerung vieler Fenster ist dabei stark eingeschränkt, um dem Bediener die Übersicht zu erleichtern. An PC-Peripherie (Monitor, Drucker, Maus, Tastatur) ist einsetzbar, was der Markt für windowsfähige Rechner zur Verfügung stellt. Die Ankopplung des Visualisierungs-Systems erfolgt über eine serielle Schnittstelle direkt an die SPS (PG-Schnittstelle). Zur Darstellung des Prozessgeschehens sind anlagenbezogene Grafikbilder realisiert, die auf die spezifischen Anforderungen des Betreibers abgestimmt werden können.

Aktuelle Prozessdaten und Prozesszustände lassen sich in digitaler oder in analoger Form (zum Beispiel als Bargraphen, Füllflächen und Trendfenster) an geeigneter Position einbinden.

In Abhängigkeit von Prozesszuständen können die graphischen Symbole ausgetauscht werden, blinken, sowie ihre Farbe und ihre Position im Grafikbild ändern.

Im Falle der hier dargestellten Versuchsanlage werden im Anlagenübersichtsbild die Statusmeldungen der Antriebe, also Endlagen und Störmeldungen via Farbumschlag der Symbole, Störmeldungen zudem als Klartextmeldungen in der Kopfzeile angezeigt.

Alle relevanten Messungen wie Förderdruck „Gefäß“, Förderdruck in den einzelnen Rohrleitungsabschnitten, sowie der Fördergasmassenstrom werden zum Einen als eingebettete Messwertanzeigen in digitaler Form dargestellt, zum Anderen lassen sie sich als eingebettete Trendkurven im Übersichtsbild



Versuchsanlage

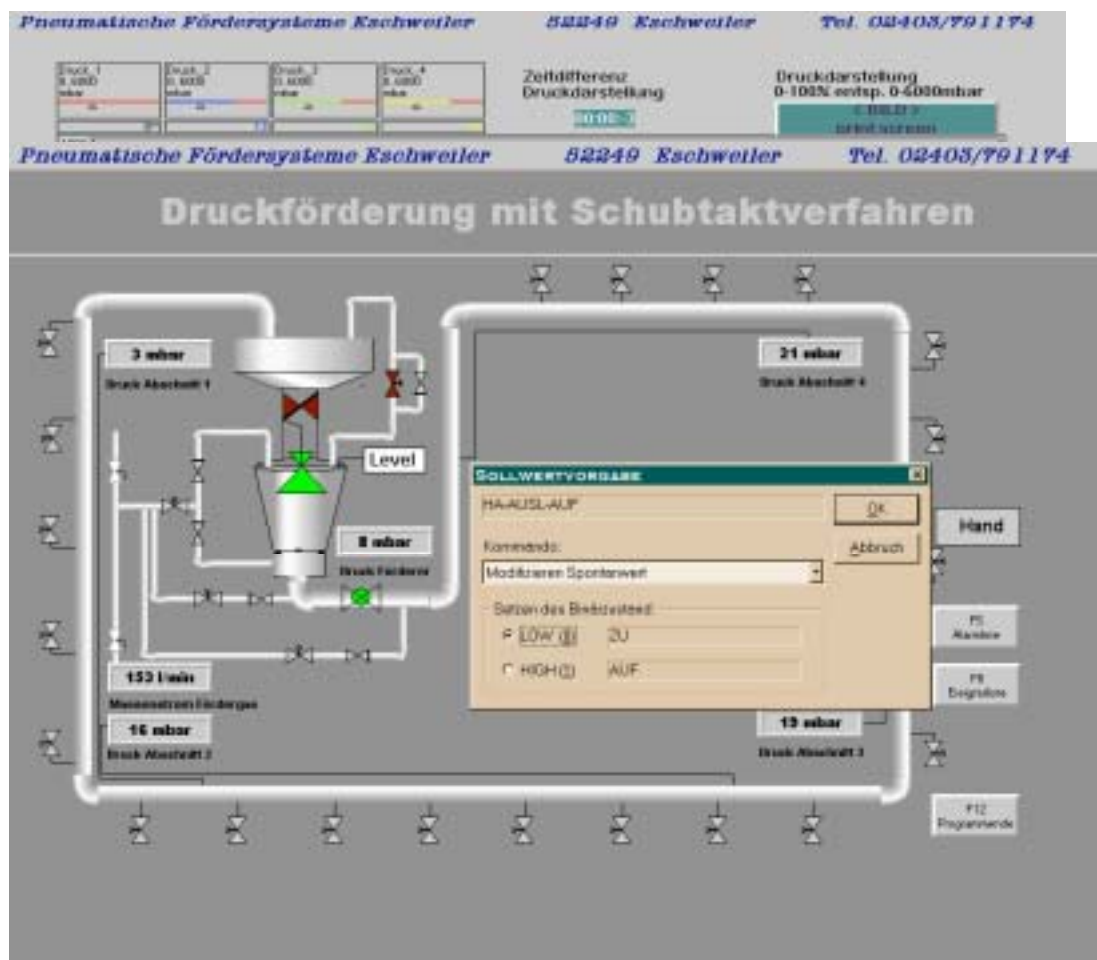
einblenden. Der momentane Druckverlust jedes einzelnen Rohrleitungsabschnittes wird zudem durch 4-stufigen Farbumschlag der Förderrohrleitung veranschaulicht (Grenzwertüberschreitungen bzw. aktive Druckstufe).





Versuchsanlage

Ebenso lassen sich die Werte für den momentanen Druckverlust der einzelnen Förderleitungsabschnitte (von den einzelnen Druckmessungen abgeleitete Werte) wahlweise als eingebettete Trendkurven oder als Kurvenschar in Vollbilddarstellung über eingebettete Button abrufen.



Umfangreiche Handfunktionen erlauben die Bedienung aller Antriebe direkt vom Leitstand aus.



Versuchsanlage

Über folgende Anwahlbutton im Fußbereich des Übersichtsbildes werden weitere Bilder angewählt:

[Grenzwerte
Abschnitt 1-4](#)

für die Eingabe/Änderung der Grenzwerte zur Umschaltung zwischen den Druckstufen in den einzelnen Rohrleitungsabschnitten. Zur besseren Übersicht bei Änderungen „on the fly“ werden die aktuellen Meßwerte auch in dieser Maske angezeigt.

Pneumatische Förder Systeme Eschweiler *52249 Eschweiler* *Tel. 02405/791174*

Grenzwerte eingeben

Grenzwert 1 Abschnitt 1	100 mbar	Wert P1	Grenzwert 1 Abschnitt 2	100 mbar	Wert P2
Grenzwert 2 Abschnitt 1	150 mbar	100 mbar	Grenzwert 2 Abschnitt 2	150 mbar	13 mbar
Grenzwert 3 Abschnitt 1	200 mbar	See mbar	Grenzwert 3 Abschnitt 2	200 mbar	1 mbar
Grenzwert 4 Abschnitt 1	350 mbar		Grenzwert 4 Abschnitt 2	350 mbar	
Grenzwert 1 Abschnitt 3	100 mbar	Wert P3	Grenzwert 1 Abschnitt 4	100 mbar	Wert P4
Grenzwert 2 Abschnitt 3	150 mbar	14 mbar	Grenzwert 2 Abschnitt 4	150 mbar	18 mbar
Grenzwert 3 Abschnitt 3	200 mbar	Wert P3-F2	Grenzwert 3 Abschnitt 4	200 mbar	Wert P4-F2
Grenzwert 4 Abschnitt 3	350 mbar		Grenzwert 4 Abschnitt 4	350 mbar	1 mbar

Anlagenbild aufrufen Grenzwerte Abschnitt 1-4 Bitmuster P > MIN Bitmuster P > MAX 1 Bitmuster P > MAX 2 Bitmuster P > MAX 3 Grundtakt und Zellversatz



Versuchsanlage

Bitmuster
P>MIN

für die Eingabe der in den einzelnen Takten zu öffnenden Ventile, sowie der gewünschten Öffnungszeiten in dieser Druckstufe (getrennt für jeden Abschnitt).

Pneumatische Förderysteme Eschweiler 52249 Eschweiler Tel. 02405/791174

Öffnungszeiten und Bitmuster

P > MIN

	Ventil 6	Ventil 5	Ventil 4	Ventil 3	Ventil 2	Ventil 1	
Ventilfolge Takt 0 P > MIN							Öffnungszeit Abschnitt 1 <input type="text" value="10 sek/100"/>
Ventilfolge Takt 1 P > MIN							Öffnungszeit Abschnitt 2 <input type="text" value="10 sek/100"/>
Ventilfolge Takt 2 P > MIN							Öffnungszeit Abschnitt <input type="text" value="10 sek/100"/>
Ventilfolge Takt 3 P > MIN							Öffnungszeit Abschnitt <input type="text" value="10 sek/100"/>
Ventilfolge Takt 4 P > MIN							
Ventilfolge Takt 5 P > MIN							

Anlagenbild aufrufen Grenzwerte Abschnitt 1-4 Bitmuster P > MIN Bitmuster P > MAX 1 Bitmuster P > MAX 2 Bitmuster P > MAX 3 Grundtakt und Zeitversatz



Versuchsanlage

Bitmuster
P>MAX 1

für die Eingabe der in den einzelnen Takten zu öffnenden Ventile, sowie der gewünschten Öffnungszeiten in dieser Druckstufe (getrennt für jeden Abschnitt).

Pneumatische Förder Systeme Eschweiler *52249 Eschweiler* *Tel. 02403/791174*

Öffnungszeiten und Bitmuster

P > MAX1

	Ventil 6	Ventil 5	Ventil 4	Ventil 3	Ventil 2	Ventil 1	
Ventilfolge Takt 0 P > MAX 1							Öffnungszeit Abschnitt 1
Ventilfolge Takt 1 P > MAX 1							15 sek./100
Ventilfolge Takt 2 P > MAX 1							Öffnungszeit Abschnitt 2
Ventilfolge Takt 3 P > MAX 1							15 sek./100
Ventilfolge Takt 4 P > MAX 1							Öffnungszeit Abschnitt
Ventilfolge Takt 5 P > MAX 1							15 sek./100
Ventilfolge Takt 6 P > MAX 1							Öffnungszeit Abschnitt

Anlagenbild aufrufen Grenzwerte Abschnitt 1-4 Bitmuster P > MIN Bitmuster P > MAX 1 Bitmuster P > MAX 2 Bitmuster P > MAX 3 Grundtakt und Zeitversatz

Bitmuster
P>MAX 2

für die Eingabe der in den einzelnen Takten zu öffnenden Ventile, sowie der gewünschten Öffnungszeiten in dieser Druckstufe (getrennt für jeden Abschnitt).



Versuchsanlage

Pneumatische Förder Systeme Eschweiler *52249 Eschweiler* *Tel. 02403/791174*

Öffnungszeiten und Bitmuster

P > MAX 2

	Ventil 6	Ventil 5	Ventil 4	Ventil 3	Ventil 2	Ventil 1	
Ventilfolge Takt 0 P > MAX 2							Öffnungszeit Abschnitt 1 <input type="text" value="15 sek./100"/> Öffnungszeit Abschnitt 2 <input type="text" value="15 sek./100"/> Öffnungszeit Abschnitt <input type="text" value="15 sek./100"/> Öffnungszeit Abschnitt <input type="text" value="15 sek./100"/>
Ventilfolge Takt 1 P > MAX 2							
Ventilfolge Takt 2 P > MAX 2							
Ventilfolge Takt 3 P > MAX 2							
Ventilfolge Takt 4 P > MAX 2							
Ventilfolge Takt 5 P > MAX 2							

Anlagenbild aufrufen Grenzwerte Abschnitt 1-4 Bitmuster P > MIN Bitmuster P > MAX 1 Bitmuster P > MAX 2 Bitmuster P > MAX 3 Grundtakt und Zeitversatz



Versuchsanlage

Bitmuster
P>MAX 3

für die Eingabe der in den einzelnen Takten zu öffnenden Ventile, sowie der gewünschten Öffnungszeiten in dieser Druckstufe (getrennt für jeden Abschnitt).

Pneumatische Förderysteme Eschweiler 52249 Eschweiler Tel. 02403/791174

Öffnungszeiten und Bitmuster

P > MAX 3

	Ventil 6	Ventil 5	Ventil 4	Ventil 3	Ventil 2	Ventil 1	
Ventilfolge Takt 0 P > MAX 3							Öffnungszeit Abschnitt 1
Ventilfolge Takt 1 P > MAX 3							Öffnungszeit Abschnitt 2
Ventilfolge Takt 2 P > MAX 3							Öffnungszeit Abschnitt
Ventilfolge Takt 3 P > MAX 3							Öffnungszeit Abschnitt
Ventilfolge Takt 4 P > MAX 3							
Ventilfolge Takt 5 P > MAX 3							

35 sek/100
45 sek/100
45 sek/100
45 sek/100

Anlagenbild aufrufen Grenzwerte Abschnitt 1-4 Bitmuster P > MIN Bitmuster P > MAX 1 Bitmuster P > MAX 2 Bitmuster P > MAX 3 Grundtakt und Zeitversatz



Versuchsanlage

Grundtakt und Zeitversatz

für die Eingabe der Taktfrequenz des Schubtaktsystems, sowie für die Eingabe eines zeitlichen Versatzes des Beginns der jeweiligen Öffnungszeit der einzelnen Abschnitte untereinander.

Pneumatische Förder Systeme Eschweiler 52249 Eschweiler Tel. 02403/791174

Grundtakt und Zeitversatz

Grundtakt	<input type="text" value="65 sek./100"/>
Versatz	
öffnen Abschnitt 1	<input type="text" value="30 sek./100"/>
öffnen Abschnitt 2	<input type="text" value="20 sek./100"/>
öffnen Abschnitt 3	<input type="text" value="10 sek./100"/>

Anlagenbild aufrufen Grenzwerte Abschnitt 1-4 Bildmuster P > MIN Bildmuster P > MAX 1 Bildmuster P > MAX 2 Bildmuster P > MAX 3 Grundtakt und Zeitversatz



2 Vorteile des PFE Schubtakt-Systems

2.1 Anwendungsbereiche und besondere Merkmale

Das PFE Schubtaktssystem erlaubt die Förderung von Schüttgütern mit extrem geringen Fördergeschwindigkeiten, die in der Regel weit unter der Stopfgrenze herkömmlicher Dichtstromfördersysteme liegen. Es findet daher vor allem dort seinen Einsatz, wo geringe Fördergeschwindigkeiten von besonderem Vorteil oder sogar zwingend erforderlich sind (meist wegen hoch abrasiver, kohäsiver oder extrem empfindlicher Fördergüter), und diese Förderung von herkömmlichen Dichtstrom-Fördersystemen nicht- oder nur unzureichend erfüllt werden kann.

Ein weiteres besonderes Merkmal des Systems ist die Fähigkeit, eine beladene Förderrohrleitung nach Abschaltung des Fördergases erneut wieder anzufahren. Dies ist vor allem dort von Vorteil, wo besonderer Wert auf die Einsparung von Energie bzw. teurem Fördergas (z.B. Inertgas) gelegt werden muß. Die fördertechnisch ungünstigen An- und Abfahrvorgänge der Förderrohrleitung können durch diese besondere Eigenschaft auf ein Minimum beschränkt werden.

2.2 Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit

Die Frage nach Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit hat die Entwicklung pneumatischer Bypass-Fördersysteme seit den (negativen) Erfahrungen mit den Bypasssystemen der ersten Generation begleitet. Verstopfte, oder durch Abrasion zerstörte Nebenleitungen, häufige Ausfälle durch verschmutzte Überströmventile, sowie aufwendige und kostenintensive Wartung bzw. Reparatur dieser Anlagen brachte die Systeme in Verruf.

🕒 **Zuverlässigkeit durch geeignete Konstruktion:**

PFE verfolgt von je her konsequent das Konzept der Vermeidung komplizierter Mechanik für die Steuerung des Bypasssystems und verwendet auch keine aufwendigen Sonderanfertigungen für die Förderrohrleitung.

Stattdessen setzt PFE auf die Möglichkeiten der modernen Leittechnik. Das System erfordert daher auch keine empfindlichen und/oder komplizierten Überströmventile für die Eindüsung der Begleitluft. Die einfachen, aber hoch effizienten PFE-Rückdruckventile gewährleisten eine zuverlässige Rückschlagfunktion und schützen somit die räumlich abgesetzten elektrischen Taktventile (2/2 Wege Membranventile). Die Erfassung der relevanten Daten für die Steuerung/Regelung des Systems erfolgt über robuste und äußerst zuverlässige Druckmessumformer. Zum Schutz der eigentlichen Meßzellen sind die Meßumformer mit frontbündigen Edelstahlmembranen ausgestattet. Die Auswertung erfolgt



Versuchsanlage

abgesetzt in der Steuerung der Anlage.

🕒 **Verfügbarkeit durch geeignete Konstruktion**

Die Rückdruckventile lassen sich bedingt durch ihre einfache, bedienerfreundlich durchdachte Konstruktion ohne besondere Fachkenntnis in wenigen Minuten komplett austauschen oder zerlegen. Dabei sind keinerlei Einstellarbeiten erforderlich.

Das Parametrieren/Einstellen der Anlage (Grenzwerte, Öffnungszeiten, Taktzeiten, „Bitmuster“ usw.) erfolgt menügeführt direkt über die Visualisierung. Die Einstellung der Ventile erfolgt dabei in der Regel abschnittsweise und für jede Druckstufe getrennt. Dabei ist es zusätzlich möglich (z.B. für „Problemzonen“ im Bereich von Umlenkungen), absolut unabhängige Einstellung jedes Einzelventils vorzunehmen. Auch hierfür sind keine Programmierkenntnisse erforderlich.

Einstellungsänderungen lassen sich in wenigen Sekunden, z.B. zu Optimierungszwecken, „on the fly“, also während eines laufenden Fördervorgangs durchführen, das Ergebnis des Optimierungsversuchs kann direkt am Bildschirm verfolgt werden (Trendkurven, Messwerte, Förderstatistik).

🕒 **Verfügbarkeit durch Selbstüberwachung**

Die konsequente Nutzung der Möglichkeiten einer vollelektronisch geregelten Anlage erlaubt umfangreiche Selbstüberwachung des Systems. Die Palette der Fehlererkennungsmaßnahmen reicht von der Leitungsbruchüberwachung externer Sensoren, über die Langzeitüberwachung von Förderzeiten, Förderdruck und Fördergasverbrauch, bis hin zu zyklischen –und/oder Ereignisgesteuerten Selbsttestroutinen, bei denen vollautomatisch die Funktion jedes Ventils sowie die Gas-Dichtigkeit des gesamten Systems geprüft werden kann. Denkbar in diesem Zusammenhang sind sogar spezielle Testläufe, die Rückschlüsse über die ordnungsgemäße Funktion der Rückdruckventile zulassen.



3 Beispiel: Förderversuche mit Siliziumoxid

Es wurden zwei Versuchsreihen durchgeführt.

Während der ersten Versuchsreihe wurde die Anlage mit 21 Rückdruckventilen mit einem Abstand von ca. 2500 – 3000 mm zwischen den einzelnen Ventilen betrieben.

Für die zweite Versuchsreihe wurde die Anlage mit annähernd der doppelten Anzahl von Rückdruckventilen betrieben, der Abstand betrug somit nur noch ca. 1250-1500 mm.

Die Chargengröße betrug 500 bzw. 400 kg. In allen Fällen wurde die Leitung 1 gefahren. Neben den Versuchen mit dem Schubtaktverfahren wurden auch einige Versuch im herkömmlichen Dichtstromverfahren (ohne Begleitluft) durchgeführt.

3.1 Ergebnisse Versuchsreihe 1

(Einzelergebnisse siehe Anlage)

a) Schubtaktssystem

Durchschnittlich erreichte Beladung (○)	20
Fördergasgeschwindigkeit am Ende der Rohrleitung:	6-11 m/s
Fördergasvolumenstrom:	1,1-2,8 Nm ₃ /min
Förderdruck:	stark pulsierend 1,2 bis über 3 bar

Mit zunehmender Beladung deutliche Pulsation der Förderung, Druckschläge

b) herkömmliches Dichtstromsystem

Durchschnittlich erreichte Beladung (○)	30
Fördergasgeschwindigkeit am Ende der Rohrleitung:	ca. 18 m/s
Fördergasvolumenstrom:	3-4 Nm ₃ /min
Förderdruck:	1,8 bis 2,5 bar

Bewertung:

Die Ergebnisse der Schubtaktversuche der Versuchsreihe 1 waren unbefriedigend. Die zum Teil heftigen Druckschläge in der Förderrohrleitung weisen auf zu lange Förderpfropfen hin. Die hohen erforderlichen Verschiebedrücke von zum Teil über 3 bar führen nach Überschreiten des Losbrechmoments zu unkontrollierter Beschleunigung der Pfropfen. Diese schweren Pfropfen werden dann in den Umlenkungen abrupt abgebremst. Die Geräuschentwicklung durch die aufprallenden Pfropfen wurde zudem durch ungünstige Resonanzschwingungen des Stahlbaus verstärkt.



Versuchsanlage

3.2 Ergebnisse Versuchsreihe 2

(Einzelergebnisse siehe Anlage)

Schubtaktssystem

Durchschnittlich erreichte Beladung (○)	30
Fördergasgeschwindigkeit am Ende der Rohrleitung:	7,5-10,5 m/s
Fördergasvolumenstrom:	1,5-2,2 Nm ₃ /min
Förderdruck:	1,5 bis 2 bar

Erheblich geminderte Pulsationen der Förderung, deutlich geringerer Förderdruck bei gleichzeitig um 50% gesteigerter Beladung

Zusammenfassende Bewertung:

Die Ergebnisse der Schubtaktversuche der Versuchsreihe 2 sind als befriedigend zu bewerten. Die Versuche bestätigten die an das Verfahren gestellten Erwartungen. Die während der Versuche gesammelten Daten und Erfahrungen bilden eine ausreichende Basis für die Auslegung der geplanten Anlagen. Die grundlegend unterschiedlichen Ergebnisse aus Versuchsreihe 1 und 2 belegen und unterstreichen dabei eindrucksvoll den Stellenwert von Versuchsdurchführungen im Industriemaßstab.

Die Versuche mit dem herkömmlichen Dichtstromverfahren lieferte im Grunde die erwarteten Ergebnisse. Die erzielte Beladung von $\text{○} > 30$ stellt zwar einen akzeptablen Wert dar, die erforderlichen Geschwindigkeiten für eine halbwegs sichere Förderung sind jedoch hinsichtlich des zu erwartenden Verschleißes an der Rohrleitung durch das hoch abrasive Produkt nicht zu vertreten.

Bei der Auswahl des Förderverfahrens für die geplanten Anlagen sollte auf die Erfüllung folgender Kriterien besonderer Wert gelegt werden:

- ⌚ Der Abstand zwischen den einzelnen Einspeisungen in die Förderrohrleitung sollte 1 m nicht wesentlich überschreiten.
- ⌚ Produktberührte, und damit erhöhtem Verschleiß ausgesetzte Komponenten sollten unkompliziert, unempfindlich und leicht zu warten sein.



Versuchsanlage

- ⌚ Optimierungen der Anlageneinstellung, insbesondere der Einspeiseventile sollte jederzeit ohne deren Demontage und ohne aufwendige Prozeduren möglichst im laufenden Betrieb erfolgen können.
- ⌚ Einstellparameter müssen jederzeit überprüfbar sein und dürfen nicht durch Einflüsse wie mechanischen Verschleiß einer schleichenden Drift unterliegen.
- ⌚ Veränderungen / Fehlfunktionen im Förderverhalten sollten von der Anlage weitestgehend selbsttätig erkannt und in geeigneter Weise diagnostiziert und angezeigt werden.



4 Beispiel: Förderversuche mit Tiermehl

Es wurden zwei Versuchsreihen durchgeführt.
Während der ersten Versuchsreihe wurde Versuche mit unterschiedlichen Förderdrücken und Beladungen mit herkömmlichen Förderverfahren (Flugförderung und Dichtstrom) durchgeführt.

In der zweiten Versuchsreihe wurden ausnahmslos Förderversuche mit dem PFE Schubtaktverfahren (Dichtstrom/ Pfropfenförderung) gefahren.

4.1 **Ergebnisse Versuchsreihe 1**

a) Flugförderung (Förderdruck bewußt begrenzt auf max 500 mbar)

Realisierte Beladungen Beladung (○)	3-15
Fördergasgeschwindigkeit am Ende der Rohrleitung:	20 m/s
Fördergasvolumenstrom:	4 Nm ₃ /min
Fördergastemperatur	<10°C
Produkttemperatur	< 10°C
Förderdruck:	0,2 bis 0,5 bar

b) Flugförderung (Förderdruck bis 800 mbar)

Durchschnittlich erreichte Beladung (○)	25
Fördergasgeschwindigkeit am Ende der Rohrleitung:	25 m/s
Fördergasvolumenstrom:	5 Nm ₃ /min
Förderdruck:	0,8 bar

Mit zunehmender Beladung Pulsation der Förderung, oberhalb 800mbar Förderdruck schlagartiges Verstopfen der Förderrohrleitung, die grundsätzliche Problematik ließ sich auch nicht durch Erhöhung der Geschwindigkeiten beseitigen (äußerst geringe beherrschbare Stopfenlänge).

Bewertung:

Die Ergebnisse der Flugförderversuche der Versuchsreihe 1 lieferten befriedigende Ergebnisse. Die zum Teil heftigen Druckschläge oberhalb 800 mbar in der Förderrohrleitung markieren die Grenze der Flugförderung . Bei weiterer Beladung kommt es zu massiver Strähnen und Dünenbildung mit zeitweilig vollständig gefüllter Rohrleitung. Durch die hohen erforderlichen Verschiebedrücke der Stopfen kommt es zu massiven Druckschlägen und in der Folge zur Verstopfung der Förderrohrleitung.



Versuchsanlage

c) Dichtstromförderung

Versuche mit herkömmlichen Dichtstromverfahren lieferten im Grunde die erwarteten Ergebnisse, die sich schon bei den Flugförderungen bei 800mbar abzeichneten. Das Produkt ist aus derzeitiger Sicht mit herkömmlichen Dichtstromverfahren kaum zu beherrschen. Die erzielten Ergebnisse blieben deutlich hinter denen der Flugförderung zurück. Gleichzeitig stieg die Verstopfungsgefahr.

4.2 Ergebnisse Versuchsreihe 2

Schubtaktssystem

Durchschnittlich erreichte Beladung (○)	30
Fördergasgeschwindigkeit am Ende der Rohrleitung:	ca. 17 m/s
Fördergasvolumenstrom:	3,5-Nm ₃ /min
Förderdruck:	1,5 bar

Erheblich gesteigerte Beladung bei gleichzeitig verringerter Fördergeschwindigkeit

Zusammenfassende Bewertung:

Die Förderung des Produktes mit Niederdruckförderanlagen, beispielsweise zur dosierten Eindüsung in Verbrennungen, stellt grundsätzlich kein Problem dar. Vorausgesetzt: Den besonderen Eigenschaften des Produktes wird dabei ausreichend Rechnung getragen.

Hierbei ist vor allem die Wärmeempfindlichkeit zu beachten. Bei Fördergastemperaturen $>40^\circ$ und/oder hohen Fördergeschwindigkeiten sind Ablagerungen des Produktes an den Rohrleitungswandungen nicht nur im Krümmbereich festzustellen (Zuwachsen der Förderleitung). Der Problematik ist jedoch durch entsprechende Aufarbeitung der Förderluft (Kühler) und sorgfältiger Planung der Förderrohrleitungsführung (Reduzierung der erforderlichen Geschwindigkeiten) durchaus wirkungsvoll zu begegnen.

Die betriebssichere Förderung des Produktes mit hoher Leistung und/oder über weite Entfernungen kann aus derzeitiger Sicht nur im Flugförderverfahren, oder über besondere Bypassfördersysteme wie zum Beispiel das PFE Schubtaktssystem erfolgen.

Die Ergebnisse der Schubtaktversuche sind als befriedigend zu bewerten.



Versuchsanlage

--	--	--