

Entwässerung von Erzkonzentraten – Wege zur weiteren Restfeuchte-Verminderung

Werner Stahl, Harald Anlauf,
Reinhard Bott

Es wird eine Methode zur Beschreibung des Entfeuchtungsverhaltens feindisperser Filterkuchen in Abhängigkeit von der anliegenden Druckdifferenz, der Kuchenhöhe und der Entfeuchtungszeit mittels einer Laborfilterapparatur vorgestellt. Zielgrößen sind die erreichbare Absenkung der Produkt-Restfeuchte und der dafür erforderliche Aufwand an zu verdichtender Blasluft. Es wird die Übertragung der Basisdaten auf kontinuierliche Filter diskutiert und über den Aufbau eines Pilotdrehfilterversuchsstandes berichtet.

● **Dewatering of ore-concentrates – methods of further reduction of moisture content.** A method is presented describing the behaviour of dewatering of fine disperse filter cakes, depending on the effective pressure difference, cake length and dewatering time by using a laboratory filter apparatus. The attainable reduction of the moisture content and the necessary quantity of compressed air is the subject of the research. The transfer of the basic data to continuous filters will be discussed, and information be given on the design of a pilot drum filter plant.

● **Déshydratation de concentrés de minerai – méthodes d'une réduction ultérieure du degré d'humidité**

● **Desagüe de concentrados minerales – métodos para la ulterior reducción de la humedad residual**

Prof. Dr.-Ing. W. Stahl, Dipl.-Ing. H. Anlauf, Dipl.-Ing. R. Bott, Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik Universität Karlsruhe (TH), Postfach 63 80, 7500 Karlsruhe 1.

Gekürzter Vortrag von erstgenanntem Verfasser im Vortragskreis „Aufbereitung“ auf der GDMB-Hauptversammlung am 13. Mai 1982 in Freiburg (Brsg.).

Vollständiges Manuskript beim Verfasser erhältlich.

Manuskripteingang: 21. 1. 1983

1 Bedeutung weiterer Fortschritte auf dem Gebiet der Filtration

In der Aufbereitung besteht zunehmend die Aufgabe, schwierig zu filtrierende Massengüter durch mechanische Entwässerungsverfahren möglichst weit in der Restfeuchte abzusenken.

Die Gründe dafür sind verschieden. So geht es beispielsweise darum,

- bei der Filtration von Flotationskohlekonzentrat eine durch vermehrt anfallendes Feinstkorn steigende Restfeuchte unter ein gesetztes Feuchtelimit für die Kraftwerkskohle zu drücken;
- bei der Entfeuchtung von Kupferkonzentrat die nachfolgende teure thermische Trocknung zu vermindern oder ganz zu vermeiden;
- bei feiner aufgemahlten Eisenerzen trotz höherer spezifischer Oberfläche die Restfeuchte wegen der anschließenden Pelletierung nicht über ca. 9% ansteigen zu lassen.

Für derartige Entfeuchtungsaufgaben sind bisher weltweit eine große Zahl von kontinuierlichen Vakuumfiltern eingesetzt, bei denen aber auch heute schon vielfach die erreichte Restfeuchte im Verhältnis zur Produktionsrate nicht mehr befriedigt.

2 Stand des Wissens und Vorgehensweise

Der Vorgang des Trockensaugens bzw. -blasens von Filterkuchen ist bis heute nur unzureichend theoretisch

zu beschreiben. Bisher erarbeitete Modellansätze haben eine Reihe von Vereinfachungen und Idealisierungen zur Voraussetzung, die eine zuverlässige Vorhersage von Entfeuchtungsergebnissen realer Filterprodukte oft nicht mit genügender Genauigkeit zulassen.

Die hier beschriebene Arbeit hatte zum Ziel, ein anwendbares Auslegeverfahren zu schaffen, welches für beliebige Betriebsbedingungen im Vakuum- und im Druckbereich gültig sein sollte.

Es sollten keine irgendwie gearteten Annahmen getroffen werden, die eventuell nur von Modellsubstanzen erfüllt würden. Daher wurden ausschließlich reale, in der Aufbereitung vorkommende Suspensionen verwendet. Weiterhin wurden Filterkuchenhöhen und Entfeuchtungszeiten vorzugsweise in solchen Bereichen untersucht, in denen technische Drehfilter bevorzugt arbeiten werden.

Schließlich wurde auch der Einfluß des Filtertuches auf die Entfeuchtung berücksichtigt.

Grundlage jeder Aussage sollte also einzig und allein das gemessene, reale Verhalten des Filterkuchens sein.

3 Der Basistest

3.1 Versuchsapparatur

Kernstück der in Abbildung 1 dargestellten Versuchsanlage ist eine Labordrucknutsche mit 20 cm² Filterfläche. In der Nutsche können Filterkuchen von ca. 4 mm bis 25 mm Kuchenhöhe gebildet werden. Die Apparatur ist für Überdrücke bis 4 bar ausgelegt. Die Blasluft

wird, vom Kompressor kommend, mittels eines Reduzierventils auf den gewünschten Druck eingestellt und gelangt über einen Schwebekörperdurchflußmesser in die Nutsche. Die Stellung des Schwebekörpers als Maß für den Gasdurchsatz wird optisch erfaßt und aufgezeichnet. In Kombination mit Druckluft, aber auch ohne zusätzlichen Überdruck kann über eine Wasser-ringpumpe auch Unterdruck hinter dem Filtermedium erzeugt werden. Es kann also Druck-, Vakuum- und kombinierte Druck/Vakuum-Filtration (hyperbare Vakuum-Filtration) realisiert werden.

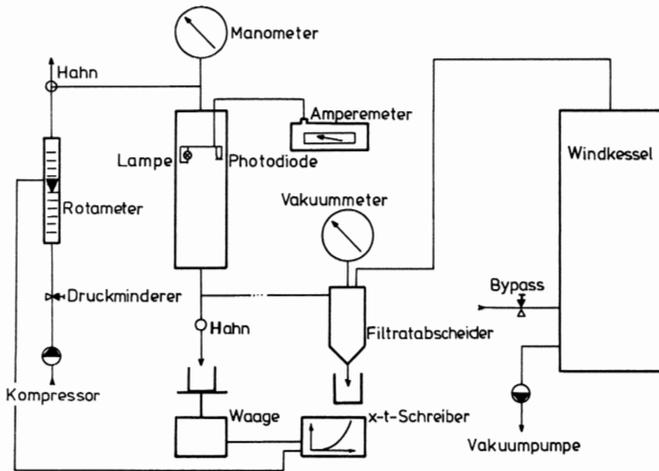


Abb. 1. Schematische Darstellung der Laborfilterapparatur (Drucknutsche)

Das verdrängte Filtrat wird auf einer elektronischen Waage registriert und seine Menge über der Zeit aufgezeichnet.

Der Moment des Umschlages von der Kuchenbildung zur Entfeuchtung des Filterkuchens wird unter Ausnutzung des unterschiedlichen Reflexionsverhaltens von Flüssigkeit und Kuchen mittels einer Kombination aus Lampe, Photodiode und Amperemeter erfaßt.

3.2 Typische Versuchsergebnisse

In Abbildung 2 sind, zusammengefaßt, typische Ergebnisse eines Experimentes zu sehen. Das erste Diagramm (2a) zeigt für konstante Druckdifferenz Δp , Kuchenhöhe h und Suspensionskonzentration c den Verlauf des Gasdurchsatzes \dot{V} über der Entfeuchtungszeit t_2 . Diese beginnt im Moment der Unterschreitung des Sättigungsgrades $S=1$. Während einer ersten Zeitspanne t_{20} von einigen Sekunden ist der Gasdurchsatz noch Null. Die im Haufwerk vorhandene, frei verschiebliche Flüssigkeit wird zunächst kolbenartig verdrängt.

Dieser Vorgang ist auch an der im zweiten Diagramm (2b) dargestellten korrespondierenden Restfeuchtekurve erkennbar. Von der ursprünglich vollen Sättigung des Kuchens sinkt die Feuchte zunächst sehr steil ab und nähert sich bei langen Blaszeiten schließlich der Grenze der mechanischen Entfeuchtung asymptotisch an.

Der für die Entfeuchtung getriebene Aufwand in Form von Verbrauch verdichteter Luft V ist schließlich im

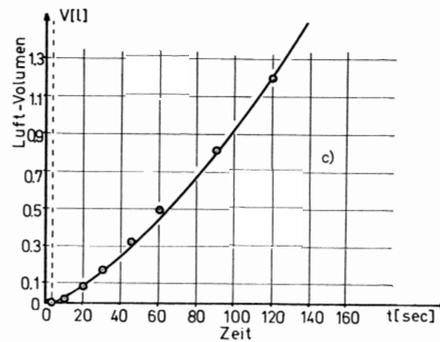
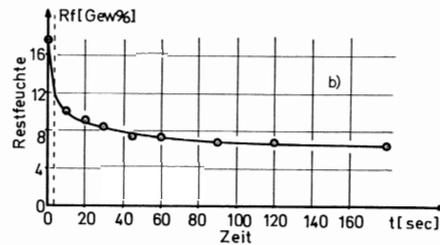
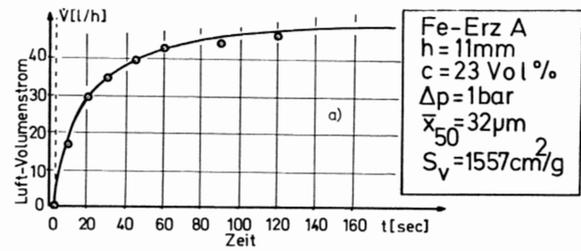


Abb. 2. Typische Ergebnisse eines Drucknutschenexperimentes bei konstanter Kuchenhöhe h , Suspensionskonzentration c und Druckdifferenz Δp für ein Eisenerz mit dem mittleren Korndurchmesser \bar{x}_{50} und der spezifischen Oberfläche S_v (Blaine)

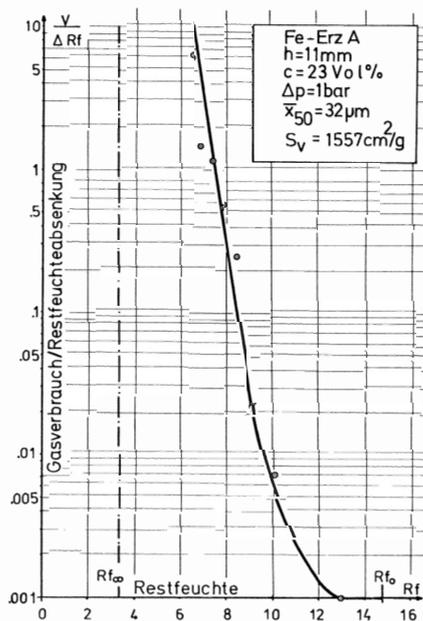


Abb. 3. Verlauf des pro abgesenktem Restfeuchteprozent erforderlichen Luftvolumens über der Restfeuchte

dritten Diagramm (2c) dargestellt worden. Die Kurve resultiert aus der Integration der im ersten Diagramm gezeigten Gasdurchsatzkurve.

Setzt man diesem Aufwand den Nutzen weiterer Restfeuchteabsenkung entgegen, so wird sofort sichtbar, daß diese Relation stark progressiv steigen muß. Dies bedeutet, daß man bei langen Entfeuchtungszeiten Gefahr läuft, um einiger Zehntelprozent Restfeuchteabsenkung willen, unwirtschaftlich viel Gas zu verbrauchen. Dies trifft besonders für die Druckfiltration zu.

Abbildung 3 zeigt diesen Verhältniswert als Ordinate. Es wurde der Verbrauch an verdichteter Luft pro weiteres Prozent Restfeuchteabsenkung aufgetragen. Das Diagramm wird im Verlauf der Entfeuchtung von dem Wert der Restfeuchte bei voller Sättigung Rf_0 aus durchlaufen. Im Bereich bis zum ersten Luftdurchbruch liegt die wirtschaftlichste Entfeuchtung. Dann steigt dieser Wert progressiv an, um bei der Grenze der hier möglichen Entfeuchtung bei Rf_∞ in die vertikale Asymptote überzugehen.

3.3 Beschreibung der Ergebnisse des Basistests

Versuche mit mehr als einem Dutzend Aufbereitungsprodukten haben bezüglich des Gasdurchsatzes die Erkenntnis gebracht, daß sich dieser in Abhängigkeit von der Zeit durch folgende Formel beschreiben läßt

$$\dot{V}_{(t)} = \dot{V}_\infty \cdot \exp\{-b \cdot (1/t_2 - t_{20})^c\}$$

Hierbei sind b und c Anpassungsgrößen, die aus dem Experiment bestimmt werden.

Zur Beschreibung des Restfeuchteverlaufes über der Zeit kann die Tatsache ausgenutzt werden, daß Gasdurchsatz und Restfeuchte in einem direkten Zusammenhang stehen. Verwendet man statt des Begriffes der Restfeuchte den Begriff des relativen Gasgehaltes des Haufwerks, der sich aus der Beziehung

$$\epsilon_{\text{gas}} + \epsilon_{\text{liq}} + \epsilon_{\text{sol}} = 1$$

ergibt, so kann man den oben erwähnten Sachverhalt wie in Abbildung 4 dargestellt, doppeltlogarithmisch

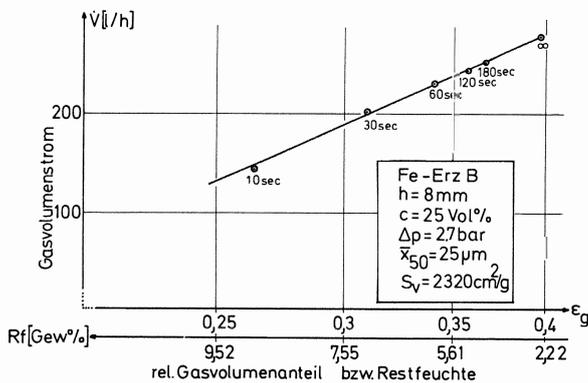


Abb. 4. Doppeltlogarithmisch dargestellter linearer Zusammenhang von Gasdurchsatz $\ln \dot{V}$ und Restfeuchte bzw. relativem Gasanteil $\ln \epsilon_g$

auftragen. Auf der Ordinate ist der Gasvolumenstrom \dot{V} und auf der Abszisse der relative Gasgehalt ϵ_{gas} bzw. die Restfeuchte Rf des feuchten Filterkuchens dargestellt. Die Entfeuchtungszeit erscheint jetzt als Parameter. Bei allen bisher durchgeführten Versuchen ergaben sich bei diesem Zusammenhang Geraden, die durch die obige Methode der regressionsanalytischen Erfassung des Vorganges auch in das Gebiet großer Zeiten, die nicht mehr durch Versuche abgedeckt sind, hineingerechnet werden können. Die Kurve endet mit dem Wert von $\epsilon_{\text{gas} \infty}$ bzw. Rf_∞ und \dot{V}_∞ .

Im Bereich unter 20 sec Blaszeit können die Meßwerte nach unten von der Geraden abweichen. Dies deutet darauf hin, daß die beiden Vorgänge „Kolbenabströmen“ und „Entfeuchten durch Luftdurchströmen“ nicht mit einer Unstetigkeit ineinander übergehen, sondern „verschliffen“ sind. Die Abweichungen liegen jedenfalls immer unter der gefundenen Geraden, so daß dies eine Auslegung nach der sicheren Seite bedeutet.

3.4 Erweiterung der Beschreibung der Entfeuchtung auf Druckdifferenz und Kuchenhöhe

Die bisher beschriebene Vorgehensweise bezog sich auf eine einzige Druckdifferenz und eine einzige Kuchenstärke. Um ein sog. Entfeuchtungskennfeld eines Produktes zu erhalten, ist es unumgänglich, Meßwerte für andere Druckdifferenzen und Kuchenhöhen experimentell zu ermitteln.

Betrachten wir zunächst das Entfeuchtungsverhalten bei verschiedenen Drücken. Entsprechend der technischen Durchführung des kontinuierlichen Filterprozesses wird der Kuchen aus der Suspension in allen Fällen unter derselben Druckdifferenz gebildet, die auch anschließend ohne Zwischenentlastung zur Entfeuchtung angelegt wird. Demzufolge werden alle Auswirkungen, die durch eine unterschiedliche Kuchenbildung entstehen können, im Entfeuchtungsverhalten mitgemessen.

In Abbildung 5 sind Meßergebnisse für verschiedene Druckdifferenzen Δp zusammengestellt. Beginnt man bei sehr kleinen Kuchenbildungs- und Entfeuchtungsdrücken, so tritt zunächst solange praktisch keine Verdrängung der Flüssigkeit ein, als der Kapillareingangs-

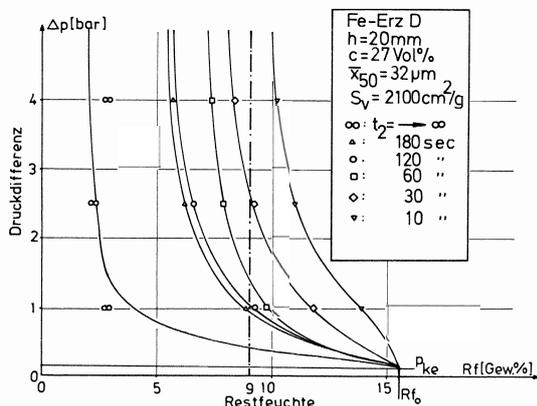


Abb. 5. Verlauf der Restfeuchteabsenkung in Abhängigkeit von der anliegenden Druckdifferenz für verschiedene Entfeuchtungszeiten

druck p_{ke} nicht überschritten wird. Erst danach fallen die Feuchten mit fortschreitender Zeit ab. Wenn auch die Versuchspunkte nur bis zu 180 sec reichen, so kann doch aus der oben geschilderten Berechnungsweise die mechanische Entfeuchtung ins Unendliche extrapoliert werden; sie sind im Diagramm nachgetragen.

Wie man sieht, werden bei diesem Produkt auch bei einer Druckdifferenz von etwa $\Delta p = 1$ bar nach genügend langer Zeit dieselben niederen Restfeuchten wie bei $\Delta p = 4$ bar erreicht. Entscheidend ist jedoch für die technische Anwendung erstens der „Zeitraffereffekt“ der Entfeuchtung, der bei höheren Druckdifferenzen erreicht wird und zweitens die dabei verbrauchte Menge an unterschiedlich hoch verdichteter Luft. Dieser „Zeitraffereffekt“ der Entfeuchtung bei höheren Druckdifferenzen ist bei diesem Produkt besonders ausgeprägt im Bereich von $\Delta p = 0,8$ bar (Vakuumfiltration) bis zu $\Delta p = 2$ bar (Druckfiltration oder Kombination aus Vakuum und Druck), so daß die zum Pelletieren dieses Erzes nötige Restfeuchte von maximal 9 Gew.-% jeweils durch die in Tabelle 1 angegebenen Kombinationen aus Druck und Entfeuchtungszeit erreicht werden können.

Tabelle 1
Druck/Zeit-Kombinationen zur Erreichung konstanter Restfeuchte von max. 9 Gew.-%

Druck Δp (bar)	4	2,7	1,4	1,5	0,95
Entfeuchtungszeit t_2 (sec)	20	30	60	120	180

Unter Vakuumbedingungen wären – bei dieser Kuchendicke von 20 mm – so große Saugzeiten nötig, daß sie auf kontinuierlichen Drehfiltern wegen der mit der Wurzel aus der Drehzahl absinkenden Produktionsrate nicht mehr gefahren werden könnten. Eine zusätzliche Erhöhung der Druckdifferenz, ausgehend vom Vakuum, um etwa 1 bar Überdruck auf den Kuchen würde schon eine erhebliche Zeitabkürzung erbringen.

Im nächsten Schritt werden Experimente bei wenigstens drei verschiedenen Kuchenhöhen (z. B. 5, 10, 20 mm) und drei verschiedenen Druckdifferenzen (z. B. 1, 2, 4 bar) angesetzt, wie sie dem Filterproblem angepaßt sind. Es müssen also maximal 9 Versuche durchgeführt werden, wobei aber sicherlich je ein Wiederholungsversuch zur Gewährleistung zuverlässiger Ergebnisse hinzukommt.

Dreidimensional, wie in den Abbildungen 6 und 7 dargestellt, bekommt man nun für jede festgelegte Entfeuchtungszeit z. B. $t_2 = 60$ sec als Ergebnis eine Raumfläche für das verbrauchte Gasvolumen und dazu eine Raumfläche der Restfeuchte zu dieser Zeit. Verschneidet man die Restfeuchteflächen mit der Horizontalen, wie dies für eine geforderte Maximalfeuchte zutrifft, so erhält man Alternativen von Kuchendicken und Druckdifferenzen beim Betrieb eines kontinuierlichen Filters mit einer fest eingestellten Geschwindigkeit. Diesen Varianten kann jeweils aus dem Gasdurchsatzdiagramm ein Gasverbrauch zugeordnet werden, der, mit der spezifischen Verdichtungsarbeit multipliziert, den Aufwand für das Erreichen dieser Restfeuchte darstellt.

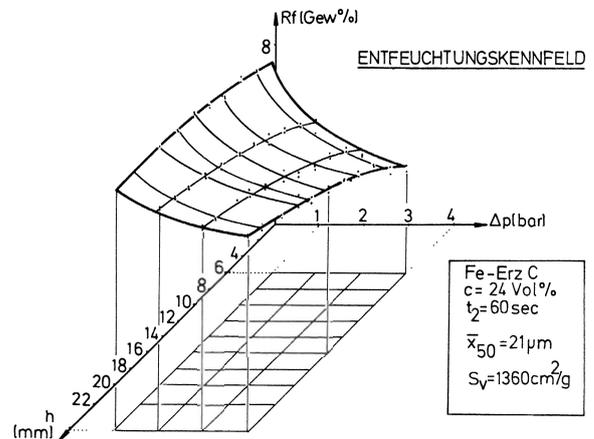


Abb. 6. Dreidimensionale Darstellung des Restfeuchteergebnisses in Abhängigkeit von Kuchenhöhe und Druckdifferenz bei einer konstanten Entfeuchtungszeit t_2 und Suspensionskonzentration c

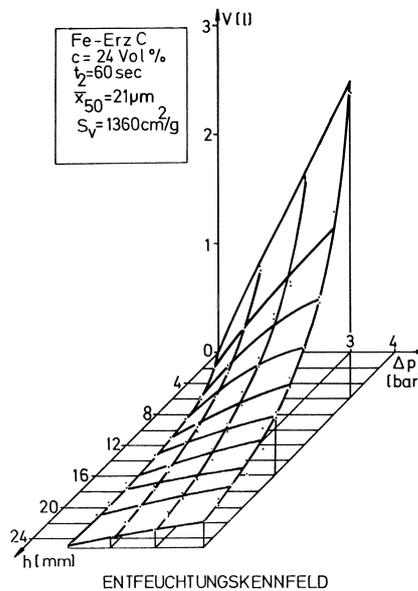


Abb. 7. Dreidimensionale Darstellung des zur Restfeuchteabsenkung in Abb. 6 gehörenden Gasverbrauches in Abhängigkeit von Kuchenhöhe und Druckdifferenz bei einer konstanten Entfeuchtungszeit t_2 und Suspensionskonzentration

Die rechnerische Beschreibung der entstehenden Flächen erfolgt durch Interpolation zwischen den durch Messung festgelegten Rasterpunkten. Für die Interpolation wurden alle erforderlichen Zusammenhänge durch Regressionsformeln erfaßt.

4 Übertragung der Basistests auf das Drehfilter

Man mag dieses auf mindestens 9 Versuche aufbauende Vorgehen für aufwendig halten und einwenden, daß man doch über den Zusammenhang der Kuchenbildung nur jeweils über die Drehzahl zusammengehörige Wertepaare von Kuchendicken und Entfeuch-

tungszeiten zu betrachten brauchte. Dies ist dann richtig, wenn durch ein gegebenes Drehfilter die Winkelverhältnisse von Kuchenbildungszone zu Trockenblaszone festgelegt sind. Es ist aber sicher nicht sinnvoll, diese Werte aus den Gewohnheiten der Vakuumfiltration bei Eintauchtiefen von 25 bis 37% vorzeitig festzulegen, wenn man später Optimaleinstellungen auffinden will. Es ist ganz und gar unzweckmäßig für Bandfilter, da diese im Verhältnis von Kuchenbildung zu Trockensaugzone in dieser Hinsicht völlig frei sind.

Es wird für die numerische Auswertung auf jeden Fall unumgänglich, einen Computer einzusetzen und die Einstellvarianten auf der Basis des wirklichen, experimentell gefundenen Entfeuchtungsverhaltens in verschiedenen Varianten durchzuspielen.

Obwohl die Basistests mit sehr großer Sorgfalt und mittlerweile großer Erfahrung gut reproduzierbar durchgeführt werden können, verbleiben doch, wie jeder Filterfachmann weiß, einige Imponderabilien, die den Wert bzw. die Aussagekraft solcher Basistests einschränken.

Wir wollen sie nur stichpunktartig angeben, um anzudeuten, daß zur Einführung der Auslegungsmethode in die großtechnische Praxis zusätzliche Pilotdrehfilterversuche nötig sind:

- die Abnahme des Kuchens vom Tuch;
- das Dauerstandverhalten des Filtertuchs; gleichbleibender Widerstand oder sukzessiv weitergehende Verstopfung;
- der Kuchenaufbau zwischen Basistest und Drehfilter kann unterschiedlich sein;
- das Gebiet eventuell auftretender Rißbildung bei dickeren Filterkuchen ist aus dem Basistest nicht klar abzugrenzen;
- Sedimentationserscheinungen im Filtertrog.

Diese Gründe und die Möglichkeit der Betriebsbedingungen von Vakuum bis auf 4 bar Überdruck und alle dazwischen liegenden Betriebszustände unmittelbar hintereinander vergleichend betreiben zu können, machen den Aufbau einer Pilotanlage notwendig. Diese ist inzwischen in unserem Institut installiert und erfolgreich mit einem sehr feinen Eisenerz in Betrieb genommen worden.

Eine schematische Darstellung dieser Anlage gibt Abbildung 8. Die Versuchsfilteranlage besteht aus einem Drehfilter, das in einem Druckraum untergebracht ist, der bis 4 bar Atmosphärenüberdruck ausgelegt wurde. Als Drehfilter dient ein Trommelfilter mit einer Fläche von $A = 0,72 \text{ m}^2$; es können jedoch auch ein Scheibenfilter bzw. ein Bandfilter im Druckraum eingesetzt werden. Der Druckbehälter kann über eine Flanschverbindung geöffnet und auseinandergefahren werden. Das Filter steht im Behälterinnern auf einer Konsole, die fest mit dem Klöpperboden verbunden ist. So ist der Filterapparat für Umbauarbeiten wie Tuchwechsel, Steuerkopfveränderungen, Inspektionen und Meßarbeiten leicht zugänglich.

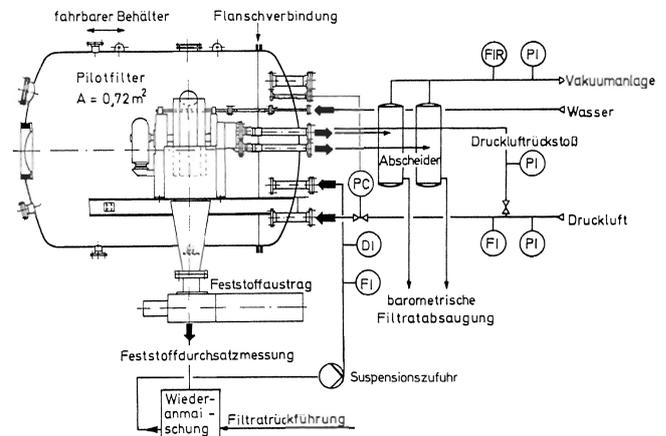


Abb. 8. Schematische Darstellung der Pilotfilteranlage mit in einem Druckbehälter montiertem Trommelfilter

Um die Menge des Untersuchungsgutes in einem labor-technisch sinnvollen Maße zu halten, wird die Versuchsanlage in Kreislauffahrweise betrieben. Die zu filtrierende Suspension wird außerhalb des Druckraumes in einem Rührbehälter bevorratet und von dort zum Filtertrög im Druckkessel gepumpt. Dabei wird radio-metrisch die Dichte und induktiv der Durchfluß gemessen. Der durch die hyperbare Vakuumfiltration anfiltrierte und entfeuchtete Filterkuchen wird nach der Kuchenabnahme über eine Zellenradschleuse aus dem Druckraum ausgeschleust, nach Probenahme in den Rührbehälter transportiert und dort zusammen mit dem ebenfalls zurückgeführten Filtrat wieder angemaischt. Das Zweiphasengemisch aus Luft und Filtrat wird nach der Fest-Flüssig-Trennung im Filter über die Filtratleitungen in die Abscheider abgeführt und dort separiert. Die Filtratabsaugung erfolgt über barometrische Rohre und einen barometrischen Fuß. Dort werden die Filtratströme gemessen, in einem Sammelbehälter aufgefangen und zum Wiederanrührbehälter zurückge-pumpt.

Zur Druckfiltration wird die Druckluft aus dem Haus-netz entnommen. Der Druckluftstrom wird über ein Stellventil geregelt, das mit einem Druckaufnehmer im Behälterinnern gekoppelt ist. Dadurch wird der Filtrationsdruck konstant gehalten. Nach dem eigentlichen Trennschritt im Filter entweicht und entspannt die Luft über das Filtratrohrsystem und die Abscheider. Dabei wird der tatsächlich durch den Filterkuchen hindurch-gesetzte Luftstrom gemessen und nach Druck- und Temperaturkorrektur in Normvolumen angegeben. Der zur Vakuumfiltration erforderliche Unterdruck wird mit einer Wasserringpumpe erzeugt und über die Abscheider an die Filterzellen der Trommel ange-legt.

Neue Ergebnisse der kontinuierlichen Druck- und hyperbaren Vakuumfiltration liegen inzwischen vor und wurden auf dem 112. AIME-Jahrestreffen in Atlanta/USA im März 1983 vorgestellt.