

Vergleichende Betrachtung zur Druck- und Druck/Vakuumfiltration *) Vom Verfasser überreicht

791)

A comparative consideration of pressure and pressure/vacuum filtration *)

Comparaison entre la filtration à pression et la filtration à pression/à vide

Comparación entre la filtración a presión y la filtración a presión/al vacío

Dr.-Ing. H. Anlauf, Karlsruhe

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden die Vakuum-, die Überdruck- und die kombinierte Druck/Vakuumfiltration einander vergleichend gegenübergestellt. Die Verschiebung des Druckniveaus in den Vakuum- oder den Überdruckbereich wird hinsichtlich der Auswirkungen auf Filterkuchenbildung, Restfeuchteabsenkung und Luftdurchsatz untersucht.

Am Beispiel der Filtration feinstkörniger Erz- und Mineralkonzentrate konnte gezeigt werden, daß die Leistung eines Filters durch die Wahl des Druckniveaus erheblich beeinflußt werden kann. Die Analyse der physikalischen Vorgänge in ein- und zweiphasig durchströmten porösen Haufwerken bildet die Grundlage für weitergehende Überlegungen zur Wahl optimaler Betriebsparameter und zur Gewährleistung eines wirtschaftlichen Filtereinsatzes.

Résumé

Dans le présent article l'auteur compare la filtration à vide, la filtration à surpression ainsi que la filtration combinée à pression/à vide. Le déplacement du niveau de pression vers la zone de vide ou de surpression est étudié, afin de connaître les répercussions correspondantes sur la formation du gâteau, la réduction de l'humidité résiduelle et le débit d'air.

C'est en citant l'exemple de la filtration de concentrés très fins de minerais et de minéraux qu'on a pu démontrer que le choix du niveau de pression permet d'influer beaucoup sur le rendement d'un filtre. L'analyse des processus physiques observés sur la matière tout-venant poreuse, à une ou deux phases de circulation, sert de base aux décisions postérieures concernant le choix du paramètre de service optimum et l'emploi économique des filtres.

Resumen

En el presente trabajo se comparan la filtración al vacío, la filtración a sobrepresión así como la filtración combinada a presión/al vacío. El desplazamiento del nivel de presión hacia la zona donde reina el vacío o la sobrepresión se estudia con respecto a las correspondientes repercusiones sobre la formación de la torta, la reducción de la humedad residual y el caudal de aire.

Tomando como ejemplo la filtración de concentrados finísimos de mena y de mineral, se ha podido demostrar que existe la posibilidad de influir considerablemente sobre el rendi-

Summary

This paper is concerned with a comparison of vacuum, overpressure and combined pressure/vacuum filtration. The movement of pressure level in the region of vacuum or overpressure was investigated in order to determine the effect on filter cake formation, reduction of residual moisture content and air throughput.

The filtration of very fine grained ore and mineral concentrates was used as an example to demonstrate that the filter output could be considerably affected by the choice of pressure level. The analysis of physical processes occurring when fluids flow through one or two phase porous masses is the basis for further considerations when choosing optimal process parameters and to warrant an economical utilisation of filters.

Introduction

In the solid/liquid separation process of very fine grained beneficiation slurries using continuously operating filters the question arises as to how the forcing potential necessary for formation and dewatering of the filter cake should be produced.

Principally, there are three possibilities if the atmospheric pressure is used as a standard for comparison:

- pure vacuum filtration;
- combined pressure/vacuum filtration;
- pure overpressure filtration.

If pressure differences of more than 0.8 bar are necessary, pure vacuum filtration is not possible.

The filtration pressure difference can be characterised quantitatively as well as by its position of pressure level. In order to evaluate the three varying factors mentioned, both economically and from a processing point of view, it is necessary to first clarify the physically bound differences which a shift of pressure level would have on formation and dewatering of the filter cake.

A first reference to this theme can be found in a publication from 1923 titled "filter effect"¹⁾. In the following time different authors had reported in agreement that the flow resistance of the filter elements used in vacuum filtration appeared to increase haphazardly during the time of operation. Especially the work done by Simon and Neth in 1927 is worth mentioning²⁾. A conclusive interpretation of the observed

*) Vortrag gehalten auf der GVC-Fachausschußsitzung am 13.3.1986 in Münster über Untersuchungen am Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik, Universität Karlsruhe (TH).

*) Paper presented at the GVC-Fachausschußsitzung in Münster (13.3.1986) concerning investigations at the Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik, Universität Karlsruhe (TH)

miento de un filtro a través del nivel de presión. El análisis de los procesos físicos observados en un todo uno poroso, con una o dos fases de circulación, sirve de base para posteriores decisiones sobre la elección de parámetros de servicio óptimos y para garantizar un empleo económico de los filtros.

Einführung

Bei der Fest/Flüssig-Trennung feinstkörniger Aufbereitungssuspensionen durch kontinuierlich arbeitende Filter stellt sich die Frage, auf welche Weise das erforderliche treibende Potential zur Kuchenbildung und -entfeuchtung erzeugt werden soll.

Wenn man den Atmosphärendruck als Vergleichsmaßstab anlegt, so existieren hierfür prinzipiell drei Möglichkeiten:

- reine Vakuumfiltration;
- kombinierte Druck/Vakuumfiltration;
- reine Überdruckfiltration.

Sofern Druckdifferenzen erforderlich sind, die einen Betrag von etwa 0,8 bar übersteigen, scheidet die reine Vakuumfiltration von vorneherein aus.

Die Filtrationsdruckdifferenz wird also sowohl durch ihren Betrag als auch durch die Lage des Druckniveaus charakterisiert. Um die genannten drei Varianten zur Erzeugung des notwendigen Druckgefälles nach wirtschaftlichen und verfahrenstechnischen Gesichtspunkten beurteilen zu können, sind zunächst die physikalisch begründeten Unterschiede zu klären, welche sich bei einer Verschiebung des Druckniveaus im Hinblick auf Kuchenbildung und -entfeuchtung ergeben können.

Erste Hinweise zu diesem Thema finden sich bereits in Veröffentlichungen aus dem Jahr 1923 unter dem Stichwort „Filtereffekt“¹⁾. Übereinstimmend wird von verschiedenen Autoren in der Folgezeit berichtet, daß der Durchströmungswiderstand von Filterelementen bei der Vakuumfiltration mit fortschreitender Zeit scheinbar regellos zugenommen habe. Hierbei sind besonders die systematischen Arbeiten von Simon und Neth von 1927 zu nennen²⁾. Eine schlüssige Deutung der beobachteten Phänomene erfolgte 1937 in einer Arbeit von Mehner, in welcher der „Filtereffekt“ auf die Ausscheidung von in der Flüssigkeit gelöstem Gas und auf das Wechselspiel zwischen treibendem Druckgefälle und wirksamen Kapillardrücken zurückgeführt wurde³⁾.

Im folgenden sollen diese Erkenntnisse aus dem Bereich der Durchströmung poröser Filterelemente mit klaren Flüssigkeiten auf die kuchenbildende Filtration angewendet werden.

Filterapparat und Versuchsprodukte

Die notwendigen experimentellen Arbeiten erfolgten im Labormaßstab mit Hilfe einer Labordruckfilterapparat⁴⁾. Die verwendete Drucknutsche besaß eine Filterfläche von 20 cm². Sie war dazu geeignet, Vakuum-, Überdruck- und Druck/Vakuumfiltration bis zu Druckdifferenzen von 4 bar zu betreiben. Die Filterkuchenhöhe variierte zwischen 4 und 25 mm. Als Filtermedien kamen monofile und multifile technische Gewebe zum Einsatz.

Als Versuchsprodukte wurden zwei hämatitische und ein limonitisches Eisenerzkonzentrat sowie ein Zinksulfid- und ein Barytkonzentrat verwendet.

Diese Suspensionen waren vom Standpunkt der Vakuumfiltration her als schwer filtrierbar einzustufen.

Tabelle 1 faßt einige charakteristische Merkmale der Partikelkollektive zusammen.

Einfluß des Druckniveaus auf die Filterkuchenbildung

Im Bereich der Filterkuchenbildung sind zwei Effekte denkbar, die von der Lage des Druckniveaus beeinflußt werden.

Senkt man den Druck im Haufwerk bis auf den Sättigungsdampfdruck des Wassers ab, so werden sich Dampfblasen

phenomena followed in 1937 in a thesis by Mehner in which the “filter effect“ is lead back to the desorption of gas dissolved in the liquid and the interchange of forcing pressure drops and effective capillary pressures³⁾.

These conclusions concerning clear fluids flowing through porous filter elements will be applied to investigate cake forming filtration.

Filter apparatus and experimental products

The necessary experimental work was carried out in bench scale using laboratory filter apparatus⁴⁾. The pressure filter cell used had a filter area of 20 cm². It was suitable for application in vacuum, overpressure and pressure/vacuum filtration, operating at pressure differences of up to 4 bar. The cake thickness varied between 4 and 25 mm. Monofile and multifile technical cloths were used as filter media.

Two hematite and one limonite iron ore concentrates as well as a zinc sulphide and a barite concentrate were used as test materials.

These suspensions were classified as difficult to filter with regard to vacuum filtration.

Table 1 contains some characteristic details of the particle collectives.

Influence of pressure level on filter cake formation

In the field of filter cake formation there are two conceivable effects which can be influenced by the position of pressure level. When the pressure in the cake mass is reduced to the saturation pressure of water, steam bubbles will form in the filter cake. This situation is not relevant to the field of application investigated here.

However, realistic would be a desorption of air dissolved in the filtrate, when the saturation limit is exceeded due to the pressure drop within the filter cake. If and how much air could be released by a pressure drop is described by Henry's law:

$$\Sigma c(i) = \Sigma K_H(i) \cdot p(i) \quad [1]$$

The concentration of dissolved gas components c(i) depends on the Henry Constants K_H(i) which is dependent on material and temperature, and their partial pressures p(i). With increasing pressure and falling temperature the amount of air soluble in the filtrate increases.

If, for example, in the case of vacuum filtration the pressure is reduced from 1 to 0.2 bar, at a constant temperature of 20°C, inversely 75 mm³ air (0.2 bar, 20°C) can be released from 1 cm³ water.

Desorption of air from the solution occurs in the form of bubbles. The gas bubbles first adhere to the surface of the particles, increase in size, and then loosen from the surface when the forces caused by the filtrate flow exceed the adhesive forces.

When local condition of the capillary forces and forcing pressure fall allow, these bubbles are able to pass through the contracted pores. Otherwise these contracted pores will be blocked by the bubbles and the flow resistance of this system consisting of filter cake and cloth will increase.

The first step taken in the experimental investigation of this problem consisted of clarifying the question of whether the presence of released gas bubbles in the suspension i.e. gas

Tabelle 1: Charakteristische Feststoffmerkmale

Table 1: Characteristic details of compound solids

Produkt Product	ρ_s g/cm ³	$x_{50.3}$ µm	$x_{90.3}/x_{10.3}$	$S_V^{(FSSS)}$ cm ⁻¹
lim. Fe	4,70	32,6	30,8	12784
häm. Fe 1	4,85	34,0	20,3	8661
häm. Fe 2	4,90	26,0	12,3	11495
ZnS	4,22	26,0	25,6	11163
Baryt	4,21	3,5	8,3	24000

im Filterkuchen bilden. Dieser Fall ist für das hier untersuchte Anwendungsgebiet nicht relevant.

Als realistisch kann hingegen eine Desorption von im Filtrat gelöster Luft angenommen werden, wenn aufgrund des Druckabfalles im Filterkuchen die Sättigungsgrenze überschritten wird. Ob und wieviel Luft bei einer Druckabsenkung frei werden kann, wird durch das Henry-Gesetz beschrieben:

$$\Sigma c(i) = \Sigma K_H(i) \cdot p(i) \quad [1]$$

Die Konzentration der gelösten Gaskomponenten $c(i)$ ist abhängig von den stoff- und temperaturabhängigen Henry-Konstanten $K_H(i)$ und ihren Partialdrücken $p(i)$. Mit steigendem Druck und sinkender Temperatur steigt die im Filtrat lösliche Luftmenge.

Wenn man nun beispielsweise im Falle der Vakuumfiltration den Druck bei konstanter Temperatur von 20°C von 1 bar auf 0,2 bar absenkt, so können umgekehrt aus 1 cm³ Wasser maximal 75 mm³ Luft (0,2 bar, 20°C) frei werden.

Die Ausscheidung der Luft aus der Lösung erfolgt in Form von Blasen. Die Gasblasen haften zunächst an der Feststoffoberfläche der Partikeln, werden dann größer und lösen sich ab, wenn die Haftkräfte zwischen Blase und Partikel von den durch die Filtratströmung ausgeübten Kräften übertroffen werden.

Wenn es die örtlichen Verhältnisse des Kapillardruckes und des treibenden Druckgefälles zulassen, können diese Blasen durch Porenverengungen hindurchtreten. Andernfalls werden diese Porenverengungen durch die Blasen blockiert, und der Durchströmungswiderstand des Systems aus Filterkuchen und -tuch steigt an.

Der erste Schritt in der experimentellen Untersuchung dieser Problematik bestand in der Klärung der Frage, ob die Existenz freier Gasblasen in der Suspension bzw. durch Desorptionsvorgänge freigesetztes Gas einen Einfluß auf die entstehende Filterkuchenstruktur besitzen.

Bild 1 zeigt einige repräsentative Versuchsergebnisse für die Verteilung der örtlichen Porosität über der Kuchenhöhe.

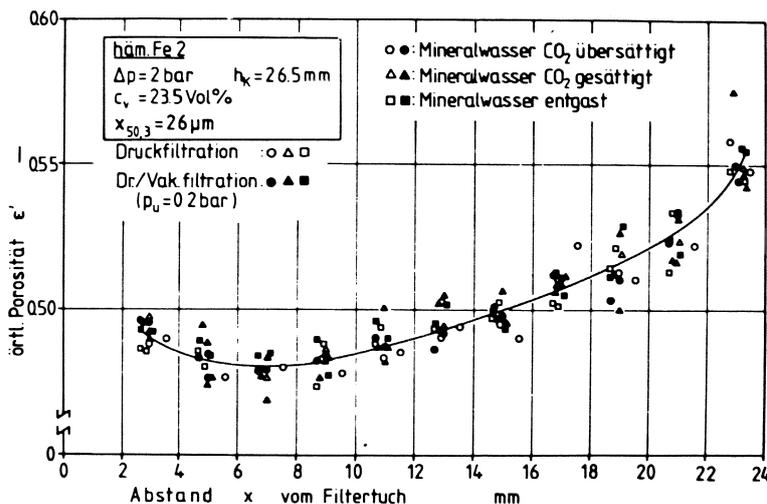


Bild 1: Einfluß von Gasblasen auf die Kuchenstruktur

In Übereinstimmung mit der Theorie kompressibler Filterkuchenbildung nahm die Porosität, vom Filtertuch ausgehend, zur Kuchenoberfläche hin zu⁵⁾. Wie weiterhin aus den eingezeichneten Meßpunkten zu ersehen ist, spielte die Wahl des Druckniveaus im Bereich der reinen Überdruck- oder der Druck/Vakuumfiltration für den Kuchenaufbau genauso wenig eine Rolle, wie der Gasgehalt der filtrierten Suspensionen.

Im Gegensatz zur Kuchenstruktur konnten jedoch die Durchströmungseigenschaften des Systems aus Kuchen

released by desorption has an effect on the structure of the filter cake being formed.

Fig. 1 shows some representative experimental results concerning the distribution of local porosity throughout the filter mass.

In agreement with the theory of compressible filter cake formation⁵⁾, the porosity, beginning at the filter cloth, increases in the direction of the cake surface. Further, can be seen from the points measured that the choice of pressure level with regard to pure overpressure or pressure/vacuum filtration did not affect the cake structure nor did the gas content of the filtered suspensions.

Contrary to the cake structure, the flow properties of the cake and cloth system were highly influenced by the choice of pressure level.

Fig. 2 shows the results of a comparison of cake formation times in cases of pressure and pressure/vacuum filtration. The amounts of pressure difference and the cake thickness were varied.

The suspension samples were saturated with air at atmospheric pressure before commencing filtration. Desorption processes will preferably occur in the case of combined pressure/vacuum filtration. A much longer time was needed for cake formation as in the case of overpressure filtration.

The smaller the amount of pressure difference and the greater the cake thickness chosen, the more pronounced were the differences in cake formation times. At the lowest pressure differences and thickest cake, these differences were up to 24%.

Alternatively, it can be recognised that the effect of pressure level on cake formation time when applied to high pressure differences and thin cakes becomes more and more irrelevant. At $\Delta p = 1.8$ bar and $h_k = 6$ mm, the difference was only 1.4%.

This is especially important because the areas of aspired high throughput of continuous rotary filters lie in this sphere⁶⁾.

Fig. 1. Influence of gas bubbles on cake structure

An increased blockade of pores may not only be caused by a reduction of the forcing pressure fall, as shown in Fig. 2, but may also be caused by an increase in capillary forces due to a decrease of pore diameters.

Fig. 3 demonstrates this using three solid materials of different grain size.

With increasing specific surface of the solid material i. e. with decreasing pore diameter of the filter masses, the blockade of pores obviously increases, all other factors remaining equal.

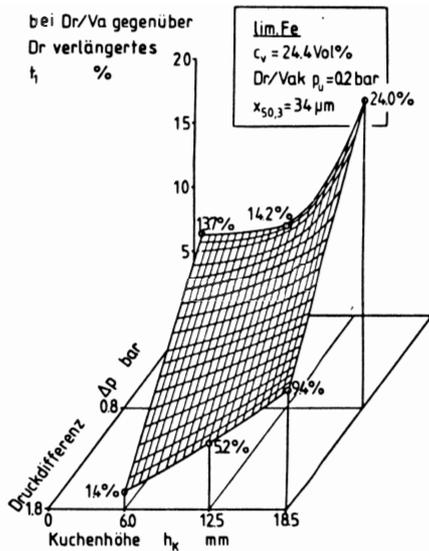


Bild 2: Vergleich der Kuchenbildungszeiten bei variiertem Druckdifferenz und Kuchenhöhe

Fig. 2: Comparison of cake formation time by varying pressure difference and cake thickness

und Tuch sehr empfindlich durch die Wahl des Druckniveaus beeinflusst werden.

Bild 2 gibt hierzu die Ergebnisse eines Vergleiches der Kuchenbildungszeiten zwischen Druck- und Druck/Vakuumfiltration wieder. Der Betrag der Druckdifferenz und die Kuchenhöhe wurden variiert.

Die Suspensionsproben waren vor Filtrationsbeginn bei Atmosphärendruck mit Luft gesättigt. Desorptionsvorgänge konnten also vorzugsweise bei der kombinierten Druck/Vakuumfiltration auftreten. Die hierbei benötigten Kuchenbildungszeiten waren denn auch gegenüber der Überdruckfiltration deutlich erhöht.

Je geringer der Betrag der Druckdifferenz und je größer die Kuchenhöhe gewählt wurden, desto gravierender waren die Unterschiede in der Kuchenbildungszeit. Bei den niedrigsten Druckdifferenzen und den höchsten Kuchen betragen sie bis zu 24 %.

Auf der anderen Seite ist zu erkennen, daß der Einfluß des Druckniveaus auf die Kuchenbildungszeit in Richtung hoher Druckdifferenzen und niedriger Kuchen immer unbedeutender wurde. Bei $\Delta p = 1,8$ bar und $h_K = 6$ mm betrug der Unterschied nur noch 1,4 %.

Dies ist vor allem deshalb von Bedeutung, weil hier die Gebiete der angestrebten hohen Durchsatzleistung kontinuierlicher Drehfilter liegen ⁽⁶⁾.

Eine verstärkte Porenblockade kann jedoch nicht nur durch eine Verringerung des treibenden Druckgefälles entstehen, wie in Bild 2 gezeigt wurde, sondern auch durch eine Erhöhung der auftretenden Kapillardrücke infolge von sich veringenden Porendurchmessern.

In Bild 3 wird dies am Beispiel von drei Feststoffen unterschiedlichen Feinheitsgrades verdeutlicht.

Mit steigender spezifischer Oberfläche des Feststoffes, d. h. mit abnehmendem mittlerem Porendurchmesser der Haufwerke, nimmt die Porenblockade bei ansonsten vergleichbaren Bedingungen offensichtlich zu.

Zusammenfassend sollen nun noch einmal einige Tendenzen angegeben werden, die sich bei einer Gasausscheidung in Kuchen und Tuch im Hinblick auf die Kuchenbildung ergeben können. Dabei wird vorausgesetzt, daß die Suspension vor der Filtration mit Gas gesättigt sei und eine Desorption bei der Druckabsenkung im Kuchen stattfinden kann.

— Senkt man, ausgehend von einem konstant gehaltenen Druck über der Suspension, den Druck hinter dem Filtermedium schrittweise ab, so hat dies drei Konsequenzen:

- die Menge des aus der Lösung frei werdenden Gases nimmt zu;

Summarising, some tendencies will be stated, which with respect to cake formation, can result due to gas release in cake and cloth. It is presumed that the suspension is saturated with gas before filtration and that a desorption can take place in the cake when pressure falls.

— If, by constant pressure on the suspension, the pressure behind the filter medium is gradually lowered, this will have three consequences:

- the amount of gas released from the solution increases;
- the volume of the released gas bubbles increases;
- the forcing pressure fall increases and less pores are blocked.

— If the cake thickness and thus also the filtration time is increased, more gas will be released, in accordance with the kinetics of the desorption process. Simultaneously, the local pressure fall decreases, so that an increased blockade of pores must be expected.

— The finer the pores of the cake mass flow through, the higher will be the capillary pressure within the pores and the more likely would pores be blocked by gas bubbles.

— The finer the pores of the filter medium compared to the filter cake on it are, the more likely would gas bubbles which could still flow through the filter cake mass block the filter cloth.

Influence of pressure level on residual moisture content of filter cakes

As soon as the first pores are freed of liquid, two parallel phases, one liquid and one gaseous, flow through the cake mass. The exchange of gas and liquid now possible within the filter cake and the condition of the gas itself introduce further varying factors which are dependent on the position of pressure level. They must be investigated as to their importance with regard to dewatering.

Entirely dominant for the mechanical dewatering is the overcoming of capillary pressures present in the cake pores using the externally applied pressure difference.

Dewatering due to a dynamic air pressure on the upright flowing liquid bridges between particles or due to a dragging effect of flowing air on the liquid surface in contact with it must be totally neglected in the conditions investigated here ⁽⁷⁾.

Considering a filter cake having pores blocked due to gas desorption during the cake formation in comparison with a filter cake completely filled with liquid, there are two consequences for the dewatering:

- The dewatering process of a filter cake having gas enclosed within it does not begin at a condition of completed saturation but begins at $S < 1$.
- On the other hand, the flow resistance is increased by the blockade of pores and dewatering will be delayed in comparison with the unblocked cake mass.

By further progress of dewatering thermal factors become important. The lower the pressure level, the more will, at

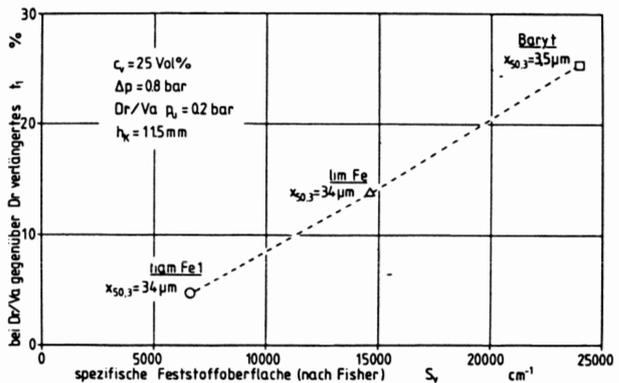


Bild 3: Auswirkung der Luftdesorption bei unterschiedlicher Feinheit des Feststoffes

Fig. 3: Effect of desorption of air at different grain sizes of solid materials

- das Volumen der entstehenden Gasblasen vergrößert sich;
 - das treibende Druckgefälle erhöht sich und daher werden weniger Poren blockiert.
- Vergrößert man die Kuchenhöhe und damit die Filtrationszeit, so kann, der Kinetik des Desorptionsvorganges entsprechend, mehr Gas frei werden. Gleichzeitig nimmt das örtliche Druckgefälle ab, so daß insgesamt mit einer verstärkten Porenblockade gerechnet werden muß.
- Je feinporiger das zu durchströmende Haufwerk ist, desto größer werden die in diesen Poren wirksamen Kapillardrücke und desto eher werden Poren durch Gasblasen blockiert werden.
- Je feinporiger das Filtermittel gegenüber dem darüber liegenden Filterkuchen wird, desto eher werden Gasblasen, welche noch durch das Haufwerk hindurchtransportiert werden, das Filtertuch verstopfen.

Einfluß des Druckniveaus auf die Restfeuchte von Filterkuchen

Sobald die ersten durchgehenden Porenkanäle von Flüssigkeit befreit sind, liegt im Haufwerk eine gleichgerichtete, parallele Strömung einer flüssigen und einer gasförmigen Phase vor. Der nun mögliche Austausch von Gas und Flüssigkeit innerhalb des Filterkuchens und der Gaszustand selbst bringen weitere, von der Lage des Druckniveaus abhängige Einflußgrößen mit sich, die hinsichtlich ihrer Bedeutung für den Flüssigkeitsentzug untersucht werden müssen.

Als völlig dominierend für die mechanische Entfeuchtung kann die Überwindung der in den Haufwerksporen wirksamen Kapillardrücke durch die von außen angelegte Druckdifferenz angesehen werden.

Eine Entfeuchtung infolge des dynamischen Druckes der Luft auf senkrecht angeströmte Flüssigkeitswickel oder infolge einer Schleppwirkung der strömenden Luft auf die in Kontakt stehende Flüssigkeitsoberfläche ist unter den hier untersuchten Randbedingungen völlig zu vernachlässigen⁷⁾.

Betrachtet man vergleichend einen Filterkuchen, der infolge von Gasdesorption während der Kuchenbildung blockierte Poren besitzt, und einen ausschließlich mit Flüssigkeit gefüllten Filterkuchen, so ergeben sich für die Entfeuchtung zunächst einmal zwei Konsequenzen:

- Der Entfeuchtungsvorgang für den Filterkuchen mit Gaseinschlüssen beginnt nicht im Zustand völliger Sättigung, sondern bei $S < 1$.
- Andererseits ist sein Durchströmungswiderstand durch die Porenblockade erhöht, und die Entfeuchtung wird gegenüber dem unblockierten Haufwerk verzögert ablaufen.

Im weiteren Verlauf der Entfeuchtung kommen dann hauptsächlich thermisch bedingte Effekte zur Wirkung. Je tiefer das Druckniveau abgesenkt wird, desto näher kommt man bei konstanter Temperatur dem Sättigungsdampfdruck der Flüssigkeit. Das treibende Potential für eine Verdunstung des Filtrates erhöht sich folglich.

Zur Überführung der Flüssigkeit in den gasförmigen Aggregatzustand muß die dazu erforderliche Verdampfungsenthalpie aufgebracht werden. Dazu wird der Flüssigkeit, dem Feststoff, dem nachströmenden Gas und der Apparatewand Wärme entzogen. Wenn von außen nicht genügend schnell Wärme nachfließen kann, kühlt sich das durchströmte System ab. Die Abkühlung wiederum führt zu einer Erhöhung der Filtratviskosität und damit zu einer Verringerung der Entfeuchtungsgeschwindigkeit.

Eine Verschiebung des Druckniveaus zu kleineren Werten hin hat also sättigungsvermindernde und entfeuchtungsverzögernde Folgen. Für die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Versuchsprodukte und Filtrationsbedingungen schienen sich diese gegenläufigen Erscheinungen in ihrer Wirkung weitgehend zu kompensieren.

constant temperature, the gas saturation pressure of the liquid be approached. The forcing potential for an evaporation of the filtrate increases accordingly.

To be able to convert the liquid into the gaseous aggregate condition, the necessary evaporation enthalpy must be produced. To achieve this, heat must be removed from liquid, solid material, gas which flows through afterwards, and the walls of the apparatus. If not sufficient heat can flow from outside the system, it will cool down. This cooling causes an increase in viscosity and hence a decrease in the dewatering rate.

A change of pressure level to a reduced value will result in a reduced saturation and a delayed dewatering. With the test materials and filtration conditions used within the scope of this investigation, it appeared that the contrary effects of these observations almost compensated each other.

A significant difference of saturation level in case of pure overpressure filtration or in case of combined pressure/vacuum filtration could not be determined.

Fig. 4 shows a comparison of saturation levels for overpressure and pressure/vacuum filtration at various pressure differences. There are 9 curves drawn for $\Delta p = 2$ bar, each differing 0.1 bar in pressure level. No systematic tendency of curves could be recognised. Even longer times of dewatering which reach into areas of pure thermal dewatering show little difference, as can be seen from Fig. 5.

The increased tendency to evaporate at low pressure level does not come into effect because the system flow through cools down strongly in comparison to pure pressure filtration.

Fig. 6 shows the temperature recorded for the experiments shown on Fig. 5.

The temperature falls, if initially 21°C, in the case of overpressure filtration to approximately 15°C. However, in case of pressure/vacuum filtration it falls to approximately 4°C.

All test results documented here can only be applied in cases where the different factors neutralise each other in a similar manner. If one effect becomes more pronounced, it will be possible that differences could occur in the dewatering result.

Influence of pressure level on the air throughput of partially dewatered filter cakes

In order to completely evaluate the entire process of filtration it is necessary to look beyond the filtration results and to consider the outlay needed for the flow of air through the filter cake. This air must be compressed in order to produce and maintain the forcing pressure difference, and the energy needed for this has a decisive influence on the production costs of continuously working filters.

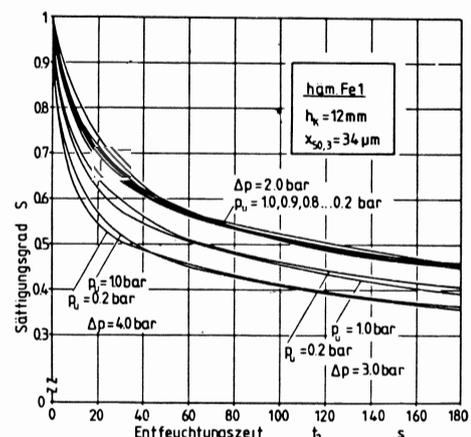


Bild 4: Einfluß des Druckniveaus auf den Haufwerkssättigungsgrad
Fig. 4: Influence of pressure level on cake mass saturation

Ein signifikanter Unterschied der Sättigungsgrade bei reiner Überdruck- und bei kombinierter Druck/Vakuumfiltration war nicht festzustellen.

Bild 4 zeigt einen Vergleich der Sättigungsgrade bei Überdruck- und Druck/Vakuumfiltration für verschiedene Druckdifferenzen. Für $\Delta p = 2$ bar sind 9 Kurven eingezeichnet, welche sich jeweils um 0,1 bar im Druckniveau unterscheiden. Es ist keine systematische Tendenz der Kurven untereinander zu erkennen. Selbst für große Entfeuchtungszeiten, welche bis weit hinein in den Bereich rein thermischer Entfeuchtung reichen, sind nach Bild 5 die Unterschiede nur gering ausgeprägt.

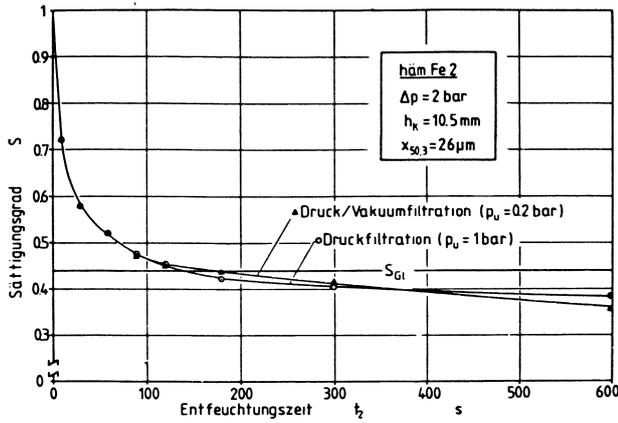


Bild 5: Vergleich der Sättigung bei großen Entfeuchtungszeiten
Fig. 5: Comparison of saturation at long dewatering times

Die verstärkte Verdunstungsneigung bei tiefem Druckniveau kommt hier sicherlich deshalb nicht zur Geltung, weil sich das durchströmte System im Vergleich zur reinen Druckfiltration sehr stark abkühlt.

Bild 6 gibt den zeitlichen Verlauf der Kuchentemperatur für die in Bild 5 dokumentierten Experimente wieder.

Die Temperatur sinkt, von etwa 21°C ausgehend, im Fall der Überdruckfiltration bis auf etwa 15°C. Im Fall der Druck/Vakuumfiltration dagegen sinkt sie bis auf etwa 4°C.

Alle hier dokumentierten Versuchsergebnisse sind nur auf Fälle zu übertragen, wo sich die verschiedenen Effekte in ähnlicher Weise gegenseitig neutralisieren. Gewinnt ein Effekt größere Bedeutung, so können durchaus Unterschiede im Entfeuchtungsergebnis auftreten.

Einfluß des Druckniveaus auf den Luftvolumenstrom durch teilentfeuchtete Filterkuchen

Für eine vollständige Beurteilung des gesamten Filtrationsvorganges muß über das Filtrationsergebnis hinaus der dafür erforderliche Aufwand in Form von durch den Kuchen strömender Luft betrachtet werden. Diese Luft muß zur Erzeugung und Aufrechterhaltung der treibenden Druckdifferenz verdichtet werden, und die dazu notwendige Energie bestimmt maßgeblich die Betriebskosten eines kontinuierlich arbeitenden Filters.

Die Durchströmung eines teilentfeuchteten Haufwerkes mit einem als kompressibel betrachteten Gas läßt sich mit Hilfe der folgenden Beziehung beschreiben⁸⁾:

$$\dot{V}_{g,e} = \frac{P_c \cdot P_{c,rel,g}(S) \cdot A}{\eta_g \cdot (h_K + h_{KE})} \cdot \frac{p_m \cdot \Delta p}{p_o} \quad [2]$$

Der in Gl. [2] enthaltene Druckterm ist abhängig vom Druckniveau. Je weiter das Druckniveau bei konstanter Druckdifferenz abgesenkt wird, desto geringer wird der im Zustand über dem Filterkuchen gemessene Gasvolumenstrom sein.

Diese Voraussage konnte für alle verwendeten Versuchsprodukte experimentell bestätigt werden. In Bild 7 wird

A gas, regarded as compressible, flowing through a partially dewatered cake mass can be described by using the following formula⁸⁾:

$$\dot{V}_{g,e} = \frac{P_c \cdot P_{c,rel,g}(S) \cdot A}{\eta_g \cdot (h_K + h_{KE})} \cdot \frac{p_m \cdot \Delta p}{p_o} \quad [2]$$

The pressure factor contained in Eq. [2] is dependent on pressure level. At constant pressure difference, the more the pressure level is reduced, the smaller will be the gas throughput measured above the filter cake.

This prediction was confirmed in all cases of experimental products used. Fig. 7 can be used as an example. At a grade of saturation of cake mass of $S = 0.69$, the pressure level was systematically changed by 0.1 bar and the air throughput at cake entry was measured. The lowest value of this pressure factor corresponds to a pressure/vacuum filtration with $p_u = 0.2$ bar and the highest value that of pure overpressure filtration.

The relaxation of air in the filter cake and thus also the change in its density connected with its dependence on pressure level is also affected by other factors. In the case of a severe blockade of pores and thus reduced cake i.e. cloth permeability the gas throughput will be reduced. As gases cool as a result of evaporation taking place in the cake, this causes a lower gas viscosity resulting in an increased gas throughput.

The experimental comparison of pressure and pressure/vacuum filtration shown in Fig. 8 clearly shows an example of the effect first mentioned; a reduction of air flow caused by an increased blockade of pores. The air throughput measured in case of pressure/vacuum filtration is lower as could theoretically have been expected using $p_m \cdot \Delta p/p_o$.

At this last stage of evaluation it becomes necessary to determine the energy needed to compress the required volume of air.

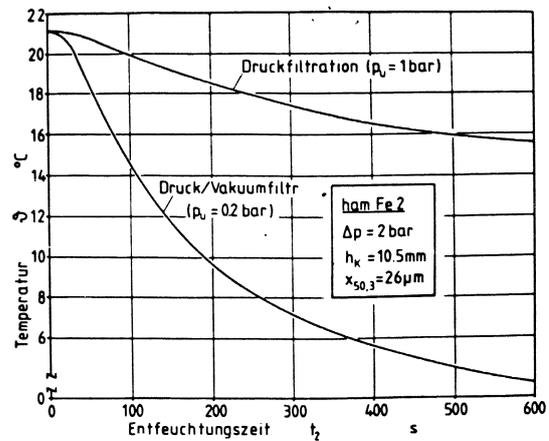


Bild 6: Kuchentemperaturen bei Druck- und Druck/Vakuumfiltration
Fig. 6: Cake temperatures for pressure and pressure/vacuum filtration

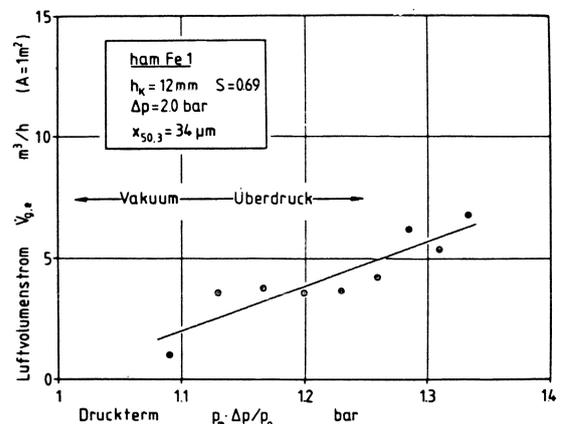


Bild 7: Abhängigkeit des Luftvolumenstromes vom Druckniveau
Fig. 7: Dependence of air throughput on pressure level

dafür ein Beispiel gegeben. Bei einem Haufwerkssättigungsgrad von $S = 0,69$ wurden das Druckniveau systematisch um 0,1 bar verändert und der Luftvolumenstrom am Kucheneintritt gemessen. Der kleinste Wert dieses Druckterms entspricht der Druck/Vakuumsfiltration mit $p_u = 0,2$ bar und der größte Wert der reinen Überdruckfiltration.

Die mit der Entspannung der Luft im Filterkuchen und damit auch ihrer Dichteänderung zusammenhängende Abhängigkeit vom Druckniveau wird durch weitere Einflüsse überlagert. Im Falle einer starken Porenblockade und damit verringerter Kuchen- bzw. Tuchdurchlässigkeit wird der Gasdurchsatz verringert. Die Abkühlung des Gases infolge der Verdunstungsvorgänge im Kuchen führt hingegen zu einer Verminderung der Gasviskosität und damit zu einem Anstieg des Gasdurchsatzes.

Der in Bild 8 dargestellte experimentelle Vergleich von Druck- und Druck/Vakuumsfiltration zeigt offenbar ein Beispiel für den erstgenannten Effekt einer Verminderung des Luftstromes durch verstärkte Porenblockade. Der gemessene Luftvolumenstrom bei der Druck/Vakuumsfiltration liegt tiefer als theoretisch nach $p_m \cdot \Delta p/p_o$ zu erwarten gewesen wäre.

In einem letzten Schritt der Auswertung muß die zur Verdichtung der benötigten Luftmenge erforderliche Energie bestimmt werden.

Als Voraussetzung wird angenommen, daß die Luft als ideales Gas betrachtet werden darf und ihre Zustandsänderung adiabatisch, d. h. isentrop erfolge.

Für die technische Arbeit als Summe von Verdrängungsarbeit und Arbeit für die Zustandsänderung des Gases gilt:

$$W_t = p_o \cdot V_e \cdot \frac{\kappa}{(\kappa-1)} \cdot \left(1 - \left(\frac{p_u}{p_o} \right)^{(\kappa-1)/\kappa} \right) \quad [3]$$

Das in Gl. [3] enthaltene Druckverhältnis p_u/p_o deutet auch hier wieder eine Abhängigkeit von der Lage des Druckniveaus an. Die Erzeugung der treibenden Filtrationsdruckdifferenz durch eine Kombination von Druck und Vakuum ist danach energieaufwendiger als die Erzeugung eines reinen Überdruckes.

Eine gewisse Kompensation erfolgt dabei allerdings durch den sich bei absinkendem Druckniveau verringernenden Gasvolumenstrom.

Rein theoretisch erhält man bei einer Berücksichtigung dieses Sachverhaltes die in Bild 9 dargestellten Verhältnisse.

Ausgangspunkt des Vergleiches ist immer die reine Überdruckfiltration, die mit 100 % des Gasverdichtungsaufwandes gekennzeichnet ist. In Richtung sinkenden Druckniveaus ist dann für verschiedene Beträge der Druckdifferenz der Mehr- oder Minderaufwand für die Druck/Vakuumsfiltration eingetragen. Wie zu erkennen ist, findet man bis zu Druckdifferenzen von 1 bar Kombinationen von Druck und Vakuum, welche vom Standpunkt des Energieverbrauches günstiger sind als die reine Druckfiltration. Oberhalb von 2 bar dagegen ist die Druck/Vakuumsfiltration grundsätzlich energieaufwendiger.

Bei der Beurteilung dieser Ergebnisse muß beachtet werden, daß für den theoretischen Vergleich die Wirkungsgrade der notwendigen Verdichter gleich 1 gesetzt wurden. Berücksichtigt man, daß die Wirkungsgrade von Vakuumerzeugern in der Regel deutlich niedriger sind als diejenigen von Kompressoren, so wird die Erzeugung einer Druckdifferenz aus Vakuum und Druck in der Praxis energieintensiver sein als die reine Luftkompression.

Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Untersuchungen haben gezeigt, daß der Filtrationsvorgang bei ungünstiger Lage des Druckniveaus stark beeinträchtigt werden kann. Im Filtrat gelöst vorliegendes Gas kann bei einer Druckabsenkung zur Desorption führen, und die entstehenden Gasblasen verstopfen bei entsprechendem hohem örtlichem Kapillardruck und geringem treibendem Druckgefälle Poren des entstehenden Filterkuchens und

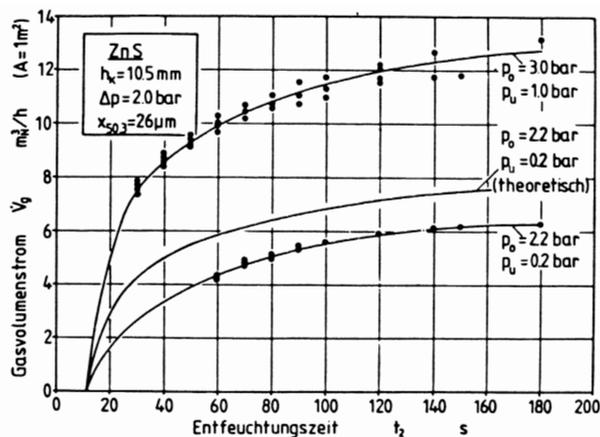


Bild 8: Vergleich des Gasvolumenstromes bei Druck- und Druck/Vakuumsfiltration

Fig. 8: Comparison of gas throughput with pressure and pressure/vacuum filtration

It will be assumed that air may be regarded as an ideal gas and that a change of its condition ensues in an adiabatic i. e. isentropic manner.

In the case of technical compression work on gases being regarded as the sum of gas displacement work and the work done to change the state of the gas, the following formula is valid:

$$W_t = p_o \cdot V_e \cdot \frac{\kappa}{(\kappa-1)} \cdot \left(1 - \left(\frac{p_u}{p_o} \right)^{(\kappa-1)/\kappa} \right) \quad [3]$$

The pressure ratio p_u/p_o contained in Eq. [3] indicates here also a dependence on the position of pressure level. Generating a forcing filtration pressure difference through a combination of pressure and vacuum requires more energy as when generating an overpressure only.

However, a certain compensation takes place due to the reduced gas throughput at a falling pressure level.

If considering these facts theoretically the conditions shown in Fig. 9 are obtained.

The original point of comparison is always the pure overpressure filtration, its criterion being 100 % of gas compression expenditure. By falling pressure level the different values of pressure differences at higher or lower expenditure for pressure/vacuum filtration have been placed on the chart. As can be recognised, at pressure differences of 1 bar, combinations of pressure and vacuum are found which, when considering energy consumption, are more favourable as in the case of pressure filtration only. On the contrary, at pressures of more than 2 bar the pressure/vacuum filtration fundamentally consumes more energy.

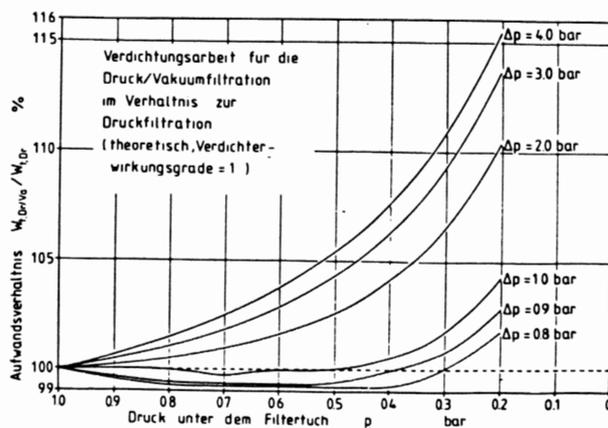


Bild 9: Einfluß des Druckniveaus auf die benötigte Energie zur Luftverdichtung

Fig. 9: Influence of pressure level on the energy needed for air compression

des Tuches. Dadurch verringert sich die Durchlässigkeit des durchströmten Systems. In Richtung höherer Druckdifferenzen und niedrigerer Kuchenhöhen spielen diese Effekte eine immer geringere Rolle.

Ein signifikanter Einfluß des Druckniveaus auf die erreichbare Kuchenrestfeuchte konnte nicht festgestellt werden. Eine Kompensation verschiedener Effekte ergab bei reiner Überdruck- und Druck/Vakuumbfiltration vergleichbare Entfeuchtungsergebnisse.

Die zur Erzeugung und Aufrechterhaltung der treibenden Druckdifferenz notwendige Gasverdichtungsarbeit schließlich steigt in der Regel mit absinkendem Druckniveau an. Hier auftretende Unterschiede werden allerdings maßgeblich durch die Wirkungsgrade der jeweils eingesetzten Verdichter bestimmt.

Der Übergang zu höheren Druckdifferenzen stellt auch unter den in dieser Arbeit behandelten Aspekten eine interessante Alternative zu herkömmlichen Verfahren der Entwässerung schwer zu filtrierender Suspensionen, wie etwa einer Kombination aus Vakuumbfilter und Trockner, dar.

Bei erhöhten Druckdifferenzen wird nicht nur der Massendurchsatz kontinuierlicher Filter erhöht und die Produktrestfeuchte abgesenkt, sondern es verringern sich auch die filtrationsstörenden Effekte der hier behandelten Art.

Die Entscheidung für eine bestimmte Lage des Druckniveaus in der Praxis wird dann weniger durch physikalisch begründete Auswirkungen auf den Filtrationsvorgang selbst als durch verfahrenstechnische und wirtschaftliche Aspekte des jeweiligen Einsatzfalles bestimmt werden.

Verzeichnis der Abkürzungen — List of symbols

A	— Filterfläche — filter surface (area)
C, C _v	— Konzentration, Volumen- — concentration, volume-
h _{K, PKF}	— Kuchenhöhe, Ersatz- — cake thickness, repace-
K _H	— Henry-Konstante — Henry's Constant
p, Δp	— Druck, -differenz — pressure, -difference
p _u , p _o	— Druck unter-, oberhalb des Kuchens — pressure under, above cake
p ₀	— (p _u + p _o)/2
P _C	— spez. Kuchendurchlässigkeit — spec. cake permeability
P _{C, rel.g}	— relative Gasedurchlässigkeit — relative gas permeability
S, S	— Sättigungsgrad, Gleichgewichts- — degree of saturation, balance-
S _V	— spez. Oberfläche — spec. surface
t ₁ , t ₂	— Kuchenbildungs-, Entfeuchtungszeit — cake formation-, dewatering time
$\bar{V}_{g,e}$	— Gasvolumenstrom am Kucheneintritt — gas throughput at cake entry
W _t	— technische Verdichtungsarbeit — technical compression work
X _{50,3}	— Medianwert der Volumersummenverteilung — median value of the cumulative distribution by volume
η _g	— Gasviskosität — gas viscosity
κ	— Polytropenkoeffizient = 1,4 — polytropic coefficient = 1.4
θ	— Temperatur — temperature
ρ _s	— Feststoffdichte — density of solid material

In examining these results it must be noted that for a theoretical comparison the efficiency of the necessary compressors was set as being equal to 1. Considering that the efficiency of vacuum generators is much lower as a rule as for compressors, producing a pressure difference, in the practice, from vacuum and pressure will consume more energy as by air compression only.

Conclusion

The investigations showed that the process of filtration is strongly aggravated if the position of pressure level is unfavourable. Gas dissolved in the filtrate can lead to desorption by falling pressure and in the case of high local capillary pressure and low forcing pressure fall, the gas bubbles which arise block the filter pores of the filter cake being formed and the filter cloth. This reduces the permeability of the system flow through. These effects tend to be of minor importance at higher pressure differences and reduced cake thickness.

A significant influence of pressure level on the attainable residual moisture content of the cake could not be established. The compensation of different effects in both pure overpressure and pressure/vacuum filtration produced similar dewatering results.

The gas compression work needed to produce and maintain the forcing pressure difference increases as a rule with decreasing pressure level. Differences may appear largely due to the efficiency of the compressor employed.

Also considering the aspects discussed in this paper, the transition to higher pressure differences offers an interesting alternative to traditional processing in dewatering of suspensions which are difficult to filter, such as a combination of vacuum filter and dryer.

At higher pressure differences, not only the mass throughput of continuous filters is increased and residual moisture content reduced, but the effects discussed here which disturb filtration are reduced.

The choice of a certain position of pressure level is, in the practice, made less due to physically bound effects on filtration but more due to the processing and economical aspects of each different situation.

Schrifttum — References

- 1) SIMON, A., und NETH, W.: Über Filtrationserscheinungen; Ztschr. anorg. u. allg. Chemie 166 (1926), 221 - 254.
- 2) SIMON, A., und NETH, W.: Über Filtrationserscheinungen; Ztschr. anorg.-u. allg. Chemie 168 (1928), 221 - 254.
- 3) MEHNER, W.: Gasausscheidung als Ursache des Filtereffektes; Die chemische Fabrik 10 (1937), Nr. 12, 2 - 9.
- 4) ANLAUF, H.: Entfeuchtung von Filterkuchen bei der Vakuum-, Druck- und Druck/Vakuumbfiltration; Dissertation Universität Karlsruhe (TH) (1985), 4 ff.
- 5) TILLER, F. M.: Compressible cake filtration; in Ives, K. J., Nato advanced study series, Serie E, Vol. 2, Noordhoff, Leyden (1975).
- 6) BOTT, R., ANLAUF, H., und SIMON, W.: Kontinuierliche Druckfiltration feinstkörniger Kohlekonzentrate; Aufbereitungs-Technik 25 (1984) 5, 245 - 258.
- 7) ANLAUF, H.: Entfeuchtung von Filterkuchen bei der Vakuum-, Druck- und Druck/Vakuumbfiltration; Dissertation Universität Karlsruhe (TH) (1985), 101 ff.
- 8) ANLAUF, H.: Entfeuchtung von Filterkuchen bei der Vakuum-, Druck- und Druck/Vakuumbfiltration; Dissertation Universität Karlsruhe (TH) (1985), 163 ff.