

Rahmenprogramm Rohstofforschung Mineralische Rohstoffe

764)

Nur zum persönlichen Gebrauch

Vom Verfasser überreicht

Statusbericht 1984

Vorträge zum Statusseminar,
4. bis 6. Juni in Bad Neuenahr

Projektleitung Rohstofforschung (PLR) der KFA Jülich GmbH
im Auftrag des
Bundesministeriums für Forschung und Technologie (BMFT)

Über die Druckfiltration schwierig zu entwässernder Erzkonzentrate

Dipl.-Ing. H. Anlauf, Dipl.-Ing. R. Bott, Prof.Dr.-Ing. W. Stahl*

Forschungsziel

Soll einem Filterkuchen Flüssigkeit entzogen werden, wobei Gas durch ihn hindurchgesaugt oder -geblasen wird, so müssen prinzipiell die in den Haufwerksporen wirksamen Kapillardrücke überwunden werden.

Das zur Überwindung der Kapillarkräfte zu erzeugende Potential ist bei den gegenwärtig zur Entwässerung von Mineralkonzentraten weltweit eingesetzten kontinuierlichen Vakuumfiltern in der Regel auf etwa 0,8 bar begrenzt.

Die physikalischen Randbedingungen der Filtration lassen die konventionelle Vakuumtechnik in einer Vielzahl von Anwendungsfällen bereits heute

- bei zu feiner Körnung des Feststoffes im Konzentrat,
- bei erhöhtem Flüssigkeitsdampfdruck z.B. durch höhere Prozeßtemperaturen
- oder bei niedrigem Umgebungsdruck durch große geodätische Höhen

an ihre Grenzen gestoßen.

In der Zukunft muß durch die Tendenz zur Erhöhung des Feinstkornanteiles in Konzentraten noch mit einer Verschärfung dieser Problematik gerechnet werden.

Selbst bei grundsätzlich möglichem Einsatz von Vakuumfiltern ist aufgrund von Produktfeuchtevorgaben oft eine nachgeschaltete thermische Trocknungsstufe erforderlich.

Hier erscheint nun die kontinuierliche Druck- oder Druck/Vakuum-Filtration als verfahrenstechnisch und wirtschaftlich interessante Alternative zur herkömmlichen Technik. Die dadurch mögliche Anpassung der wirksamen Druckdifferenz an die jeweilige Filtrationsaufgabe scheint geeignet, die vorstehend beschriebenen Schwierigkeiten zu überwinden.

* Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik
der Universität Karlsruhe (TH)
Postfach 6380, D-7500 Karlsruhe 1, Tel. 0721/608 2401

Die Forschungsaufgabe des BMFT-Vorhabens O3RO280 bestand in der Untersuchung der Auswirkungen erhöhter Filtrationsdrücke auf das Kuchenbildungs- und -entfeuchtungsverhalten verschiedener feinstkörniger Mineralkonzentrate.

Vorgehensweise

Die erforderlichen experimentellen Arbeiten erfolgten an der in Abb. 1 schematisch dargestellten Labordruckfilterapparatur.

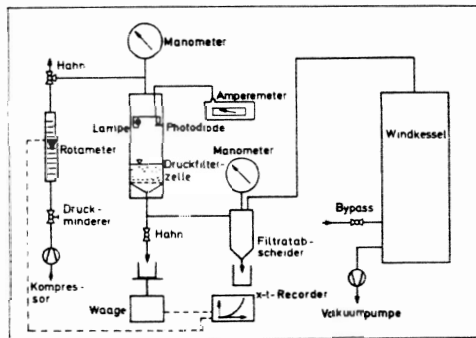


Abb. 1 Labordruckfilterapparatur

Diese Apparatur erlaubte bei vertretbarem Aufwand die unabhängige Veränderung aller für die Filtration relevanten Einstellgrößen in einem weiten Variationsbereich. So umfaßte der Einstellbereich Filtrationsdrücke von 0 - 5 bar abs., Kuchenhöhen von 5 - 20 mm und beliebige Entfeuchtungszeiten, die zur Vermeidung von Fehlern durch Verdunstung jedoch auf 180 sek begrenzt wurden.

Die Meßzelle besitzt eine Filterfläche von 20 cm².

Die Apparatur kann zur Druck-, Vakuum- und Druck/Vakuum-Filtration eingesetzt werden.

Da vergleichende Experimente zwischen Druck- und Druck/Vakuum-Filtration nur zu geringen Unterschieden im Ergebnis führten, wurde der Hauptteil des Untersuchungsprogrammes mit Hilfe der labortechnisch einfacher zu realisierenden Druckfiltration durchgeführt.

Als Filtermedien dienten technische Gewebe, die größtenteils auch im Aufbereitungsbetrieb der jeweils untersuchten Erze Anwendung gefunden hatten.

Soweit verfügbar, erfolgte der Trübeansatz mit Originalfiltrat aus dem Aufbereitungsprozeß.

Die verschiedenster Provenienz entstammenden Versuchsprodukte gliederten sich in sieben magnetitische, hämatitische und limonitische Eisenerze, sowie ein sulfidisches Zink-Erz. Vom Standpunkt eines Betreibers von Vakuumfiltern her betrachtet, war die Mehrzahl dieser Erze als schwierig filtrierbar zu beschreiben. Zur systematischen Erfassung von Korngrößeninflüssen wurden drei verschiedene Eisenerze durch

- verschieden weites Absieben des Grobanteiles einer Ausgangskornverteilung,
- Mahlung in einer Kugelmühle,
- Mahlung in einer Scheibenschwingmühle

in mehreren Schritten hinsichtlich des Feinheitsgrades verändert.

Charakterisierung der Versuchsprodukte

Die wichtigsten hier relevanten Eigenschaften der in die Untersuchung einbezogenen Erze sind in Tabelle 1 zusammengefaßt.

Nr.	Vers. Produkt	Herkunft	ρ_s (kg/m ³)	$x_{50,3} \cdot 10^6$ (m)	Anteil mit $x < 10^5$ m (%)	S_v (Fisher SSS) (m ⁻¹) · 10 ³
1a	Fe-Erz	UdSSR	4,85	31,5	18,3	665,0
1b	hämatitisch			31,5	18,3	665,0
1c				31,5	18,7	689,0
1e				29,5	19,6	701,8
1f				22,6	23,0	794,8
2a	Fe-Erz	Schweden	5,16	32,5	13,0	795,0
2b	magnetitisch			29,0	16,0	993,4
2c				25,5	19,0	1047,5
2d				22,5	23,0	1107,9
2e				20,0	27,0	1274,4
3a	Fe-Erz	Schweden	5,15	107,0	-	173,3
3b	magnetitisch	Svenskt.		66,0	6,0	419,2
3c		Stahl		42,0	16,0	933,3
3d				23,0	27,0	1336,4
3e				11,5	46,0	2234,7
3f				7,8	56,0	2843,7
4	Fe-Erz	Brasilien	4,90	28,0	19,0	1070,4
	hämatitisch	CVRD				
5	Fe-Erz	Venezuela	4,76	32,0	24,0	1270,4
	limonitisch	Orinoco				
6	Fe-Erz	Philippinen	4,84	22,0	21,0	983,0
	magnetitisch	Atlas				
7	Fe-Erz	USA	4,79	12,0	45,0	1967,0
	hämatitisch	Tilden				
8	Zn-Erz	BRD	4,22	25,5	30,0	1116,3
	sulfidisch	Meggen				

Tabelle 1 Produkteigenschaften

Tendenziell steilen die Verteilungen in dem Maße auf, in dem der mittlere Korndurchmesser abnimmt. Die Verteilungsbreite verringert sich und der prozentuale Anteil der Körner mit einem Durchmesser unter 10 µm sowie die spez. Oberfläche steigen mit wachsendem Aufmahlungsgrad.

Diese Zusammenhänge lassen sich durchgehend nur bei den Erzen beobachten, die systematisch in ihrem Feinheitsgrad verändert worden waren. Abweichungen lassen sich dagegen beispielsweise bei den Erzproben 1f und 2a (vgl. Tabelle 1) feststellen, die zwar die gleiche spez. Oberfläche besitzen, sich aber bezüglich der anderen aufgeführten Merkmale erheblich unterscheiden. Die Kornverteilungsbreite von Erz 2a übertrifft die von Erz 1f erheblich, wodurch für Erz 2a ein größerer mittlerer Partikeldurchmesser und ein geringerer Massenanteil < 10 µm resultiert. Dies läßt sich auf den relativ geringen Anteil sehr grober Körner bei Erz 2a zurückführen, der bezüglich der spez. Oberfläche einen nur unbedeutenden Beitrag liefert, die anderen Größen jedoch empfindlich verschiebt.

Weiterhin trägt die unterschiedliche Kornform und Oberflächenbeschaffenheit der untersuchten Erze zu Abweichungen von den diskutierten Tendenzen bei.

Abb. 2 zeigt rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von Partikeln des russ. und schwed. Eisenerzes in jeweils 3000-facher Vergrößerung.



Abb. 2 RIEM-Aufnahme von russ. und schwed. Fe-Erz

Kuchenbildung und Haufwerkseigenschaften

Zur Beschreibung des Kuchenbildungsvorganges erfolgte eine Charakterisierung der Filterkuchen hinsichtlich der Porosität, der spez. Permeabilität und der Kuchenbildungsrate. Zusätzlich wurde der Filtertuchwiderstand registriert.

Die mittleren Kuchenporositäten variierten in einem Bereich zwischen 0,42 und 0,49. Bei der Mehrzahl der Erze ergab sich in Richtung gesteigerter Filtrationsdrücke eine leichte Verdichtung der Filterkuchen. Die systematische Veränderung der Kornverteilung von Partikelkollektiven durch Mahlvorgänge ergab zusätzliche Einflüsse auf die Packungsdichte.

Abb. 3 zeigt, wie die Porosität eines zunächst relativ groben Ausgangsproduktes bei der Erhöhung seines Feinheitsgrades abnimmt und schließlich bei weiterer Zerkleinerung wieder ansteigt.

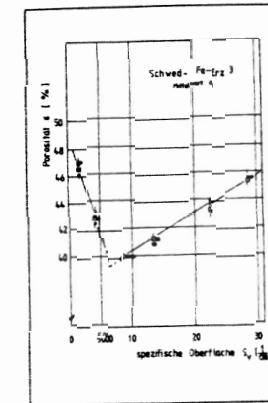


Abb. 3 Porosität ϵ bei sich änderndem Feinheitsgrad

Eine Vorherberechnung zu erwartender Kuchenporositäten ist nicht möglich.

Die Porosität beeinflusst in nicht unerheblichem Maße andere haufwerkscharakterisierende Größen, wie etwa die Permeabilität bzw. den Durchströmungswiderstand eines Filterkuchens. Bei unveränderter Kornverteilung verringert sich die Permeabilität generell mit zunehmender Packungsdichte.

Zusätzliche Veränderungen des Partikelkollektivs können sich ihrerseits allerdings so stark auf den Filterkuchenwiderstand auswirken, daß der Porositätseinfluß völlig überdeckt wird. So steigt die Permeabilität für das schwed. Fe-Erz-3 (vgl. Abb. 3) mit zunehmendem Feinheitsgrad des Feststoffes nicht etwa wieder an, sondern fällt aufgrund der sich stark verringerten Porendurchmesser kontinuierlich ab. Die theoretische Berechnung der Permeabilität aus der Porosität und Daten der Kornverteilung lieferte nicht befriedigend von Produkt zu Produkt übertragbare Ergebnisse. Eine direkte Messung sollte als zuverlässigerer und zudem einfacher Weg bevorzugt werden.

Eine hier nicht zu vernachlässigende Einflußgröße auf die Filtration stellt der Durchströmungswiderstand des mit Feststoff teilweise verlegten Filtertuches dar.

Er kann sich in Abhängigkeit von der Webart des Tuches, dem Partikelkollektiv und den Filtrationsbedingungen stark ändern.

Die zur Charakterisierung des Filtermittelwiderstandes bestimmten äquivalenten Kuchenhöhen lagen durchweg in einem Bereich von 1 - 6 mm.

Die Informationen über Kuchen- und Tuchwiderstand, Kuchenbildungsbedingungen und Suspensionseigenschaften lassen nach den vorliegenden Ergebnissen eine Vorherberechnung des zu erwartenden Filtrationsergebnisses und der damit zu realisierenden Feststoffmassendurchsätze von Filtergeräten zu. Abb. 4 zeigt einen Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Kuchenbildungszeiten für willkürlich aus dem gesamten Versuchsprogramm herausgegriffene Beispiele.

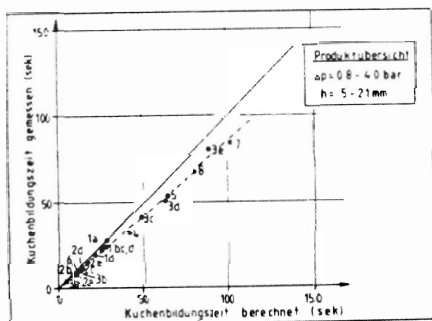


Abb. 4 Vergleich berechneter und gemessener Kuchenbildungszeiten

Die systematischen Abweichungen zwischen Rechen- und Meßergebnissen können auf die prinzipiell bei der Filtration in Richtung des Erdfeldes unvermeidbaren Sedimentationseffekte zurückgeführt werden.

Kapillarität

Für die hier diskutierte Art der Haufwerksentfeuchtung ist die Überwindung der in den Kuchenporen wirksamen Kapillardrucke entscheidend.

Sowohl der kapillare Eintrittsdruck als auch die Kapillardruckverteilung aller eingesetzten Versuchsprodukte wurden als haufwerkscharakterisierende Größen ermittelt.

Die Gleichgewichtssättigungswerte konnten direkt aus dem Filtrationsexperiment durch Extrapolation des Entfeuchtungsverlaufes bestimmt werden.

In Abb. 5 und Abb. 6 sind zusammenfassend einige der gemessenen Kapillardruck-Kurven dokumentiert.

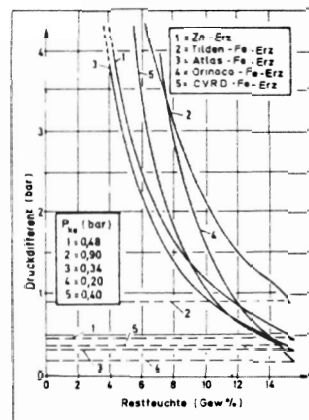


Abb. 5 Kapillardruck-Kurven verschiedener Erze

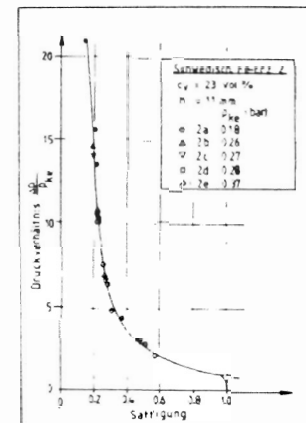


Abb. 6 Zusammengefaßte Kapillardruck-Kurve

Da Porengrößenverteilung, Oberflächenbeschaffenheit und Benetzungseigenschaften eines Haufwerkes nur schwer zu erfassen sind, sollte die Kapillardruckverteilung individuell für jedes Versuchsprodukt experimentell ermittelt werden.

Wenn ein feindisperser Feststoff allerdings nur hinsichtlich seines Feinheitsgrades verändert wird, z.B. durch einen Mahlvorgang, so können die daraus resultierenden Auswirkungen auf die Kapillardruckverteilung bei bekanntem Kapillareintrittsdruck relativ gut abgeschätzt werden.

Wie aus Abb. 6 hervorgeht, fallen die Kapillardruck-Kurven der verschiedenen Mahlprodukte bei der Auftragung des Quotienten aus treibendem Druckgefälle und Eintritts-Kapillardruck über dem Kuchensättigungsgrad in einem sehr weiten Bereich zusammen.

1. Entfeuchtungsabschnitt

Die sich an die Bildung des Filterkuchens anschließende Entfeuchtungsphase ist zunächst durch eine noch sehr inhomogene Flüssigkeitsverteilung im Haufwerk und darüberhinaus noch dadurch gekennzeichnet, daß noch kein Gas durch das Filtertuch hindurchgedrungen ist.

Sobald dann die ersten groben Poren durchgehend entleert sind, kann Blasluft frei durch den Kuchen strömen und der Gasverbrauch steigt mit fortschreitender Zeit und Porenentleerung an.

Der Zeitpunkt des ersten Luftdurchbruches kann aus Daten der Kuchenbildung und experimentell zu gewinnenden Anpassungsgrößen abgeschätzt werden.

In Abb. 7 sind gemessene und berechnete Luftdurchbruchzeiten gegenübergestellt.

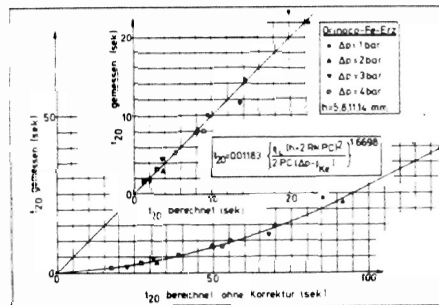


Abb. 7 Berechnung der Luftdurchbruchzeit

Zunächst werden zu erwartende Luftdurchbruchzeiten nach einem aus der Darcy-Gleichung hergeleiteten Ansatz berechnet, der sowohl die nun wirksamen Kapillarkräfte als auch den sich verringern den Durchströmungswiderstand der Poren bei fortschreitender Entfeuchtung berücksichtigt. Dies führt zu Zeiten, die in charakteristischer Weise von den Meßwerten abweichen.

Diese Abweichungen können durch eine Potenzfunktion beschrieben werden, die für jedes Produkt individuell ermittelt werden muß. Die Diskrepanz zwischen Messung und Rechnung kann als Einfluß grober Poren interpretiert werden, die sehr schnell entfeuchtet werden. Je geringer die Kuchenhöhe und damit die Wahrscheinlichkeit für solch einen durchgehenden groben Kanal ist, je größer ist sie.

Gesamt-Restfeuchteabsenkung

In der Regel genügt der bis zum ersten Luftdurchbruch erzielbare Entwässerungsgrad des Filterkuchens nicht den gestellten Anforderungen, so daß eine weitere Restfeuchteabsenkung bei gleichzeitiger Durchströmung des Haufwerkes mit Luft erforderlich ist.

Die Restfeuchte kann in Abhängigkeit von Entfeuchtungszeit, Kuchenhöhe und Filtrationsdruck durch Entfeuchtungskennfelder beschrieben werden, wie sie exemplarisch für ein Erz in Abb. 8 dargestellt sind.

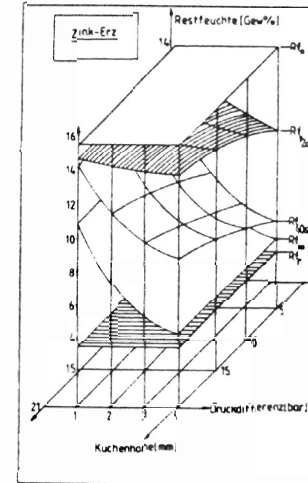


Abb. 8 Restfeuchtekenfelder

Als Ausgangsinformation ist lediglich der zeitliche Entfeuchtungsverlauf von neun, gleichmäßig über den ganzen Einstellbereich von Druck und Kuchenhöhe verteilten, Filterkuchen erforderlich. Mit Hilfe der Regressionsanalyse kann damit jeder Entfeuchtungsstand interpoliert werden.

Eine noch weiter verallgemeinerte Darstellung der Restfeuchteabsenkung ist durch die in Abb. 9 wiedergegebene Kennzahl möglich.

Wie auch schon in Abb. 5 und Abb. 6 für die Kapillardruckverteilung läßt sich nun hier der Restfeuchteverlauf für jedes Produkt in einer Kurve zusammenfassen.

Zur brauchbaren Vorhersage von Entfeuchtungsergebnissen ist zu klären, inwieweit das untersuchte Haufwerk als absolut inkompressibel betrachtet werden kann. Zumeist muß jedoch der Zusammenhang zwischen Druckdifferenz und Haufwerkspereabilität, Porosität und Filtertuchwiderstand bestimmt werden.

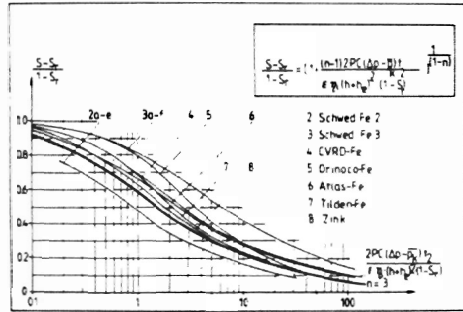


Abb. 9 Entfeuchtungskennzahl

Gasverbrauch

Zur Abschätzung der Wirtschaftlichkeit der Entfeuchtung und zur Auslegung der erforderlichen Gasverdichtungsaggregate ist es unerlässlich, Informationen über die sich während der Restfeuchteabsenkung einstellenden Gasdurchsätze zu gewinnen.

Analog zur Darstellung der sich einstellenden Restfeuchte kann der Gasdurchsatz bzw. -verbrauch sowohl durch die Methode der Interpolation in Kennfeldern als auch durch Kennzahlen zusammenhängend beschrieben werden.

Abb. 10 gibt am Beispiel eines Eisenerzes ein Gasverbrauchskennfeld für 120 sek. Entfeuchtungszeit wieder. Der dramatische An-

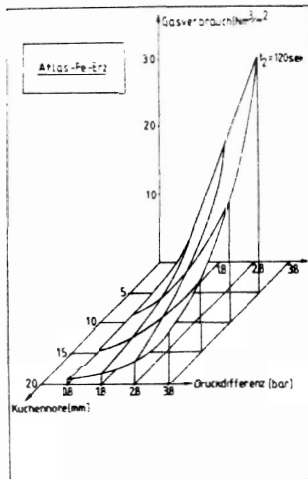


Abb. 10 Gasverbrauchskennfeld

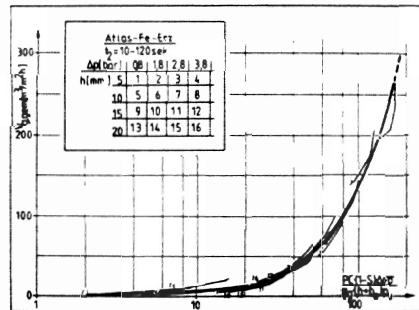


Abb. 11 Gasdurchsatz-Kennzahl

stieg des Gasverbrauches zu niederen Kuchenhöhen und großen Druckdifferenzen hin verdeutlicht die Notwendigkeit, den Entfeuchtungsvorgang zum frühest möglichen Zeitpunkt abzubrechen.

In Abb. 11 erfolgt die Darstellung des Gasdurchsatzes in Abhängigkeit von einer Kennzahl. Ganz analog zu den bisher vorgestellten Ergebnissen existiert auch hier für jedes Erz eine eigene Gasdurchsatzkurve.

Der zur Entfeuchtung erforderliche Gasdurchsatz kann in die zur Verdichtung des Gases erforderliche Energie ungerechnet werden und muß zur Bestimmung des tatsächlichen Aufwandes in Beziehung zur Restfeuchte gesetzt werden.

Kontinuierliche Filtration und Optimierung der Filtrationsbedingungen

Die folgenden Betrachtungen beziehen sich auf ein Trommelfilter mit Kugelnbildungs- und Entfeuchtungswinkeln von 87,5° und 163,5°.

Abb. 12 gibt exemplarisch die Restfeuchte über errechneten spez. Feststoffmassendurchsätzen für verschiedene Filtrationsdrücke und Trommeldrehzahlen wieder.

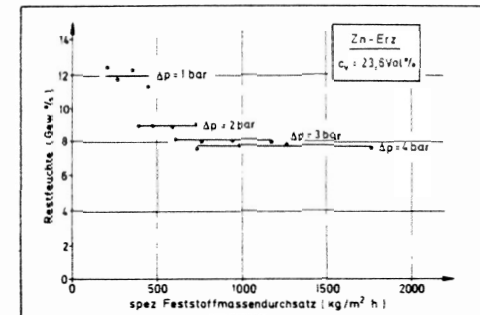


Abb. 12 Restfeuchte und Durchsatz für ein Trommelfilter

Für jede Druckdifferenz stellt sich unabhängig von der Drehzahl ein konstanter Restfeuchtwert ein.

Wird der Filtrationsdruck erhöht, so wird sowohl die Restfeuchte gesenkt als auch der spez. Feststoffmassendurchsatz erhöht.

Bei fester Filtereinstellung bezüglich den Verhältnissen am Steuerkopf und der Eintauchtiefe muß, wie aus Abb. 13 hervorgeht, eine Restfeuchteerniedrigung mit gesteigertem Energieverbrauch erkauft werden.

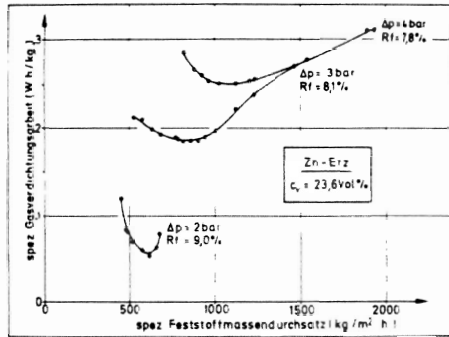


Abb. 13 Energiebedarf zur Restfeuchteabsenkung

Interessant ist hierbei die Ausbildung von Energieminima bei der Variation der Trommeldrehzahl, die in Richtung höherer Druckdifferenzen zu größeren spez. Feststoffmassendurchsätzen hin verschoben sind.

Wenn die Einstellung des Drehfilters dergestalt verändert wird, daß andere Verhältnisse von Kuchenbildungs- zu Trockenblaswinkel entstehen, so kann auch gleiche Restfeuchte für verschiedene Druckdifferenzen erzielt werden.

Abb. 14 zeigt, daß für Drücke von 3 und 4 bar der erforderliche Energiebedarf in der gleichen Größenordnung liegt, wobei auch hier das zum größeren Druck gehörige Energieminimum einem höheren spez. Feststoffmassendurchsatz zugeordnet ist.

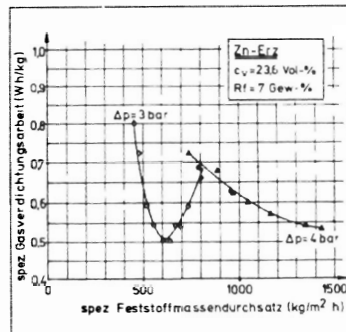


Abb. 14 Energiebedarf für verschiedene Filtereinstellungen

Ähnliche Betrachtungen können für die Entfeuchtung von Filterkuchen mit verschiedenem Feinheitsgrad des Feststoffes angestellt werden. Als generelle Tendenz sei hier nur qualitativ angegeben, daß sich der Energiebedarf zur Entfeuchtung auf denselben Punkt in dem Maße verringert, in dem sich der "Abstand" zwischen treibender Druckdifferenz und Eintrittskapillardruck vergrößert.

Zusammenfassung

Die im Rahmen der vorgestellten Untersuchungen gewonnenen Ergebnisse haben die Tauglichkeit der Druckfiltration für die Entwässerung schwer filtrierbarer Erzkonzentrate in vollem Umfang bestätigt. Durch die Beschreibung des Kuchenbildungs- und Entfeuchtungsvorganges kann eine Optimierung des Filtrationsvorganges gemäß einer individuell vorgegebenen Aufgabenstellung erfolgen.

Detaillierte Informationen über die Forschungsergebnisse können dem in der Schriftenreihe des BMFT erschienenen Forschungsbericht entnommen werden.

Formelzeichen

- c_v = Suspensionskonzentration
- h, h_e = Kuchenhöhe, Ersatz-
- PC = spez. Kuchendurchlässigkeit
- Δp = Druckdifferenz
- $\bar{p}, p_{\bar{u}}$ = mittlerer Druck, Druck über d. Kuchen
- p_{ke}, p_k = Kapillareintrittsdruck, mittlerer K.
- RM = Filtertuchwiderstand
- RF = Restfeuchte
- Rf_0 = Restfeuchte bei völliger Sättigung
- Rf_{∞} = Gleichgewichtsrestfeuchte
- Rf_r, Sr = Grenze der mech. Entfeuchtung
- S = Sättigungsgrad
- S_v = spez. Oberfläche
- t_{20} = Luftdurchbruchzeit
- t_2 = Entfeuchtungszeit
- V_g = Gasvolumenstrom
- $x_{50,3}$ = mittlerer Korndurchmesser der Q_3 -Verteilung
- ϵ = Porosität
- $\eta_{l,g}$ = Flüssigkeits-, Gas-Viskosität
- ρ_s = Feststoffdichte