

**Prom. Nr. 3029**

# **Über den Einfluss der Filtertuch-Unterlage auf den Filtrationsverlauf**

Von der  
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN  
HOCHSCHULE IN ZÜRICH

zur Erlangung  
der Würde eines Doktors der technischen Wissenschaften  
genehmigte

PROMOTIONSARBEIT

vorgelegt von  
YVAN KELLER  
dipl. Ing.-Chem. E. T. H.  
von Baden (Kt. Aargau)

Referent: Herr Prof. Dr. A. Guyer  
Korreferent: Herr P.-D. Dr. H. Schütze

Juris-Verlag Zürich  
1962

Leer - Vide - Empty

**Meinen Eltern**

**meiner Frau**

Leer - Vide - Empty

Meinem verehrten Lehrer,

Herrn Prof. Dr. A. Guyer,

möchte ich für sein mir stets entgegengebrachtes verständnisvolles Interesse herzlich danken.

Ebenso geht mein Dank an

Herrn Dr. A. Guyer,

für die vielen Ratschläge und seine stets bereitwillige Unterstützung.

Leer - Vide - Empty

## INHALTSVERZEICHNIS

EINLEITUNG	11
THEORETISCHER TEIL	12
I. ALLGEMEINES UND DEFINITIONEN	12
II. KUCHENFILTRATION	14
1. Die Gleichung für die Filtrationsrate	14
2. Der spezifische Kuchenwiderstand	16
3. Beziehungen zwischen spezifischem Kuchenwiderstand und fundamentalen Grössen	19
4. Der Filtermediumswiderstand	21
5. Die integrierte Filtergleichung	23
6. Die praktische Anwendung der Filtrationstheorien	25
III. KLAERFILTRATION	29
1. Allgemeines	29
2. Die Gesetze der Klärfiltration	29
3. Eine spezielle Anwendung des Standardgesetzes	32
4. Die Initialmomente des Filtrationsvorganges	33
EXPERIMENTELLER TEIL	35
I. EINFUEHRENDE VERSUCHE	35
1. Allgemeines und Versuchsziel	35
2. Apparatur	35
3. Versuchstechnik	38

4. Die Wahl des Filtermediums und der Aufschlämmung	38
5. Die Konstruktionsmerkmale der benützten Unterlagenplatten	41
6. Versuchsplan	41
7. Messresultate	43
8. Auswertung der Versuchsergebnisse	46
9. Zusammenfassung	53
II. BESTIMMUNG DES EFFEKTES EINFACHER UNTERLAGENGEO- METRIEN AUF DIE FILTRATION MIT VERSCHIEDENEN TUCH- QUALITÄTEN	55
1. Allgemeines	55
2. Apparatives	55
a) Prinzip und Vorteile der Vierkammerfiltrationszelle	55
b) Allgemeiner Aufbau der Filtrationsanlage	56
c) Die Vierkammerfiltrationszelle	57
d) Spannung des Filtertuches	59
e) Simultane Volumenmessung	59
f) Eichung der Auffanggefäße	62
3. Faktorenwahl	63
4. Die ausgewählten Filtertücher und ihre Charakteristiken	63
5. Versuchsplanung	66
6. Durchführung der Versuche	67
7. Auswertung der Messresultate	68
a) Darstellung im $(t/V) - V$ - Diagramm	68
b) Steigungsanalyse des $t/V$ - $V$ -Zusammenhanges	81
c) Einfluss der Unterlagengeometrie	87
d) Einfluss der Filtertuchqualität	87
e) Einfluss des Druckes	89
f) Einfluss der Konzentration	90
g) Diskussion	91



8. Bestimmung der Filtertuchfläche in Abhängigkeit des Belastungsdruckes	91
a) Methode	91
b) Herstellung der Gipsabdrücke	91
c) Ausmessung der Abdruckflächen	92
d) Resultate	93
e) Annähernde Berechnung der Filterfläche aus einer einfachen Längenmessung	95
9. Einführung der ermittelten Filtertuchflächen	99
a) Berechnung des spezifischen Kuchenwiderstandes	99
b) Vergleich mit Filtrationen unter Zusatz eines Filterhilfsmittels	101
<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>103</b>
<b>NOMENKLATUR</b>	<b>104</b>
<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>107</b>

Leer - Vide - Empty

## EINLEITUNG

Die auf allen Gebieten der Technik angewandte Filtration tritt in der Abwicklung der meisten chemischen Prozesse auf irgendeiner Stufe auf.

Mit Filterapparaten können aus einem mit mikro- oder makroskopischen Teilchen beladenen Gas- oder Flüssigkeitsstrom mit Hilfe eines Filtermittels, das mit einem Sieb vergleichbar ist, feste oder flüssige Partikeln herausgenommen werden.

Die klassischen Hauptanwendungsgebiete der Filtration stellen die Trennung chemischer Fällungen von Flüssigkeiten, die Klärung von Trinkwasser sowie von chemischen Ausgangs- und Endprodukten dar. Filterapparate können mit Erfolg zur Abscheidung kleiner Schwebeteilchen eingesetzt werden. In kleinem Masstab werden sie sogar zur Zurückhaltung von Viren oder zur Trennung von flüssigen Zweiphasensystemen benützt.

Neben der Wahl des Filtrationsapparates ist der Auswahl des Filtermittels die Hauptbedeutung zuzumessen. Als Filtermittel kommen zur Anwendung: Siebe, Metall- und Textilgewebe, verfilzte Schichten, lockere Schüttungen, poröse Massen oder Häute und Membranen für Ultrafilter. Der Einsatz dieser verschiedenen Materialien wird durch Anwendungsgebiet und wirtschaftliche Ueberlegung bestimmt.

In der vorliegenden Arbeit wurde ausschliesslich das Verhalten von Textilgeweben, deren Bedeutung vor allem durch die Entwicklung von chemisch und mechanisch hochresistenten Kunstfasern eine neue Beachtung erfahren hat, untersucht. Solche Gewebe weisen relativ geringe Festigkeitseigenschaften auf. In Filterapparaten müssen sie demzufolge durch eine feste Unterlage gestützt werden. Die Art und Weise, wie ein Filtertuch durch eine Unterlage getragen wird, seine Qualität und der Druck, dem es während einer Filtration ausgesetzt wird, können als mitbestimmende Faktoren für den Verlauf des Filtrationsvorganges betrachtet werden. Die vorliegenden Versuche sollten dazu beitragen, Informationen über diesen Zusammenhang zu erhalten.

## THEORETISCHER TEIL

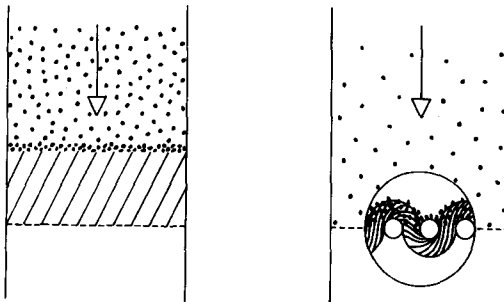
---

### I. ALLGEMEINES UND DEFINITIONEN

Das engere Gebiet der Einheitsoperation Filtration, dessen theoretische Grundlagen im folgenden zusammengefasst werden sollen, umfasst die Trennung einer Suspension von unlöslichen Feststoffteilchen in einer Flüssigkeit. Diese Aufgabe übernimmt eine Membran, das sogenannte Filtermedium, das für die Flüssigkeit durchlässig, für den Feststoff hingegen undurchlässig ist.

Sowohl der Praktiker als auch der Theoretiker unterscheidet zwischen Kuchenfiltration und Klärfiltration. Grace (1) hat in neuerer Zeit bei seinem Versuch, die praktischen Wahlkriterien für die zahlreichen handelsüblichen Filtertypen anzugeben, bezeichnenderweise das erwähnte Ordnungsprinzip angewandt.

Nachstehende Figur 1 zeigt in anschaulicher Art und Weise, wie sich die beiden Filtrationsarten voneinander unterscheiden.



Figur 1 Kuchen- und Klärfiltration

Bei der sogenannten Schlamm- oder Kuchenfiltration trifft eine relativ konzentrierte Suspension fester Teilchen von einem Druckunterschied getrieben auf das Filtermedium, das in einer kurzdauernden Anfangsphase mit den ersten aufgetroffenen Partikeln zusammen das eigentliche filtrierende Element bildet. Auf dieser dynamischen Trennvorrichtung baut sich der Filterkuchen, der im Laufe der Zeit regelmässig an Dicke zunimmt, auf.

Im Falle einer Klärungfiltration wird die mit wenig Feststoffteilchen beladene Flüssigkeit dadurch, dass die Partikeln im Filtermediumsgefüge zurückgehalten werden, geklärt. Auf dem Filtertuch ist die Feststoffablagerung makroskopisch kaum zu erfassen. Die Anfangsphase kommt bei diesem Vorgang nie zum Abschluss.

Aus dieser Betrachtungsweise geht klar hervor, dass der Verlauf des Filtrationszyklus im ersten Fall durch die Kucheneigenschaften bestimmt wird. Die Aktion des Filtermediums ist nur während der sehr kurzen Anfangsphase bemerkbar. Hingegen wird die Klärungfiltration während des ganzen Zyklus durch das Filtermedium und seine Beziehungen zu den Feststoffpartikeln beherrscht.

Im Jahre 1908 erfolgte die erste Publikation durch Hatschek (2), der auf die physikalische Natur des Filtrationsvorganges aufmerksam machte und versuchte, seine Ueberlegungen über den qualitativen Verlauf des Vorganges durch Experimente zu bestätigen. Kurz darauf setzten Almy und Lewis (3) mit der Erforschung der quantitativen Filtrationsbeziehungen ein, die für die Kuchenfiltration bezeichnend sind. Erst ungefähr zwanzig Jahre später befassten sich Hermans und Bredée (4) aus der holländischen Schule eingehend mit den Gesetzmässigkeiten der Klärfiltration, die lange Zeit nicht an die industrielle Bedeutung der Schlammfiltration herankam.

Im Verlaufe der letzten fünfzig Jahre ist eine Filtrationstheorie entstanden, die deutlich die Grenzen der praktischen Anwendbarkeit überschritten hat. Die vielen unter speziellen Bedingungen durchgeführten Experimente, deren Resultate stark mathematisiert worden sind, haben aber wesentlich dazu beigetragen, das Verständnis für die Vorgänge, die sich bei einer Filtration abspielen, zu vertiefen. Dadurch sind für die Planung von Filteranlagen neue Möglichkeiten aufgetaucht.

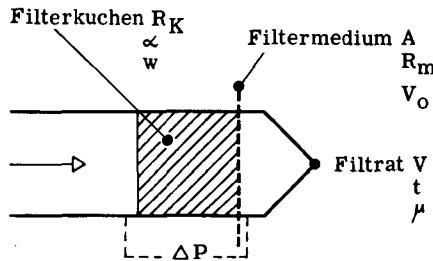
Die relativ komplizierte mathematische Beschreibung der Filtration, einer Einheitsoperation, die durch ihre äusserliche Einfachheit auffällt, ist deshalb verständlich, weil dieser Vorgang in das Gebiet der nicht stationären Hydrodynamik eingereicht werden muss.

Zum allgemeinen Verständnis sollen im folgenden die modernen Filtrationstheorien mit ihren Leitgedanken und ihre praktischen Anwendungsmöglichkeiten zusammengestellt werden.

## II. KUCHENFILTRATION

### 1. Die Gleichung für die Filtrationsrate (Filtrationsdurchfluss-Gleichung)

Das System, das betrachtet werden muss, um eine Differentialgleichung für den Vorgang Filtration herzuleiten, wird in Figur 2 schematisch angeben.



Figur 2 Der Filtrationsvorgang

Zu jedem Zeitpunkt des Filtrationszyklus wird ein Trübelement, das in Richtung Filtermedium gedrückt wird, in seine zwei Phasen getrennt. Dabei werden die festen Teilchen zu Beginn der Operation durch das Filtermedium allein im späteren Verlauf durch den sich auf der Membran aufbauenden Kuchen zurückgehalten. Die von den Feststoffpartikeln befreite Flüssigkeit überwindet darauf in Serie die zwei Widerstände, die ihr durch Filterkuchen und -tuch entgegengesetzt werden, um das System als sogenanntes Filtrat zu verlassen.

Die Intuition verschiedener Forscher wählte die Aussagen des Gesetzes von Poiseuille (5) als Ausgangspunkt für die semitheoretische Herleitung ihrer Filtergleichungen. Dabei betrachteten sie den Filterkuchen als Kapillarbündel.

Poiseuille fand für das laminare Strömen einer Flüssigkeit durch eine glatte Kapillare folgendes Experimentalgesetz:

$$Q = \frac{\pi}{8} \frac{\epsilon_c \Delta P}{\mu \cdot l} r^4 \quad (1)$$

Die Möglichkeit der formalen Anwendung dieses Gesetzes auf das Strömen durch poröse Medien zeigte Darcy (6) schon im Jahre 1856.

Es ist das Verdienst von Sperry (7), den Wert dieses Ansatzes erkannt und ihn zur Ableitung einer Filtergleichung benützt zu haben.

Für das in Figur 2 beschriebene System kann die Lineargeschwindigkeit wie folgt angegeben werden:

$$v = \frac{dV}{A dt} = \frac{g_c \Delta P}{\mu R} \quad (2)$$

Voraussetzung für die erfolgreiche Anwendung dieser Durchflussgleichung, die eine Proportionalität zwischen Strömungsgeschwindigkeit und Druckabfall ausdrückt, bildet die Annahme einer reinen Reibungsströmung im betrachteten Filtersystem. Die Gültigkeit dieser Annahme für die in der Filtrationstechnik angetroffenen Bedingungen wurde durch die Experimente von Ruth (10,11) bestätigt, dies entgegen den früheren Ansichten von Underwood (13).

Der gegen die Strömung wirkende Widerstand  $R$  setzt sich aus dem Filterkuchenwiderstand  $R_K$  und dem in Serie wirkenden Filtermediumswiderstand  $R_m$  zusammen. Der im Prinzip dazukommende Apparatewiderstand kann bei entsprechend konzipierten Filterversuchsanlagen vernachlässigt werden.

$$R = R_K + R_m \quad (3)$$

Der von Lewis und Almy (3) in ihrem Experimentalgesetz vernachlässigte Tuchwiderstand wurde zum erstenmal von Sperry (15) bei der Herleitung seiner Gleichungen berücksichtigt. Underwood (14) betonte, dass die Vernachlässigung des Membranwiderstandes verantwortlich sein könnte für die Abweichungen, deren Erklärung durch die Annahme eines "Durchschwemmeffektes" ("scouring effect") versucht wurde.

Unter der Voraussetzung eines idealen, sich auf einer Filterfläche  $A$  homogen aufbauenden Filterkuchens wächst der Kuchenwiderstand  $R_K$  offensichtlich proportional zur pro Flächeneinheit abgelagerten Feststoffmenge  $W/A$ :

$$R_K = \alpha \frac{W}{A} \quad (4)$$

Die Proportionalitätskonstante  $\alpha$  stellt den sogenannten spezifischen Kuchenwiderstand dar. Durch Einführung der Grösse  $w$ , der Feststoffmenge, die im Kuchen pro Filtratvolumeneinheit abgelagert wird, kann der Kuchenwiderstand mit dem Filtratvolumen  $V$  in Beziehung gebracht werden. Da  $W = wV$  ist, wird:

$$R_K = \frac{\alpha w V}{A} \quad (5)$$

Falls angenommen wird, dass der Kuchen- und der in Serie wirkende Filtermediumswiderstand sich in ähnlicher Art und Weise auf die Durchflussgeschwindigkeit auswirken, liegt es nahe, sich das Filtermedium durch einen widerstandsgleichen Kuchen ersetzt zu denken. Das Filtratvolumen, das bei der Bildung dieses hypothetischen Filterkuchens freigegeben wird, trägt die Bezeichnung äquivalentes Filtratvolumen  $V_0$ . So wird der Filtermediumswiderstand  $R_m$  in Analogie zu Gleichung 5 ausgedrückt:

$$R_m = \frac{\alpha_w V_0}{A} \quad (6)$$

Die Durchflussgleichung 2 lässt sich durch Einführung der Gleichungen 3, 5 und 6 leicht weiterentwickeln:

$$Q = \frac{dV}{dt} = \frac{A g_c \Delta P}{\mu (R_K + R_m)} = \frac{A g_c \Delta P}{\mu \left( \frac{\alpha_w V}{A} + R_m \right)} = \frac{A g_c \Delta P}{\mu \alpha_w \left( \frac{V}{A} + \frac{V_0}{A} \right)} \quad (7)$$

Die differentielle Form (Gleichung 7) der später anzugebenden Filtergleichung drückt aus, dass die Filtrationsgeschwindigkeit proportional einer treibenden Kraft und umgekehrt proportional der Summe der Widerstände ist. Es sei noch bemerkt, dass die durch die Einführung des äquivalenten Filtratvolumens erfolgte Idealisierung die Gefahr mit sich bringt, dass die Diskontinuität zwischen Filterkuchen und Filtermedium übersehen wird.

## 2. Der spezifische Kuchenwiderstand

Besondere Beachtung muss dem spezifischen Kuchenwiderstand, der für einen bestimmten Kuchen charakteristisch ist, geschenkt werden. Dieses Konzept hat sich als äusserst fruchtbar erwiesen.

Er gibt den Widerstand einer Einheitsmenge Kuchen an. Eine Definition, die sich auf das Einheitsvolumen des Filterkuchens bezieht, wird manchmal vorgezogen.

Zwischen diesen zwei Gesichtspunkten besteht die einfache Beziehung:

$$\alpha = \alpha_v / \rho (1 - \epsilon) \quad (8)$$

Beim Vergleich mehrerer Kuchen, die bei verschiedenen Druckbedingungen aus dem gleichen Material entstanden sind, kann festgestellt werden, dass der spezifische Widerstand mehr oder weniger vom angewandten Filtrationsdruck abhängt.



Materialien, die in breitem Druckbereich keine oder nur sehr kleine Variationen ihres spezifischen Kuchenwiderstandes zeigen, werden als inkompressibel bezeichnet. Die meisten in der Praxis angetroffenen Schlämme weisen aber dieses ideale Verhalten nicht auf. Ihr spezifischer Kuchenwiderstand ist druckabhängig; sie werden kompressibel genannt.

Schon Lewis und Almy (3) gaben für die Druckabhängigkeit des spezifischen Kuchenwiderstandes folgendes Experimentalgesetz an:

$$\alpha = \alpha' (\Delta P)^s \quad (9)$$

Die Konstanten  $\alpha'$  und  $s$  sind für jedes System charakteristisch. Die Konstante  $s$ , deren Werte zwischen 0,1 und 0,9 zu liegen kommen, hat die Bezeichnung Kompressibilitätsfaktor erhalten, da sie mit der Kompressibilität einer Substanz zunimmt. Ihre Definition fällt aber nicht mit derjenigen der physikalischen Kompressibilität zusammen. Seiner Einfachheit halber wird dieser Ansatz viel angewandt. Er beschreibt aber die Tatsache nicht, dass der spezifische Kuchenwiderstand bei niederen Drucken einem von Null verschiedenen Grenzwert zustrebt.

Aus diesem Grunde schlug Carman (17) eine Beziehung vor, die diese Einschränkung nicht aufweist:

$$\alpha = \alpha'' (1 + \beta \Delta P)^s \quad (10)$$

Neben der zu beschränkt anwendbaren linearen Relation von van Gilse, van Ginneken und Waterman (16)

$$\alpha = \alpha''' (1 + \beta' \Delta P) \quad (11)$$

sei noch die von Ruth (11) überprüfte und diskutierte Beziehung angegeben.

$$\alpha = \alpha_0 (1 + \beta (\Delta P)^n) \quad (12)$$

Für sehr kompressible Substanzen nimmt  $n$  Werte bis zu 0,8 an. Zugleich kann  $\alpha_0$  unter solchen Bedingungen sehr nahe an null herankommen.  $\beta$  nimmt mit der Kompressibilität ab.

Obige Gleichungen sollten nicht weit über den gemessenen Druckbereich angewandt werden. Grace (18) macht in seiner Arbeit darauf aufmerksam, dass Beziehungen der Form von Gleichung 12 die Verhältnisse nur bis zu Drucken von 4 - 7 at zuverlässig beschreiben.

Die in Abschnitt 1 gemachte Voraussetzung, dass sich der Kuchen homogen aufbaut, entspricht dem Sachverhalt bei inkompressiblen Substanzen, ist aber bei kompressiblen Kuchen nicht haltbar. Auch im Falle eines bei konstantem Druckabfall aufgebauten Filterkuchens konnte die unter anderen von Underwood (13) vertretene These eines durch die ganze Filterdicke konstanten spezifischen Widerstandes den später erfolgten Porositätsmessungen nicht standhalten. Eindeutige experimentelle Bestätigung, dass der spezifische Kuchenwiderstand innerhalb eines Kuchens in Strömungsrichtung zunimmt, ist nochmals in neuester Zeit durch die Arbeiten von Grace (18,19), von Tiller (21) und von Hutto (22) erhalten worden.

Der höchste spezifische Widerstand wird in der Membrannähe, der niedrigste in der Ablagerungszone vorgefunden.

Die Erklärung für diese Erscheinung ist leicht anzugeben. Der in der Strömungsrichtung zunehmende Druckabfall ruft auf jeder Kuchenhöhe einen entsprechenden Kuchengegendruck hervor. In Filtermediumsnähe ist dieser Kuchendruck gleich dem gesamten von der Flüssigkeit im Kuchen erlittenen Druckabfall. Ihm gegenüber steht nur noch ein kleiner Flüssigkeitsdruck.

Diese Anschauung gilt streng nur für den Fall einer an einer ebenen vertikalen Fläche durchgeführten Filtration. Kompliziertere Fälle, bei denen noch andere Druckkräfte in Strömungsrichtung wirken, wie dies bei einer horizontalen Filterfläche der Fall ist, wurden von Grace (19) eingehend erörtert.

Ruth (10) und Carman (17) haben gezeigt, warum die Filtrationsgleichung, die unter der Annahme eines homogenen Kuchenaufbaues abgeleitet wurde, mit gleichem Erfolg auf inkompressible und auf kompressible Filterkuchen anwendbar ist.

Der für einen bestimmten vorliegenden Filtrationsdruck als spezifischer Widerstand  $\alpha$  bei zusammendrückbaren Materialien auftretende Wert stellt einen mittleren spezifischen Widerstand dar, der folgendermassen zu definieren ist:

$$\alpha = \frac{\Delta P}{\int_0^{\Delta P} (dP/\alpha_p)} \quad (13)$$

Diese Definition ist von ausschlaggebender Bedeutung. Sie besagt, dass der mittlere spezifische Kuchenwiderstand nur vom Filtrationsdruck  $\Delta P$  und nicht von der Kuchenhöhe abhängt. Dabei ist der örtliche spezifische Kuchenwiderstand  $\alpha_p$  nur eine Funktion des innerhalb des Kuchens stattfindenden Druckabfalles  $P$ , der identisch mit dem Kompressionsdruck ist. Dieser steigt vom Werte Null in der Ablagerungszone zur Grösse von  $\Delta P$  beim Filtrataustritt. Gleichung 13 hat Gültigkeit, solange der Druckabfall allein auf Reibungskräfte zurückzuführen ist, d. h. bei senkrecht stehender Filterfläche, und bei Ablagerung dünner Kuchen auf waagrechter Filterfläche.

Damit lässt sich auf Grund der Filtrerrategleichung 7, sofern der mittlere spezifische Kuchenwiderstand und seine Druckbeziehung bekannt sind, der Verlauf einer Filtration voraussagen. Dazu müssen Filtratviskosität, Schlammkonzentration und Filtermediumswiderstand angegeben werden.

Von grossem Interesse ist es, eine vollständige Vorhersage der Filtrervorgänge zu ermöglichen. Diese kann aber nur dann erfolgen, wenn der spezifische Kuchenwiderstand mit Hilfe grundlegender Grössen angegeben werden kann.

### 3. Beziehungen zwischen spezifischem Kuchenwiderstand und fundamentalen Grössen

Hervorragende Hydrodynamiker, unter denen Kozeny (23) mit seiner Arbeit über die kapillare Leitung des Wassers im Boden speziell zu erwähnen ist, befassten sich mit dem bei reiner Reibungsströmung in porösen Medien entstehenden Widerstand. Sie versuchten diesen Widerstand in grundlegenden Grössen auszudrücken.

Die von Kozeny abgeleitete Beziehung, die die Permeabilität einer Schütt-schicht mit den Partikel- und Schichteigenschaften in Zusammenhang bringt, wurde von Carman (24) diskutiert und vervollkommenet. Dieser machte auf die Anwendungsmöglichkeit dieser Korrelation auf dem Filtrationsgebiet aufmerksam.

Eine für unsere Betrachtungen interessante Form der als "Kozeny - Carman - Gleichung" bekannte Beziehung lautet:

$$Q = \frac{dV}{dt} = \frac{\epsilon^3}{K_z S_0^2 (1 - \epsilon)^2} \frac{A g_c \Delta P}{\mu L} = B_0 \frac{A g_c \Delta P}{\mu L} \quad (14)$$

Das der Herleitung zu Grunde gelegte Modell ist ein Kapillarmodell, dessen Querschnittsform für die durchschnittliche Porenquerschnittsform repräsentativ ist.

Als Querschnittsmass wurde der mit Hilfe der Schichtporosität  $\epsilon$  und der spezifischen Oberfläche  $S_0$  ausgedrückte hydraulische Radius gewählt. Vorausgesetzt wurde eine viskose Strömung und eine reine zufällige Packung der diskreten Feststoffteilchen.

Auffallend ist die Aehnlichkeit der Kozeny-Carman-Gleichung mit der Durchflussgleichung (2), die für die Betrachtung des Kuchens allein folgendes ergibt:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{A \cdot g_c \cdot \Delta P}{\mu R_K} = \frac{A \cdot g_c \cdot \Delta P}{\mu \left( \frac{\alpha w V}{A} \right)} \quad (15)$$

Da die Kuchenstärke  $L = wV / [A \rho_s (1 - \epsilon)]$  beträgt, wird Gleichung 15 zu:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{A \Delta P}{\mu \alpha L \rho_s (1 - \epsilon)} \quad (16)$$

Aus dem Vergleich zwischen der Kozeny-Carman-Beziehung (Gleichung 14) und der Filtrationsdurchflussgleichung (16) geht folgende Definition des mittleren spezifischen Kuchenwiderstandes hervor:

$$\alpha = \frac{K_Z S_O (1 - \epsilon)}{\epsilon^3 e_s} \quad (17)$$

Weiter besteht eine Beziehung zwischen der Schichtpermeabilität  $B_o$ , einem reziproken Widerstand, und dem mittleren spezifischen Kuchenwiderstand:

$$\frac{1}{B_o} = \alpha e_s (1 - \epsilon) \quad (18)$$

Dieser einfachen Beziehung kommt besondere Bedeutung zu, da durch die hervorragenden Arbeiten von Ruth (12) und Grace (18, 19, 20) eindeutig gezeigt worden ist, dass Permeabilitätsmessungen zur Vorhersage von Filtrationswiderständen kompressibler Substanzen mit Erfolg benützt werden können (Methoden in Abschnitt 5 angegeben). Die Experimente von Hoffing und Lockhart (25) haben die Uebereinstimmung des auf Grund von Permeabilitätskoeffizienten und Porosität nach Gleichung 18 berechneten und des bei Filtrationen erhaltenen Widerstandes für inkompressible Materialien wie Quarz und Diatomeerde hervorgehoben.

Ruth (12), der Permeabilitätsmessungen mit einer empirisch modifizierten Kozeny-Gleichung

$$\frac{dV}{dt} = \frac{v^2 \rho_s f^2 D_p^2}{K} \frac{A^2 \Delta P \cdot g_c}{\mu W} \quad (19)$$

korreliert hatte, konnte diese Beziehung nur mit Hilfe einer Korrektur auf die Vorhersage von Filtrationswiderständen chemischer Fällungen anwenden. Unter der Annahme eines sogenannten "toten" Leervolumens, eines Leervolumengebietes, das der Flüssigkeitsströmung unzugänglich ist, schlug er eine neue Definition des örtlichen spezifischen Widerstandes vor:

$$\begin{aligned}\alpha_p &= K / [(\nu - \nu_0)^2 \varrho_s f^2 D_p^2 g_c] \\ &= K' S_0^2 / (\nu - \nu_0)^2 \varrho_s g_c\end{aligned}\quad (20)$$

Eine elegante Erklärung für das erwähnte Phänomen lieferte er auf Grund einer elektrokinetischen Theorie. Bestimmungen der Permeabilität einer konstanten Filtersubstanzmenge unter verschiedenen mechanischen Kompressionsdrücken, sogenannte Permeabilitätskompressionsmessungen, erlaubten es Ruth (12) das tote Leervolumen zu bestimmen und aus den für verschiedene Kompressionsdrücke berechneten  $\alpha_p$  auf den mittleren spezifischen Widerstand zu schliessen. Dies verlangte die Integration von Gleichung (13).

Bei der Anwendung dieser Methode wird vor allem die Wahl eines Mittelmasses für die Partikelgrösse Schwierigkeiten bereiten. Der sichere Weg muss von Bestimmungen der spezifischen Oberfläche  $S_0$  und des toten Leervolumens unter Zuhilfenahme einer Kompressionspermeabilitäts-Zelle erwartet werden.

#### 4. Der Filtermediumswiderstand

Neben dem den Hauptteil des Strömungswiderstandes liefernden Kuchen tritt der Filtermediumswiderstand  $R_m$  in Serie auf, wie dies in der Filtrationsrategleichung 7 explizit ausgedrückt wird. Obwohl diese Grösse in den meisten praktischen Fällen für einen bestimmten Filtrationszyklus als Konstante behandelt wird, muss auf ihre Komplexität aufmerksam gemacht werden.

Bei näherer Betrachtung fällt die Tatsache auf, dass der Filtrationswiderstand in einfacher Art und Weise in zwei Serienwiderstände zerlegt wird. Dabei scheint der Kuchenwiderstand wirklich eine Betrachtungseinheit zu bilden. Hingegen stellt die unter dem Sammelnamen Filtermediumswiderstand bezeichnete Grösse ein System dar, dem nicht nur der reine Membranwiderstand, sondern auch ein zusätzlicher Widerstand beigeordnet werden muss. Dieser wird durch die Betrachtung der Partikeln, die sich im Filter verfangen haben und derjenigen, die noch in Beziehung zur Membran stehen, erfasst. Offenbar dürfen diese Teilchen nicht in die am Filterkuchen gemachte Betrachtung eingeschlossen werden.

Die wichtige Frage des Strömungszustandes, der beim Durchströmen von Filtermembranen auftritt, wurde von Ruth (11) festgelegt. Er zeigte, dass das Gesetz von Poiseuille die auftretenden Strömungsgeschwindigkeiten vollständig beschreibt.

Der Grund für die relativ einfache Form der Filtrerrategleichung ist darin zu suchen, dass sowohl im Kuchen als auch im Filtermedium Proportionalität zwischen Strömungsgeschwindigkeit und Druck herrscht.

Underwood (13,14) hatte sich für die Ableitung seiner Gleichungen auf Strömungsgeschwindigkeiten, die proportional zur Wurzel oder zum Quadrat des Druckes sein sollten, gestützt, wie dies aus den Beobachtungen von Hinchley et al. (27,28) hervorging.

Ruth (11) fand, dass solche Gesetzmässigkeiten nur bei Strömungsversuchen durch Metallgewebe auftreten. Er war auch imstande, die mannigfachen Gründe anzugeben, die mit dem laminaren Strömungsgesetz interferieren, und zu Fehlschlüssen geführt hatten.

Die Durchströmungsversuche sauberer Membranen sind insofern unbefriedigend, als sie Permeabilitäts- oder Widerstandswerte ergeben, die nicht auf den Filtermediumswiderstand  $R_m$  schliessen lassen, der aus Filtrationsversuchen mit Hilfe einfacher mathematischer Methoden bestimmt wird. In den meisten Fällen ist der experimentell bestimmte Widerstand grösser als die Filtertuchpermeabilität für eine saubere Flüssigkeit.

Die theoretische Voraussage der effektiven Grösse des Filtermediumswiderstandes ist bis heute nicht gelungen. Dafür verantwortlich ist die Komplexität der Vorgänge, die in der Anfangsphase einer Filtration, d. h. beim Aufbau der sogenannten Zwischenschicht, mitspielen, bevor sich ein von der Membran unabhängiger Filterkuchen aufgebaut hat.

Die Beobachtung der Anfangsstadien einer Filtration stellt leider fast unüberwindbare Messprobleme infolge der sehr kurzen Zeitspanne, in der sie sich abspielen. Heertjes und Haas (29) versuchten eine Einsicht in diese Phase zu erhalten, indem sie sehr verdünnte Aufschlämmungen bei konstantem Druck filtrierten. Diese Methode erlaubte ihnen, interessante Aussagen über den Ablagerungsmechanismus von Feststoffteilchen auf dem Filtertuch zu machen. Ihre Resultate trugen wesentlich zum Verständnis des Filtrationsverlaufes bei Klärungsvorgängen (siehe Kapitel III) bei, ohne dabei für sich beanspruchen zu können, die Initialphase einer Kuchenfiltration wahrheitsgetreu rekonstruiert zu haben.

Zur Beschreibung der Druckabhängigkeit des Filtermediumswiderstandes ist es üblich, in Analogie zur Druck - Kuchenwiderstand - Beziehung folgende Approximation zu benützen:

$$R_m = R' (\Delta P)^a \quad (21)$$

Die Form dieses Gesetzes wurde von Carman (17) gewählt. Die zu Grunde liegende Anschauung hält die zum Filtertuch in Beziehung stehenden Feststoffteilchen für den weitaus grössten Teil des Filtermediumswiderstandes verantwortlich. Infolge-

dessen kann das Verhalten dieses Widerstandes gegenüber Druckeinflüssen als ähnlich zum Verhalten des Kuchenwiderstandes angesehen werden. Die zwei Gesetze unterscheiden sich lediglich in der Grösse der Exponenten.

Diese Behandlungsweise, die für praktische Zwecke anwendbar ist, vernachlässigt sozusagen vollständig das Verhalten des Filtermediums, vor allem den Fall, bei dem eine gegenüber einer Druckeinwirkung deformierbare Filtermembran benutzt wird. Besonders hervorzuheben ist, dass sich Filtertücher unter einem Belastungsdruck deformieren lassen. Dabei ist es augenfällig, dass die Filtertuchunterlage eine massgebende Rolle spielt. Jedes Filtertuchgewebe weist ein charakteristisches Dehnungsdiagramm auf. Prinzipiell führt dieses Verhalten zu zwei wesentlichen Veränderungen:

1. einer Vergrösserung der Filtertuchfläche,
2. einer Strukturänderung des Filtertuchgewebes, die sich durch eine Vergrösserung und durch eine Deformation der Membranporen bemerkbar macht.

Die Vergrösserung der Filterfläche zieht eine Erhöhung des Filtratdurchsatzes nach sich. Die unter Punkt 2 erwähnten Vorgänge müssen die Initialmomente der Filtration gestalten helfen. Daraus wird sich ein veränderter Filtermediumswiderstand  $R_m$  ergeben.

Grace (30) hat in neuester Zeit gezeigt, wie die Struktur eines Filtertuches die Leistungsfähigkeit eines Filtermediums bestimmt. Er hat vor allem gezeigt, dass ein mittlerer Porenradius, der mit Hilfe einer Quecksilbereindringmethode bestimmt wird, in Zusammenhang mit der Filtermediumsverstopfung gebracht werden kann. Damit hat er eine hervorragende Basis für ein Eindringen in die Probleme des Einflusses der Filtermediumsstruktur auf den Filtrationsvorgang geschaffen.

## 5. Die integrierte Filtergleichung

Die den ganzen Filtrationsverlauf beschreibende Beziehung zwischen der Zeit  $t$  und dem zu dieser Zeit angefallenen Filtratvolumen  $V$  wird durch die Integration der Filtriergleichung erhalten.

Eine bei Filtrationsexperimenten sehr oft angewandte Durchführungsform stellt der Fall der Filtration bei konstantem Druckabfall dar.

Im einfachsten Fall von inkompressiblem Material lässt sich annehmen, dass die Kuchenporosität durch eine Konstante angegeben werden darf. Es ergibt sich also für eine konstante Druckfiltration aus dem üblichen Differentialansatz

$$\frac{dV}{dt} = \frac{A^2 g_c \Delta P}{\mu \alpha w V} + \frac{A g_c \Delta P}{\mu R_m} \quad (7)$$

wenn die Anfangsbedingungen  $t = 0$  und  $V = 0$  erfüllt sind, folgende Beziehung zwischen  $t$  und  $V$ :

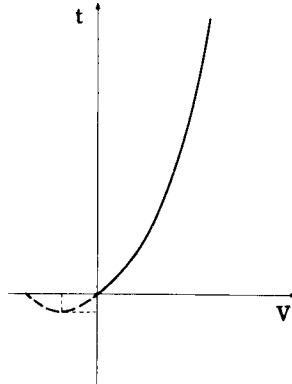
$$\int_0^t dt = \int_0^t \frac{\mu \alpha w}{A^2 g_c \Delta P} V dV + \int_0^t \frac{\mu R_m}{A g_c \Delta P} dV$$

$$t = \frac{\mu \alpha w}{2A^2 g_c \Delta P} V^2 + \frac{\mu R_m}{A g_c \Delta P} V \quad (22)$$

Durch Einführung des Aequivalentvolumens  $V_0$ :

$$t = \frac{\mu \alpha w}{A^2 g_c \Delta P} \left( \frac{1}{2} V^2 + V_0 V \right) \quad (23)$$

Diese integrierte Filtergleichung stellt eine Parabel dar, wie sie in Figur 3 aufzeichnet ist.



Figur 3 Die Filterparabel

Die Filterparabel geht durch den Nullpunkt, ihr Scheitel aber befindet sich nicht im Koordinatenursprung. Der Filtermediumswiderstand wurde dabei durch eine imaginäre Filtration aufgebaut, die im Scheitelpunkt der Parabel beginnt.



Dieser parabolische Zusammenhang bleibt auch für kompressible Materialien bestehen, wie experimentell und theoretisch von Ruth (10) und von Carman (17) bestätigt worden ist.

Unter der Annahme, dass die Druckabhängigkeit des mittleren spezifischen Kuchenwiderstandes und des Kuchenwiderstandes einem einfachen Potenzgesetz, wie dies in den Gleichungen (9) und (21) ausgedrückt wird, folgt, erhält die Filtergleichung folgende Form:

$$t = \frac{\mu \alpha' w}{2A^2 g_c (\Delta P)^{1-s}} V^2 + \frac{\mu R'}{A^2 g_c (\Delta P)^{1-a}} V \quad (24)$$

## 6. Die praktische Anwendung der Filtrationstheorien

Die Anwendbarkeit der vorgeschlagenen Theorien stösst auch auf dem Filtrationsgebiet auf ernsthafte Schwierigkeiten.

Die Hauptgründe müssen unter folgenden Punkten gesucht werden:

1. Die Experimente, die die Gesetzmässigkeiten aufdecken oder überprüfen sollen, werden unter Bedingungen durchgeführt, die öfters gegenüber den industriellen weitgehend idealisiert worden sind.
2. Der Geltungsbereich der angegebenen Gesetze ist nur beschränkt.
3. Speziell bei der Filtration chemischer Niederschläge kann die Variabilität der Qualität der Aufschlammung ausserordentlich gross sein. Verschiedene Flockungsformen, denen in der Filtergleichung keine Rechnung getragen werden kann, ergeben neue Kuchenwiderstände mit neuen Kompressibilitätswerten.

Eines der wichtigsten industriellen Probleme liegt in der Bestimmung der Grösse einer Anlage, die eine Aufschlammung in einer bestimmten Zeit unter möglichst wirtschaftlichen Bedingungen in ihre zwei Phasen auftrennen kann.

Für den Fall einer Konstant - Druckfiltration, die wohl die am häufigsten angewandte Durchführungsform darstellt, wird der Filtrationsverlauf für eine bestimmte Aufschlammung bei einem bestimmten Druck und bei einer bestimmten Temperatur vollständig durch die Filtergleichung

$$t = \frac{\mu \alpha w}{2A^2 g_c \Delta P} V^2 + \frac{\mu R_m}{A g_c \Delta P} V \quad (22)$$

beschrieben, sofern der zugehörige spezifische Kuchenwiderstand  $\alpha$  und der Filter-

mediumswiderstand  $R_m$  bekannt sind. Dieser nimmt erfahrungsgemäss einen Wert an, der zwischen 0,05 und 0,1  $\alpha$  schwankt.

Für diese eindeutigen Bedingungen kann die Zeit zur Erzeugung eines vorgegebenen Filtratvolumens in Funktion der Filtratviskosität und der Filterfläche angegeben werden.

Wie aus den Darlegungen der Abschnitte 2 und 3 hervorgeht, sind die Möglichkeiten der Vorhersage des spezifischen Kuchenwiderstandes  $\alpha$  beschränkt.

Die zwei erwähnten Widerstände können im Laboratorium durch Aufnahme der Volumen - Zeit - Beziehung für bestimmte Bedingungen an einer vorgegebenen Aufschlammung bestimmt werden (für Auswertungsverfahren siehe praktischer Teil).

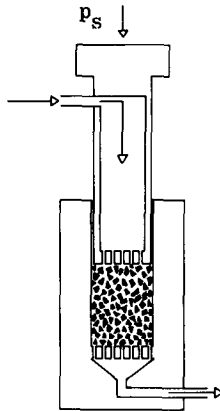
Eine solche Messung bei einem einzigen Druck genügt bei inkompressiblen Materialien. Für kompressible Materialien, zu denen die Mehrzahl der zu filtrierenden Substanzen zu zählen sind, ist es unumgänglich, die Grösse des spezifischen Kuchenwiderstandes bei mehreren Drucken zu kennen.

Durch Messungen bei zwei verschiedenen Filtrationsdrucken lässt sich zwar die Druckabhängigkeit des Kuchenwiderstandes durch Beziehungen wie  $\alpha = \alpha'(\Delta P)^S$  (9) angeben, dies aber nur in kleinen Druckbereichen bis höchstens 4-7 at.

Ueberdies hat Grace (18) auf die Tatsache aufmerksam gemacht, dass mit einem festgelegten Feststoffmaterial in weiten Grenzen variierende Kuchenwiderstände mit eigenen Druckabhängigkeiten beobachtet werden können. Verantwortlich für diese Erscheinung sind die verschiedenen Flockungsintensitäten, die in Aufschlämmungen auftreten können. Zur Charakterisierung des Flockungszustandes eines bestimmten Materials kann die Licht-Extinktions-Konstante benützt werden.

Grace hat nach einer Methode gesucht, mit deren Hilfe die Druckabhängigkeit der verschiedenen Aufschlämmungen bestimmt werden kann, ohne dass eine ganze Serie von Konstant-Druck-Filtrationen für die Bestimmung der Druckabhängigkeit des mittleren spezifischen Kuchenwiderstandes in breitem Bereich durchgeführt werden muss. Diese Methode, die als die modernste bezeichnet werden darf, soll im folgenden skizziert werden.

Figur 4 zeigt den prinzipiellen Aufbau der Versuchsanordnung, die bei sogenannten "Kompressions-Permeabilitäts-Diagrammen" benützt werden kann.

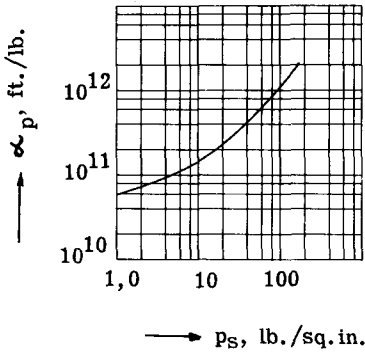


Figur 4 Die Kompressions-Permeabilitäts-Zelle

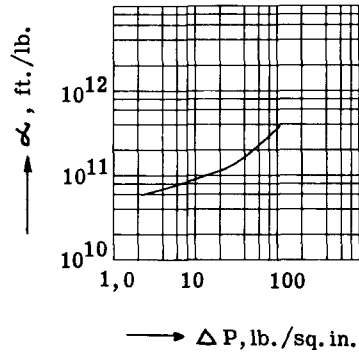
Die zu untersuchende Aufschlämung wird in eine Druckzelle gegeben, die aus einem Zylinder, der mit einer porösen Bodenplatte versehen ist, und einem Kolben, der ebenfalls ein poröses Ende aufweist, besteht. Der entstehende Kuchen wird so dann zunehmenden mechanischen Drucken ausgesetzt. Für jeden der gewählten Belastungsdrucke wird die Schichtpermeabilität bestimmt. Aus den so erhaltenen Permeabilitätswerten kann aus der Filtrergleichung (7) der mittlere spezifische Kuchenwiderstand berechnet werden, der in einer solchen statischen Schicht mit dem örtlichen spezifischen Kuchenwiderstand  $\alpha_p$  zusammenfällt. Blindversuche ergeben den Filtermediumswiderstand in Funktion des Kompressionsdruckes.

Aus einem solchen Kompressions-Permeabilitäts-Experiment werden Widerstandswerte erhalten, wie sie in Figur 5 dargestellt sind. Mit solchen Daten kann der mittlere spezifische Kuchenwiderstand, der bei einem bestimmten, angewandten Filtrationsdruck zu erwarten sein wird, berechnet werden. Für eine vertikale, plane Filterfläche kann gezeigt werden, dass

$$\alpha = \frac{\Delta P}{\int_0^{\Delta P} \frac{d p_s}{f(p_s)}}$$



Figur 5 Oertlicher spezifischer Kuchenwiderstand  $\alpha_p$  in Funktion des mechanischen Druckes  $p_s$



Figur 6 Mittlerer spezifischer Kuchenwiderstand  $\alpha$  in Funktion des Filtrationsdruckabfalls  $\Delta P$

Dabei ist die Funktion  $\alpha_p = f(p_s)$  experimentell zu bestimmen. Das im Nenner auftretende Integral kann graphisch aus einer Darstellung  $1/\alpha_p = f(p_s)$  bestimmt oder durch Anwendung der Simpson'schen Regel berechnet werden.

In Figur 6 sind die  $\alpha$ -Werte, die aus der für verschiedene Filtrationsdrucke durchgeführten Integration berechnet worden sind, angeben.

Die so berechneten Kuchenwiderstände decken sich innerhalb  $\pm 10\%$  mit den bei Filtrationsexperimenten erhaltenen Widerständen. Auch Ingmanson (31, 32) lieferte eine Bestätigung der von Grace vertretenen Ansichten.

Hervorzuheben ist die beschränkte Anwendungsmöglichkeit der Kozeny-Carman-Beziehung zur Vorhersage von Filterleistungen, besonders im Bereich der stark kompressiblen Kuchen, die sich meistens aus kleinen, leicht flockulierenden Partikeln aufbauen. In solchen Fällen ist die aus Partikelgrößenverteilung und Partikelform bestimmte spezifische Oberfläche  $S_0$  unbrauchbar. Die in die Kozeny-Gleichung einzusetzende spezifische Oberfläche ist stark porositätsabhängig. Dazu ist die Kenntnis der Druckabhängigkeit der Porosität notwendig.

### III. KLAERFILTRATION

#### 1. Allgemeines

Die Initialmomente einer Kuchenfiltration und der Verlauf einer Klärfiltration, bei der keine wesentliche Kuchenbildung beobachtbar ist, sind offensichtlich miteinander vergleichbar, indem in beiden Fällen die Abscheidung der Feststoffpartikeln im Filtermedium selbst oder in dessen nächster Nähe erfolgt. Die Ablagerungsform wird von den Filtermediums- und von den Teilchencharakteristiken abhängen, die zu bestimmten Wechselwirkungen zwischen Filtermedium und Feststoffteilchen führen müssen. Diese Interaktion ist wohl für die bei verschiedenen Bedingungen erhaltenen Filtrationsresultate verantwortlich. Bekannt sind die Fälle, bei denen schon nach der Durchführung weniger Kuchenfiltrationszyklen eine für die Filterleistung der Anlage untragbare Verstopfung des Filtermediums eintritt. Die entsprechende Erscheinung kann sich schon nach sehr kurzer Klärungszeit durch fast vollständige Verstopfung der Filtermembran bemerkbar machen. In beiden Fällen wird die Wirtschaftlichkeit des Trennprozesses herabgesetzt.

Die grosse Anzahl Filtermedien, die auf dem Markt angepriesen werden, mag erstaunen, ist aber wohl zum Teil als Folge der ungenügenden theoretischen Kenntnisse der Vorgänge, die sich auf dem Filtermediumsniveau abspielen, zu betrachten.

Bis heute hat der Verfahrenstechniker keine Möglichkeiten, auf Grund fundamentaler charakteristischer Grössen über Filtermedium und über Feststoffteilchen, geringste quantitative Aussagen über den unter bestimmten Filtrationsbedingungen zu erwartenden effektiven Filtermediumswiderstand einer Kuchenfiltration oder über den Klärungsfilterwiderstand zu machen. Die neuesten Arbeiten von Grace (30) scheinen den Weg zu einer Teillösung dieses eminent wichtigen Problems zu eröffnen.

#### 2. Die Gesetze der Klärfiltration

Der experimentell feststellbare zeitliche Verlauf vieler technischer Klärungsfiltrationen ist mathematisch beschrieben worden. Hermans und Bredée (4) haben gezeigt, dass sich aus einer einzigen Differentialgleichung eine Serie von Gesetzmässigkeiten rein formal ableiten lässt, die zur Darstellung des auftretenden

Verlaufes benützt werden können. Für den Fall einer Filtration bei konstantem Druck heisst diese Differentialgleichung

$$\varphi = \frac{d^2 t}{d\left(\frac{V}{A}\right)^2} = k \left[ \frac{dt}{d\left(\frac{V}{A}\right)} \right]^{n'} \quad (23)$$

Für die Filtrationen bei konstanter Durchflussmenge ( $dV / dt = \text{konstant}$ ) gilt:

$$\frac{d(\Delta P)}{d\left(\frac{V}{A}\right)} = k(\Delta P)^{n'} \quad (24)$$

Mit diesen zwei Ansätzen postuliert man, dass die Widerstandsänderungs-Geschwindigkeit, oft als "Verstopfungsgeschwindigkeit" bezeichnet, proportional zum momentanen in die n.-te Potenz erhöhte Filtrationswiderstand ist. Der Wert von n' bestimmt dabei den Filtrationstypus. Die Grösse k hängt für einen bestimmten Filtrationstypus vom System, vom Filtermedium und von den Filtrationsbedingungen ab.

Die Autoren machen auf vier n-Werte aufmerksam, die nach Integration von Gleichung (23) für konstanten Druckabfall zu vier Volumen-Zeit-Beziehungen führen, die im Verlauf von praktischen Filtrationen beobachtet werden können. Diese Gesetze sind in Tabelle 1 für Konstant-Druck-Filtrationen angegeben.

Tabelle 1

	n	$\varphi = k \left[ \frac{dt}{d(V/A)} \right]^{n'} = kw^{n'}$	V = f (t)
Reine Kuchenfiltration	0	$\varphi = k$	$t/V = \frac{K_c}{2} V + \frac{1}{q_0} \quad (25)$
Zwischengesetz	1	$\varphi = kw$	$K_i V = \ln(1 + K_i t q_0) \quad (26)$
Standardgesetz	$1 \frac{1}{2}$	$\varphi = kw^{3/2}$	$t/V = \frac{K_s}{2} t + \frac{1}{q_0} \quad (27)$
Reine Verstopfungsfiltration	2	$\varphi = kw^2$	$V = q_0(1 - e^{-K_b t}) \quad (28)$

In den Volumen-Zeit-Beziehungen obiger Tabelle treten zwei Konstanten auf.  $K_c$ ,  $K_i$ ,  $K_s$  und  $K_b$  stellen die sogenannten "Verstopfungskonstanten" für die vier angeführten Gesetze dar, während  $q_0$  die Anfangsfiltrationsrate bedeutet. Diese zwei Grössen sind experimentell zu bestimmen.

Für den Exponenten  $n' = 0$  liefert die Integration der fundamentalen Differentialgleichung (23) das klassische Gesetz der Kuchenfiltration wie es in Kapitel II, Abschnitt 5 erläutert worden ist. Ein Vergleich zwischen Gleichung (22) und der in obiger Tabelle angeführten Gleichung (25) zeigt komplette Uebereinstimmung und ergibt für  $K_c$  und für  $q_0$ :

$$K_c = \frac{\mu \alpha_w}{A^2 g_c \Delta P} \quad (29)$$

$$\frac{1}{q_0} = \frac{\mu R_m}{A g_c \Delta P} \quad (30)$$

Während das Standardgesetz und das Gesetz für reine Verstopfungsfiltration auf Grund idealisierter physikalischer Bilder ableitbar sind, konnte der Filtrationsverlauf, der durch das Zwischengesetz beschrieben wird und dem wenig Filtrationen oder nur Filtrationsabschnitte zu folgen scheinen, nicht auf Grund eines einfachen Mechanismus gedeutet werden.

Dem Standardgesetz ( $n = 3/2$ ) liegt die Vorstellung zu Grunde, dass sich die Teilchen, die vom Filtermedium zurückgehalten werden, regelmässig an den Wandungen der zylindrisch gedachten Filtermediumsporen ablagern. Damit tritt während des Trennvorganges eine fortschreitende Porenverengerung ein. Grosse Bedeutung kommt diesem Gesetz in der Industrie der Viskose, deren Filtration es befolgt (4), zu. Mit seiner Hilfe wird die Viskose-Filtrierbarkeit geschätzt, die mit fraglichem Erfolg als Qualitätskriterium benützt wird. In neuerer Zeit hat vor allem Vosters (38) zur Vorsicht bei der Anwendung dieser Beziehung gemahnt, da die Anfangsphase der Viskosefiltrationen Abweichungen vom betreffenden Gesetz erkennen lässt. Weitere Bestätigung für die Brauchbarkeit des Standardgesetzes erwächst aus den Arbeiten von Grace (30).

Unter der Annahme, dass jedes suspendierte Teilchen, das eine Filtermediumspore trifft, diese vollständig verstopft, leiteten Hermans und Bredée das Gesetz der reinen Verstopfungsfiltration ab.

Wie es Gonsalves (39) gezeigt hat, kann man ebenfalls zu den obigen Verstopfungsgesetzen unter der Annahme anderer physikalischer Mechanismen kommen. Daraus geht eindeutig hervor, welche Ungewissheit über den Mechanismus herrscht, der zu den bekannten Filterverstopfungen führt.

### 3. Eine spezielle Anwendung des Standardgesetzes

Schon Hermans und Bredée (4) haben darauf aufmerksam gemacht, dass die in den von ihnen vorgeschlagenen Gesetzen auftretenden Konstanten K (Verstopfungskonstante) und  $q_0$  (Anfangsgeschwindigkeit) geeignet sind, bei konstantem Filtermedium die zu filtrierende Flüssigkeit, bei konstanter Flüssigkeit das Filtermedium zu charakterisieren.

Letzteren Weg hat Grace (30) in einem Versuch, Filtermediumscharakteristiken und Filtermediumsleistungen quantitativ miteinander in Beziehung zu bringen, beschritten.

Seine Verfeinerung in der Ableitung des Standardgesetzes 27 hebt deutlich hervor, wie die Konstanten K und  $q_0$  in filtermediumseigenen Werten ausgedrückt werden können:

$$t / V = \frac{8 h \mu}{\pi N r_0^4 A g_c \Delta P} + \left[ \frac{c' / (1 - \epsilon_p)}{\pi N A h r_0} \right] t \quad (31)$$

Ein Vergleich mit Gleichung 27 ergibt für

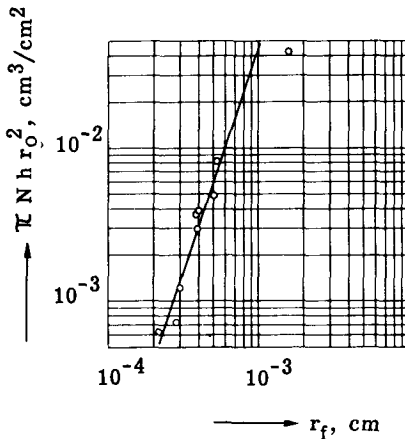
$$1 / q_0 = 8 h \mu / \pi N r_0^4 A g_c \Delta P \quad (32)$$

$$K_s = 2 \left[ \frac{c' / (1 - \epsilon_p)}{\pi N A h r_0^2} \right] \quad (33)$$

Besondere Beachtung ist dieser Form des Standardgesetzes für Konstantdruck-Filtration zu schenken, da die Klärfiltrationsversuche von Grace (30) mit einer verdünnten Standardaufschlämmung zeigten, dass für jedes betrachtete Filtermedium ein bestimmtes Gebiet der Volumen-Zeit-Kurve dem Standardgesetz gehorcht. Aus der Untersuchung des Standardgesetzgebietes konnte er für jedes Filtermedium einen charakteristischen "Verstopfungswert"  $\pi N h r_0^2$  bestimmen.



Entscheidend ist, dass eine Korrelation zu existieren scheint zwischen dem experimentellen Verstopfungswert und dem "Modalwert" des Porendurchmessers, der zwischen den Fasern auftritt. (Im Gegensatz zum Porendurchmesser zwischen den Garnen). Dieser Modalwert wurde durch Anwendung der Quecksilbereindringmethode bestimmt. Die für neun verschiedene Filtermedien erhaltene Korrelation stellt einen bedeutenden Erfolg auf dem Weg der Vorhersage der Filtermediumsleistungen auf Grund der bestimmbarer Filtermediumsgrößen dar. Dieser Zusammenhang wird in Figur 7 gezeigt.



Figur 7 Verstopfungswert  $\pi N h r_o^2$  in Funktion des Modalwertes des Zwischen-Faser-Porendurchmessers  $r_f$

#### 4. Die Initialmomente des Filtrationsvorganges

Mit dem Ziel, die Initialmomente einer Kuchenfiltration aufzuklären, führten Heertjes und Haas (29) Versuche an möglichst idealen Systemen mit sehr kleinen Feststoffkonzentrationen durch, um eine genügende Zeitspanne für die Beobachtung des Aufbaues der ersten Partikelschichten zur Verfügung zu haben. Die Annahme, dass der dabei angetroffene Mechanismus derselbe ist wie in der Anfangsphase einer Kuchenfiltration, erscheint berechtigt. Man muss aber voraussetzen können, dass die effektiv wirkende Partikelgröße nicht vom Flockungsgrad abhängt, der eine Funktion der Konzentration darstellt. Ihre Versuche an einem einzelnen System, bei denen die Konzentration im Bereich kleiner Konzentrationen (0,001 - 4 g/l) variiert wurde, zeigten eine ganze Stufenleiter von Gesetzmässigkeiten, die

auf der einen Seite entsprechend einer Kuchenfiltration durch eine Proportionalität zwischen Widerstand und Filtratvolumen, auf der andern Seite für die kleinsten Konzentrationen durch eine vollständige Verstopfung begrenzt waren. Ihre Resultatsinterpretation neigt dahin, zwischen den zwei erwähnten Randgesetzen keine diskreten Stufen, sondern ein sukzessives Gleiten zu erkennen. Sie waren auch imstande, eine Durchflussgleichung für den Fall der vollständigen Verstopfung anzugeben.

$$\frac{dV}{Adt} = \frac{\Delta P}{R_k + R_m} = \Delta P / \left[ \frac{R_m W}{a'N - W} + R_m \right] \quad (34)$$

Gleichung 34 zeigt, dass die Durchflussmenge 0 wird, wenn die Kuchenmenge  $W$  gegen die Menge Feststoff  $aN$ , die imstande ist, alle Poren vollständig zu verstopfen, strebt.

In neuester Zeit ist von Heertjes (33) eine neue Gleichungsversion aus einer vereinfachten Fanning-Gleichung abgeleitet worden:

$$R = R_m \left[ \frac{0 \ a'N}{0 \ a'N - W} \right] S' \quad (35)$$

Der Gültigkeitsbereich erstreckt sich vom laminaren bis ins turbulente Strömungsgebiet. Die Parameter  $0$  und  $S'$  können Werte zwischen 1 und grossen positiven Zahlen annehmen, wobei letztere Werte beim Kuchenfiltrationstypus auftreten. Sie sind Funktionen der Konzentration, der Differenz zwischen Feststoff- und Flüssigkeitsdichte, der Partikelgrössenverteilung und der Grenzflächenspannung, die an der Phasengrenze fest - flüssig herrscht. Ueberdies scheint  $0$  von der Partikel- und Porenform abzuhängen. Das der Ableitung dieser Gleichung zu Grunde liegende Bild besteht aus einem Filtertuch mit  $N$  kreisförmigen Poren pro Flächeneinheit, sphärischen Partikeln vom Gewichte  $a$ , deren Durchmesser grösser ist als der Porendurchmesser.

Mit Hilfe der Gleichung 35 können die Versuche von Heertjes (33) im Bereich starker Filtertuchverstopfung geordnet werden. Auffallend ist, dass auch dieser Autor die Gesamtheit seiner Versuche nicht ohne die Annahme eines Zwischengesetzes (Zwischenverstopfungs- und Kuchenfiltration) zu beschreiben vermag, was einer Annäherung an die von Hermans und Bredée (4) vertretene Meinung gleichkommt.

Die grosse Anzahl von miteinander in Wechselwirkung stehenden Faktoren erschwert die Untersuchung der Anfangsvorgänge, die in neuester Zeit noch einmal von Heertjes (34) aufgegriffen worden sind. Er war nur imstande, eine rein experimentelle Gleichung für die schon bekannte Konzentrationsabhängigkeit des differentiellen Widerstandes  $r_d = dR / dW$  anzugeben. Daneben konnte gezeigt werden, dass die Initialgeschwindigkeit deutlichen Einfluss auf diesen Widerstand ausübt. Für die untersuchten Systeme nimmt er mit zunehmender Anfangsgeschwindigkeit und mit zunehmender Konzentration ab.

## EXPERIMENTELLER TEIL

---

### I. EINFUEHRENDE VERSUCHE

#### 1. Allgemeines und Versuchsziel

Filtertücher weisen, wie schon früher erwähnt wurde, Dehnungseigenschaften auf, die zum Teil reversibel sein können. Diese Dehnungserscheinungen müssen nach rein mechanischem Gesichtspunkt zu verschiedenen Deformationen führen, die von der Art und Weise, wie die Filtertücher bei einer Druckbelastung gestützt werden, abhängen.

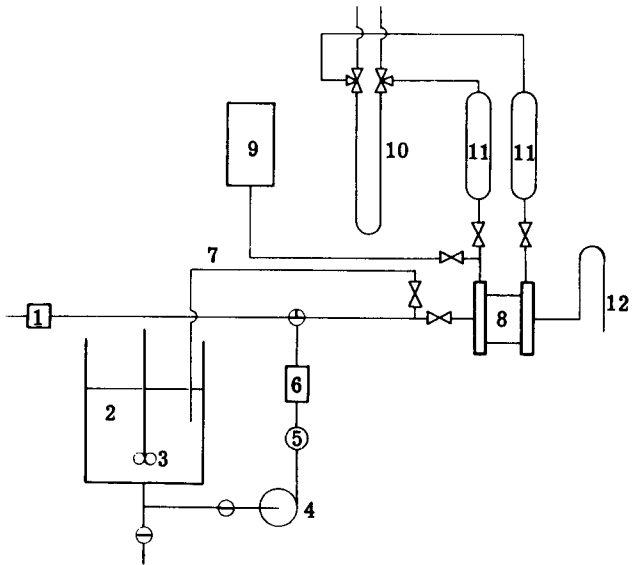
Eine bestehende Filtrationsanlage, deren prinzipieller Aufbau einer klassischen Versuchsanlage entsprach, barg die Möglichkeit in sich, verschiedenartige Filtermediumsunterlagen aufzunehmen.

Das Ziel der ersten Versuche bestand darin, zu prüfen, ob mit der gegebenen Apparatur unter günstig gewählten Bedingungen überhaupt Unterschiede zwischen Filtrationen festzustellen waren, bei denen nur die Art der Filtertuchunterstützung variiert wurde. In zweiter Linie sollte die Eignung dieser Anordnung für solche Untersuchungen festgestellt werden.

#### 2. Apparatur

Aus Figur 8 ist der Bau der benützten Apparatur ersichtlich.

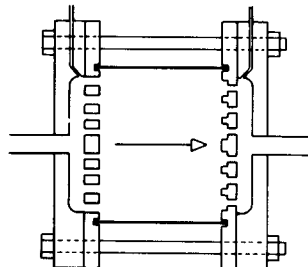
Die Suspension, die filtriert werden sollte, wurde in einem Vorratsgefäß von zweihundert Liter Inhalt (Durchmesser = 58 cm) aufbewahrt. Ein Dreiflügel-Propeller-rührer (Durchmesser = 24 cm, Drehzahlen: 200 U/Min. und 400 U/Min.) verhinderte die Sedimentation der Feststoffteilchen.



**Figur 8** Apparatuschema

**Legende:**

- |                        |                          |
|------------------------|--------------------------|
| 1. Glaswollefilter     | 7. Umwegleitung          |
| 2. Aufschlämmsbehälter | 8. Filtrationszelle      |
| 3. Propellerrührer     | 9. Schreibmanometer      |
| 4. Zentrifugalpumpe    | 10. Quecksilbermanometer |
| 5. Bimetallthermometer | 11. Puffergefäße         |
| 6. Filterkerze         | 12. Filtratausfluss      |



**Figur 9** Die Filtrationszelle

Der Schlamm wurde mittels einer doppelstufigen Zentrifugalpumpe (Pumpenbau Brugg, Modell NcP 3a, maximale Förderhöhe = 62 m, maximaler Durchsatz = 1,8 Liter / sec) in die Filterzelle gedrückt. Die Temperaturkontrolle erfolgte mittels eines Bimetallthermometers in der Zellenzuleitung, in die ein Sarco-Kerzenfilter eingesetzt werden konnte. Die mit einem geeigneten Filtertuch überspannte Metallkerze diente bei Wasserdurchlässigkeitsversuchen an Filtertüchern zur Vermeidung des sogenannten "Filtereffektes". Eine Umwegleitung erlaubte es, die Pumpe vor Versuchsbeginn in Betrieb zu nehmen und leistete bei der Druckregulierung mit den zwei in der Nähe der Zelle angebrachten Hähnen wertvolle Dienste. Die durch diese Leitung ins Trübenreservoir zurückströmende Aufschlammung sorgte für zusätzliche Rührung und bewirkte einen langsameren Temperaturanstieg. Zur Druckmessung konnte entweder ein Quecksilbermanometer, dessen Schenkel direkt mit der Flüssigkeit in Berührung standen, oder ein Membranmanograph (Manometer A.G., 0-3 atü) benützt werden. Das aus der Filtrationszelle herausströmende Filtrat wurde mit einer automatisch registrierenden Waage in Funktion der Zeit gemessen. Das Frischwasser, das durch eine spezielle Zuleitung in die Apparatur eingeführt werden konnte, wurde mit Hilfe eines Glaswollfilters geklärt.

Das Leitungssystem der Anlage bestand aus verzinkten Eisenröhren (3/4").

Die zylindrische Filterzelle, deren Längsschnitt in Figur 9 gezeichnet ist, wies drei wesentliche Bestandteile auf: einen Verteilungsflansch, ein zylindrisches Rohr und einen Filtermediumsunterlagenflansch. Der Verteilungsflansch diente der Erweiterung des Strömungsquerschnittes. Seine Lochplatte sorgte für möglichst gute Strömungsverteilung. Durch eine kleine Bohrung wurde die Verbindung zwischen Filtrationsschlamm und Manometer hergestellt. Der Unterlagenflansch bestand aus einer Plexiglasunterlage, die ausgewechselt werden konnte, und einem vernickelten Eisentrichter für die Sammlung des anfallenden Filtrates. Ein in diesen Flansch gebohrter Kanal ermöglichte eine Druckmessung hinter der Unterlagenplatte. Zwischen den zwei mit kreisförmigen Nuten versehenen Flanschen konnte eine zylindrische Plexiglasröhre (lichter Querschnitt =  $130,6 \text{ cm}^2$ ) eingesetzt werden. Das Filtermedium wurde beim Anziehen mit den vier zur Verfügung stehenden Schrauben in die Nuten der Unterlagenplatte gedrückt. Zwei Gummiringe sorgten für genügende Abdichtung. Die Filterfläche wurde stets in vertikaler Lage eingesetzt.

### 3. Versuchstechnik

Zur Durchführung von Versuchen bei kleinen Feststoffkonzentrationen musste die Apparatur, die nicht in allen Teilen rostfrei war, eine halbe Stunde lang bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten gespült werden. Ein kleiner Zusatz von Netzmittel war nützlich. So wurden eventuelle Feststoffablagerungen oder Rostansätze aus dem System entfernt.

Vor dem Versuch wurde die Apparatur bis zur als Ueberlauf ausgebildeten Filtrataustrittsstelle mit Frischwasser aufgefüllt und entlüftet. Die Pumpe brachte den im Vorratsgefäß angesetzten Schlamm schon vor dem Versuchsbeginn über die Umwegsleitung bei geschlossenem Zellen-Zuführungshahn in Zirkulation. Dadurch konnte der gewünschte Filtrationsdruck schon kurze Zeit nach Oeffnung des Filterventils erreicht werden. Die Konstanthaltung des Filtrationsdruckes erfolgte durch Handregulierung mit Hilfe der Umwegeleitungs- und Filtereingangsventile.

Die bis nahe an die Filterzelle zirkulierende Aufschlammung drang beim Oeffnen des Filterventiles sofort in die Filterzelle ein. Die Ablagerung der Feststoffteilchen auf dem Filtermedium, also der Beginn der eigentlichen Filtration, erfolgte mit eini-ger Verzögerung. Das sich vor Versuchsbeginn in der Filterzelle befindliche Wasservolumen, das  $725 \text{ cm}^3$  betrug, musste vorerst durch das Trennmedium gedrückt werden. Auch andere Versuchstechniken weisen ähnliche Verzögerungszeiten auf in der Aufnahme des Filtrationsbeginnes. Da in diesen Fällen das Filtersystem nicht mit Wasser gefüllt wird, verstreicht nach Zuleitung des Schlammes eine gewisse Zeit, bis sich das filtratseitige System mit Wasser gefüllt hat. Das Filtrat erscheint in der Messanordnung, nachdem der Filtrationsvorgang schon begonnen hat.

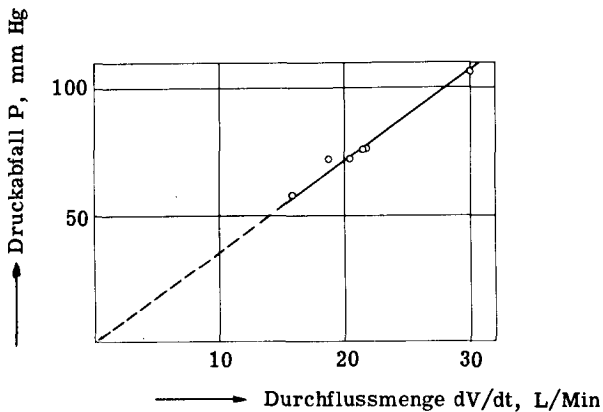
### 4. Die Wahl des Filtermediums und der Aufschlammung

Bei der Auswahl des Filtertuches wurde darauf geachtet, eine Qualität zu finden, die für eine geeignete Aufschlammung und für die gewählten Versuchsbedingungen nicht vom ersten Augenblick an imstande war, ein klares Filtrat zu ergeben. Für diese Aufgabe eignete sich eine Filtertuchqualität, deren technische Daten in Tabelle 2 zusammengestellt sind.

Tabelle 2 Technische Angaben über Filtertuch No. 5

Material	Baumwolle
Bindungsart	Leinwandbindung
Dicke	0,99 mm
Gewicht pro Flächeneinheit	530 g/m <sup>2</sup>
Luftdurchlässigkeit für trockenes Tuch*)	8,5 x 10 <sup>-2</sup> l/cm <sup>2</sup> · sec
Luftdurchlässigkeit für gequollenes Tuch*)	19,4 x 10 <sup>-3</sup> l/cm <sup>2</sup> · sec

Der Widerstand des gequollenen Filtertuches gegenüber reinem Wasser wurde in der beschriebenen Filtrationsapparatur bestimmt. Die Versuchsergebnisse von Figur 10 zeigen, dass der Widerstand des gewählten Filtertuches wie normalerweise üblich druckunabhängig ist. Diese Tatsache geht aus der Proportionalität zwischen Durchflussmenge und Druckabfall hervor.



Figur 10 Druckabfall an Tuch No. 5 in Funktion der Wasserdurchflussmenge

Demnach beträgt der Filtertuchwiderstand gegenüber reinem Wasser für das Filtertuch No. 5

$$R_{m_0} = \Delta P / (dV / dt) \frac{A}{\mu} \quad (36)$$

\*) Der Luftüberdruck vor dem Filtertuch betrug 300 mm Wassersäule. Für angewandte Prüfmethode siehe Koch und Wagner (40).

Für das betrachtete System sind:

$$\text{Steigung } \Delta P / (dV / dt) = 3,37 \text{ mm Hg} / (\text{Liter} / \text{Min.})$$

$$\mu = 1,3077 \times 10^{-2} \text{ poises}$$

$$A = 130,6 \text{ cm}^2$$

$$R_{m_0} = \frac{0,05071 \times 10^{-1} \times 9,81 \times 10^5 \times 130,6 \times 60}{10^3 \times 1,3077 \times 10^{-2}}$$

$$R_{m_0} = 2,98 \times 10^6 \text{ cm}^{-1}$$

---

Aus den Durchlässigkeitsangaben von Tabelle 2 ist zu ersehen, dass die Quellung des Filtertuches einen bedeutenden Einfluss auf seinen Widerstand ausübt. Vollständige Quellung wird in vielen Fällen erst nach mehreren Stunden erreicht, wie dies durch die Messungen von Dreier (41) illustriert wird.

Vollkommene Benetzung und Grenzquellung wurden dadurch erreicht, dass die Filtertücher in eine vierzig-gradige wässrige Netzmittellösung (0,1 ‰ Invadin) gegeben und mindestens vierundzwanzig Stunden lang darin belassen wurden. Diese Grenzquellung zu erreichen war von besonderer Wichtigkeit, weil die Messungen bei niederen Feststoffkonzentrationen erfolgten.

Die Trübe bestand aus Magnesiumcarbonat, das in Wasser suspendiert war. Die Konzentration betrug 0,5 g/Liter. Diese sehr niedrige Konzentration wurde auf Grund der Ueberlegung, dass sich kleine Unterlageneffekte vor allem während des Aufbaus dünner Kuchen bemerkbar machen müssten, gewählt.



## 5. Die Konstruktionsmerkmale der benützten Unterlagenplatten

Drei verschiedene Unterlagenplatten wurden auf ihren Einfluss im Filtrationsvorgang geprüft. Figur 11 zeigt die drei gewählten Geometrien.

Der Bau der Unterlagen erfolgte so, dass bei verschiedener Filterauflagegeometrie möglichst viele gemeinsame Strömungsvariablen bestehen blieben.

Die Hauptmerkmale können in zwei Gruppen unterteilt werden.

### A) Gemeinsame Merkmale

1. Querschnitt der Auflagelamelle	4 x 2 mm
2. Anzahl Löcher	52
3. Lochdurchmesser	3 mm
4. Gesamtströmungsquerschnitt	130,6 cm <sup>2</sup>
5. Abstand zwischen zwei parallelen Lamellen	13,5 mm

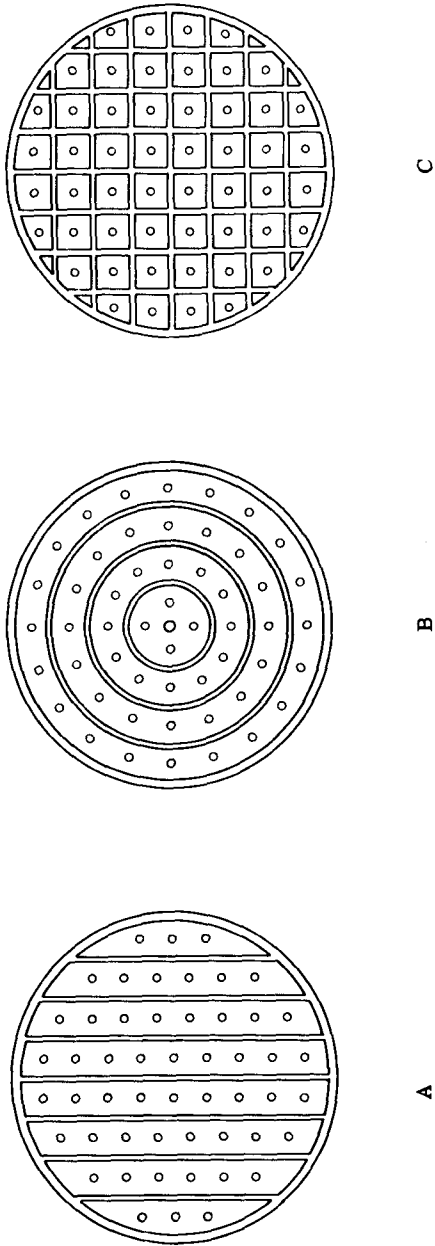
### B) Spezielle Merkmale

1. Geometrie A, B, C (siehe Figur 11)
2. Kontaktfläche des Filtertuches mit der Auflageplatte

Unterlage	A	B	C
Fläche in cm <sup>2</sup>	26	25	40

## 6. Versuchsplan

Für konstante Filtrationsbedingungen und konstante Aufschlammungskonzentration wurde der Einfluss der drei im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Unterlagenplatten auf den Prozessverlauf untersucht. Dieses Experiment galt einer bestimmten Tuchqualität. Jede Unterlage wurde viermal geprüft. Ein für diese Versuche geeigneter Versuchsplan stellen die Blöcke mit zufälliger Anordnung dar. Tabelle 3 symbolisiert diesen klassischen Versuchsplan für die Unterlagen A, B und C.



Figur 11 Die Unterlagenplatten

**Tabelle 3** Versuchsplan: Blöcke mit zufälliger Anordnung

Block	Unterlage		
1	A	C	B
2	B	A	C
3	C	A	B
4	B	C	A

Wie Tabelle 3 zeigt, bestand jeder Block aus drei Versuchen, und zwar war jede Geometrie einmal vorhanden. Die Versuchsreihenfolge innerhalb einer Dreier-versuchsserie, eines Blockes, wurde völlig zufällig herausgesucht. Das Zusammenfassen je dreier Versuche zu Blöcken erweist sich aus zwei Gründen als vorteilhaft. Erstens können dadurch die möglichen zeitlich abhängigen Störfaktoren bei der Versuchsauswertung vom Unterlagenfaktor besser getrennt werden. Zweitens war dadurch die Möglichkeit gegeben, obwohl für die vier Blöcke zufällig aus einem größeren Los herausgegriffene Tuchabschnitte benutzt worden waren, die Tuchqualität in ihrer Gesamtheit zu überprüfen und die Wirkungen der Qualitätsschwankungen von der Unterlagenwirkung zu separieren.

## 7. Messresultate

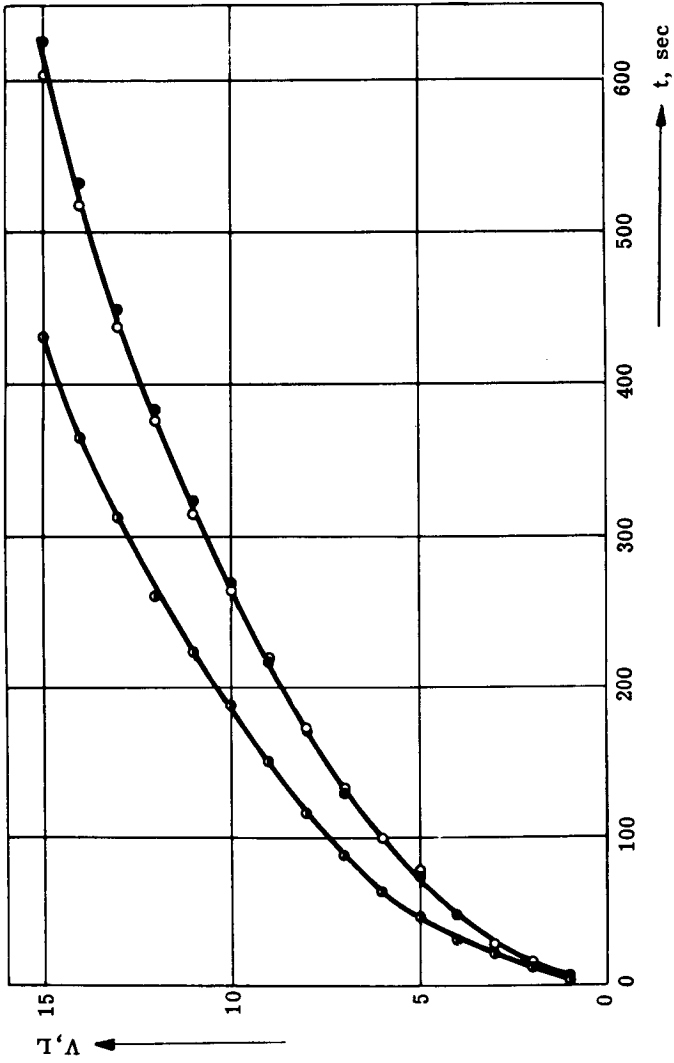
Für alle durchgeführten Versuche wurden folgende Grössen konstant gehalten:

Filtertuch	:	No. 5
Filterfläche A	:	130,6 cm <sup>2</sup>
Druckabfall $\Delta P$	:	0,75 at
Schlammkonzentration	:	0,5 g Magnesiumcarbonat pro Liter Wasser
Anfangstemperatur	:	9 <sup>o</sup> C
Endtemperatur	:	11 <sup>o</sup> C

Der Tabelle 4 können die gemessenen Volumen-Zeit-Werte entnommen werden, die für die Versuche 3A, 3B und 3C in Figur 12 graphisch aufgezeichnet worden sind. Die Kurven für die Unterlagen A und C fallen sozusagen zusammen, während die Filtrationskurve für die Unterlage B wesentlich verschieden ist.

**Tabelle 4** Messresultate der Versuche mit den Unterlagen A, B und C

Filtrat Volumen V (Liter)	Zeit t (sec)											
	Block 1			Block 2			Block 3			Block 4		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
1	5	5	3	4	5	5	5	3	6	6	5	5
2	15	15	16	13	13	16	15	11	10	16	13	13
3	27	27	30	26	24	30	27	20	29	30	23	24
4	44	40	46	42	39	47	47	30	48	47	37	40
5	65	64	73	67	63	74	77	45	73	75	58	64
6	88	89	97	92	86	98	100	62	99	96	74	86
7	120	119	129	122	116	133	132	86	129	126	98	116
8	156	157	171	164	155	173	171	116	171	164	127	155
9	197	198	213	213	198	218	220	150	217	208	160	199
10	245	244	263	266	247	275	264	187	269	257	198	248
11	294	291	315	316	294	328	315	223	323	306	236	291
12	350	350	376	380	349	395	376	265	383	365	280	351
13	410	406	444	443	411	463	438	312	449	427	326	412
14	485	497	517	521	486	546	517	364	532	498	383	488
15	565	-	605	608	574	641	603	431	626	575	440	569



Figur 12 Filtratvolumen  $V$  in Abhängigkeit der Zeit  $t$  für Versuchsblock 3 mit den Unterlagen A ○, B □, C ●

### 8. Auswertung der Versuchsergebnisse

Falls ein experimentell bestimmter Volumen-Zeit-Zusammenhang dem parabolischen Kuchenfiltrationsgesetz gehorcht, so müssen die einzelnen Werte Gleichung 22 genügen, deren vereinfachte Form folgendermassen geschrieben werden kann:

$$t = a_2 V^2 + b_1 V \quad (22b)$$

Die Differentiation dieser Parabel liefert die Gleichung einer Geraden:

$$dt/dV = 2a_2 V + b_1 \quad (37)$$

Der Zusammenhang zwischen der reziproken Filtrationsrate und dem Filtratvolumen ist linear. Diese Tatsache eröffnet die Möglichkeit einer einfachen Bestimmung der Parabelkoeffizienten  $a_2$  und  $b_1$ .

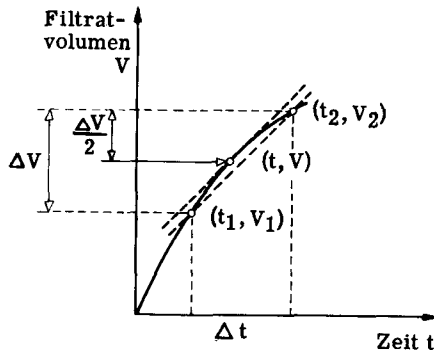
Die differenzierte Filtrationskurve ergibt in einer  $(dt/dV) - V$  - Darstellung eine Gerade, deren Steigung und deren Achsenabschnitt leicht herausgelesen werden können. Die Bestimmung der Steigung liefert den Wert für den Koeffizienten  $2a_2$ , diejenige des Achsenabschnittes den Wert für  $b_1$ .

Die Bedeutung von  $a_2$  und  $b_1$  ist wie folgt zu umschreiben:

$$a_2 = \frac{\mu \alpha w}{2A^2 g_c \Delta P} \quad (38) \quad b_1 = \frac{\mu R_m}{A g_c \Delta P} \quad (39)$$

Nach der Bestimmung von  $a_2$  und  $b_1$  können also für bekannte Versuchsbedingungen der mittlere spezifische Kuchenwiderstand aus Gleichung 38 und der Filtermediumwiderstand  $R_m$  aus der Gleichung 39 berechnet werden.

Die in den vorliegenden Versuchen erhaltenen Filtrationskurven wurden differenziert. Die Differentiation erfolgte nicht nach einer graphischen Methode, sondern mit Hilfe einer rechnerischen Approximation, die durch Figur 13 veranschaulicht wird.



Figur 13 Differentiationsverfahren

Die Steigung  $dt/dV$  im Punkte  $(t, V)$  wurde durch die Steigung der Sekante, die durch die Punkte  $(t_1, V_1)$  und  $(t_2, V_2)$  geht, approximiert. Das für alle Bestimmungen gewählte Volumenintervall  $\Delta V$  betrug 2 Liter. Der betrachtete Wert  $V$  lag stets in der Mitte dieses Intervalles.

Die nach dieser Methode berechneten Steigungswerte  $dt/dV$  werden für verschiedene Filtratvolumenwerte  $V$  in Tabelle 5 angegeben.

**Tabelle 5** Resultate der Differentiationen der Filtrationskurven

Filtrat Volumen V (Liter)	Reziproke Filtrationsrate, $dt/dV$ (Min. / Liter)											
	Block 1			Block 2			Block 3			Block 4		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
1	0,125	0,125	0,135	0,110	0,110	0,135	0,125	0,090	0,125	0,135	0,110	0,110
2	0,185	0,185	0,225	0,180	0,160	0,210	0,185	0,140	0,190	0,200	0,150	0,160
3	0,240	0,210	0,250	0,240	0,215	0,255	0,265	0,160	0,300	0,255	0,200	0,225
4	0,315	0,310	0,360	0,345	0,325	0,365	0,415	0,210	0,370	0,375	0,295	0,335
5	0,370	0,405	0,425	0,415	0,390	0,425	0,445	0,265	0,425	0,410	0,305	0,380
6	0,460	0,455	0,465	0,455	0,440	0,495	0,460	0,340	0,465	0,425	0,330	0,430
7	0,565	0,570	0,615	0,600	0,575	0,625	0,590	0,450	0,600	0,565	0,445	0,575
8	0,640	0,660	0,700	0,760	0,685	0,705	0,735	0,535	0,735	0,685	0,520	0,695
9	0,740	0,725	0,765	0,850	0,770	0,850	0,775	0,585	0,815	0,775	0,590	0,775
10	0,810	0,775	0,850	0,860	0,800	0,920	0,790	0,610	0,880	0,815	0,630	0,765
11	0,875	0,880	0,945	0,950	0,850	1,000	0,935	0,650	0,950	0,900	0,685	0,860
12	0,965	0,960	1,060	1,055	0,975	1,125	1,025	0,740	1,050	1,010	0,750	1,010
13	1,125	1,075	1,175	1,125	1,140	1,260	1,175	0,825	1,245	1,140	0,855	1,140
14	1,295	-	1,355	1,375	1,360	1,480	1,375	0,990	1,475	1,315	0,950	1,305

Die in Tabelle 5 angegebenen Abhängigkeiten zwischen  $dt/dV$  und  $V$  wurden auf ihre Linearität geprüft. Zu diesem Zwecke wurde der Korrelationskoeffizient

eines jeden Versuches für die Werte, die zwischen  $V = 1$  Liter und  $V = 11$  Liter lagen, berechnet\*).

In Tabelle 6 werden diese Korrelationskoeffizienten, die ein Mass für die Linearität darstellen, angegeben.

Tabelle 6 Korrelationskoeffizienten

Unterlage Block	A	B	C
1	0,9977	0,9953	0,9967
2	0,9929	0,9920	0,9900
3	0,9921	0,9878	0,9957
4	0,9919	0,9939	0,9921

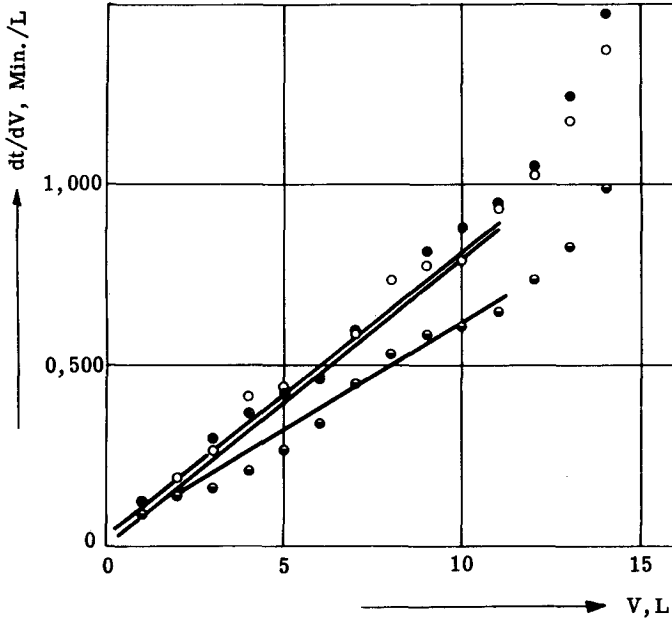
Die Korrelationskoeffizienten schwanken zwischen 0,9977 und 0,9878. Beide Werte sprechen für einen stark gesicherten linearen Zusammenhang, wie aus den Tabellen von Fisher und Yates (44) herausgelesen werden kann.

Die Darstellung der Resultate der Tabelle 5 kann also in einem bestimmten Intervall durch Geraden erfolgen. Für jeden Versuch wurde die die Verhältnisse am besten wiedergebende Gerade, die sogenannte Regressionsgerade, berechnet. Das Resultat dieser Rechnung wird in Tabelle 7 angegeben.

---

\*) Für Berechnungsmethode siehe Brownlee (43).





**Figur 14** Reziproke Filtrationsrate  $dt/dV$  in Funktion des Filtratvolumens  $V$  für Versuchsblock 3 mit den Unterlagen A ○, B ◐, C ●

**Tabelle 7** Gleichungen der Regressionsgeraden

Unterlagen Block	A	B	C
1	$dt/dV=0,0782V+0,0149$	$dt/dV=0,0775V+0,0168$	$dt/dV=0,0815V+0,0324$
2	$dt/dV=0,0888V-0,0087$	$dt/dV=0,0802V+0,0024$	$dt/dV=0,0894V+0,0079$
3	$dt/dV=0,0784V+0,0332$	$dt/dV=0,0596V+0,0297$	$dt/dV=0,0795V+0,0057$
4	$dt/dV=0,0799V+0,0506$	$dt/dV=0,0611V+0,0016$	$dt/dV=0,0846V+0,0251$

Die ausgewerteten Versuchsergebnisse von Block 3 werden mit den zugehörigen Regressionsgeraden in Figur 14 eingezeichnet. Aus dieser Darstellung kann festgestellt werden, dass sich die Steigung der Geraden für die Filtration auf der Unterlage B wesentlich von denjenigen der Filtrationen auf den Unterlagen A und C unterscheidet.

Um zu beurteilen, ob von einem wirklichen Unterlageneinfluss gesprochen werden darf, wurde die Steigung der Regressionsgeraden als wichtigste charakterisierende Grösse einer Filtration betrachtet.

Die Gesamtheit der erhaltenen Steigungen wurde mit Hilfe einer statistischen Methode, der sogenannten Streuungszzerlegung, ausgewertet\*).

Die Steigungen, die dabei betrachtet werden müssen, sind in Tabelle 8 mit den dazugehörigen Kolonnen-, Reihen und Gesamtsummen enthalten.

Tabelle 8 Steigungen der Geraden  $dt/dV = 2 a_2 V + b_1$

Unterlage Block	A	B	C	Reihensumme
1	0,0782	0,0775	0,0815	0,2372
2	0,0888	0,0802	0,0894	0,2584
3	0,0784	0,0596	0,0795	0,2175
4	0,0799	0,0611	0,0846	0,2256
Kolonnen- summe	0,3253	0,2784	0,3350	Gesamtsumme 0,9387

Zur Analyse der in Tabelle 8 angegebenen Werte mussten folgende Grössen bestimmt werden:

1. Die Summe der Quadrate der Abweichungen der Einzelwerte vom Gesamtdurchschnitt (= SQ (Insgesamt)).
2. Viermal die Summe der Quadrate der Abweichungen der Blockdurchschnitte vom Gesamtdurchschnitt (= SQ (Zwischen Blöcken)).
3. Dreimal die Summe der Quadrate der Abweichungen der Unterlagendurchschnitte vom Gesamtdurchschnitt (= SQ (Zwischen Unterlagen)).

Mit Hilfe dieser Grössen kann die Streuungszzerlegung leicht angegeben werden, wie dies nach konventioneller Art in Tabelle 9 gemacht wird.

Die  $n$  Freiheitsgrade, die eine Summe der Quadrate SQ besitzt, ergeben sich aus der um eine Einheit verminderten Anzahl Beobachtungen  $N$ . Die Durchschnittsquadrate DQ können durch Division der Summe der Quadrate SQ durch die Anzahl Freiheitsgrade berechnet werden.

\*) Für detaillierte Angaben über die im vorliegenden Abschnitt angewandten statistischen Auswertungsverfahren siehe Linder (42).

Tabelle 9 Streuungszerlegung für die Werte von Tabelle 8

Streuungsquelle	Freiheitsgrade n = N - 1	Summe der Quadrate SQ	Durchschnitts- quadrate DQ
Zwischen Blöcken	4 - 1 = 3	31 552,9	10 517,6
Zwischen Unter- lagen	3 - 1 = 2	52 514,5	26 257,3
Rest	2 x 3 = 6	9 644,8	1 607,5 (s <sup>2</sup> )
Insgesamt	12 - 1 = 11	93 712,2	-

Der Streuungszerlegung (Tabelle 9) liegt die einfache Idee zu Grunde, dass die Disperison der Messwerte um den Gesamtdurchschnitt zu einem ersten Teil von der Verschiedenheit der betrachteten Blöcke, zu einem zweiten Teil vom Unterlageneinfluss und zu einem dritten Teil von rein zufälligen Einflüssen herrührt. Die letzteren Einflüsse, die unter der Bezeichnung "Rest" in Tabelle 9 angeführt sind, stellen den Versuchsfehler dar.

Die Ermittlung des Versuchsfehlers wird dadurch möglich, dass sich die Summen der Quadrate der einzelnen Streuungsquellen zur SQ (Insgesamt) addieren lassen. Das Durchschnittsquadrat für den Rest stellt die eigentliche Versuchsstreuung s<sup>2</sup> dar.

Mit Hilfe der statistischen Prüfverfahren wurde nun entschieden, ob von einem Einfluss der Unterlage auf die betrachtete Steigung gesprochen werden kann. Zu diesem Zwecke wurden Versuchsstreuung s<sup>2</sup> und DQ (Unterlagen) mit Hilfe des F-Testes miteinander verglichen.

Aus dem erhaltenen F-Wert:

$$F = \text{DQ (Unterlagen)} / \text{DQ (Rest)} = \frac{26\,257,3}{1\,607,5} = 16,33$$

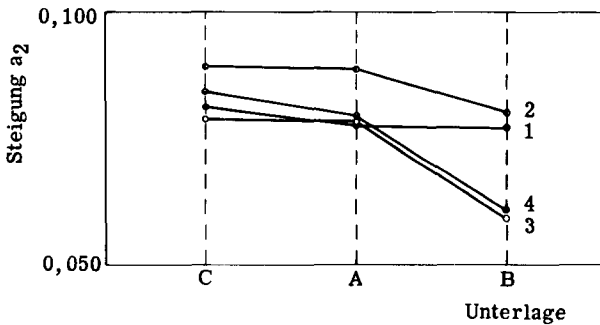
kann den statistischen Tabellen (44) entnommen werden, dass ein gesicherter Einfluss der Unterlage auf die Steigung des (dt/dV) - V-Zusammenhanges besteht.

Mit Hilfe eines zweiten statistischen Prüfverfahrens, des sogenannten t-Testes, konnte entschieden werden, ob zwischen den Steigungen für die drei Unterlagengeometrien gesicherte Unterschiede bestanden. Die drei zu betrachtenden Unterschiede ergeben folgende t-Werte:

Unterschied	t-Wert	Freiheitsgrade
A - B	4,14	6
C - B	4,94	6
C - A	0,86	6

Aus dem Vergleich dieser t-Werte mit tabellierten Werten kann gesagt werden, dass sich die Wirkung der Unterlagen A und C gegenüber derjenigen der Unterlage B mit Sicherheit unterscheidet. Hingegen kann zwischen den Unterlagen A und C kein gesicherter Unterschied festgestellt werden.

Um eine Uebersicht über die erhaltenen Resultate zu gewinnen, wurden die Steigungen der Regressionsgeraden für die verschiedenen Unterlagen graphisch dargestellt. Jeder Unterlage wurde eine willkürliche Stellung auf der Abszisse zugeordnet. Die zu einem Versuchsblock gehörigen Werte wurden durch eine Linie miteinander verbunden.



Figur 15 Steigungen für Unterlagen A, B, C, für Blöcke 1, 2, 3, 4

Die zweite für die durchgeführten Filtrationsversuche charakteristische Grösse wird durch den Achsenabschnitt der Regressionsgeraden dargestellt. Die Achsenabschnitte  $b_1$ , die der Tabelle 6 entnommen werden können, wurden ebenfalls einer Streuungszerlegung unterworfen, die in Tabelle 10 angegeben wird.

Tabelle 10 Streuungszerlegung für Achsenabschnitte  $b_1$

Streuungsquelle	Freiheitsgrade $n = N - 1$	Summe der Quadrate SQ	Durchschnitts- Quadrate DQ
Zwischen Blöcken	3	68 027	22 676
Zwischen Unter- lagen	2	41 498	20 749
Rest	6	144 229	24 038 ( $s^2$ )
Insgesamt	11	253 754	-

Tabelle 10 kann entnommen werden, dass die Versuchsstreuung  $s^2$  grösser ist als diejenige, die den Blöcken und den Unterlagen zukommt. Daraus geht hervor, dass aus den vorliegenden Versuchen aus dem Vergleich der erhaltenen Achsenabschnitte kein Unterlageneinfluss festgestellt werden kann.

### 9. Zusammenfassung

Die durchgeführten Untersuchungen an einem einzelnen System konnten im betrachteten Anfangsabschnitt durch eine Gerade im  $(dt/dV) - V$ -Diagramm beschrieben werden.

Der Verlauf dieser Anfangsphase, die durch zwei Koeffizienten charakterisiert werden kann, wurde für drei verschiedene Unterlagengeometrien (Figur 11) untersucht.

Es konnte festgestellt werden, dass die Unterlagengeometrie einen Einfluss auf den Filtrationsvorgang ausüben kann. Die Schwankungen in der Tuchqualität und im Vorgang der Einstellung des Filtrationsdruckes verunmöglichten die Objektivierung eines Unterlageneinflusses auf Grund der Analyse der für den Koeffizienten  $b_1$  erhaltenen Werte. Prinzipiell darf hier eine Wirkung auf den mit  $b_1$  durch Gleichung 39 verknüpften Filtermediumswiderstand  $R_m$  erwartet werden. Hingegen machte sich ein systematischer Einfluss der Unterlagengeometrie im Koeffizienten  $a_2$  bemerkbar. Zwischen der Wirkung der Unterlagen A und C konnten keine Unterschiede gemessen werden. Hingegen waren die Steigungswerte für die Unterlage B stets die niedrigsten.

Niedrigere Steigungen sind durch die Aenderung von drei Faktoren zu erklären (vergleiche Gleichung 38):

1. Vergrößerung der Filterfläche,
2. Verkleinerung des mittleren spezifischen Widerstandes,
3. Verkleinerung des Verhältnisses von Menge abgelagertem Feststoff zu Menge Filtrat.

Unter der Annahme, dass die feststellbaren Steigungsänderungen zwischen Versuchen mit den Unterlagen A oder C und Versuchen mit Unterlage B allein einer Vergrößerung der Filterfläche zuzuschreiben sind, kann durch eine einfache Rechnung auf eine Flächenvergrößerung von etwa 8% bei Unterlage B gegenüber den Unterlagen A und C geschlossen werden. Wie spätere Messungen ergeben haben, ist eine solche Flächenvergrößerung unter den gegebenen Druckbelastungen undenkbar.

Die Hauptquelle der feststellbaren Unterschiede muss neben einer eher problematischen Veränderung des spezifischen Widerstandes auf eine Abnahme des Verhältnisses der abgelagerten Feststoffmenge zur Filtratmenge zurückgeführt werden.

Zur Erklärung einer scheinbar erhöhten Porenöffnung kann keine einfache mechanische Deutung angegeben werden.

Aus diesen Versuchen geht hervor, dass neben einer Vergrößerung der Filterfläche kleinere Porendeformationen zu wesentlich verschiedenen Filtrationsverläufen führen können, und zwar als Folge einer Aenderung der Unterlagengeometrie.

Die Untersuchungsmöglichkeiten waren speziell dadurch eingeschränkt, dass die Unterlagenplatten infolge der kleinen Lamellenhöhe nur für einen beschränkten Druckbereich ein freies Durchhängen des Filtertuches erlaubten.

Obwohl runde Filterzellen bei Laboratoriumsversuchen vorherrschen, scheinen sie für systematische Untersuchungen über den Unterlageneinfluss ungeeignet zu sein, da viele in der Praxis vorkommende Unterlagen rechteckige Geometrien aufweisen, deren Untersuchung in runden Zellen bedeutende Randeffekte (siehe Figur 11) ergeben können.

## II. BESTIMMUNG DES EFFEKTES EINFACHER UNTERLAGENGEOMETRIEN AUF DIE FILTRATION MIT VERSCHIEDENEN TUCHQUALITÄTEN

### 1. Allgemeines

Zur Fortsetzung der Untersuchungen wurde nach einer apparativen Konzeption gesucht, die es ermöglichen würde, einen genaueren Vergleich zwischen der Wirksamkeit verschiedener Filtermediumsunterlagen zu ziehen. Eine im vorliegenden Kapitel beschriebene Anordnung wurde in diesem Sinne angewandt.

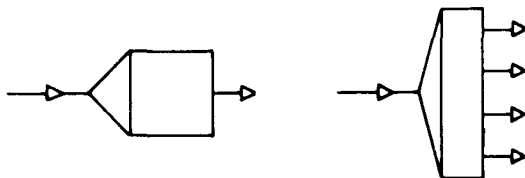
Bei einer genauen Kenntnis der Dehnungseigenschaften verschiedener Filtertuchqualitäten sollte auf die zu erwartenden Wirkungen verschiedener einfacher Unterlagengeometrien während des Filtrationsvorganges geschlossen werden können.

In erster Linie mussten die experimentell auftretenden Unterschiede für verschiedene Filtrationsbedingungen festgehalten werden. In diesen Untersuchungen wurden neben Variationen der Unterlagengeometrie, des Tuches und des Druckes Konzentrationsvariationen eingeschlossen. Letztere wurden an Stelle von Versuchswiederholungen eingesetzt. Zudem konnten sie im niederen Konzentrationsgebiet zur eventuellen Feststellung von Aufbauunterschieden der Zwischenschicht infolge variierender Porengrößen von Interesse sein.

### 2. Apparatives

#### a) Prinzip und Vorteile der Vierkammerfiltrationszelle

Der wesentliche funktionelle Unterschied zwischen einer konventionellen Zelle für Filtrationsuntersuchungen und der angewandten Vierkammer-Filtrationszelle kann aus Figur 16 ersehen werden.



Figur 16 Konventionelle Zelle und Vierkammerfiltrationszelle

In die neu beschriebene Zelle wird eine Suspension in vier gleiche Kammern gedrückt, die je einen Filtrataustritt aufweisen.

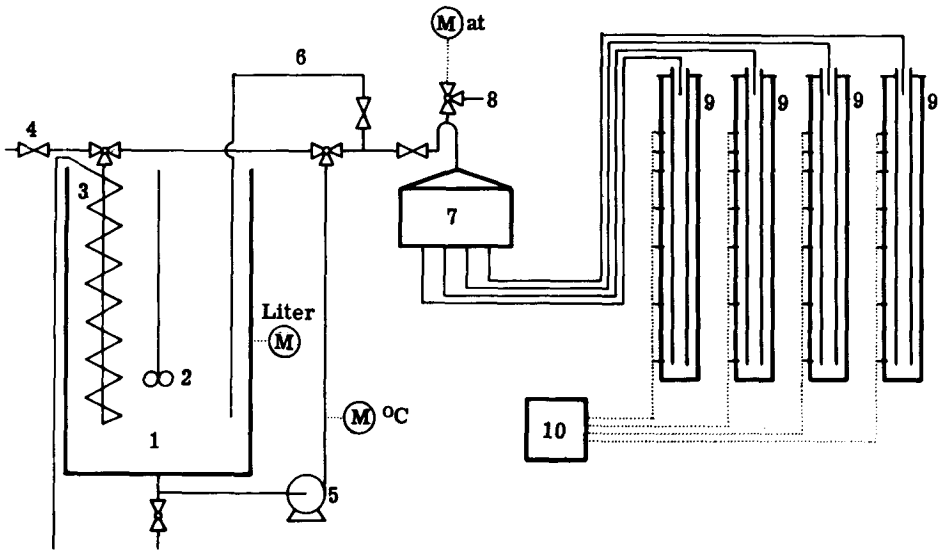
Durch diesen Kunstgriff können mit der vierteiligen Zelle vier Kammern, die in Bezug auf Filtertuch und Filtertuchunterlage verschieden ausgerüstet sind, in einem einzigen Versuch bei ein und dem selben Druck mit der gleichen Aufschlammung getestet werden. Dazu ist zu bemerken, dass sich der Unterlageneffekt schärfer abzeichnen wird, da im Gegensatz zu vier Messungen in einer konventionellen Zelle die Streuungen, die durch unbeherrschbare Bedingungsschwankungen von einem Versuch zum andern hervortreten, beim Zusammenlegen der vier Versuche in eine einzige Zelle praktisch verschwinden sollten.

#### b) Allgemeiner Aufbau der Filtrationsanlage

In Figur 17 wird die Apparatur, die zur Messung des Unterlageneffektes diente, in ihren wesentlichen Bestandteilen dargestellt. Ihr allgemeiner Aufbau entspricht in den wesentlichen Zügen dem in Abschnitt I beschriebenen. Es wurde zusätzlich ein Kühlaggregat in den Aufschlammungsbehälter eingebaut, das zum Abtransport der Verlustwärme mit Hilfe von Leitungswasser diente. Durch einfache Handregulierung konnte die Temperatur innerhalb  $\pm 0,5^{\circ}$  C konstant gehalten werden.

Die aus den vier Kammern der Filtrationszelle ausströmenden Filtrate wurden in vier zylinderförmigen Gefäßen aus PVC gesammelt. Die Volumen-Zeit-Beziehung, die zur Auswertung des Filtrationsvorganges nötig ist, wurde mit Hilfe eines Registriergerätes aufgenommen. Die Zeiten, zu denen das Filtrat bestimmte Gefässniveaux erreichte, wurden für jeden Behälter auf einer Zeitachse aufgezeichnet.





Figur 17 Die Filtrationsapparatur

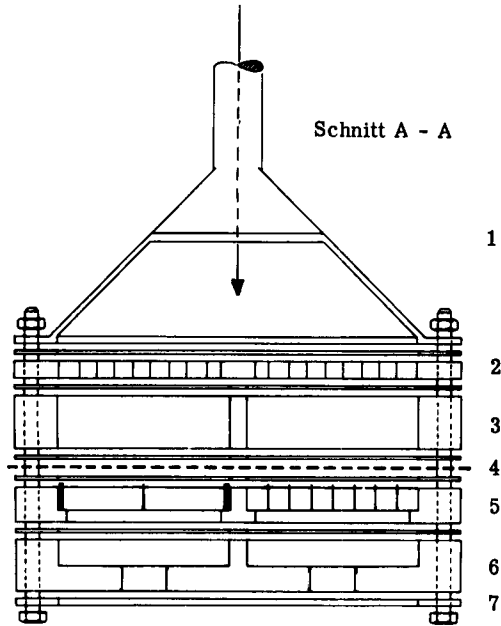
- |                        |                                  |
|------------------------|----------------------------------|
| 1. Aufschlämmsbehälter | 6. Umwegleitung                  |
| 2. Propellerrührer     | 7. Filterzelle                   |
| 3. Lamellenkühler      | 8. Entlüftungshahn               |
| 4. Frischwasserhahn    | 9. Filtratbehälter               |
| 5. Pumpe               | 10. Volumen-Zeit-Registriergerät |

### c) Die Vierkammerfiltrationszelle

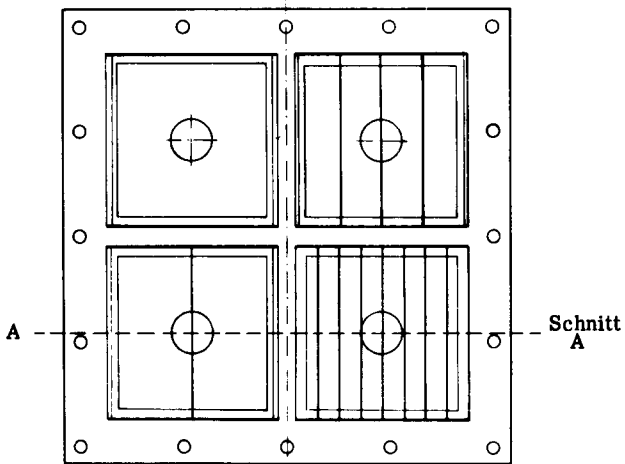
Der Aufbau der viereckigen Vierkammerfiltrationszelle ist aus den Figuren 18 und 19 ersichtlich.

Das Suspensionsverteilsystem bestand aus einem pyramidenförmigen Verteiltrichter (1) und einer Verteilplatte (2) mit kreisförmigen Löchern, die vom Zentrum gegen den Rand zunehmende Grösse aufwiesen.

Von der Kuchenplatte (3) weg erfolgte die Teilung in vier viereckige Kammern (100 x 100 mm). Das Filtertuch (4) lag auf der Unterlagenplatte (5) auf, deren Grundriss in Figur 19 wiedergegeben wird. In diese Plexiglasplatte konnten die Filtertuchunterlagen eingebaut werden. Die zum Aufbau dieser Unterlage benützten Messinglamellen wiesen einen rechteckigen Querschnitt (1 x 15 mm) auf. Diese Lamellen waren an jedem Ende mit einer Nocke versehen, die in die entsprechende Nute einer seitlichen Stützlamelle (Querschnitt 2 x 14 mm) eingeführt werden konnte. Die Stützlamelle lag auf einem 5 mm breiten Vorsprung in der Plexiglasplatte auf.



**Figur 18** Schnitt der Filtrationszelle



**Figur 19** Grundriss der Unterlagenplatte

Um die in Figur 19 dargestellten Unterlagengeometrien miteinander vergleichen zu können, mussten die Auflageflächen für das Filtertuch in allen vier Kammern gleich gross sein. Diese Bedingung konnte dadurch eingehalten werden, dass an beiden Rändern der vier Kammern Kompensationslamellen parallel zu den Unterlagenlamellen eingesetzt wurden.

Die vier Filtrate wurden durch die Sammelplatte (6) in vier Filtratsleitungen eingeführt.

Die Konstruktionselemente (2, 3 und 6) bestanden aus PVC.

Die Abdichtung zwischen den verschiedenen Zellelementen erfolgte durch 1 mm dickes Korkdichtungsmaterial, das eine relativ gute Formkonstanz der benützten Dichtungen gewährleistete. Die Elemente der Filtrationszelle wurden zwischen dem Metalltrichter (1) und einem viereckigen Metallrahmen (7) mit Hilfe von 16 Schrauben dicht aneinander gepresst.

#### d) Spannung des Filtertuches

Um die Genauigkeit der Experimente zu steigern, wurde auf eine konstante Spannung des Filtertuches beim Einlegevorgang geachtet. Jede Seite des viereckigen Filtertuches wurde mit einem Gewicht von 3,5 kg belastet.

Jede Seitenlänge des Tuches wurde mit Hilfe von vier Schrauben zwischen zwei festen Eisenlamellen eingeklemmt. Das Gewicht konnte mit einer speziellen Vorrichtung an diesem Metallelement aufgehängt werden.

#### e) Simultane Volumenmessung

Die Messanlage bestand aus drei Teilen:

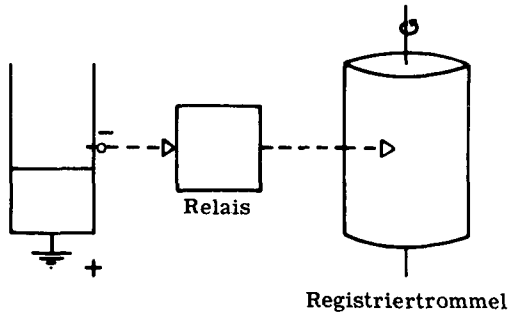
- a) Vier Auffanggefässen für die Filtrate
- b) Relais- und Wählersystem
- c) Schreibgerät

Die vier Auffanggefässe waren aus PVC-Rohr (Aussendurchmesser 14 cm, Wanddicke 3 mm, Höhe 110 cm, Inhalt 14,5 L, 39 Kontakte) aufgebaut. Das Filtrat wurde durch ein inneres Rohr (Aussendurchmesser 5 cm, Wanddicke 2 mm) bis nahe auf den Grund des Gefässes eingeführt, um eine möglichst ruhige Filtratoberfläche zu erhalten. Jedes Rohr war mit einer Bodenkontaktstelle und mit je 39 Kontaktstellen versehen, die auf der ganzen Rohrlänge nach einem bestimmten Plan angeordnet waren.

Der Kontaktplan war folgender: Der Abstand zwischen den ersten 17 Kontaktstellen betrug je 4 cm, derjenige zwischen der 17. und der 28. je 2 cm, und derjenige zwischen der 28. und der 39. je 1 cm.

Für die Messungen konnten pro Gefäß 24 geeignete Stellen mit dem Messgerät verbunden werden.

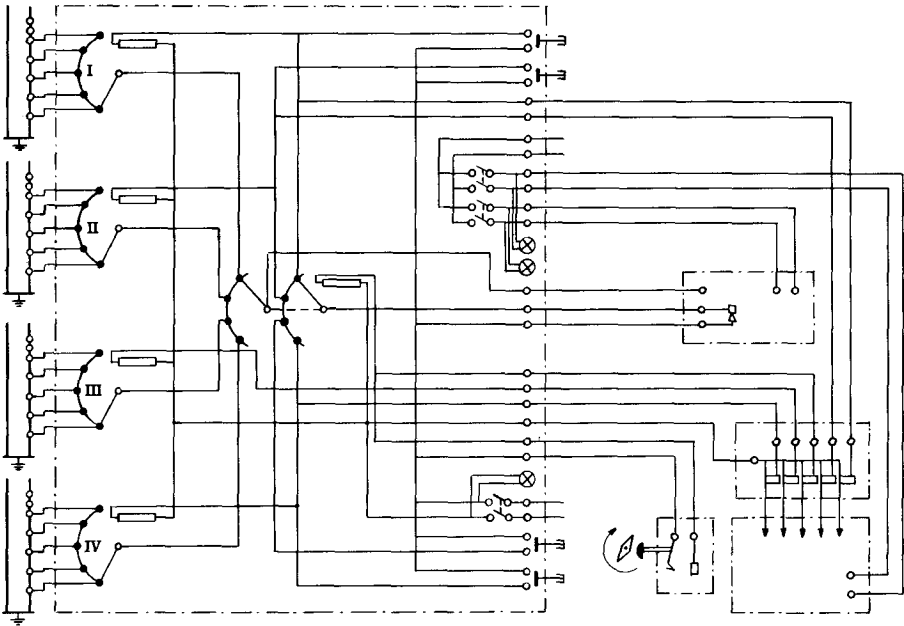
Die Bestimmung der Filtratmenge in Funktion der Zeit erfolgte dadurch, dass der Zeitpunkt, bei dem der Filtrat Spiegel die verschiedenen Kontaktstellen, d. h., bestimmte Niveaux erreichte, bestimmt wurde. Das apparative Prinzip wird in Figur 20 schematisch dargestellt.



Figur 20 Prinzip der Volumenmessung

Im Filtratgefäß wird beim Erreichen einer Kontaktstelle durch den Flüssigkeitsspiegel ein Erdungsstrom ermöglicht, der zur Folge hat, dass mit Hilfe eines elektronischen Relais ein Arbeitsstromimpuls auftritt. Dieser Stromimpuls betätigt eine Schreibfeder, die ihn auf einer sich mit einer bestimmten konstanten Geschwindigkeit drehenden Schreibtrommel festhält.

Figur 21 gibt den Bau der gesamten Filtratmessanordnung wieder. Ein Kontaktgeber, der aus einem Mikroschalter mit Rollhebel und einer von einem Elektromotor angetriebenen Nocke bestand, betätigte einen zentralen Wähler (W). Dieser Wähler stellte viermal pro Sekunde das einzige elektronische Relais (Philips GM 4803) abwechselungsweise den vier Wählern (I, II, III, IV), von denen je einer einem Auffanggefäß zugeteilt war, zur Verfügung. Im Zeitpunkt, in dem der zentrale Wähler einen Auffanggefäßwähler erreichte, bei dem die gewählte Kontaktstelle vom Flüssigkeitsspiegel erreicht worden war, wurde das elektronische Relais betätigt. Dies erfolgte dadurch, dass negative Ladungen vom Gitter der Relaisthyatronröhre über den betreffenden Wähler durch die Flüssigkeit zur Erde flossen. Auf diese Weise wurde die Thyatron-



Figur 21 Das Filtratmessgerät

röhre gezündet und das Relais zog für kurze Zeit an. Dadurch wurde ein Stromkreis geschlossen, der zwei Aufgaben bewältigen musste:

1. einen Strom durch den Elektromagneten des betreffenden Wählers schicken, damit er die Leitung der nächsten Gefässkontaktstelle auswähle,
2. einen Strom durch den Elektromagneten der betreffenden Schreibfeder schicken, damit das Erreichen des betreffenden Flüssigkeitsniveaus auf die Schreibtrommel geschrieben werde.

Die Aufzeichnung der Impulse erfolgte durch vier Magnetschreibfedern auf einer rotierenden Schreibtrommel (Prof. Fleisch, Drehgeschwindigkeit = 0,25 mm/Min. - 60 mm/sec., Trommelumfang = 60 cm).

f) Eichung der Auffanggefäße

Die mit Wasser bei 18°C durchgeführte Eichung ergab keine wesentliche Abweichung von Rohr zu Rohr.

Pro cm Rohr wurde ein mittlerer Inhalt von 137,8 cm<sup>3</sup> gewählt. Daraus ergaben sich für die verschiedenen Kontaktabstände folgende Werte:

Kontaktabstand in cm	1	2	4
Inhalt in cm <sup>3</sup>	137.8	275.6	551.3

Bis zum ersten Kontakt konnte ein mittleres Volumen von 725 cm<sup>3</sup> gemessen werden. Bei der Mehrzahl der Versuche wurde von 4 cm zu 4 cm gemessen. Die maximalen Abweichungen betragen  $\pm 10$  cm<sup>3</sup>. In Tabelle 11 werden die Volumenwerte für die 39 Kontaktstellen angegeben.

Tabelle 11 Totalvolumen V (cm<sup>3</sup>) bis zum Kontakt n

n	V	n	V	n	V
1	720	14	7886	27	12571
2	1271	15	8437	28	12846
3	1822	16	8988	29	13122
4	2374	17	9539	30	13260
5	2925	18	10090	31	13398
6	3476	19	10366	32	13535
7	4027	20	10642	33	13673
8	4578	21	10917	34	13811
9	5130	22	11193	35	13949
10	5681	23	11468	36	14087
11	6232	24	11744	37	14224
12	6783	25	12020	38	14363
13	7334	26	12295	39	14510

### 3. Faktorenwahl

Für die folgenden Untersuchungen wurden nachstehende unabhängige Variablen gewählt:

- a) Filtertuchunterlage-Geometrie
- b) Tuchqualität
- c) Filtrationsdruck
- d) Konzentration der Aufschlammung

Das Mass, durch welches die Unterlagen-Geometrie charakterisiert worden ist, wird in einem späteren Abschnitt angegeben.

Der Filtrationsdruck wurde als Variable gewählt, da die Deformation des Filtertuches von ihm abhängt.

Die Wahl der Konzentration als vierte Variable ging dahin, mit den oberen Niveaux vor allem den Kuchenaufbau zu erfassen und mit den unteren Niveaux die Beobachtungszeit für die Ablagerung der Zwischenschicht zu verlängern. Zudem sollte sie in gewisser Masse erlauben, auf Versuchswiederholungen zu verzichten.

### 4. Die ausgewählten Filtertücher und ihre Charakteristiken

Die Auswahl erfolgte aus einer Serie von acht verschiedenen Filtertuchqualitäten (Schweizerische Leinenindustrie AG, Niederlenz). Dabei wurden folgende zwei Auswahlkriterien angewandt:

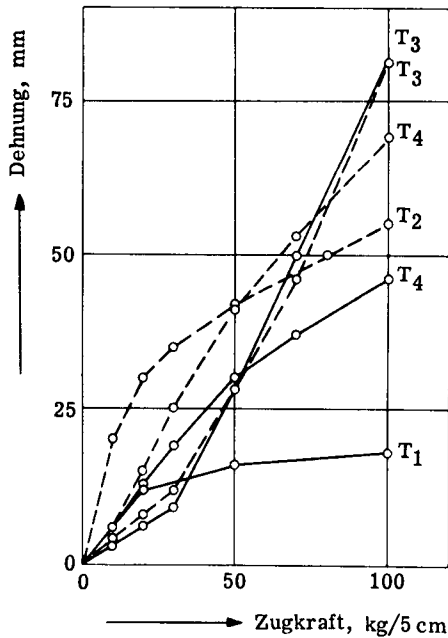
- a) Aus Filtrationsversuchen mit den betreffenden Filtertüchern im gewählten Druck- und Konzentrationsbereich wurden diejenigen Tücher ausgewählt, die ein genügendes Trennvermögen für eine gegebene Magnesiumcarbonataufschlammung aufwiesen.
- b) Diejenigen Tücher, die ein genügendes Trennvermögen aufwiesen, wurden weiter nach ihren Dehnungseigenschaften selektioniert. Zur Verfügung standen die Kraft-Dehnungsdiagramme in Schuss- und Zelltellrichtung. Die Auswahl umfasste diejenigen Tücher, die sich durch ihre Dehnungseigenschaften am deutlichsten voneinander unterschieden.

In Figur 22 wird das Kraft-Dehnungsdiagramm der gewählten Tücher aufgezeichnet. Die Messungen erfolgten an klimatisierten Proben (Temp. 20°C, relative Feuchtigkeit 65%), deren Breite 50 mm und deren Einspannlänge 200 mm betrug. In

Tabelle 12 ist die Fabrikbezeichnung und die Richtung angegeben, in die sie in die Filtrationszelle eingelegt wurden. Als Richtung wurde die Geweberichtung verstanden, die senkrecht zur Unterlagenlamelle lag.

Tabelle 12 Filtertuchbezeichnungen

Tuch	Fabrikbezeichnung	Richtung
T <sub>1</sub>	Baumwolle 11230	Schuss
T <sub>2</sub>	Baumwolle 11230	Zettel
T <sub>3</sub>	Dynel 3008	Schuss
T <sub>4</sub>	Grilon 11428	Schuss






Figur 22 Kraft-Dehnungsdiagramm für Filtertücher T in Schussrichtung—— und Zettelrichtung-----

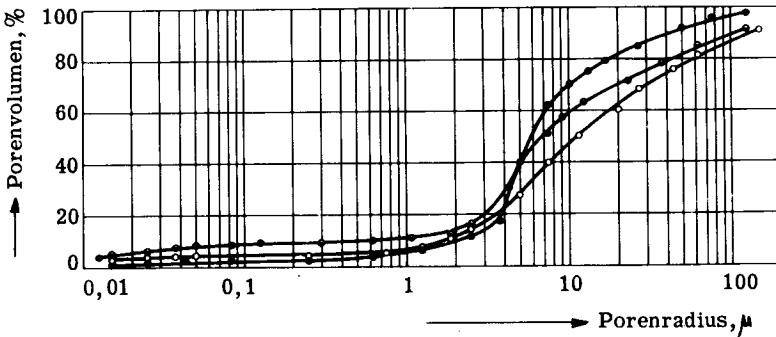


Zur weiteren Qualitätsbeschreibung der Filtertücher wurden die in Tabelle 13 zusammengestellten Charakteristiken ermittelt. Die Tuchdicke wurde mit Hilfe eines Micrometers an zehn verschiedenen Stellen einer 10x10 cm grossen quadratischen Probe bestimmt. Der angegebene Wert stellt das Mittel dieser Messungen dar. Das Gewicht pro Flächeneinheit wurde an je zwei Proben gemessen.

Tabelle 13 Filtertuchcharakteristiken

Tuchbezeichnung	Baumwolle 11230	Dynel 3008	Grilon 11428
Dicke in mm	0,66	0,88	1,08
Gewicht pro Fläche in g/m <sup>2</sup>	669	493	434
Webart	 Köper 2/2	 Leinen	 Leinen

Trockene Proben der angewandten Filtertücher wurden in einem Quecksilberdruckporosimeter (45) auf ihre Porengrössen untersucht. Die Auswertung der Messungen lieferte die in Figur 23 aufgezeichneten Verteilungen.



Figur 23 Integrale Porengrösseverteilungskurven der Filtertücher  
 $T_1 = T_2 \bullet$ ,  $T_3 \circ$ ,  $T_4 \bullet$ . Totales Porenvolumen für  
 $T_1 = T_2 : 0,735 \text{ cm}^3/\text{g}$ ,  $T_3 : 0,567 \text{ cm}^3/\text{g}$ ,  $T_4 : 0,447 \text{ cm}^3/\text{g}$

## 5. Versuchsplanung

Die für die gewählten Faktoren zur Verfügung stehenden Variationsbereiche waren durch die Forderung eines genügenden Feststoff-Flüssig-Trenneffektes stark eingengt. Innerhalb der interessierenden Bereiche wurden drei oder vier Faktorenstufen gewählt. Für den Druck wurden als Niveaux  $P_1 = 0,5$  at,  $P_2 = 1,0$  at,  $P_3 = 1,5$  at und  $P_4 = 2,0$  at gewählt. Die Konzentrationen, bei denen gemessen wurde, betragen  $c_1 = 0,75 \times 10^{-3}$  g/g,  $c_2 = 1,5 \times 10^{-3}$  g/g und  $c_3 = 3 \times 10^{-3}$  g/g. Als Charakteristiken für die Filtertuchunterlage wurde der Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Lamellen gewählt. Die Abstände wurden mit  $l$  bezeichnet und betragen  $l_1 = 93 \text{ mm}/8 = 11,6 \text{ mm}$ ,  $l_2 = 93 \text{ mm}/4 = 23,2 \text{ mm}$ ,  $l_3 = 93 \text{ mm}/2 = 46,5 \text{ mm}$  oder  $l_4 = 93 \text{ mm}$ . Diese entsprachen den Geometrien  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_3$ ,  $G_4$ . Die Filtrationsversuche erfolgten mit den vier im letzten Abschnitt erwähnten Tuchqualitäten  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  und  $T_4$ .

Es wurde mit allen möglichen Kombinationen der gewählten Variablen-niveaux experimentiert. Die Anzahl Versuche, die bei einer solchen Planung mit der hier gewählten Anzahl Niveaux durchgeführt werden müssen, beträgt also:  
 $4 \times 3 \times 4 \times 4 = 192$ .

Mit der gewählten Versuchsanordnung konnten diese 192 Kombinationen dadurch, dass der Effekt der vier Unterlagen in einem einzigen Versuch beobachtet werden konnte, in 48 Filtrationsversuchen untersucht werden.

Die 48 Versuche wurden in einer völlig zufälligen Reihenfolge, die mit Hilfe einer statistischen Tabelle aufgestellt wurde, durchgeführt. Auch die Zuordnung der vier verschiedenen Filtertuchunterlagen zu den vier Kammern der Filtrationszelle erfolgte völlig zufällig, um die Effekte der kleinen Unterschiede, die zwischen den vier Kammern und den vier Messgefäßen vorhanden waren, zufällig zu verteilen.

## 6. Durchführung der Versuche

Die bei den vorliegenden Versuchen angewandte Technik entsprach der in Abschnitt I angegebenen. Das Volumenregistriergerät wurde gleichzeitig mit dem Öffnen des Filtereingangventiles in Betrieb genommen.

Um die Volumenmessung möglichst genau zu gestalten, musste darauf geachtet werden, dass die an den Volumenauffanggefässen angebrachten Kontakte trocken waren, ansonst die eventuell daran hängenden Wassertropfen zu frühzeitiger Kontaktgebung führen konnten.

Die ganze Versuchsserie wurde bei einer Schlammtemperatur von 18°C durchgeführt. Für alle Versuche wurde Magnesiumcarbonat aus dem selben Los verwendet.

Das unter Tabelle 14 wiedergegebene Versuchsprotokoll des Versuches No. 107 zeigt die für alle Versuche bestimmten Messgrößen.

Tabelle 14 Messprotokoll des Versuches No. 107

Filtrationsversuch No. 107

Feststoff: Magnesiumcarbonat TS

Flüssigkeit: vorfiltriertes Wasser

Konzentration:  $3 \times 10^{-3}$  g/g

Temperatur: 18°C

Filtertuch: T<sub>2</sub>

Filtertuchspannung: 4 x 3,5 kg

Druck: 1,0 at

Unterlagenanordnung: G<sub>2</sub>, G<sub>3</sub>, G<sub>4</sub>, G<sub>1</sub>

Kymograph: 30 mm/Min.

Versuchsdauer: 19'45''

V cm <sup>3</sup>	mm (1 mm = 2 sec.)			
	G <sub>2</sub>	G <sub>3</sub>	G <sub>4</sub>	G <sub>1</sub>
720	5	4	3,7	6
1271	11	8,5	8	13
1822	21,5	17,2	15,4	23,8
2373	35,2	29,5	26,3	39
2924	52,8	45	41,6	58,6
3476	75,6	65,2	60,6	83,6
4027	102,5	89,5	83,8	113
4578	135,2	118	111,8	147,7
5130	171,7	150,5	144	187,7
5681	214,4	189,1	180,5	233,3
6232	260,6	232,5	222,2	284,2
6783	315,7	280,4	269,5	342,3
7334	375,3	334	322	406
7886	440,8	393	380,3	474
8437	514	457,8	443	551,8
8988	593,5	529,1	512,6	
9539			589	

Diesem Protokoll ist zu entnehmen, dass im Versuch 107 folgende vier Faktorenkombinationen untersucht worden sind:

$$T_2 P_2 c_3 l_1 / T_2 P_2 c_3 l_2 / T_2 P_2 c_3 l_3 / T_2 P_2 c_3 l_4 .$$

## 7. Auswertung der Messresultate

### a) Darstellung im $(t/V) - V$ - Diagramm

Neben der Differentiation der Filtergleichung

$$t = a_2 V^2 + b_1 V \quad (22b)$$

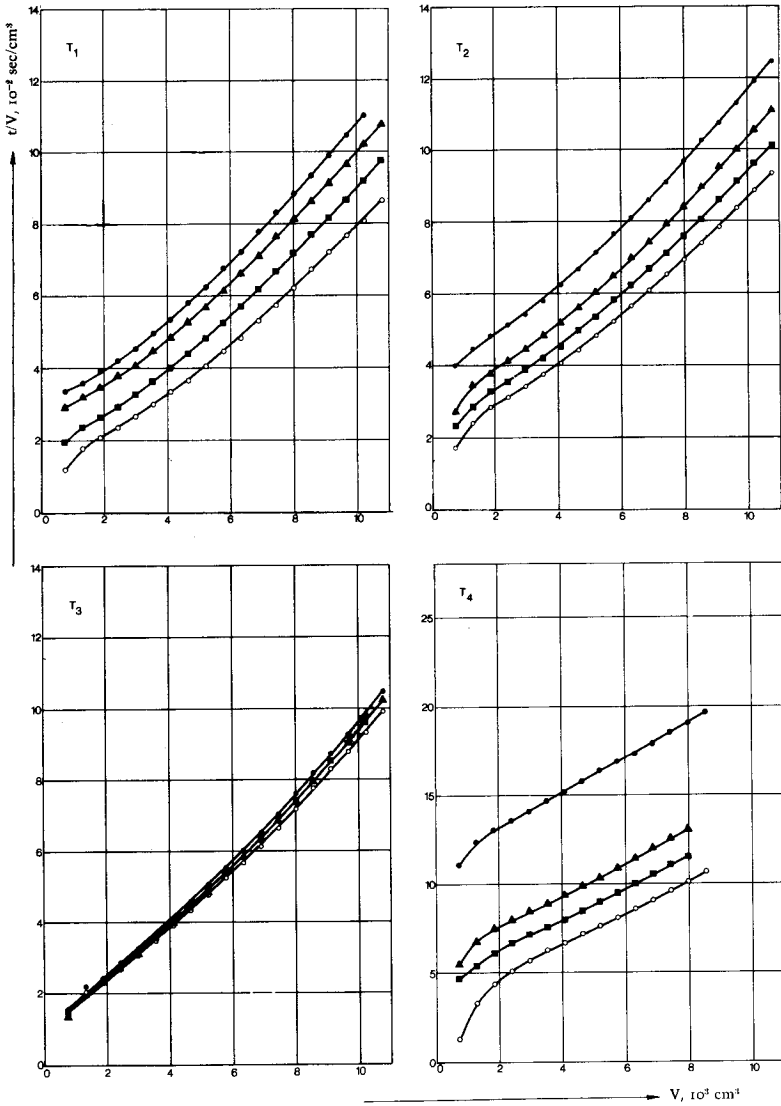
liefert auch eine einfache Division dieser Gleichung durch  $V$  eine lineare Beziehung:

$$t/V = a_2 V + b_1 \quad (40)$$

Die aus den Versuchen erhaltenen  $t$ - $V$ -Beziehungen wurden in  $t/V$ - $V$ -Beziehungen transformiert und in den Figuren 24 bis 35 dargestellt. Jedes Bild umfasst die Resultate für die vier gewählten Unterlagengeometrien bei einer bestimmten Konzentration und einem bestimmten Druck für ein gegebenes Filtertuch.

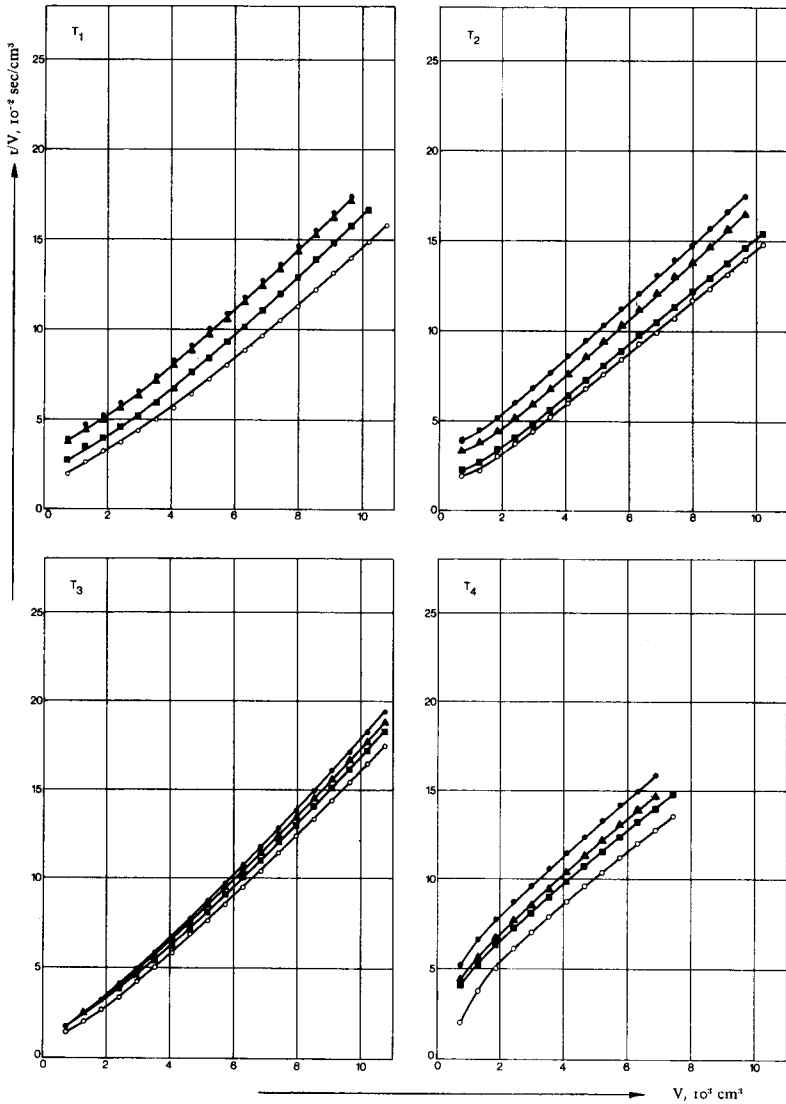
Es können folgende qualitative Feststellungen gemacht werden:

1. Die nach diesem Verfahren erhaltenen Kurven weisen einen gekrümmten Anfangsabschnitt auf, dem ein Zusammenhang folgt, der annähernd durch eine lineare Beziehung angegeben werden kann.
2. Bei allen Darstellungen ist eine bestimmte Kurvenreihenfolge festzustellen. Die Kurve für die Unterlagengeometrie  $G_4$  ist stets als unterste anzutreffen. Ihr folgen der Reihe nach die Kurven für  $G_3$ ,  $G_2$  und  $G_1$ . Nur in der Anfangsphase sind einige Kurvenüberkreuzungen festzustellen, die von der bei grossen Strömungsgeschwindigkeiten erschwerten Messfunktion herrühren.
3. Die  $t/V$ -Werte beim ersten gemessenen  $V$ -Wert ( $720 \text{ cm}^3$ ) liegen für die Versuche mit dem Filtertuch  $T_3$  nahe beieinander, während bei den übrigen Tüchern bedeutendere Unterschiede für die vier Unterlagengeometrien festzustellen sind.
4. Innerhalb eines Versuches streben die vier Kurven für verschiedene Unterlagengeometrien mehr oder weniger stark auseinander. Sie weisen also verschiedene mittlere Steigungen auf (für Steigungsanalyse siehe Abschnitt 8b).



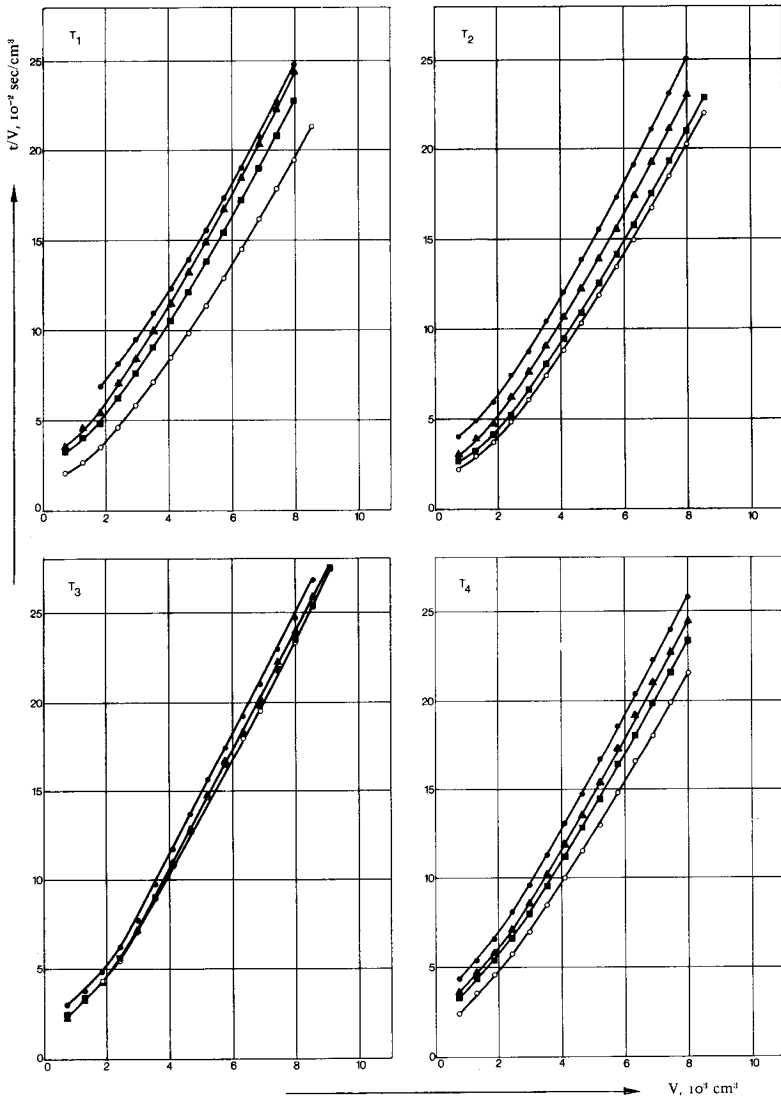
**Figur 24** Zeit-Volumen-Quotient  $t/V$  in Funktion des Filtratvolumens  $V$  für die Konzentration  $c_1$  bei konstantem Druck  $P_1$  für verschiedene Filtertücher  $T$ . Parameter: Unterlagegeometrie  $G$ .

- $G_1$       ▲  $G_2$       ■  $G_3$       ○  $G_4$



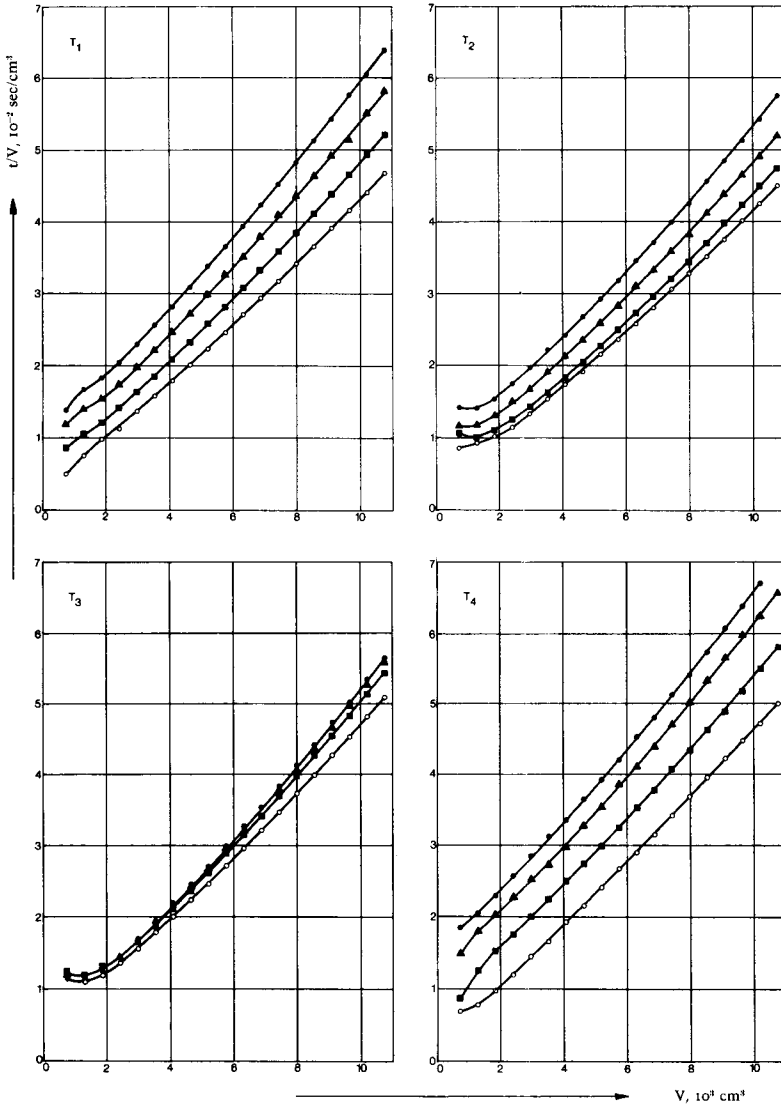
**Figur 25** Zeit-Volumen-Quotient  $t/V$  in Funktion des Filtratvolumens  $V$  für die Konzentration  $c_2$  bei konstantem Druck  $P_1$  für verschiedene Filtertücher  $T$ . Parameter: Unterlagengeometrie  $G$ .

- $G_1$
- ▲  $G_2$
- $G_3$
- $G_4$



**Figur 26** Zeit-Volumen-Quotient  $t/V$  in Funktion des Filtratvolumens  $V$  für die Konzentration  $c_3$  bei konstantem Druck  $P_1$  für verschiedene Filtertücher  $T$ . Parameter: Unterlagegeometrie  $G$ .

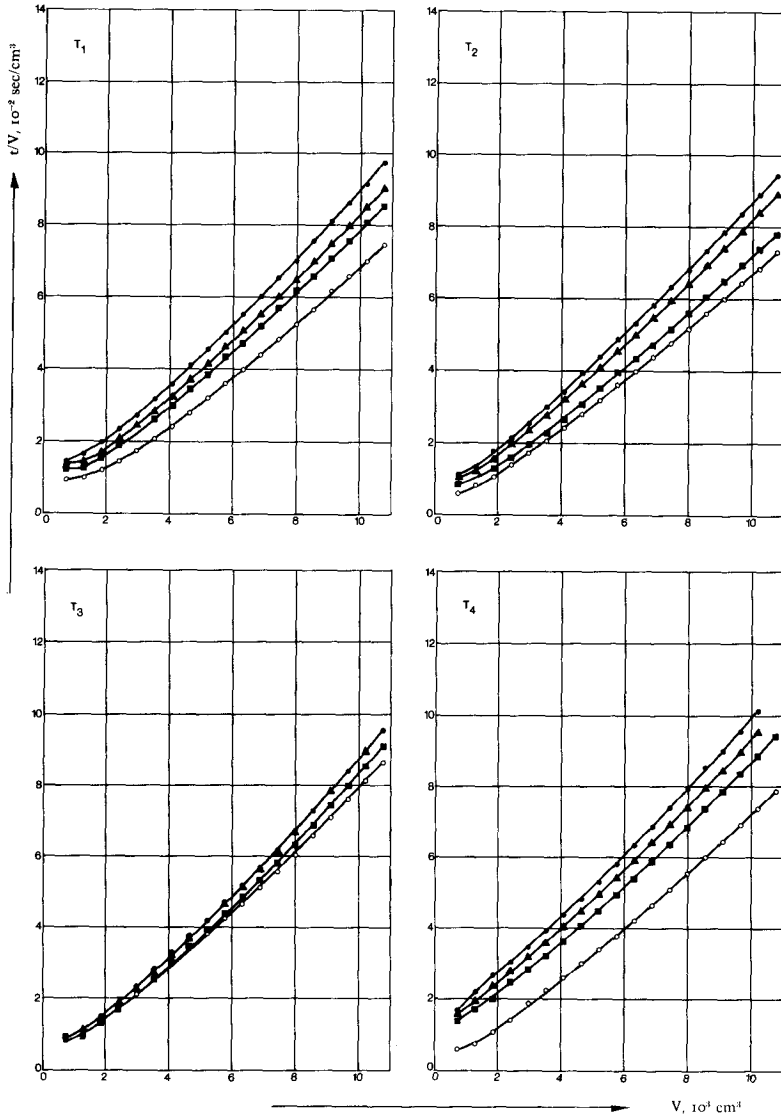
●  $G_1$       ▲  $G_2$       ■  $G_3$       ○  $G_4$



**Figur 27** Zeit-Volumen-Quotient  $t/V$  in Funktion des Filtratvolumens  $V$  für die Konzentration  $c_1$  bei konstantem Druck  $P_2$  für verschiedene Filtertücher  $T$ . Parameter: Unterlagegeometrie  $G$ .

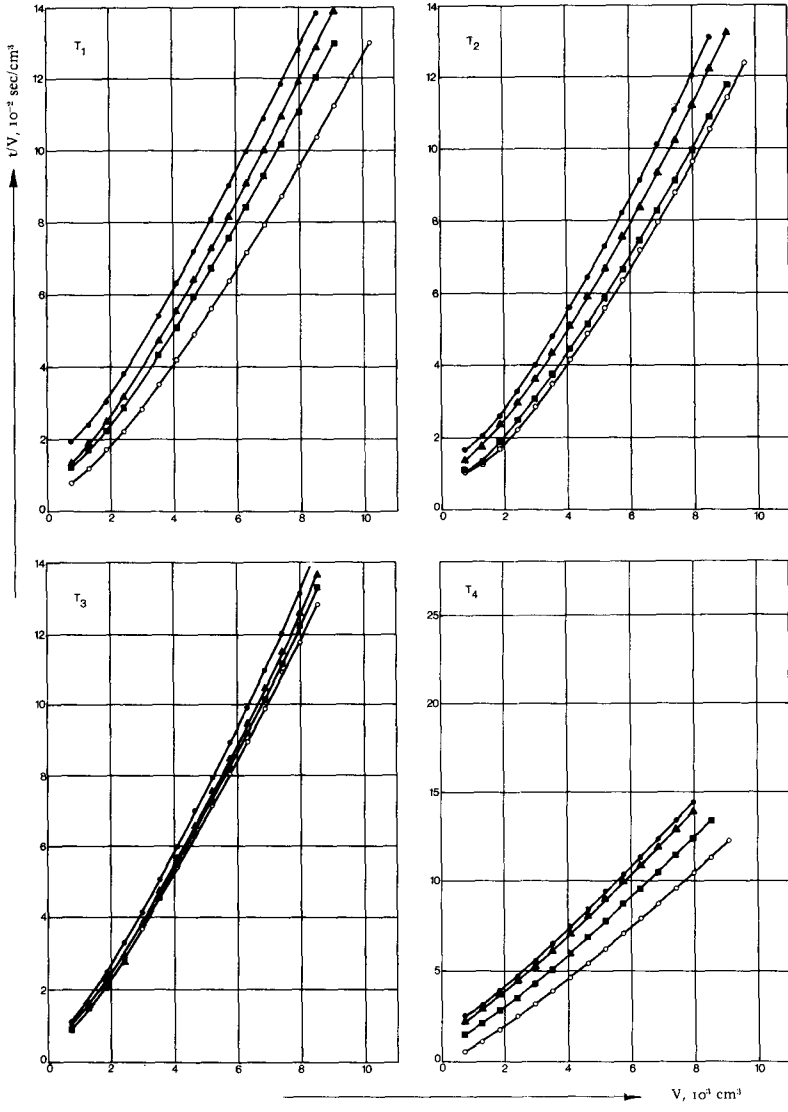
●  $G_1$       ▲  $G_2$       ■  $G_3$       ○  $G_4$





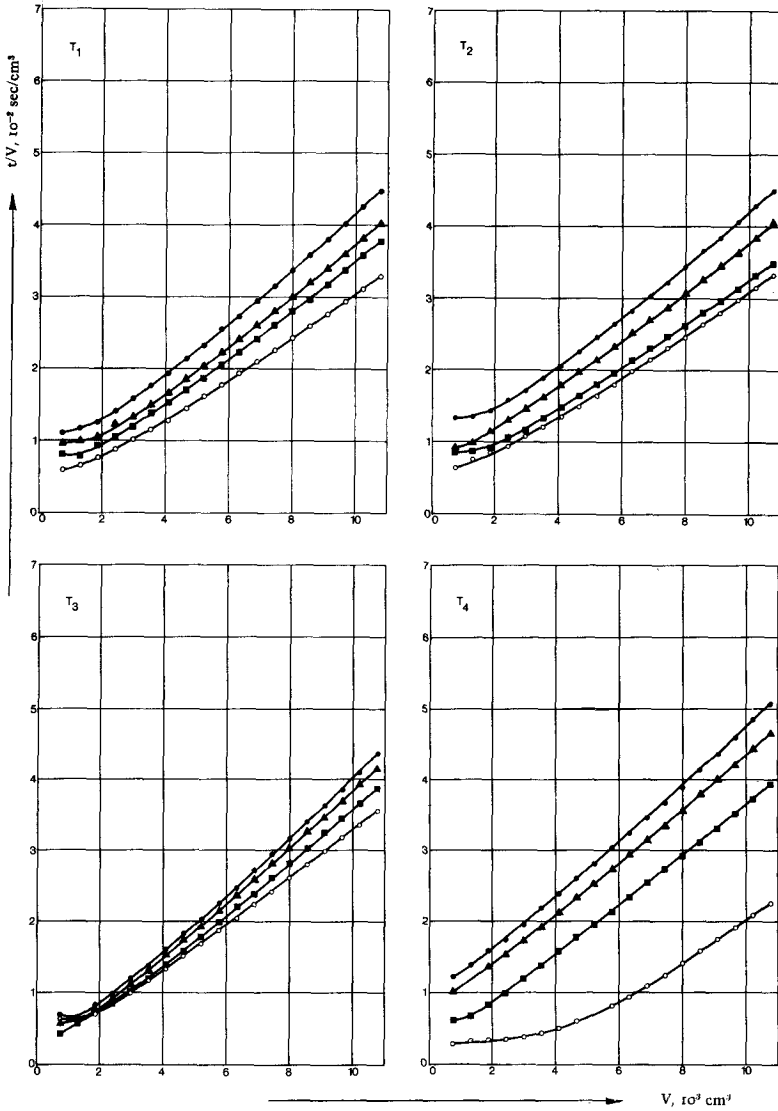
**Figur 28** Zeit-Volumen-Quotient  $t/V$  in Funktion des Filtratvolumens  $V$  für die Konzentration  $c_2$  bei konstantem Druck  $P_2$  für verschiedene Filtertücher  $T$ . Parameter: Unterlagengeometrie  $G$ .

●  $G_1$       ▲  $G_2$       ■  $G_3$       ○  $G_4$



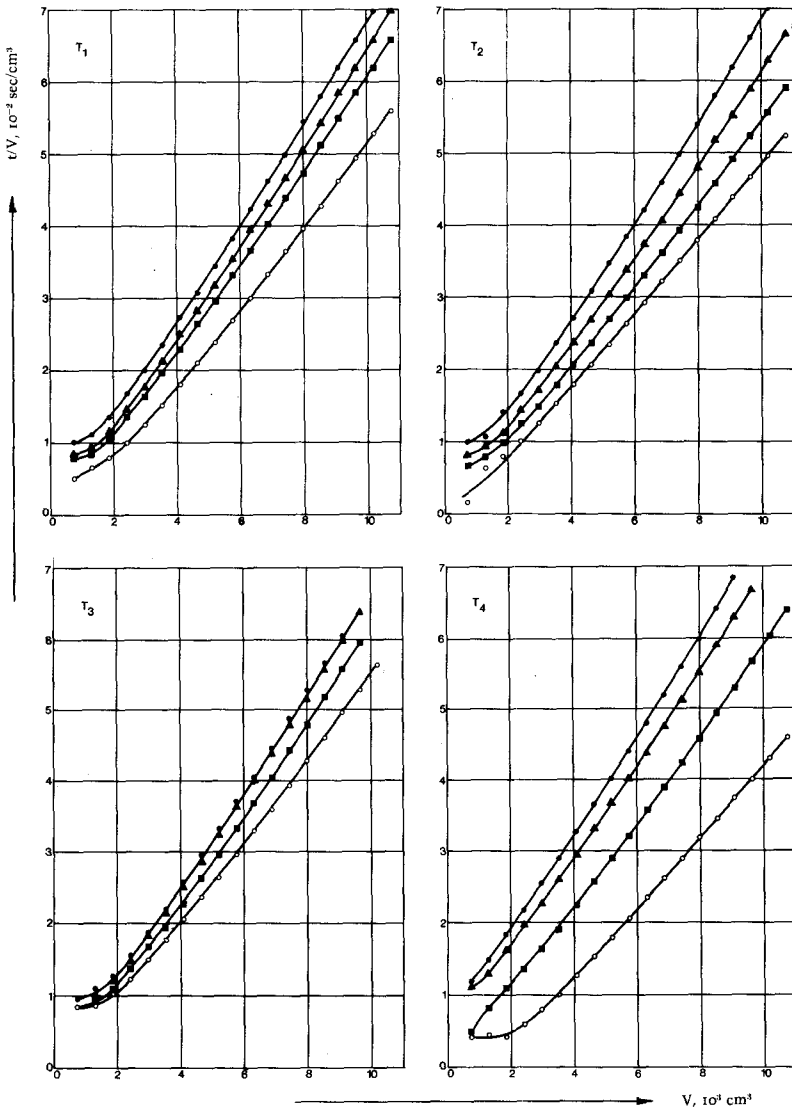
**Figur 29** Zeit-Volumen-Quotient  $t/V$  in Funktion des Filtratvolumens  $V$  für die Konzentration  $c_3$  bei konstantem Druck  $P_2$  für verschiedene Filtertücher  $T$ . Parameter: Unterlagengeometrie  $G$ .

● G<sub>1</sub>      ▲ G<sub>2</sub>      ■ G<sub>3</sub>      ○ G<sub>4</sub>



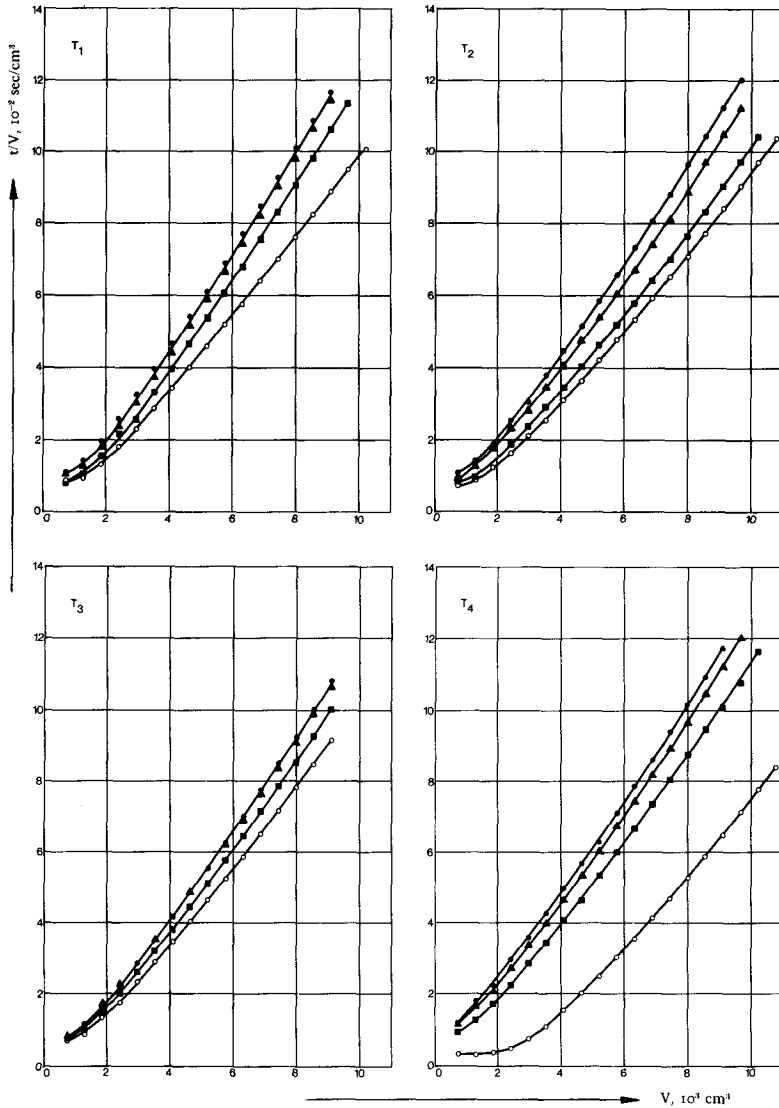
**Figur 30** Zeit-Volumen-Quotient  $t/V$  in Funktion des Filtratvolumens  $V$  für die Konzentration  $c_1$  bei konstantem Druck  $P_3$  für verschiedene Filtertücher  $T$ . Parameter: Unterlagengeometrie  $G$ .

●  $G_1$       ▲  $G_2$       ■  $G_3$       ○  $G_4$



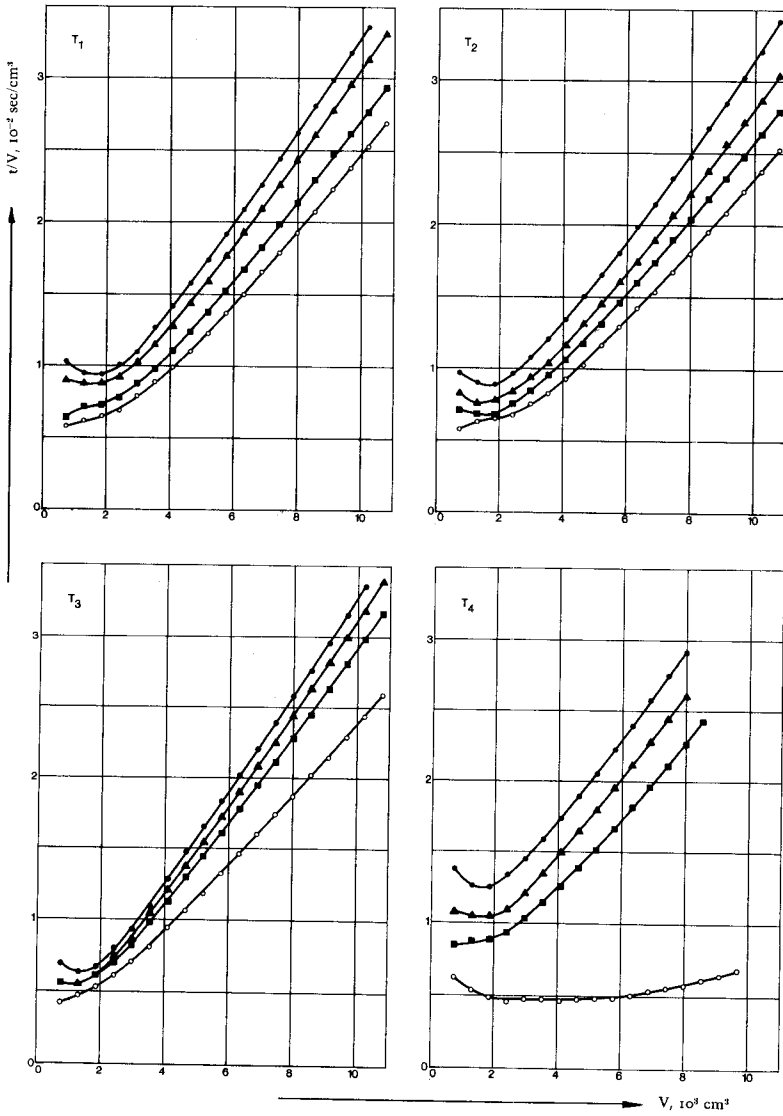
**Figur 31** Zeit-Volumen-Quotient  $t/V$  in Funktion des Filtratvolumens  $V$  für die Konzentration  $c_2$  bei konstantem Druck  $P_3$  für verschiedene Filtertücher  $T$ . Parameter: Unterlagengeometrie  $G$ .

● G<sub>1</sub>      ▲ G<sub>2</sub>      ■ G<sub>3</sub>      ○ G<sub>4</sub>



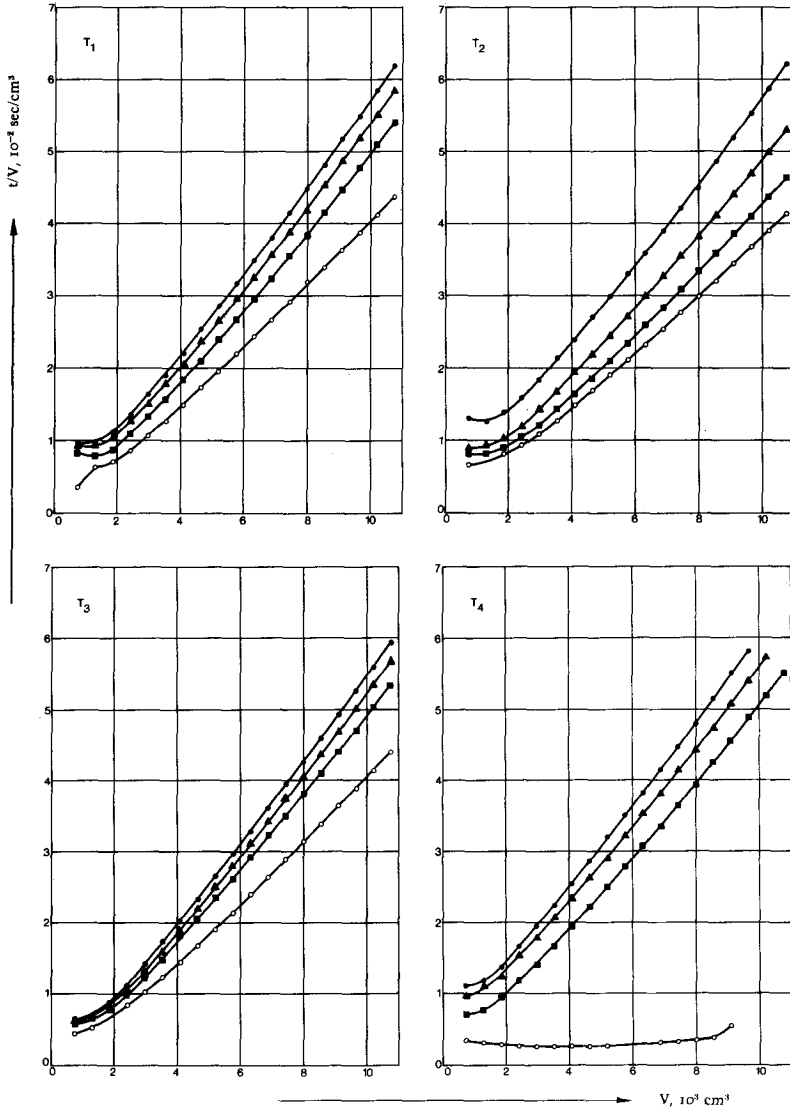
**Figur 32** Zeit-Volumen-Quotient  $t/V$  in Funktion des Filtratvolumens  $V$  für die Konzentration  $c_3$  bei konstantem Druck  $P_3$  für verschiedene Filtertücher  $T$ . Parameter: Unterlagengeometrie  $G$ .

- $G_1$       ▲  $G_2$       ■  $G_3$       ○  $G_4$



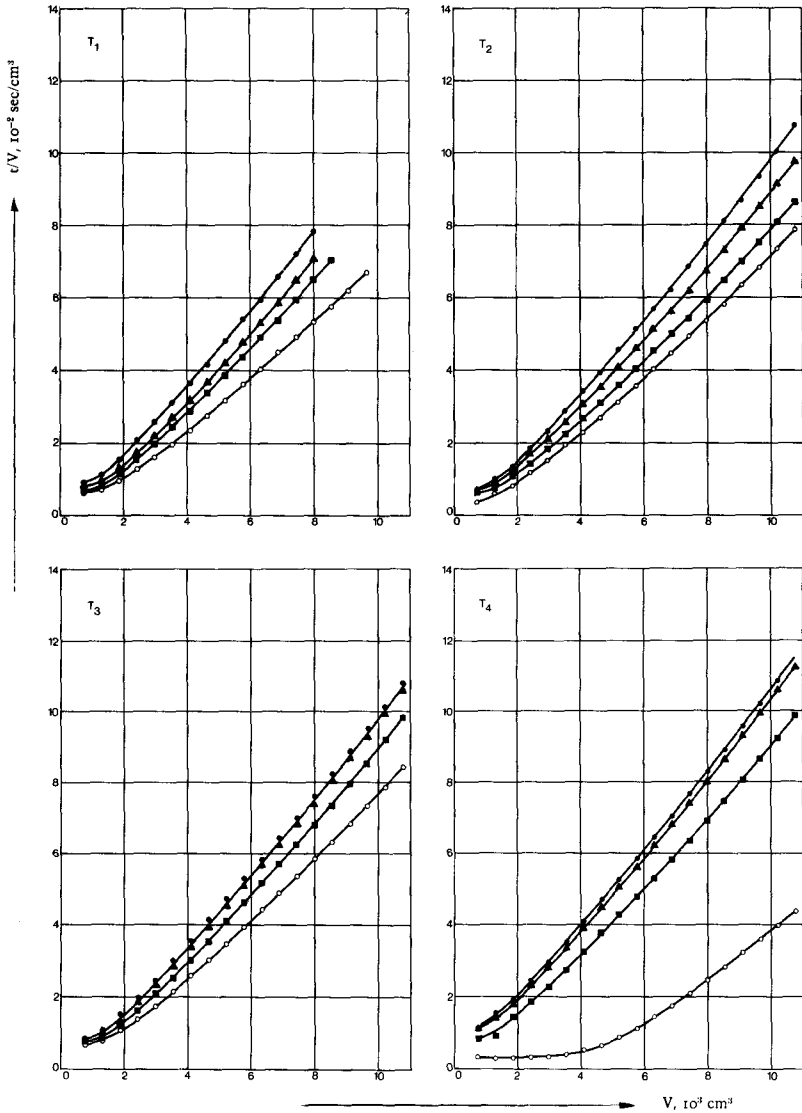
**Figur 33** Zeit-Volumen-Quotient  $t/V$  in Funktion des Filtratvolumens  $V$  für die Konzentration  $c_1$  bei konstantem Druck  $P_4$  für verschiedene Filtertücher  $T$ . Parameter: Unterlagengeometrie  $G$ .

●  $G_1$       ▲  $G_2$       ■  $G_3$       ○  $G_4$



**Figur 34** Zeit-Volumen-Quotient  $t/V$  in Funktion des Filtratvolumens  $V$  für die Konzentration  $c_2$  bei konstantem Druck  $P_4$  für verschiedene Filtertücher  $T$ . Parameter: Unterlagengeometrie  $G$ .

●  $G_1$       ▲  $G_2$       ■  $G_3$       ○  $G_4$



**Figur 35** Zeit-Volumen-Quotient  $t/V$  in Funktion des Filtratvolumens  $V$  für die Konzentration  $c_3$  bei konstantem Druck  $P_4$  für verschiedene Filtertücher  $T$ . Parameter: Unterlagengeometrie  $G$ .

●  $G_1$       ▲  $G_2$       ■  $G_3$       ○  $G_4$



b) Steigungsanalyse des  $t/V$ - $V$ -Zusammenhanges

Für jeden der durchgeführten Versuche wurde die Steigung des  $t/V$ - $V$ -Zusammenhanges im selben Filtratvolumeninterwall bestimmt. Bei allen Versuchen konnte die Anfangsphase bei  $V = 5130 \text{ cm}^3$  als abgeschlossen betrachtet werden. So wurde der Abschnitt zwischen  $V = 5130 \text{ cm}^3$  und  $V = 7886 \text{ cm}^3$  ins Auge gefasst. Die Steigung der Regressionsgeraden wurde zwischen diesen beiden Filtratvolumina berechnet.

Die betrachtete Steigung ist gleich dem Koeffizienten  $a_2$  der transformierten Filtergleichung 40 und steht in folgender Relation mit den charakteristischen Filtergrößen:

$$\text{Steigung} = a_2 = \frac{\mu \alpha w}{2A^2 g_c \Delta P} \quad (41)$$

Um ein Gesamtbild der erhaltenen Resultate zu haben, ist es von Interesse, eine Grösse zu betrachten, die druck-, viskositäts- und konzentrations-unabhängig ist. Sie kann folgendermassen errechnet werden:

$$\frac{\alpha}{A^2} = 2a_2 \frac{g_c \Delta P}{\mu w} \quad (41b)$$

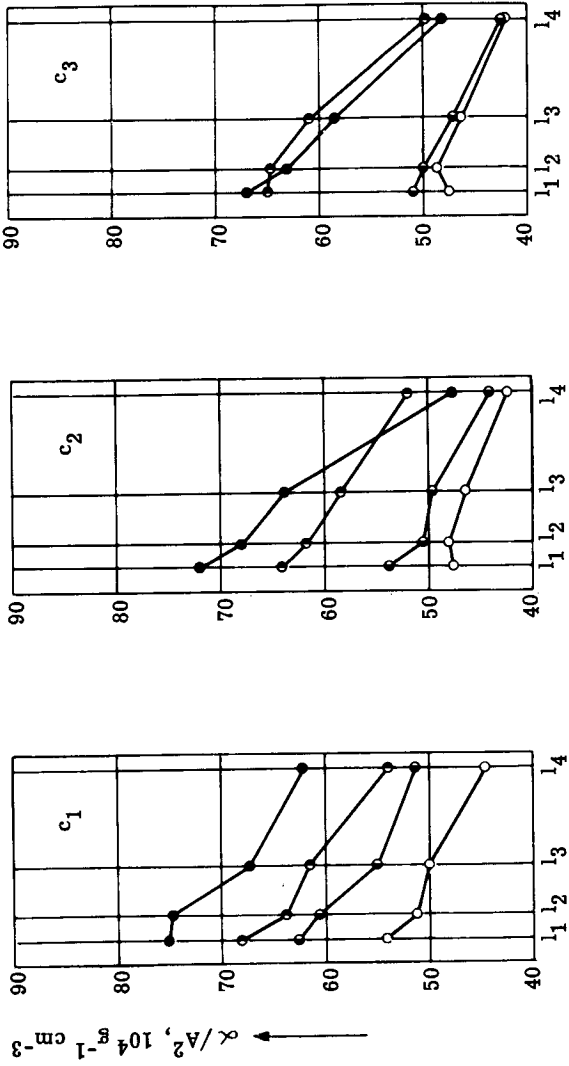
Zu bemerken ist, dass dieser Quotient auch für die Versuche berechnet wurde, bei denen  $w$  während des Versuches variabel gewesen war infolge unvollständiger Zurückhaltung der Feststoffteilchen.

Tabelle 15 enthält die nach Gleichung 41b berechneten Werte, die in Figur 36 bis 39 graphisch dargestellt werden.

**Tabelle 15** Verhältnis spezifischer Kuchenwiderstand zu (Fläche)<sup>2</sup> für verschiedene Konzentrationen c, Drucke P, Filtertücher T und Unterlagengeometrien G (cm<sup>-3</sup> g<sup>-1</sup> 10<sup>-4</sup>).

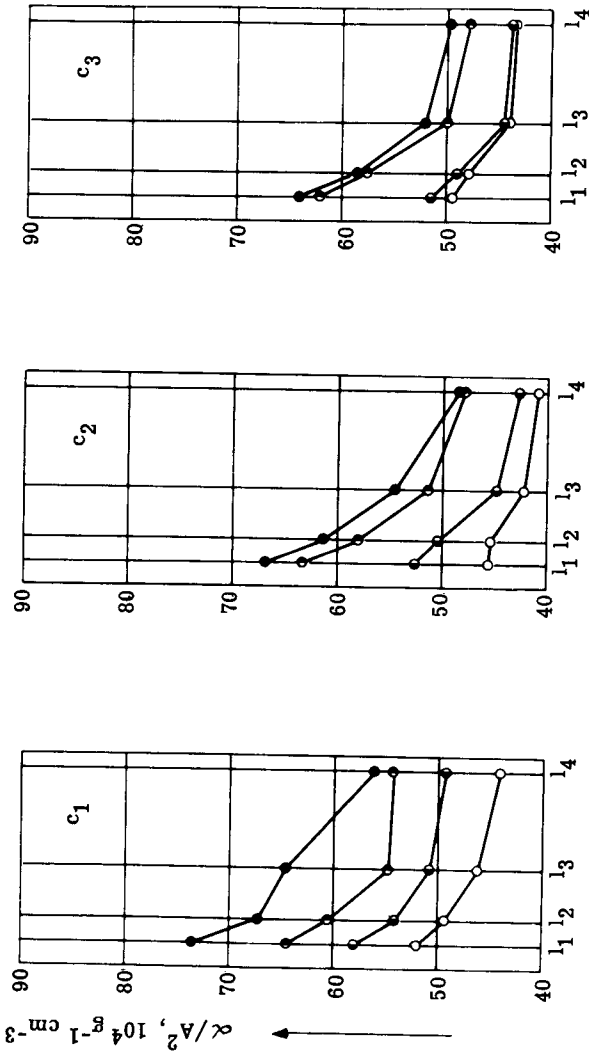
c P	c <sub>1</sub>				c <sub>2</sub>				c <sub>3</sub>				c T
	P <sub>1</sub>	54.2	51.2	49.3	44.6	47.7	48.0	46.4	42.5	47.5	48.8	46.4	
P <sub>2</sub>	62.6	60.7	55.0	51.6	53.8	50.5	49.6	44.1	51.0	50.0	47.1	42.5	
P <sub>3</sub>	68.2	63.8	61.7	53.9	64.1	61.8	58.5	52.0	65.1	64.7	61.0	49.8*	
P <sub>4</sub>	75.1	74.8	67.3	62.2	72.1	68.0	63.9	47.7*	67.0	63.2	58.6	48.2*	
P <sub>1</sub>	52.0	49.3	46.2	44.1	45.5	45.4	42.3	40.9	49.6	47.9	43.9	43.4	T <sub>2</sub>
P <sub>2</sub>	58.0	54.1	50.8	49.3	52.6	50.4	44.9	42.7	51.4	48.9	44.4	43.7	
P <sub>3</sub>	64.4	60.6	54.8	54.5	63.3	58.0	51.4	48.0*	62.1	57.5	49.9	47.8	
P <sub>4</sub>	73.5	67.3	64.6	56.2	66.8	61.3	54.6	48.3*	64.1	58.5	52.0	49.7	
P <sub>1</sub>	52.4	52.5	51.6	49.6	54.0	51.4	50.8	49.8	47.4	47.7	46.1	45.2	T <sub>3</sub>
P <sub>2</sub>	61.5	60.5	58.8	54.9	54.5	53.9	51.9	48.0	56.2	54.5	54.0	50.6	
P <sub>3</sub>	75.2	72.1	68.5	61.1	64.1	63.3	59.9	53.4	61.1	59.0	56.4	52.4	
P <sub>4</sub>	82.2	79.2	74.5	61.3	71.5	68.9	64.7	54.7	63.9	63.7	60.0	52.6	
P <sub>1</sub>	56.6	56.9	53.7	52.4	43.5	42.5	41.9	41.0	47.1	46.9	45.9	44.1	
P <sub>2</sub>	64.7	63.3	58.6	55.1	56.9	53.9	51.7	46.7	54.8	53.5	50.0	45.8	
P <sub>3</sub>	70.4	67.2	64.4	46.1*	65.0	60.5	55.4	45.7*	63.6	60.3	56.8	45.9*	
P <sub>4</sub>	75.6	71.4	65.0	7.9*	71.8	68.1	63.7	3.7*	68.2	65.5	58.6	35.2*	
P G	G <sub>1</sub>	G <sub>2</sub>	G <sub>3</sub>	G <sub>4</sub>	G <sub>1</sub>	G <sub>2</sub>	G <sub>3</sub>	G <sub>4</sub>	G <sub>1</sub>	G <sub>2</sub>	G <sub>3</sub>	G <sub>4</sub>	T G

\*) Unvollständige Trennung während des ganzen Versuches.



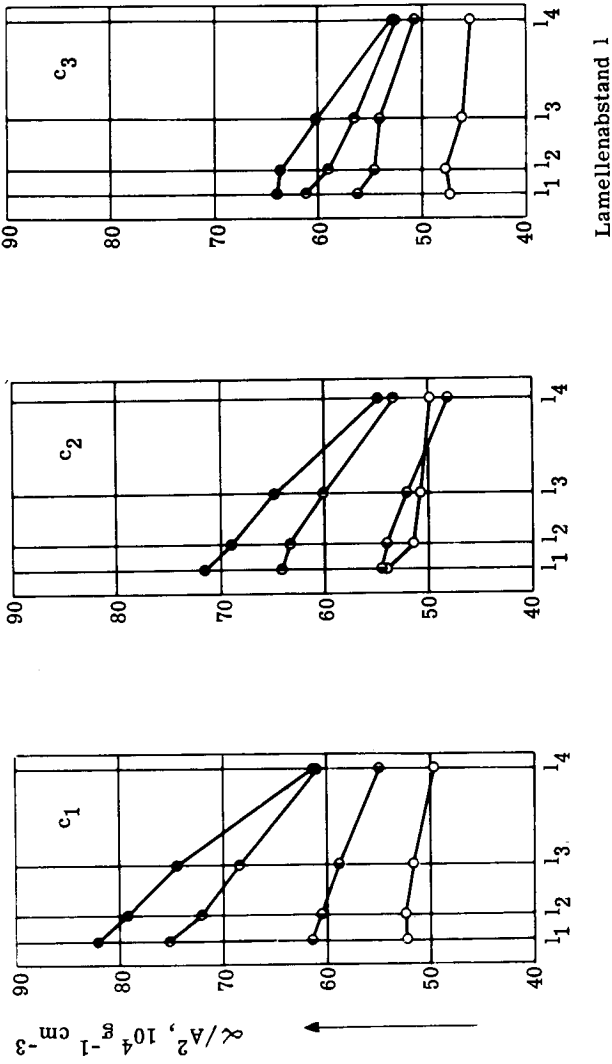
Lamellenabstand l

Figur 36  $\alpha/A^2$  in Funktion des Lamellenabstandes für Filtertuch  $T_1$  bei verschiedenen Aufschlämmungskonzentrationen  $c$  für die Druckstufen  $P_1O, P_2O, P_3O, P_4O$

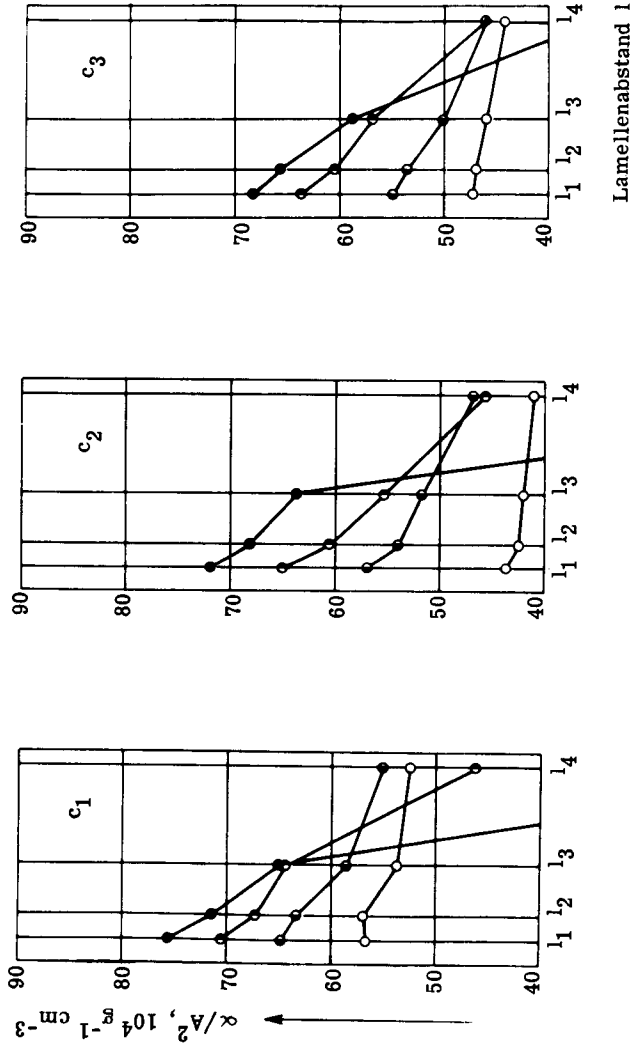


Lamellenabstand  $l$

**Figur 37**  $\alpha/A^2$  in Funktion des Lamellenabstandes für Filtertuch  $T_2$  bei verschiedenen Aufschlämmungskonzentrationen  $c$  für die Druckstufen  $P_1 \circ$ ,  $P_2 \bullet$ ,  $P_3 \circ$ ,  $P_4 \bullet$



**Figur 38**  $\alpha/A^2$  in Funktion des Lamellenabstandes für Filtertuch  $T_3$  bei verschiedenen Aufschlammkonzentrationen  $c$  für die Druckstufen  $P_1$  ○,  $P_2$  ◐,  $P_3$  ●,  $P_4$  ●



**Figur 39**  $\alpha/A^2$  in Funktion des Lamellenabstandes für Filtertuch T<sub>4</sub> bei verschiedenen Aufschlämmungskonzentrationen c für die Druckstufen P<sub>1</sub>○, P<sub>2</sub>●, P<sub>3</sub>○, P<sub>4</sub>●

### c) Einfluss der Unterlagengeometrie

Aus allen Darstellungen der Figuren 36 - 39 geht hervor, dass für die gewählten Unterlagengeometrien, die aus parallelen Lamellen konstruiert waren, der Lamellenabstand eine Grösse ist, die einen sichtlichen Einfluss auf den Filtrationsvorgang ausübt. Die Werte des Quotienten  $\alpha/A^2$  nehmen für jede Tuch-Druck-Konzentrations-Kombination mit zunehmendem Lamellenabstand durchwegs ab. Wie zu erwarten ist, hängt der Verlauf der Abnahme einerseits mit der Filtertuchqualität und andererseits mit dem angewandten Druck eng zusammen.

### d) Einfluss der Filtertuchqualität

Die Betrachtung der Auswertung der Versuchsergebnisse in ihrer Darstellung der Figuren 36 - 39 und die nähere Analyse der in Tabelle 15 angegebenen Resultate lassen folgende Aussagen zu:

1. Die verwendeten Filtertücher lassen sich in bezug auf die Durchschnitte der für die verschiedenen Tuchqualitäten erhaltenen Filtrationsresultate in einer bestimmten Reihenfolge aufstellen. Ueber alle Lamellenabstands-, Druck- und Konzentrations-Stufen betrachtet können die  $\alpha/A^2$ -Werte im Durchschnitt wie folgt geordnet werden:

$$(\alpha/A^2)_{T_3} \quad (\alpha/A^2)_{T_1} \quad (\alpha/A^2)_{T_4} \quad (\alpha/A^2)_{T_2}$$

Eine analoge Einordnung der Filtertücher kann aus der Betrachtung ihrer Dehnungseigenschaften erfolgen. Figur 23 kann aus dem zu betrachtenden Bereich (Zugkraft 0 - 30 kg/5cm) auf Grund der verschiedenen Dehnbarkeiten einer Filtertuchreihenfolge entnommen werden. Sie lautet im Sinne zunehmender Dehnbarkeit:

$$T_3 < T_1 < T_4 < T_2$$

Dabei wird nur die in der Hauptsache belastete Webrichtung betrachtet. Die Durchsicht der einzelnen Werte  $\alpha/A^2$  lässt erkennen, dass auf jeder Filtrationsbedingungsstufe die höchsten Werte für das Filtertuch  $T_3$  zu erwarten sind. Einige Unstimmigkeiten sind der Versuchsstreuung zuzuschreiben. Die niedrigsten Quotientwerte wurden in den meisten Fällen mit dem Filtertuch  $T_2$  erreicht. Diese Extremstellung wird lediglich bei hohen Drucken und grossem Lamellenabstand, und zwar ganz ausgesprochen bei den zwei niederen Konzentrationsstufen, vom Filtertuch  $T_4$  belegt. In diesen Fällen wird tatsächlich auch ein Teil der Feststoffteilchen durch das Gewebe hindurchgeschwemmt. Die Trennung ist während des ganzen

Filtrationszyklus unvollständig. Die betreffenden Werte wurden in Tabelle 15 mit \* vermerkt. Dieser Sachverhalt steht wahrscheinlich mit einer gegenüber andern Tuchqualitäten relativ hohen Porengrösse im unbelasteten Zustand im Zusammenhang. Zwischenwerte werden im allgemeinen für die Filtertücher  $T_1$  und  $T_4$  gefunden. Diese Resultate stehen in Uebereinstimmung mit den mittleren Dehnbarkeiten dieser Filtertücher. Infolge der Versuchsstreuung kann kein systematischer Unterschied zwischen diesen zwei Tucharten festgestellt werden.

2. Die schon weiter oben festgestellte Abnahme von  $\alpha/A^2$  in Funktion des Lamellenabstandes zeigt einen in engem Zusammenhang mit der Tuchqualität stehenden Verlauf. Am augenfälligsten tritt der Unterschied zwischen den Kurven für  $T_1$  und  $T_2$  (Figuren 36-37) hervor. Die  $T_1$ -Kurven weisen eher einen konvexen die  $T_2$ -Kurven einen deutlich konkaven Verlauf auf. Bekanntlich handelt es sich bei diesen zwei Versuchen um ein und dasselbe Tuch, das unter  $T_1$  in Schussrichtung und unter  $T_2$  in Zettelrichtung untersucht wurde. Demzufolge streben bei der Unterlagengeometrie  $G_4$  (Abstand  $l_4$ ) die Werte für beide Filtertücher richtigerweise zusammen. Aus dieser Erkenntnis kann die Einsicht gewonnen werden, dass der  $\alpha/A^2$ -Abfall bis zum Lamellenabstand  $l_3$  bei  $T_2$  deutlich grösser ausfällt als bei  $T_1$ . Hier erscheint wieder sehr schön der qualitative Zusammenhang, der mit den in Figur 22 aufgenommenen Dehnungskurven errichtet werden kann.

Im allgemeinen kann auch bei dieser Betrachtungsweise ausgesagt werden, dass sich für die verschiedenen Filtertücher aus der Beurteilung der Grösse des  $\alpha/A^2$ -Abfalles tendenziell eine Reihenfolge angeben lässt. Ausgeschlossen seien die Versuche, die mit \* bezeichnet wurden, da sie zu einer unvollständigen Trennung führten. Nach zunehmendem Abfall geordnet lässt sich folgende Reihe aufstellen:

$$T_3 < T_1 < T_4 < T_2$$

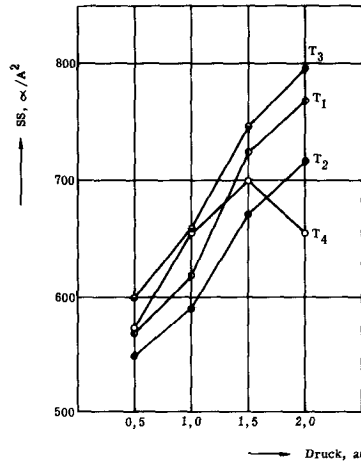
Diese Aufstellung stimmt mit der weiter oben angeführten überein, wobei eine Inversion von  $T_1$  und  $T_4$  nicht ausgeschlossen werden darf.

Die mit einer einzigen Tuchqualität unter  $T_1$  und  $T_2$  erhaltenen Resultate dürfen ein gewisses praktisches Interesse für sich beanspruchen. Festzuhalten ist, dass es in bestimmten Fällen nicht ganz gleichgültig ist, wie ein Filtertuch in bezug auf die Filtertuchunterlage eingesetzt wird, vor allem bei Klärfiltrationen. Es sollte besonders darauf geachtet werden, dass schon bei Laborversuchen die relative Lage festgesetzt werde. Diese ist für industrielle Filterapparate bereits durch die Breite der Tuchfabrikate gegeben.



e) Einfluss des Druckes

Aus der graphischen Auswertung der Figuren 36 - 39 ist zu entnehmen, dass sich ein deutlicher Druckeinfluss bemerkbar macht. In den meisten Fällen entspricht einem erhöhten Filtrationsdruck ein höherer  $\alpha/A^2$ -Wert. Da auf jeder Druckstufe mit jedem Filtertuch gleich viele Experimente durchgeführt wurden, geben die in Figur 40 dargestellten Summen ein wertvolles Bild über die Gesamtheit der bei verschiedenen Drucken durchgeführten Versuche. Die mit SS symbolisierte Summe stellt die Gesamtheit der mit einem bestimmten Tuch und unter einem bestimmten Druck für drei Konzentrations- und vier Lamellenabstands-Stufen erhaltenen  $\alpha/A^2$ -Werte dar. Sie entspricht der Summe einer Zeile der Tabelle 15.



**Figur 40** Zeilensumme von Tabelle 15 in Funktion des Druckes für die verschiedenen Filtertücher T

In Figur 40 wird für jedes Filtertuch gezeigt, wie sich die untersuchten Kriteriumsquotienten in Funktion des Filtrationsdruckes bewegen. Sie nehmen für die Filtertücher T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> und T<sub>3</sub> annähernd linear zu. Dabei scheint das Steigungsmass für das Filtertuch T<sub>2</sub> geringer zu sein als die Steigungsmasse für die Filtertücher T<sub>1</sub> und T<sub>3</sub>, bei denen kein deutlicher Unterschied festzustellen ist. Dieser Sachverhalt und die unterschiedlichen Kurvenhöhen scheinen wiederum mit den Dehnungseigenschaften der betreffenden Tücher in Einklang zu stehen. Eine besondere Stellung wird vom Filtertuch T<sub>4</sub> eingenommen. Der deutliche Abfall der Kurve gegen höhere Drucke lässt sich durch die in diesem Falle mangelnde Trennungsfähigkeit des Filtertuches glatt verstehen.

Mit aller Deutlichkeit fällt in den Figuren 36 - 39 der Einfluss des Druckes auf den Verlauf des  $\alpha/A^2$ -Zusammenhanges auf. Für alle angewandten Filtertücher und für den untersuchten Konzentrationsbereich kann gesagt werden, dass die Abnahme des  $\alpha/A^2$ -Wertes in Funktion der Grösse  $l$  mit zunehmendem Druck immer ausgesprochener wird.

#### f) Einfluss der Konzentration

Für jede der betrachteten Tuchqualitäten ist aus den Figuren 36 - 39 festzustellen, dass die  $\alpha/A^2$ -Werte eine Konzentrationsabhängigkeit aufweisen. Es kann eindeutig erkannt werden, dass der betrachtete Quotient die Tendenz hat, im untersuchten Konzentrationsgebiet mit abnehmender Konzentration höhere Werte anzunehmen.

Bei der näheren Analyse dieses Konzentrationseinflusses steht ein relativ starker  $\alpha/A^2$ -Abfall zwischen den Konzentrationsstufen  $c_1$  und  $c_2$  einem geringeren Abfall zwischen den Stufen  $c_2$  und  $c_3$  gegenüber.

Zur Erklärung genannter Tatsachen können drei Ursachen herangezogen werden:

1. Die Filterfläche hat ihren Gleichgewichtszustand im bei den Versuchen der Stufe  $c_1$  betrachteten Zeitpunkt noch nicht erreicht, während er sich bei den zwei höheren Konzentrationsstufen eingestellt hat.
2. Die Konzentration hat einen bedeutenden Einfluss auf den Flockungsgrad genommen und somit auch auf den spezifischen Kuchenwiderstand.
3. Der bei Messungen im niederen Konzentrationsgebiet um wenig kleinere Druckabfall hat sich bemerkbar gemacht. Einerseits ist  $\alpha/A^2$  zu gross ausgefallen, weil der eingesetzte Druckwert zu hoch und die Filterfläche kleiner war als bei höheren Konzentrationen. Andernteils hat sich ein vermindernder Einfluss eines kleineren spezifischen Kuchenwiderstandes entgegengesetzt bemerkbar gemacht.

Zur genauen Ermittlung der reellen Ursachenquelle könnte nur eine Reihe von Versuchen mit andern Schlammmaterialien beitragen.

### g) Diskussion

Aus der vorangegangenen Resultatsauswertung geht hervor, dass, falls die erhaltenen Resultate auf eine plane Filtrationsfläche (in unserem Falle wäre sie für alle Versuche die gleiche), wie dies in der Technik üblich ist, bezogen würden, je nach Filtertuchunterlage wesentlich verschiedene Werte für den spezifischen Filterwiderstand erhalten würden.

Nachdem die beschriebenen Resultate einen qualitativen Zusammenhang mit den auf verschiedenen Unterlagen applizierten Filterqualitäten offenbarten, stellte sich die Frage, ob die Einführung der effektiven Filterfläche, der für jeden Fall verschiedenen Filtertuchoberfläche, eine vollständige Erklärung der vorgefundenen Verhältnisse gestatten würde.

Zu diesem Zwecke wurden Filtertuchoberflächen unter verschiedenen Belastungsbedingungen ausgemessen und dazu benützt, einen weiteren Auswertungsschritt zu unternehmen, wie dies in den zwei nächsten Kapiteln ausgeführt wird.

## 8. Bestimmung der Filtertuchfläche in Abhängigkeit des Belastungsdruckes

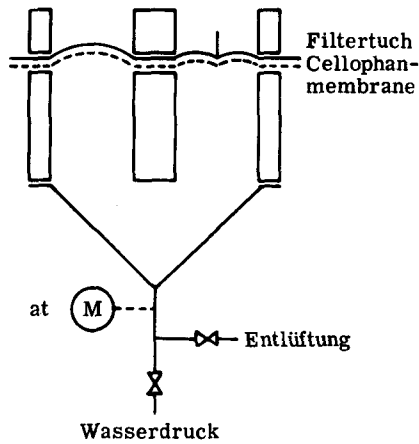
### a) Methode

Die gewählte Methode zur Bestimmung der Filtertuchfläche in Abhängigkeit des Belastungsdruckes bestand darin, Abdrücke des belasteten Tuches herzustellen und die Grösse ihrer Oberfläche zu bestimmen.

### b) Herstellung der Gipsabdrücke

Die Belastung des Tuches wurde in der für die Filtrationsversuche benützten Vierkammerzelle durchgeführt.

Die Versuchsanordnung ist in Figur 41 schematisiert.



Figur 41 Einrichtung zur Druckbelastung

Die in Figur 18 und 19 beschriebene Zelle wurde ohne Filtratsammelplatte benützt und so aufgestellt, dass die Filtrataustrittsseite nach oben wies. Auf der Belastungsseite des nach üblicher Art eingespannten Tuches befand sich ein Cellophanblatt, das das unter dem gewünschten Druck stehende Wasser am Ausfliessen verhinderte. Bei Belastungsdrücken über 2 at nahm die Wasserpermeabilität der Membran so zu, dass die gewählte Methode nicht mehr anwendbar war.

Die Form des belasteten Filtertuches wurde mit Hilfe einer geeigneten Gipsabdruckmasse (100 Teile Alabastergips, 6,5 Teile weisser Bolus, 150 Teile Wasser), die auf die obere Seite des Filtertuches gegeben wurde, festgehalten. Nach einer Stunde konnte die festgewordene Masse nach dem Auseinandernehmen der Zelle leicht herausgezogen werden.

### c) Ausmessung der Abdruckflächen

Zur Bestimmung der Oberfläche der Gipsabdrücke wurde folgende approximative Methode angewandt: Es wurden in je 5 mm Abstand die Längen der Schnittlinien, die senkrecht zum Längsgrat der gewölbten Oberfläche gezogen werden konnten, bestimmt. Das Flächenelement, das zwischen zwei solchen aufeinanderfolgenden Schnittlinien enthalten war, wurde als gleichschenkliges Trapez betrachtet, dessen Fläche leicht berechnet werden konnte. Die Addition sämtlicher 5 mm breiten trapezförmigen Elemente ergab die gesuchte Fläche.

d) Resultate

Die Messungen erfolgten bei vier Druckstufen für die vier in den Filtrationsversuchen angewandten Unterlagengeometrien  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_3$ ,  $G_4$ . Ausgemessen wurden die Filtertücher  $T_2$  und  $T_3$ , deren Dehnungseigenschaften sich untereinander wesentlich unterschieden. (Siehe Figur 22).

Die Messresultate wurden in Tabelle 16 zusammengefasst und in Figur 42 graphisch dargestellt.

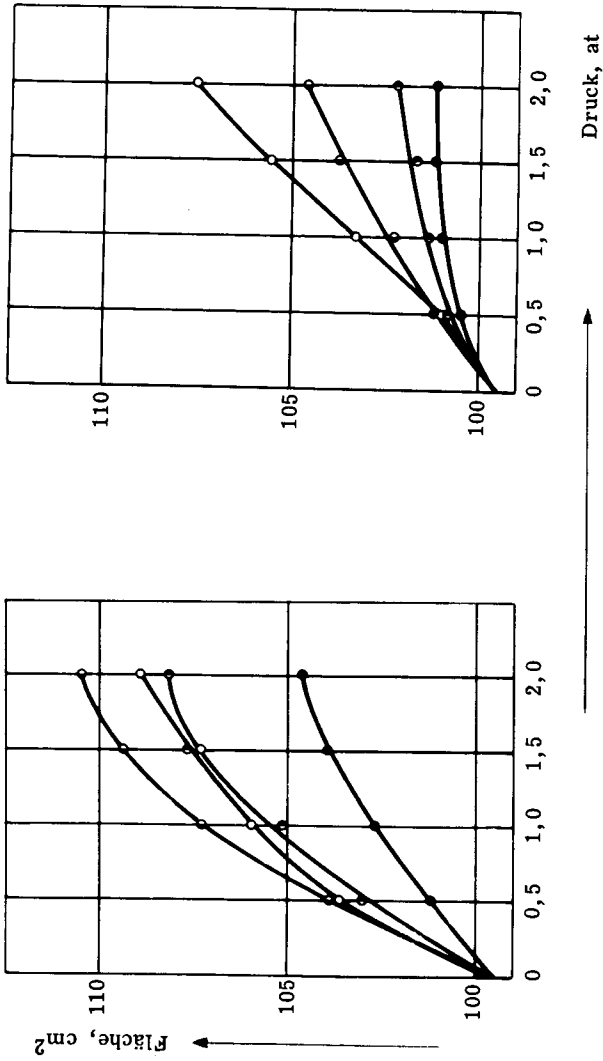
**Tabelle 16** Oberfläche ( $\text{cm}^2$ ) von Filtertüchern für verschiedene Unterlagen in Abhängigkeit vom Belastungsdruck

a) Filtertuch  $T_2$

Unterlage Druck (at)	$G_1$	$G_2$	$G_3$	$G_4$
0	99,5	99,5	99,5	99,5
0,5	101,2	103,1	103,9	103,7
1,0	102,7	105,2	107,3	106,0
1,5	104,0	107,7	109,4	107,4
2,0	104,7	108,1	110,5	109,0

b) Filtertuch  $T_3$

Unterlage Druck (at)	$G_1$	$G_2$	$G_3$	$G_4$
0	99,5	99,5	99,5	99,5
0,5	100,5	100,8	101,2	101,0
1,0	101,0	101,4	102,3	103,3
1,5	101,2	101,7	103,8	105,6
2,0	101,2	102,3	104,6	107,6



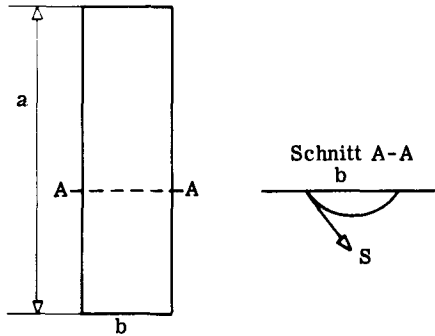
a) Filtertuch No. 2

b) Filtertuch No. 3

**Figur 42** Filtertuchflächen in Abhängigkeit vom Druck für die Filtertücher T<sub>2</sub> und T<sub>3</sub>.  
Parameter: Unterlagengeometrie G. G<sub>1</sub>●, G<sub>2</sub>○, G<sub>3</sub>●, G<sub>4</sub>○

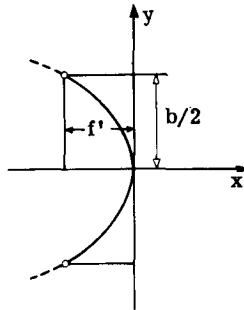
e) Annähernde Berechnung der Filterfläche aus einer einfachen Längenmessung

Für den Fall, bei dem die Filtertuchunterlage eine rechteckige Filtertuchfläche mit einem grossen Länge-Breite-Verhältnis (in Figur 43  $a \gg b$ ) ungestützt lässt, wurde versucht, eine einfache aus der Deformationslehre dünner Metallmembranen (46) stammende Approximation anzuwenden.



Figur 43 Das ungestützte Tuchelement

Weiter muss für die Möglichkeit einer Annäherung vorausgesetzt werden, dass die betrachtete Membran in den Hauptrichtungen gleiche Eigenschaften aufweist. Die nötigen Voraussetzungen erscheinen am besten bei der Unterlagengeometrie  $G_1$  ( $a : b \cong 9$ ) und dem Filtertuch  $T_3$ , das in beiden Hauptrichtungen gleiche Dehnungseigenschaften (siehe Figur 23) aufweist, erfüllt zu sein. In diesem Fall hat die Filtertuchoberfläche die Form eines parabolischen Zylinders, wenn von Randabweichungen abgesehen wird.



Figur 44 Filtertuchparabel

Die in Figur 44 dargestellte Parabel wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$y^2 = - \frac{2S}{p} x \quad (42)$$

Dabei stellt  $p$  den Belastungsdruck, dem die Membran ausgesetzt wird, dar, und  $S$  gibt die Randspannung an (siehe Figur 43).

Nun soll die Länge der in Figur 43 im Schnitt angegebenen Linie bestimmt werden. Es kann folgendermassen gerechnet werden:

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 \quad (43)$$

Unter Berücksichtigung von Gleichung 42:

$$ds^2 = \frac{p^2}{S^2} \left( y^2 + \frac{S^2}{p^2} \right) dy^2 \quad (43b)$$

oder

$$ds = \frac{p}{S} \sqrt{y^2 + \frac{S^2}{p^2}} dy \quad (43c)$$

Durch Bestimmung des Linienintegrals zwischen den Grenzen  $y = -b/2$  und  $y = b/2$  wird die Länge des betreffenden Parabelstückes  $L'$  erhalten

$$\int ds = L' = \frac{S}{p} \left[ \frac{pb}{2S} \sqrt{1 + \frac{p^2 b^2}{4S^2}} + \log \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{p^2 b^2}{4S^2}} + \frac{pb}{2S}}{1 + \sqrt{1 + \frac{p^2 b^2}{4S^2}} - \frac{pb}{2S}} \right] \quad (44)$$

Durch Anwendung der weiter oben angedeuteten Approximationsformel kann aus Gleichung 44 die praktisch nicht messbare Grösse  $S$  eliminiert werden. Es besteht nämlich zwischen der Parabelbogenhöhe  $f'$  und den in Gleichung 44 vorkommenden Grössen folgender Zusammenhang:

$$f' = \frac{p b^2}{8 S} \quad (45)$$

Durch Einsetzen von Gleichung 45 in Gleichung 44 wird eine Formel erhalten, die, falls es gelingt die Parabelbogenhöhe zu messen, zur praktischen Anwendung kommen kann:



$$L' = \frac{b^2}{8f'} \left[ \frac{4f'}{b} \sqrt{1 + \left(\frac{4f'}{b}\right)^2} + \log \frac{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{4f'}{b}\right)^2} + \frac{4f'}{b}}{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{4f'}{b}\right)^2} - \frac{4f'}{b}} \right] \quad (46)$$

Als Annäherung für die Fläche des belasteten Filtertuches, das in einem rechteckigen Rahmen belastet wird (Figur 43) gilt unter Vernachlässigung der Randunregelmässigkeiten:

$$A_p = L'a \quad (47)$$

Diese Gleichung wird umso bessere Werte ergeben, je grösser das Länge-Breite-Verhältnis des Unterlagenrechteckes sein wird. Diese Bedingung wird am ehesten bei grossen industriellen Filtern, bei denen die Unterlage aus parallelen Lamellen besteht, erfüllt sein.

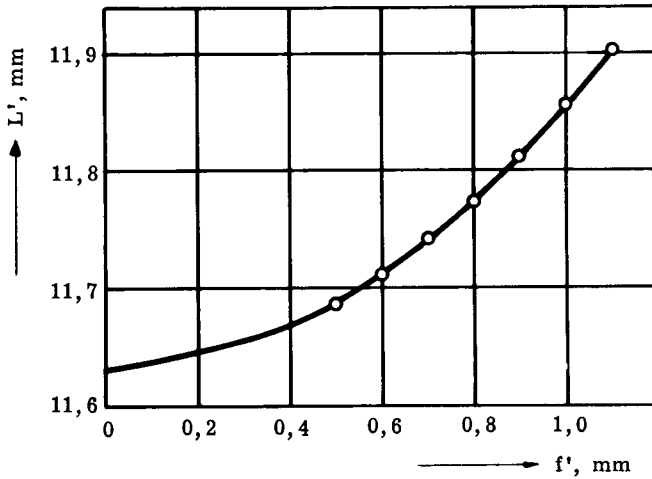
Im vorliegenden Fall wurde die Parabelbogenhöhe  $f'$  an den Gipsmodellen, die für die Flächenmessung nach der in Abschnitt c angegebenen Methode hergestellt wurden, mit Hilfe eines Kathetometers bestimmt. Es wurde nur die grösste, also die zentrale Parabelbogenhöhe in Betracht gezogen.

Falls sich die angegebene Berechnungsmethode bewährt, erübrigt sich die Herstellung eines Gipsabdruckes. Die maximale Durchgangshöhe kann mit Hilfe eines Kathetometers direkt am belasteten Filtertuch gemessen werden.

Auf Grund der den Gipsabdrücken für  $T_3$  und  $G_1$  entnommenen Messwerten wurden mit Hilfe von Gleichung 46 und 47 die im belasteten Zustand auftretenden Tüchoberflächen berechnet.

Die erhaltenen Resultate werden in Tabelle 17 den früheren (aus Abschnitt d) gegenübergestellt.

Figur 45 stellt für verschiedene Parabelbogenhöhen die aus Gleichung 46 berechneten Parabelbogen für den Lamellenabstand  $l_1$  dar.



**Figur 45** Parabelbogenlänge  $L'$  in Funktion der Bogenhöhe  $f'$

**Tabelle 17** Vergleich der nach 2 Methoden bestimmten Filtertuchflächen ( $\text{cm}^2$ ) für das Tuch  $T_3$  und die Unterlagegeometrie  $G_1$  bei verschiedenen Belastungsdrucken

Druck in at	Fläche nach Abschnitt d	Parabelbogenhöhe in mm	Fläche nach Abschnitt e
0.0	99.5	0.00	99.5
0.5	100.5	0.63	100.3
1.0	101.0	0.93	101.1
1.5	101.2	1.03	101.5
2.0	101.2	1.03	101.5

Der in Tabelle 17 aufgestellte Vergleich zeigt, dass die Methode, die von einer Messung der Parabelbogenhöhe ausgeht, im untersuchten Bereich brauchbare Werte ergibt.

## 9. Einführung der ermittelten Filtertuchflächen

Es scheint von speziellem Interesse zu sein, die Tuchflächen, die für verschiedene Belastungsbedingungen (siehe Kapitel 8) ermittelt worden sind, als die in den entsprechenden Filtrationsversuchen wirksamen Filterflächen zu betrachten. Obwohl die hervorgerufenen Flächendehformationen ansehnlich waren, wurde die Filterfläche in den folgenden Berechnungen für konstant gehalten, dies vor allem, weil die aufgebauten Filterkuchen nur geringe Dicken aufwiesen.

### a) Berechnung des spezifischen Kuchenwiderstandes

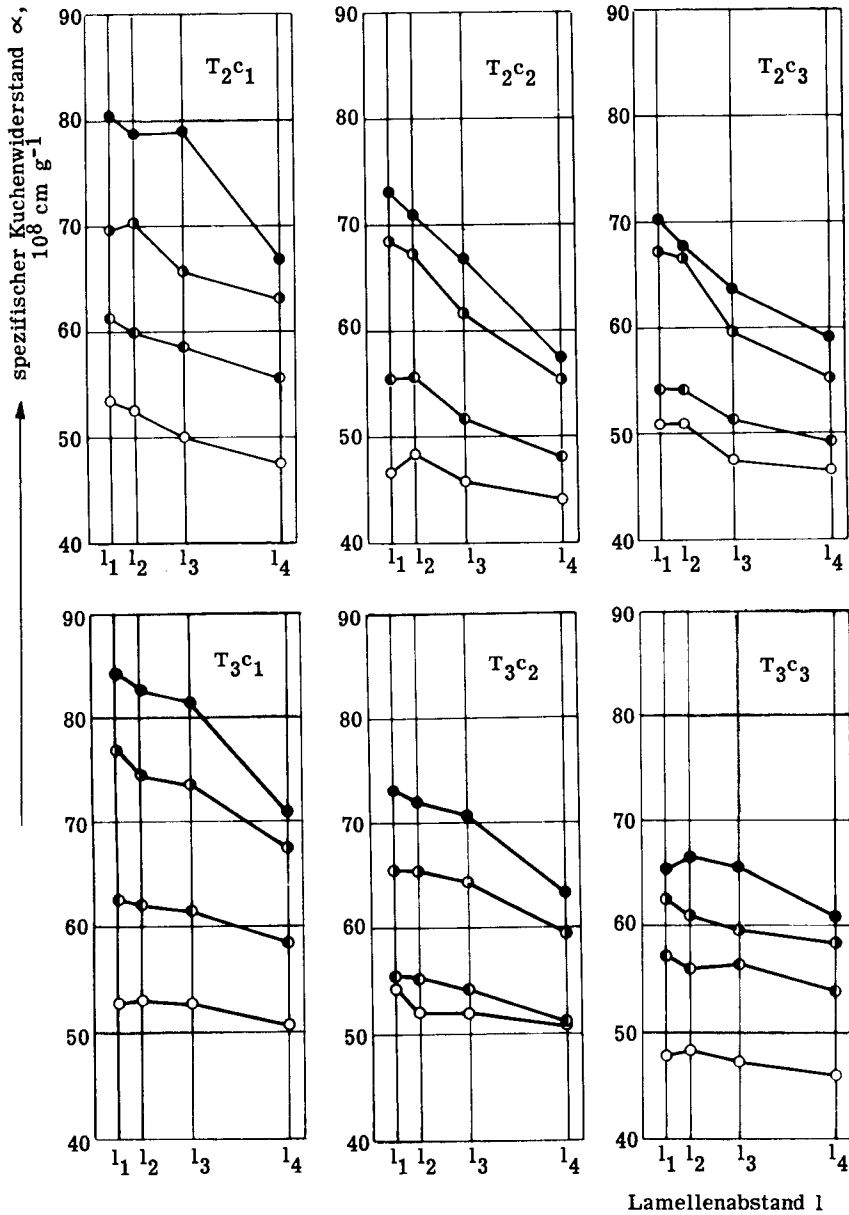
Die für die Filtertücher  $T_2$  und  $T_3$  erhaltenen  $\alpha/A^2$ -Werte (Tabelle 15) wurden mit dem Quadrat der zu den jeweiligen Versuchsbedingungen passenden Flächen (Tabelle 16) multipliziert. Das Resultat der graphischen Aufzeichnung der erhaltenen spezifischen Kuchenwiderstände zeigt die Figur 46. Aus dieser Figur ist ersichtlich, dass der beschriebene Auswertungsweg aus den im angewandten Versuchssystem erhaltenen Resultaten zu spezifischen Kuchenwiderstandswerten führt, die für jede Konzentrations- und Druckstufe eine Abhängigkeit von der Stützart des Filtertuches zeigen.

Der Einfluss der Konzentration auf die Widerstandsgrösse  $\alpha$  ist wie zu erwarten von der Filtertuchqualität durchaus unabhängig. Zu diesem Punkt gelten die in Kapitel 7 gemachten Ueberlegungen.

Die Zunahme des spezifischen Widerstandes mit dem Druck geht mit der kompressiblen Natur des filtrierten Materials in Ordnung. Diesem Kompressibilitätseffekt überlagert sich die Wirkung der gegen höhere Drucke grösser werdenden Tuchdeformationen, sodass sich die beiden Einflüsse nicht auseinanderhalten lassen.

Weiter muss festgehalten werden, dass parallel zur Flächenvergrösserung der Filtertücher, mit zunehmendem Druck und Lamellenabstand, eine Abnahme des berechneten spezifischen Kuchenwiderstandes eintritt. Diese Tendenz ist ausgesprochener beim Filtertuch  $T_2$ , das dehnbarer als das Filtertuch  $T_3$  ist.

Diesen Betrachtungen ist die Bemerkung anzuschliessen, dass die angegebenen spezifischen Kuchenwiderstände infolge der angewandten Analysenmethode sich stets aus dem gleichen Filtratvolumenintervall ergaben. Explizit ausgedrückt heisst es, dass die spezifischen Kuchenwiderstände für verschieden dicke Filterkuchen ermittelt wurden. Es ist von Wichtigkeit, diese Tatsache zu betonen, da die aufgenommenen Filterkurven keinen ganz idealen Verlauf aufwiesen. Aus diesem Grunde sollen die festgestellten Unterschiede in den  $\alpha$ -Werten noch mit Resultaten aus ganz ideal verlaufenden Filtrationen verglichen werden.



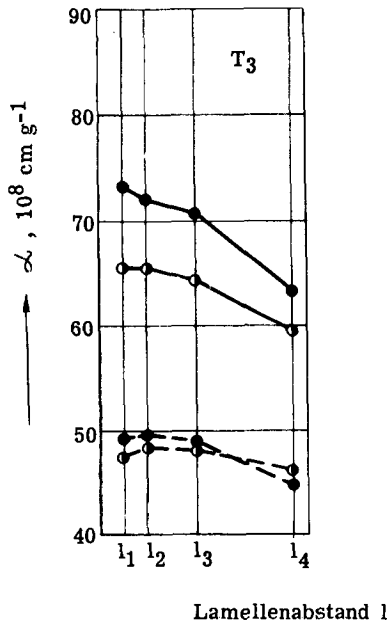
Figur 46 Spezifischer Kuchenwiderstand  $\alpha$  in Abhängigkeit des Lamellenabstandes für die Filtertücher  $T_2$  und  $T_3$  bei verschiedenen Aufschlämmungskonzentrationen  $c$  für die Druckstufen  $P_1 \circ$ ,  $P_2 \bullet$ ,  $P_3 \bullet$ ,  $P_4 \bullet$

b) Vergleich mit Filtrationen unter Zusatz eines Filterhilfsmittels

Zu Vergleichszwecken wurden Filtrationen durchgeführt, bei denen das Aufschlammungssystem durch Zusatz eines Filterhilfsmittels verändert wurde. Die Daten der filtrierte Aufschlammung sind die folgenden:

Magnesiumcarbonat	$1.5 \cdot 10^{-3} \text{ g/g } (=c_2)$
Filterhilfsmittel (Celite 535)	$0.29 \cdot 10^{-3} \text{ g/g}$

Der mit dieser Materialmischung erhaltene  $t/V - V$  - Zusammenhang war streng linear. Figur 47 stellt das Resultat der Auswertung von Filtrationen, die bei der Magnesiumkonzentration  $c_2$  und von solchen, die unter dem angegebenen Filterhilfsmittelzusatz durchgeführt wurden.



**Figur 47** Spezifischer Kuchenwiderstand  $\alpha$  für Magnesiumcarbonat ——— (Konzentration  $c_2$ ) und für Magnesiumcarbonat + Celite - - - - in Abhängigkeit vom Lamellenabstand  $l$  auf den Druckstufen  $P_3$  ● und  $P_4$  ○

Der Zusatz von "Celite 535" bewirkt erwartungsgemäss eine Senkung des spezifischen Kuchenwiderstandes. Das Zusammenrücken der bei zwei verschiedenen Drucken erhaltenen Kurven zeigt eine deutliche Abnahme der Kompressibilität an. Dennoch ist auch in diesem Fall eine Abhängigkeit des Widerstandes von der Form der Filterfläche, die durch den Lamellenabstand und den Druck gegeben ist, zu erkennen. Sie fällt weniger deutlich aus als bei den zwei oberen Kurven für reines Magnesiumcarbonat.

Aus diesem Vergleich geht hervor, dass Kuchenaufbauunterschiede möglicherweise bestehen. Sie sind aber klein und hängen mit der Qualität des Feststoffes zusammen.

## ZUSAMMENFASSUNG

1. In einem theoretischen Teil wurden die Filtrationsgesetze und -theorien sowie deren Anwendungsmöglichkeiten dargelegt.
2. Der Einfluss verschieden konstruierter Filtertuchunterlagen auf den Filtrationsvorgang wurde am System Magnesiumcarbonat-Wasser untersucht, wobei die Filtertuchart sowie der Filtrationsdruck als weitere Variablen gewählt wurden.
3. Eine speziell zu Vergleichsmessungen geeignete Filtrationszelle erlaubte die gleichzeitige Ermittlung der Filtrationscharakteristiken für verschiedene Filterstützen.
4. Mit zunehmendem Abstand der angewandten Filterstützelemente und mit zunehmender Dehnbarkeit der Filtertücher trat eine Steigerung der Filterleistung ein.
5. Während bei Drucken unterhalb 0,5 atü die Filterleistungen mit verschiedenen Unterlagen nur geringe Unterschiede aufweisen, konnten bei Drucken von 2,0 atü eindeutige Differenzen ermittelt werden.
6. Bei sämtlichen untersuchten Filtertüchern konnte durch Vergrößerung des Druckes und des Abstandes der Stützelemente ein Punkt erreicht werden, in dem keine vollständige Trennung mehr erfolgte. Dieser kritische Punkt wird durch die Gewebeeigenschaften, den angewandten Druck und die Art der Filtertuchunterlage bestimmt.
7. Die durch Aenderung der Filtertuchunterlagen erhaltenen unterschiedlichen Filterleistungen konnten nur teilweise durch die Vergrößerungen der Filterflächen erklärt werden. Bei Verwendung von Magnesiumcarbonat wurden auch Unterschiede im Kuchenaufbau festgestellt, die bei weniger kompressiblen Substanzen kaum in Erscheinung treten. Die Ermittlung der einzelnen Filterflächen geschah einerseits auf experimentellem Weg durch Ausmessen von Gipsabdrücken, andererseits mittels einer halbempirischen Methode, die sich an die Deformationslehre von Membranen anlehnt.

NOMENKLATUR

A	Fläche senkrecht zur Strömungsrichtung ( $\text{cm}^2$ )
a	Menge Feststoff für Verstopfung einer Pore (g)
a'	Gewicht eines Teilchens (g)
B <sub>o</sub>	Permeabilitätskonstante ( $\text{cm}^2$ )
b	Konstante der Beziehung zwischen Druck und Tuchwiderstand
c'	Volumen abgeschiedener Feststoff pro Volumen Filtrat
c	Konzentration
D <sub>p</sub>	mittlerer Partikelradius (cm)
f	Formfaktor
f'	Parabelbogenhöhe (mm)
g <sub>c</sub>	Umrechnungsfaktor ( $9,81 \times 10^5 \text{ cm}^{-1} \text{ g sec}^{-2} \text{ at}^{-1}$ )
h	Porenlänge in Standardfiltration (cm)
K, K'	Konstanten
K <sub>c</sub>	Verstopfungskonstante des Kuchengesetzes ( $\text{cm}^{-6} \text{ sec}$ )
K <sub>i</sub>	Verstopfungskonstante des Zwischengesetzes ( $\text{cm}^{-1}$ )
K <sub>s</sub>	Verstopfungskonstante des Standardgesetzes ( $\text{cm}^{-1}$ )
K <sub>b</sub>	Verstopfungskonstante des Verstopfungsgesetzes ( $\text{sec}^{-1}$ )
K <sub>z</sub>	Kozenyfaktor
k	Konstante des Heermans-Bredée-Gesetzes
L	Kuchendicke (cm)
L'	Parabellänge (mm)
l	Länge (cm)
N	Anzahl Poren pro Filtermediumsflächeneinheit ( $\text{cm}^{-2}$ )
n	Konstante der Beziehungen zwischen mittlerem spezifischem Widerstand und Filtrationsdruck
n'	Konstante der Heermans-Bredée-Gesetze
O	Konstante



P	Filtrationsdruck (at)
$\Delta P$	Druckabfall (at)
$p_s$	Kompressionsdruck (at)
Q	Durchflussmenge ( $\text{cm}^3 \text{sec}^{-1}$ )
$q_0$	Anfangsdurchflussgeschwindigkeit ( $\text{cm}^3 \text{sec}^{-1}$ )
R	Totaler Filtrationswiderstand ( $\text{cm}^{-1}$ )
R'	Konstante der Beziehung zwischen Druck und Tuchwiderstand
$R_K$	Kuchenwiderstand ( $\text{cm}^{-1}$ )
$R_m$	Filtermediumswiderstand ( $\text{cm}^{-1}$ )
$R_{m_0}$	Filtermediumswiderstand für frisches Tuch gegenüber Wasser ( $\text{cm}^{-1}$ )
r	Radius (cm)
$r_0$	effektiver Porenradius in Standardfiltration (cm)
S'	Konstante
S	Randspannung
$S_0$	Spezifische Oberfläche ( $\text{cm}^{-1}$ )
s, s'	Konstanten der Beziehungen zwischen mittlerem spezifischem Widerstand und Filtrationsdruck
t	Zeit (sec)
V	Filtratvolumen ( $\text{cm}^3$ )
$V_0$	Aequivalentvolumen ( $\text{cm}^3$ )
v	Geschwindigkeit ( $\text{cm sec}^{-1}$ )
W	Menge Feststoff im Filterkuchen (g)
w	Menge Feststoff im Kuchen abgelagert pro Volumeneinheit Filtrat ( $\text{g cm}^{-3}$ )
$\alpha$	mittlerer spezifischer Kuchenwiderstand ( $\text{cm g}^{-1}$ )
$\alpha_p$	örtlicher spezifischer Kuchenwiderstand ( $\text{cm g}^{-1}$ )
$\alpha_v$	mittlerer spezifischer Kuchenwiderstand, Volumenbeziehung ( $\text{cm}^{-2}$ )

$\alpha', \alpha''$	} Konstanten der Beziehungen zwischen mittlerem spezifischem Widerstand und Filtrationsdruck
$\alpha_0, \alpha_0'$	
$\beta, \beta'$	
$\epsilon$	Porosität
$\epsilon_p$	Packungsporosität der an den Porenwandungen abgelagerten Teilchen
$\mu$	Viskosität ( $\text{cm}^{-1} \text{ g sec}^{-1}$ )
$v$	spezifisches Leervolumen
$v_0$	totes Leervolumen
$\rho_s$	Feststoffdichte ( $\text{cm}^{-3} \text{ g}$ )

LITERATUR-VERZEICHNIS

- (1) Grace H. P., Chem. Eng. Progr. 47, 502 (1951)
- (2) Hatschek E., J. Soc. Chem. Ind., 27, 538T (1908)
- (3) Almy C., Lewis W. K., Ind. Eng. Chem., 4, 520 (1912)
- (4) Hermans P. H., Bredée H. L., Rec. trav. chim., 54, 680 (1935)
- (5) Poiseuille J. L., Compt. Rend., 15, (1842)
- (6) Darcy H. P. G., Les fontaines publ. de la ville de Dijon V. Dalmont,  
Paris (1856)
- (7) Sperry D. R., Ind. Eng. Chem., 13, 986, (1921)
- (8) Ruth B. F., Montillon G. H., Montonna R. E., Ind. Eng. Chem.,  
25, 76 (1933)
- (9) Ruth B. F., Montillon G. H., Montonna R. E., Ind. Eng. Chem.,  
25, 153 (1933)
- (10) Ruth B. F., Ind. Eng. Chem., 27, 708 (1935)
- (11) Ruth B. F., Ind. Eng. Chem., 27, 806 (1935)
- (12) Ruth B. F., Ind. Eng. Chem., 38, 564 (1946)
- (13) Underwood J. V., Trans. Inst. Chem. Engrs. (London) 4, 19 (1926)
- (14) Underwood J. V., Soc. Chem. Ind., 47, 325 T (1928)
- (15) Sperry D. R., Chem. & Met. Eng., 17, 161 (1917)
- (16) V. Gilse J. P. M., v. Ginneken P. J. H., Watermann H. J.,  
J. Soc. Chem. Ind., 49, 444T, 483T (1930)  
50, 41T, 95T (1931)
- (17) Carman P. C., J. Soc. Chem. Ind., 52T, 280 (1933)  
53T, 159, 301 (1934)
- (18) Grace H. P., Chem. Eng. Progr., 49, 303 (1953)
- (19) Grace H. P., Chem. Eng. Progr., 49, 367 (1953)
- (20) Grace H. P., Chem. Eng. Progr., 49, 427 (1953)
- (21) Tiller F. M., Chem. Eng. Progr., 49, 467 (1953)  
51, 282 (1955)
- (22) Hutto F. B. Jr., Chem. Eng. Progr., 53, 328 (1957)
- (23) Kozeny J., S.B. Akad. Wiss. Wien, Abt. IIa 136, 271 (1927)
- (24) Carman P. C., Trans. Inst. Chem. Engrs. (London) 15, 150 (1937)  
16, 168 (1938)
- (25) Hofting E. H., Lockhart F. J., Chem. Eng. Progr., 47, 3 (1951)
- (26) Brownell L. E., Katz D. L., Chem. Eng. Progr., 43, 537,  
601,  
703 (1947)

- (27) Hinchley J.W., Ure S.G.M., Clarke B.W., Trans. Inst. Chem. Engrs. (London) 3, 38 (1928)
- (28) Hinchley J.W., Ure S.G.M., Clarke B.W., J. Soc. Chem. Ind., 45, 1T (1926)
- (29) Heertjes P.M., van der Haas H., Rec. Trav. Chim., 68, 361 (1949)
- (30) Grace H.P., A. Inst. Chem. Eng. Journal, 2, 307 (1956)
- (31) Ingmanson W.L., Tappi, 35, 439 (1952)
- (32) Ingmanson W.L., Chem. Eng. Progr., 49, 577 (1953)
- (33) Heertjes P.M., Chem. Eng. Sci., 6, 190 (1956/57)
- (34) Heertjes P.M., Chem. Eng. Sci., 6, 269 (1956/57)
- (35) Miller S.A., Ind. Eng. Chem., 39, 5 (1947)  
40, 25 (1948)  
41, 38 (1949)  
42, 52 (1950)  
43, 85 (1951)  
44, 63 (1952)  
45, 68 (1953)  
46, 100 (1954)  
47, 546 (1955)  
48, 520 (1956)  
49, 486 (1957)
- (36) Heertjes P.M., Nijman J., Chem. Eng. Sci., 7, 15 (1958)
- (37) Rietema K., Chem. Eng. Sci., 2, 88 (1953)
- (38) Vosters H., Svensk Papperstider, 53, 29, 613, 771 (1950)
- (39) Gonsalves V.E., Rec. trav. chim., 69, 873 (1950)
- (40) Koch P.A., Wagner, Textile Prüfungen, Spohr-Verlag (1953)
- (41) Dreier W., Dissertation ETH (1957)
- (42) Linder A., Planen und Auswerten von Versuchen, Basel (1953)  
Statistische Methoden für Naturwissenschaftler, Mediziner und Ingenieure, Basel (1951)
- (43) Brownlee K.A., Industrial Experimentation, London (1956)
- (44) Fisher R.A., Yates F., Statistical Tables for Biological, Agricultural and Medical Research, (London) (1948)
- (45) Guyer A. jun., Böhlen B., Guyer A., Helv., 42, 2103 (1959)
- (46) Favre H., Cours de mécanique, 1, 364, Zürich (1946)

## LEBENS LAUF

Am 10. März 1927 wurde ich in Genf geboren, wo ich die Primarschule und den Collège de Genève besuchte. Im Frühling 1941 siedelte ich mit meinen Eltern nach Baden (AG) über, wo ich die Bezirksschule besuchte, um 1943 in die Kantonsschule Aarau einzutreten. Dort bestand ich im Jahre 1947 die Maturitätsprüfung (Typus A). Nach einer zweieinhalbjährigen Immatrikulation an der medizinischen Fakultät der Universität Genf trat ich im Herbst 1950 in die Abteilung IV für Chemie der Eidgenössischen Technischen Hochschule über, wo ich im Herbst 1954 das Diplom als Ingenieur-Chemiker erwarb. Anschliessend führte ich am anorganisch-technischen Institut unter der Leitung von Herrn Prof. Dr. A. Guyer die vorliegende Promotionsarbeit aus. Während drei Semestern war ich als Assistent für Verfahrenstechnik tätig. Ausserdem hatte ich Hilfslehrerstellen an der Kantonsschule Zürich und an der Gewerbeschule Zürich inne.

Zürich, im Februar 1960