

K. Husemann, F. Hebmüller und M. Eßlinger

# Bedeutung der Tiefenfiltration bei der Kieselgurfiltration von Bier (1)

Die mechanische Verfahrenstechnik unterscheidet Filtrationsvorgänge nach ihrem Wirkprinzip in Oberflächen- und Tiefenfiltration (1). Die Kuchenfiltration als der Vorgang, bei dem der Filterkuchen im Prozessverlauf die Aufgabe des Filtermittels übernimmt, wird als Oberflächenfiltration eingestuft und als solche in den gängigen Modellen betrachtet (1, 2, 3, 4). Die Autoren räumen allerdings ein, dass es hierbei zur Überlagerung der beiden Wirkprinzipien kommen kann. Die Kieselgurfiltration von Bier wird als Kuchenfiltration betrachtet, dabei wird dem Tiefenfiltrationsanteil in der Literatur nur geringe Beachtung geschenkt. Bei der Auslegung von Filtrationsprozessen spielt die Tiefenfiltration meist keine Rolle (5, 6, 7). In einem gemeinsamen Projekt der TU Bergakademie Freiberg und der Freiburger Brauhaus AG wurde die Bedeutung der Tiefenfiltration für die Kieselgurfiltration von Bier näher untersucht.

BC 25 Bier

Deskriptoren: Tiefenfiltration, Oberflächenfiltration, Kuchenfiltration, Granulometrie, Abtrennungsmechanismen.

Descriptors: Deep filtration, surface filtration, cake filtration, granulometry, separation process).

## 1 Einleitung

Bei der Bierfiltration handelt es sich um eine Klärfiltration, bei der die Reinigung der flüssigen Phase erwartet wird. Die Reinheit des Filtrates gilt als wesentliche Bewertungsgröße. Die Filtration erfolgt dadurch, dass eine trübe Flüssigkeit (Unfiltrat) durch ein Filtermittel in ein geklärtes (blankes) Filtrat und einen verbleibenden Filterrückstand (Filterkuchen) getrennt wird (8). Dieser Vorgang wird als Kuchenfiltration bezeichnet. Im Bier vorkommende Feststoffe weisen eine amorph-flockige bis gelartige Struktur auf und sind nahezu ausnahmslos verformbar (6). Dieses hat zur Folge, dass der abgetrennte Feststoff das Filtermittel schnell verstopfen kann. Um dieses zu verhindern, werden kristalline, starre Feststoffe zum Aufbau eines kompakten, aber durchlässigen und wenig kompressiblen Filterkuchens zugegeben. Hier spricht man von Anschwemmfiltration. Als Filterhilfsmittel werden Kieselgur, Perlite, Zellulose oder Mischungen dieser Stoffe zugesetzt.

Die Abtrennung von Trubstoffen bei der Anschwemmfiltration soll möglichst vollständig an der Oberfläche des Filterkuchens stattfinden. Der entstehende Filterkuchen stellt eine Kornschicht dar, bei deren Durchströmung das Fluid einem Widerstand ausgesetzt ist, so dass es zu einem Druckverlust kommt. Für die Modellierung des Strömungsvorganges sind weitreichende Vereinfachungen unerlässlich, da der Strömungsraum ein komplexes Porensystem darstellt. Dessen innere Struktur wird durch Korn-

größen- und Kornformverteilung der Partikel sowie deren Packungszustand (Porosität, Art der Packung) bestimmt. Bei konstanten Verhältnissen im Unfiltrat (Trubstoffmenge, Trubstoffzusammensetzung) und konstant zugegebener Menge von Filterhilfsmitteln würde bei Abtrennung aller Trubstoffe an der Kucheneintrittsseite ein gleichmäßiger Filterkuchen entstehen, der in jedem Teil der Schicht die gleiche Porosität vorweist. Damit wäre ein konstanter Widerstand pro Schichtelement gegeben. Die Widerstände der einzelnen Schichtelemente würden sich addieren, so dass der Widerstand der gesamten Schicht nur mit der Höhe des Filterkuchens steigen würde. Bei Verfahrensweisen mit konstantem Volumenstrom würde das einen linearen Anstieg des Differenzdruckes zwischen Filtereinlauf und Filterauslauf bedeuten.

Ein linearer Anstieg der Druckdifferenz ist in der Praxis aber nicht bei allen Filtrationsvorgängen zu beobachten. Häufig sind die Filtrationsverläufe durch einen exponentiellen Anstieg gekennzeichnet, bei denen der maximale Differenzdruck einer Filteranlage rasch erreicht wird und der Filtrationsprozess abgebrochen werden muss. Solche Verläufe sind – die konstanten Eigenschaften des Unfiltrates vorausgesetzt – immer in einer Veränderung der Kuchenstruktur begründet. Hierfür werden zwei äußere Einflussfaktoren verantwortlich gemacht:

- Das Eindringen von Trubpartikeln in den Filterkuchen und deren Abscheidung in der Tiefe der Schicht.
- Eine mögliche Kompressibilität des Filterkuchens infolge der Druckeinwirkung.

Der erstgenannte Grund soll in dieser Arbeit näher beleuchtet werden.

## 2 Theoretische Grundlagen der Filtration

Nach *Alt* (2) lässt sich, unabhängig vom Ort der Feststoffabtrennung (Oberflächen-, Tiefenfiltration), die Filtration als allgemeine Beziehung nach Gleichung 1 und 2 darstellen. Die beiden Gleichungen unterscheiden nur die Verfahrensweise, wonach Gleichung 1 für die Verfahrensweise mit konstanter Druckdifferenz und Gleichung 2 für die Verfahrensweise mit konstantem Volumenstrom gilt:

---

Autoren: Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus Husemann, Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Aufbereitungstechnik der Technischen Universität Bergakademie Freiberg, 09584 Freiberg, Dipl.-Ing. Frank Hebmüller und Dr.-Ing. Michael Eßlinger, beide Freiburger Brauhaus AG, Postfach 1462, 09584 Freiberg

$$\frac{d^2 t}{dV_{F,A}^2} = K \left( \frac{dt}{dV_{F,A}} \right)^n \quad (1)$$

$$\frac{d\Delta p}{dV_{F,A}} = K(\Delta p)^n \quad (2)$$

Darin ist  $t$  die Filtrationsdauer,  $V_{F,A}$  das filtrierte Volumen, bezogen auf die Filterfläche  $A$ , und  $K$  ein Durchflusskoeffizient. Der Exponent  $n$  bezeichnet in beiden Gleichungen die Art der Filtration dahingehend, wie sich die innere Struktur der filtrierenden Schicht während der Filtration verändert. Hierbei bedeutet  $n = 0$ , dass die Struktur konstant bleibt, die Abtrennung also an der Oberfläche der filtrierenden Schicht erfolgt und keine Kompression beobachtet wird. Für die Verfahrensweise mit konstantem Volumenstrom und unter Voraussetzung  $n = 0$  ergibt sich für Gleichung 2:

$$\Delta p = K \cdot V_{F,A} \quad (3)$$

Der Durchflusskoeffizient  $K$  ergibt sich aus einem Ansatz, der das Durchströmen von Kornschichten (2) beschreibt:

$$K = \frac{\dot{V}_{F,A} \cdot \alpha \cdot \eta_l \cdot h}{V_{F,A}} \quad (4)$$

Bei einer Filtration mit konstantem Volumenstrom und  $n = 0$  ist der von Alt (2) definierte Durchflusskoeffizient konstant. Der Druckverlust im Filterkuchen verändert sich nur mit der Kuchenhöhe  $h$ , bzw. dem Filtratvolumen  $V_{F,A}$ . Bei vorausgesetztem konstanten Feststoffvolumenanteil in der Trübe sind Kuchenhöhe und Filtratvolumen proportional zueinander. Filtrationen mit linear ansteigendem Druckverlust, die in der Praxis beobachtet werden, bestätigen diese Betrachtungsweise (9).

Kommt es zu einer Veränderung der inneren Kuchenstruktur, z.B. durch Eindringen von Trubstoffen in den Filterkuchen, wird dieser Tatsache durch Veränderung des Exponenten  $n$  in den Gleichungen 1 und 2 Rechnung getragen. Für  $n = 1$  schreibt man Gleichung 2, Verfahrensweise mit konstantem Volumenstrom, wie folgt:

$$\frac{d\Delta p}{dV_{F,A}} = K \cdot \Delta p \quad (5)$$

und nach der Integration

$$\Delta p = c \cdot e^{K \cdot V_{F,A}} \quad (6)$$

Der exponentielle Anstieg des Differenzdruckes mit dem filtrierten Volumen  $V_{F,A}$  wird in der Praxis (9), aber auch in den praktischen Versuchen zu dieser Arbeit immer wieder beobachtet. Verschiedene Einflussfaktoren auf die Tiefenfiltrationsvorgänge bei der Kieselgurfiltration von Bier sollen in dieser Arbeit beschrieben werden.

Für die Auswertung der Versuche geht man aber zunächst von einer konstanten Kuchenstruktur ( $n=0$ ) aus. Damit ergibt sich aus den Gleichungen 3 und 4:

$$\Delta p = \dot{V}_{F,A} \cdot \alpha \cdot \eta_l \cdot h \quad (7)$$

Gleichung 7 entspricht in anderer Schreibweise der Gleichung

von Darcy, die z.B. in (1) beschrieben wird. Ersetzt man die Kuchenhöhe  $h$  durch den Feststoffvolumenanteil  $\varphi_{FHM}$  des Filterhilfsmittels in der Trübe und das filtrierte Volumen  $V_{F,A}$ , so erhält man für den Druckverlust im Filterkuchen:

$$\Delta p = \dot{V}_{F,A} \cdot \alpha \cdot \eta_l \cdot \varphi_{FHM} \cdot V_{F,A} \quad (8)$$

Verwendet man bei der Filtration eine Voranschwemmung, so muss die Gleichung richtigerweise um diesen Widerstand  $\beta_0$  erweitert werden:

$$\Delta p = \dot{V}_{F,A} \cdot \eta_l \cdot (\beta_0 + \alpha \cdot \varphi_{FHM} \cdot V_{F,A}) \quad (9)$$

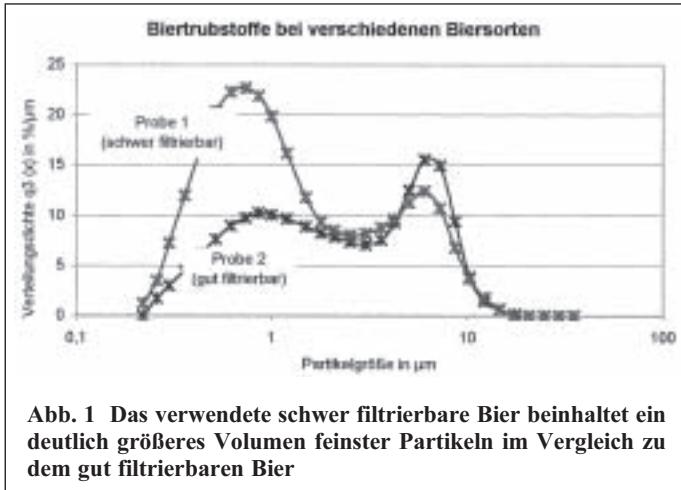
Gleichung 9 kann zur Auswertung von Filtrationsversuchen mit konstantem Volumenstrom verwendet werden. Sie entspricht in dieser Schreibweise der bekannten Carman-Gleichung, die z.B. Schubert in (1) ausführlich beschreibt. Aus dieser Literaturstelle wird auch die Quantifizierung für den spezifischen Filterkuchenwiderstand  $\alpha$  übernommen. Man kann zeigen, dass  $\alpha$  von der Porosität  $\varepsilon$  und dem Sauter-Durchmesser  $d_{ST}$  der durchströmten Schicht abhängig ist. Für ein Brechgut nach Ergun mit enger Korngrößenverteilung gilt:

$$\alpha = \frac{150 \cdot (1 - \varepsilon)^2}{d_{ST}^2 \cdot \varepsilon^3} \quad (10)$$

### 3 Material und Methoden

Die Versuche wurden an einer Versuchsanlage durchgeführt, die im Rahmen einer Diplomarbeit (10) in der Freiburger Brauhaus AG konzipiert, aufgebaut und erprobt wurde. Die Anlage stellt ein geschlossenes System dar. Es lassen sich Suspensionen bei 1,5 bar bis maximal 7 bar Überdruck und Zugabe eines Filterhilfsmittels auf einer horizontal angeordneten Siebfläche filtrieren. Der Druckverlauf am Filterein- und Filterauslauf wird während der Filtration von Druckaufnehmern erfasst und auf einem Rechner aufgezeichnet. Ebenso werden die Durchflüsse von Unfiltrat und Filtrat gemessen, gespeichert und stehen für eine Regelung von Durchfluss und Filterhilfsmitteldosage zur Verfügung. Die möglichen Volumenströme sind zwischen 4 l/h bis 20 l/h frei variierbar. Bei einer Filterfläche von 0,0123 m<sup>2</sup> entspricht das 325  $\frac{l}{m^2 \cdot h}$  bis 1626  $\frac{l}{m^2 \cdot h}$ . Zusätzlich kann eine Erfassung und Aufzeichnung der Trübungswerte mit einem Trübungsphotometer der Firma Optek unter einem Winkel von 0° und 11° erfolgen. Zum Aufbringen der Voranschwemmung kann das Fluid im Kreislauf gepumpt werden. Eine Regelung von konstantem Filtratvolumen oder konstantem Druckverlust ist möglich.

In den Versuchen wurden drei unterschiedliche handelsübliche Kieselguren verwendet, die in der Praxis als feine, mittlere und grobe Guren benutzt werden. Die Kieselgurproben wurden aus Säcken zu je 20 kg zunächst mittels Riffelteiler und dann mittels Rotationsteiler in Probenmengen zu je 400 g geteilt. Diese Menge war für die Versuche ausreichend, außerdem konnte hieraus eine weitere Probe granulometrisch untersucht werden. Anhand der Korngrößenverteilungen wurde festgestellt, dass die Einzelproben in Bezug auf das Gesamtaufwerk repräsentativ sind. Diese Messungen wurden im Prüflabor für Partikelmesstechnik des Instituts für Mechanische Verfahrenstechnik und Aufbereitung der TU Bergakademie Freiberg durchgeführt. Die Proben wurden nach zweiminütiger Ultraschalldispersion unter Zusatz von 1 g TNPP/1 mit Hilfe des Laserbeugungsgerätes HELOS untersucht. Die unterschiedlichen Kieselguren wurden sowohl in der Voran-



**Abb. 1** Das verwendete schwer filterbare Bier beinhaltet ein deutlich größeres Volumen feinsten Partikeln im Vergleich zu dem gut filterbaren Bier

schwemmung (Primärschicht), als auch in der laufenden Dosage (Sekundärschicht) in ihrer Art und Menge variiert.

Alle Versuche dieser Arbeit wurden in der Verfahrensweise mit konstantem Volumenstrom durchgeführt. Die weiteren Parameter wie Höhe und Art der Primärschicht, Menge und Art der Sekundärschicht und Filtrationsgeschwindigkeit werden bei der Auswertung der entsprechenden Versuche genannt.

Für die Versuche wurden zwei unterschiedliche Biersorten verwendet, die in der Praxis zuvor als sehr gut und sehr schlecht filterbar aufgefallen waren. Von beiden Sorten wurden vor Beginn der einzelnen Versuchsreihen ausreichende Mengen aus dem laufenden Produktionsprozess entnommen, und zwar nach einem Separator, der grobe Trubstoffe wie Hefezellen bereits deutlich reduziert hat. Die Bierproben der Versuchsreihen entsprachen somit den Verhältnissen im Produktionsprozess. Durch Standardversuche vor dem ersten und nach dem letzten Versuch einer Versuchsreihe wurde die Reproduzierbarkeit sichergestellt. Bei den Proben wurden Viskosität und Feststoffgehalt gemäß (5) bestimmt, zudem wurden die Biere granulometrisch untersucht (11).

Die beiden untersuchten Biere weisen vergleichbare Massen an Feststoffen auf, nämlich 130 mg/l im schlechter filterbaren und 140 mg/l im besser filterbaren Bier. Beide Proben unterscheiden sich aber in den Partikelgrößen ihrer Trubstoffe deutlich. Abbildung 1 zeigt die Verteilungsdichtefunktionen. Man erkennt jeweils bei etwa 6 µm einen charakteristischen Peak, der Hefezellen zuzuordnen ist. Die Verteilungsdichtefunktion zeigt bei der Probe 1 deutlich mehr Partikeln im Bereich von 0 – 2 µm. Diese Teilchen sind etwa eine Zehnerpotenz kleiner als Hefezellen. In dieser Korngrößenklasse ist in Probe 2 deutlich weniger Partikelvolumen vorhanden. Es erscheint schlüssig, dass ein großer Unterschied in der Korngrößenverteilung der abzutrennenden Trubstoffe auch Auswirkungen auf Filterbarkeit der beiden Biere hat. Die genauen Zusammenhänge von Partikelgrößenverteilung und Filterbarkeit sind bisher nur wenig beschrieben (6). Drost hat die Wirkung der kolloidalen Fraktion im Bier auf die Kieselgurfiltration untersucht (14). Der Einfluss messbarer Partikeln im Bier ist aber weitgehend ungeklärt.

## 4 Ergebnisse und Diskussion

### 4.1 Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit

Um die Abhängigkeit der Partikelabtrennung von der Strömungsgeschwindigkeit zu untersuchen, wurden zahlreiche Versuchsreihen durchgeführt, bei denen die Fließgeschwindigkeit innerhalb

einer Versuchsreihe gleich gehalten wurde (18). Von Reihe zu Reihe wurden die Strömungsgeschwindigkeiten stets im laminaren Strömungsbereich ( $Re < 10 \cdot 20$ ) variiert (13). In den untersuchten Grenzen ( $9,03 \cdot 10^{-5} \dots 4,52 \cdot 10^{-4}$  m/s) konnte dabei kein Einfluss auf die Abtrennungsvorgänge von Trubstoffen festgestellt werden. Bei ansonsten gleichen Filtrationsbedingungen wurden konstante spezifische Filterkuchenwiderstände  $\alpha$  (vgl. Gleichung 9) gemessen. Der Druckverlust  $\Delta p$  im Filterkuchen verhielt sich proportional zum Volumenstrom  $V_{F,A}$  bzw. innerhalb einer Versuchsreihe proportional zum filtrierten Volumen  $V_{F,A}$ . Die Gültigkeit der Gleichung von Darcy wurde für diese Anwendung somit bestätigt.

Ein konstanter spezifischer Filterkuchenwiderstand  $\alpha$  bedeutet, dass keine den Prozess beeinflussende Veränderung der Abtrennungs- und Bindungsmechanismen von Trubteilchen an der Eintrittsfläche zum Filterkuchen festgestellt werden konnte. Ebenso wenig werden durch unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten im Filterkuchen die Schleppkräfte für Partikeln in der Art beeinflusst, dass es zu veränderten Abtrennungsmechanismen und Ablagerungen kommt. Die Fließgeschwindigkeit hat in den untersuchten Grenzen weder einen messbaren Einfluss auf die Abtrennungsvorgänge von Partikeln an der Oberfläche eines Filterkuchens, noch auf mögliche Abtrennungen in der Tiefe einer Schicht.

### 4.2 Einfluss der Filterhilfsmittelkonzentration

Der Begriff Filterhilfsmittelkonzentration bezeichnet in der Praxis das Verhältnis der eingesetzten Kieselgurmasse zu der vorliegenden Masse, bzw. dem Volumen an Unfiltrat. Es wäre richtig, hier von dem Feststoffgehalt  $c_{FHM}$  des Filterhilfsmittels zu sprechen. Es ist zu beachten, dass es sich bei dem Feststoff um das eingesetzte Filterhilfsmittel (FHM) und nicht um die vorhandenen und abzutrennenden Trubstoffe handelt.

Es erfolgt eine getrennte Betrachtung für die Filterhilfsmittel der Primärschicht und der Sekundärschicht. Diese Trennung wird notwendig, da die Variation von Menge und Sorte der verwendeten Filterhilfsmittel in beiden Schichten unterschiedliche Folgen hat, die wiederum eine Erklärung der Abtrennungsmechanismen erleichtert.

#### 4.2.1 Einfluss der Filterhilfsmittelmenge in der Primärschicht

Es wurde die Bedeutung der Primärschicht für eine Anschwemmfiltration von Bier untersucht. Die Literatur beschreibt die Primärschicht als Stützschiebt ohne eigentlich filternde Wirkung (16, 17). Beim Vergleich von Filtrationen mit und ohne Voranschwemmung konnte aber eine filternde Wirkung der Primärschicht nachgewiesen werden (18). Kontinuierlich treten Trubpartikeln aus der Sekundärschicht aus und gelangen in das Filtrat, sofern sie nicht in der Primärschicht abgetrennt werden. In Abbildung 2 erkennt man dieses Phänomen daran, dass sich die Kurven des Druckverlustes mit dem flächenbezogenen Filtratvolumen  $V_{F,A}$  nicht parallel entwickeln. Bei vorhandener Voranschwemmung werden Trubteilchen in dieser Schicht abgelagert, verringern die Porosität und bewirken einen steigenden Druckverlust.

Subtrahiert man die Druckdifferenz „ohne Voranschwemmung“ bei jeweils gleichem filtrierten Volumen von der Druckdifferenz „mit Voranschwemmung“, so ergibt sich der Druckverlust, der alleine aus der Voranschwemmung resultiert. Läge keine Beeinflussung der Voranschwemmung durch abgelagerte Trubteilchen vor, bliebe dieser Wert konstant. Mit Hilfe von Gleichung 10 lässt

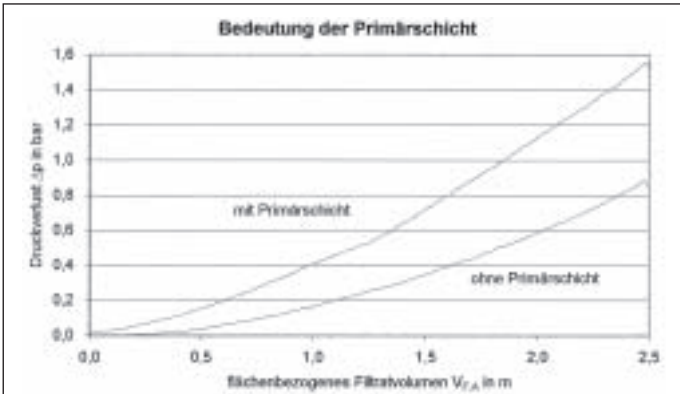


Abb. 2 Neben der Sekundärschicht zeigt auch die Primärschicht filtrierende Eigenschaften

sich die Druckdifferenz in die Porositätsänderung der Schicht umrechnen (Abb. 3). Man erkennt eine deutliche Porositätsverringern durch Abtrennung von Trubteilchen in der Primärschicht.

Für die Abtrennung von Trubstoffen in der Primärschicht lassen sich zwei Orte unterscheiden: Zum einen der Übergang der Sekundär- in die Primärschicht als Grenzfläche und zum anderen die Tiefe der angeschwemmten Primärschicht. Eine solche Trennung ist notwendig und kann durch Variation der Primärschichtdicke näher untersucht werden. Diese Veränderung wirkt nur auf die Abtrennungsvorgänge in der Tiefe der Primärschicht und nicht an der genannten Grenzschicht.

Die Filterhilfsmittelmenge kann als flächenbezogene Masse oder mit Hilfe der nassen Schüttdichte als flächenbezogenes Volumen dargestellt werden. Aus Letzterem ergibt sich die Höhe  $h$  der Primärschicht, welche durchströmt werden muss. Aus dem gesamten Volumen des Haufwerkes, der Korngrößen- und Kornformverteilung sowie aus der Porosität ergibt sich eine filtrationswirksame Oberfläche im Inneren der Schicht, deren Berechnung aber aufgrund der unterschiedlichen Einflussfaktoren bis heute nicht gelungen ist.

Bei Veränderung der eingesetzten Filterhilfsmittelmenge in der Primärschicht variiert deren wirksame Höhe. Mit einer höheren Voranschwemmung ist zunächst ein größerer Druckverlust verbunden, nicht aber eine Veränderung des spezifischen Durch-

flusswiderstandes. Dieser verändert sich erst, wenn sich in der Schicht die Porosität durch Tiefenfiltration oder Kompression verändert. Durch Eindringen von Trubstoffen aus der Sekundär- in die Primärschicht ist dieses der Fall. Dabei kommt es zu einer ständigen Veränderung der Struktur in der Primärschicht und bei sinkender Porosität zu einem nicht-linearen Druckanstieg im Filtrationsverlauf. Gleichzeitig steigt der spezifische Widerstand der Primärschicht und des gesamten Filterkuchens an.

Abbildung 4 zeigt den spezifischen Filterkuchenwiderstand  $\alpha$  für Filtrationsprozesse mit unterschiedlichen Höhen der Primärschicht. Die anderen Parameter wurden konstant gehalten. Die untere Kurve zeigt die Entwicklung des spezifischen Widerstandes bei Verwendung von 406 g/m<sup>2</sup> Kieselgur in der Voranschwemmung, einem praxisüblichen Wert. Die obere Kurve zeigt eine Voranschwemmung, die mit 1626 g/m<sup>2</sup> vierfach überdosiert gewählt wurde. Der mittlere Widerstand des gesamten Kuchens steigt nach Filtrationsbeginn stark an. Dieser Anstieg schwächt sich im Verlauf ab, bleibt aber stärker, als der nahezu lineare Anstieg des Filterkuchenwiderstandes bei Verwendung einer niedrigeren Primärschichthöhe.

Aufgrund des stärkeren Anstieges von  $\alpha$  in der dickeren Schicht lässt sich zeigen, dass während des gesamten Filtrationsvorganges Trubstoffe in dieser Schicht abgetrennt werden. Käme es nicht zu Änderungen der Porosität in Abhängigkeit von der Primärschichthöhe, würden beide Kurven parallel verlaufen. Die Messungen der Trübungswerte im Filtrat stützen diese Sicht: Eine höhere Primärschicht hat kontinuierlich niedrigere Trübungswerte zur Folge als eine dünnere Schicht. Die Differenz beider Trübungswerte beträgt im Filtrationsverlauf 0,3 – 0,4 EBC-Einheiten. Bei der dünneren Schicht war nach einer bestimmten Prozessdauer stets ein leichter Anstieg der Trübung zu beobachten. Das bedeutet, dass Partikeln die Schicht verlassen, weil sie nicht abgetrennt werden konnten. Mit dickeren Schichten wurde diese Grenze nie erreicht. Hinzu kommt, dass mit wachsender Sekundärschicht weniger Trubstoffe zur Primärschicht gelangen. Damit hängt auch die abgeschwächte Zunahme des Schichtwiderstandes in Abbildung 4 zusammen.

4.2.2 Einfluss der Filterhilfsmittelmenge in der Sekundärschicht

Aus der Literatur ist hinreichend bekannt, dass zu niedrig dosierte Filterhilfsmittel in der laufenden Dosage schwere Schäden am Kuchenaufbau mit Folgen für den Filtrationsverlauf hervorrufen

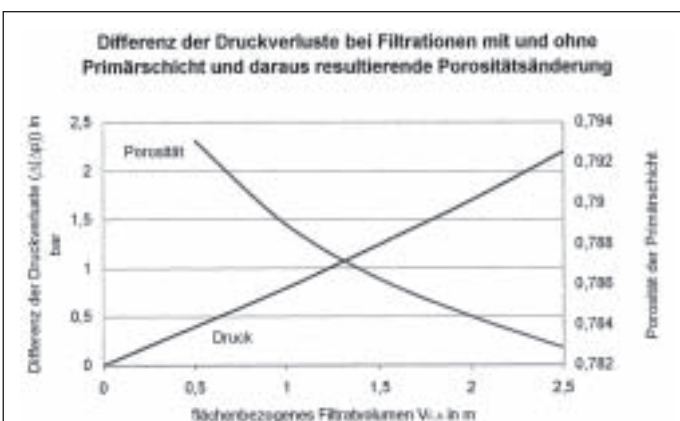


Abb. 3 Durch die Abtrennung von Trubstoffen in der Primärschicht verringert sich die Porosität

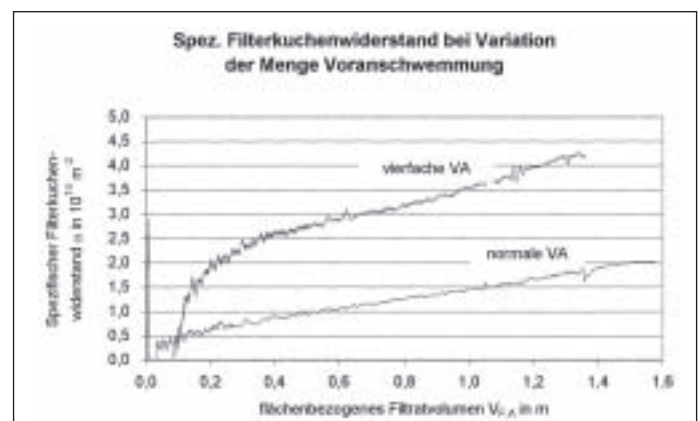


Abb. 4 Die Abtrennung von Trubstoffen erfolgt auch in der Voranschwemmung, eine erhöhte Voranschwemmung trennt mehr Partikeln ab

können. *Tittel* (15) spricht in diesem Zusammenhang von Schichtexpansion, weil mit abnehmender Filterhilfsmittelkonzentration die Trubpartikeln nicht nur in das vorhandene Porensystem eingelagert werden, sondern vielmehr das Schichtgerüst selber bilden. In diesem Fall ist das Schichtvolumen größer als bei reinem Filterhilfsmittel mit gleicher eingesetzter Menge.

In Versuchen konnte gezeigt werden, dass beim Fehlen einer ausgeprägten feinen Trubstoffmenge (Abb. 1) die zugesetzte Filterhilfsmittelmenge bis zu einem Grenzwert Einfluss auf den Filtrationsverlauf hat (18). Wird weniger Filterhilfsmittel zugegeben, kommt es bei der Abtrennung zur oben erwähnten Schichtexpansion. Damit ist eine Porositätserniedrigung im gesamten Sekundärschichtbereich verbunden. Der Grenzwert ist abhängig von dem Volumenverhältnis der Trubstoffe zu den Lücken des Filterkuchens und kann versuchstechnisch ermittelt werden, indem Versuche mit unterschiedlichen Dosagemengen unter Verzicht auf die Voranschwemmung durchgeführt werden. Hierbei beeinflussen in erster Linie die gröberen Trubpartikeln wie Hefezellen die Porosität und damit den Filterwiderstand der Gesamtschicht.

Grobe Trubpartikeln nehmen ein größeres Volumen am Gesamtaufwerk im Vergleich zu feinen Trubpartikeln (Anteil < 2 µm Durchmesser) ein. In der porösen Sekundärschicht haben die feinen Trubteilchen keinen oder nur geringen Einfluss auf den Schichtwiderstand, obwohl sie dort abgetrennt werden. Es konnte gezeigt werden, dass diese Abtrennung weniger an der Eintrittsfläche zur Sekundärschicht (Kuchenoberfläche), sondern vielmehr im Inneren nach den Gesetzen der Tiefenfiltration abläuft. Außerdem kann sich die Abtrennung in den undurchlässigeren Bereichen einer feinen Primärschicht vollziehen. Für die Abtrennung per Tiefenfiltration ist aber die durchströmte Schichthöhe von entscheidender Bedeutung. Die Schichthöhe eines Filterkuchens wird von der Schichthöhe der Primärschicht (4.2.1) und der dosierten Filterhilfsmittelmenge in der Sekundärschicht bestimmt.

Somit kann ein Zusammenhang zwischen der Abtrennung feiner Trubteilchen und der Schichthöhe hergestellt werden. Außerdem besteht der Einfluss auf den gesamten Filtrationsverlauf dann, wenn durch geringere Abtrennung feinsten Teilchen in der Sekundärschicht die feinere Primärschicht stärker belastet wird. Dieser Einfluss ist in Abbildung 5 dargestellt. Hier erkennt man bei „dünnen“ laufenden Dosagen, dass weniger feinstes Trubmaterial abgetrennt wird. Dieses gelangt leichter bis zur feinen Primärschicht und trägt zur deutlichen Erhöhung des Gesamtwiderstandes im Kuchen bei.



Abb. 5 Je mehr Filterhilfsmittel in der laufenden Dosage zugegeben werden, umso geringer steigt der spezifische Filterkuchenwiderstand

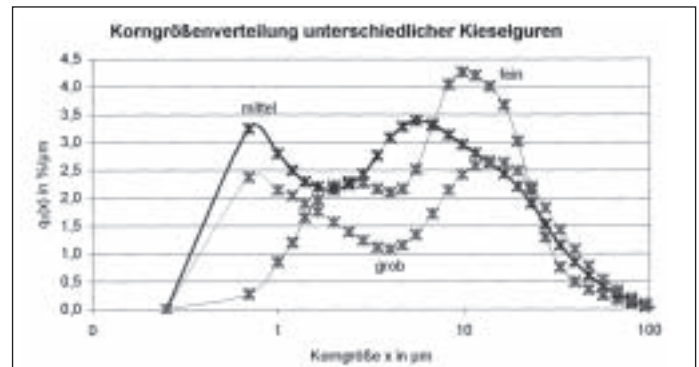


Abb. 6a Feine Kieselgur hat wenig Partikeln im feinsten Bereich < 10 µm und dominiert dafür den Bereich um 10 µm

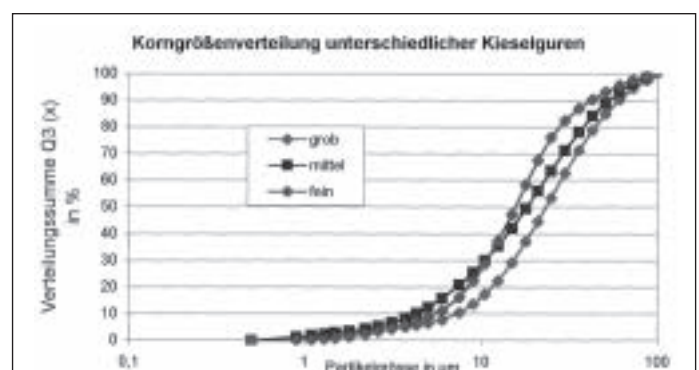


Abb. 6b Die Darstellung als Summenverteilung bestätigt die Aussage von Abb. 6a

Durch eine höhere Sekundärschicht gelangen weniger feine Trubstoffe zur Voranschwemmung und verringern den gesamten spezifischen Filterkuchenwiderstand  $\alpha$ . Da der gesamte Kuchenwiderstand und damit der Druckverlust gemäß Gleichung 7 auch von der Kuchenhöhe beeinflusst wird, bedeutet ein niedriger spezifischer Filterkuchenwiderstand nicht unbedingt den niedrigsten Gesamtwiderstand. Für praktische Filtrationsvorgänge kann aber ein Optimum aus Widerstand und Kuchenhöhe ermittelt werden.

### 4.3 Granulometrische Untersuchung der Kieselgur

Die Ergebnisse der Korngrößenanalyse der drei untersuchten Kieselguren zeigt Abbildung 6. Man beachte die logarithmische Darstellung. Die praxisübliche Unterteilung der Kieselguren (grob, mittel, fein) scheint nicht vollständig in ihrer Korngrößenverteilung begründet. Vielmehr erfolgt die Einteilung in der Brauereipraxis aufgrund der Permeabilität (5), wobei feine Kieselgur die geringste Permeabilität und grobe Kieselgur die größte Permeabilität aufweist. Die Gründe für die abweichenden Durchflusswiderstände sind in unterschiedlichen Kornformen und Kornoberflächen der Kieselguren zu suchen. Feine Kieselgur hat eine meist nadelförmige Struktur, zudem sind viele Bruchstücke vorhanden, die sich als Haufwerk unregelmäßig und mit geringer Porosität ausrichten. Das ergibt einen wenig durchlässigen Filterkuchen.

Im Gegensatz dazu weisen die untersuchten mittleren und groben Kieselguren oft zylindrische Partikeln auf, die einen durchlässigen Kuchen mit größerem Lückenvolumen aufbauen. Unterschiede zwischen mittlerer und grober Kieselgur liegen in ihrer Oberflächenbeschaffenheit. Die Aufnahmen einer Elektronenras-

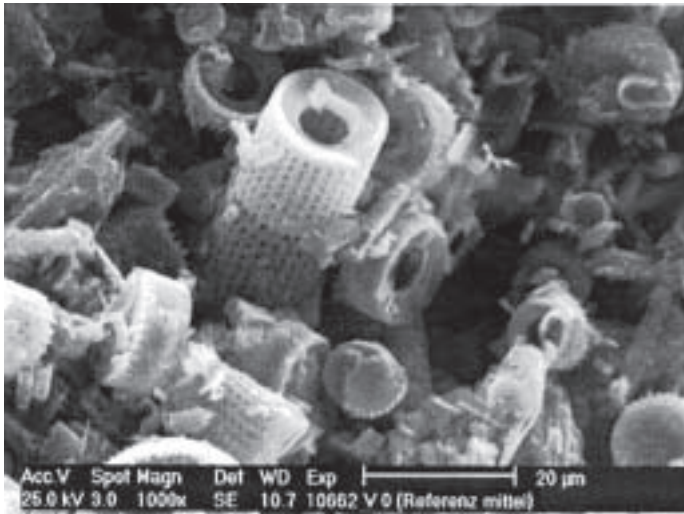


Abb. 7 Mittlere Kieselgur in 1000-facher Vergrößerung (offene Poren)

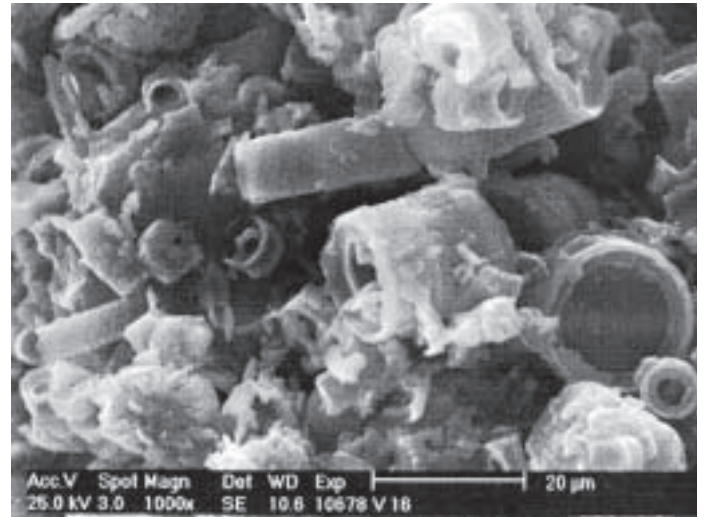


Abb. 8 Grobe Kieselgur in 1000-facher Vergrößerung (versiegelte Poren, glatte Oberflächen)

termikroskopie der beiden Sorten zeigen die Abbildungen 7 und 8. Bei der groben Kieselgur handelt es sich um eine fluxkalzinierte Kieselgur, deren Oberfläche durch das Flussmittel (meist Natriumkarbonat) mit einer dünnen Glasur überzogen ist, wodurch die innere und äußere Struktur deutlich verändert wurde. Diese Phänomene sind in früheren Arbeiten (7, 12) ausreichend beschrieben worden, für das Verständnis der Ergebnisse unserer Untersuchung sind sie von Bedeutung.

## 5 Zusammenfassung

In der vorliegenden Untersuchung konnten Abtrennungsmechanismen, die der Tiefenfiltration zuzuordnen sind, bei der praxisnahen Anschwemmfiltration von Bier nachgewiesen werden. Zu diesem Zwecke wurden in einer Versuchsanlage zwei in ihrer Zusammensetzung unterschiedliche Biere unter Verwendung verschiedener Kieselgursorten bei variierenden Versuchsbedingungen filtriert. Der Einfluss der Versuchsbedingungen auf den Filtrationsverlauf wurde gemessen. Zur Bewertung diente der spezifische Filterkuchenwiderstand  $\alpha$ , der nach Gleichung 9 aus dem gemessenen Druckverlust  $\Delta p$  und den variierenden Versuchsbedingungen berechnet wurde.

In den Versuchen konnte kein Einfluss der Anströmgeschwindigkeit auf die Abtrennungsmechanismen an der Filterkuchenoberfläche und im Kucheninneren nachgewiesen werden. Die Anströmgeschwindigkeit wurde zwischen  $9,03 \cdot 10^{-5}$  und  $4,52 \cdot 10^{-4}$  m/s variiert, dadurch blieben laminare Strömungsverhältnisse in der Kuchenstruktur gewahrt.

Die Filterhilfsmittelkonzentration, bzw. der Feststoffgehalt des Filterhilfsmittels  $c_{\text{FHM}}$  in der Trübe hat dagegen vielfältigen Einfluss auf die Abtrennung von Trubteilchen. In der Primärschicht werden in Abhängigkeit der Schichthöhe vor allem feine Trubpartikeln kontinuierlich abgetrennt. Hier greifen die Gesetzmäßigkeiten der Tiefenfiltration. Größere Trubpartikeln (z.B. Hefezellen) werden meist an der Kucheneintrittsseite abgetrennt. Für sie ist weniger die Menge des verwendeten Filterhilfsmittels, sondern vielmehr die Korngrößenzusammensetzung und damit die Porosität von Bedeutung.

In diesem Zusammenhang wurde festgestellt, dass bei dem untersuchten schlecht filtrierbaren Bier die Korngrößenverteilung stark

von der Korngrößenverteilung eines gut filtrierbaren Bieres abwich. Das schlecht filtrierbare Bier zeigt eine bimodale Verteilung der Partikeln mit einem deutlichen Maximum im Bereich von ca.  $0,8 \mu\text{m}$  (Abb. 1).

Es zeigte sich, dass Trubstoffe mit stark unterschiedlichen Korngrößen durch verschiedene Mechanismen bei der Kieselgurfiltration von Bier abgetrennt werden: Durch Oberflächen- und durch Tiefenfiltration. Dabei nehmen Korngrößenverteilung und Oberflächenbeschaffenheit der Kieselgur Einfluss. Dieser Problematik bleibt ein weiterer Teil der Arbeit vorbehalten. In den Untersuchungen werden Einflussfaktoren auf die Abtrennungsmechanismen von unterschiedlichen Biertrubstoffen durch Kieselgur näher beschrieben. Dabei wird mit Hilfe gezielter Veränderungen der Kieselgur der Einfluss unterschiedlicher Korngrößenverteilungen und Oberflächenbeschaffenheiten auf das Abtrennungsverhalten beschrieben.

## Dank

Die Autoren bedanken sich für die sehr gute und gewissenhafte Durchführung ihrer studentischen Arbeiten bei Herrn Dipl.-Ing. Stefan Mende und Herrn Dipl.-Ing. Jörg Halpap. Außerdem bedanken wir uns bei den Damen und Herren im Prüflabor für Partikelmesstechnik der TU Bergakademie Freiberg für die sorgfältigen granulometrischen Untersuchungen und bei den Damen im Labor der Freiburger Brauhaus AG für die ständige Hilfe und Unterstützung.

## 6 Summary

Husemann, K., Hebmüller, F., and Eßlinger, M.: Significance of deep filtration for kieselguhr filtration of beer (1) — Monatsschrift für Brauwissenschaft 55, No 3/4, 44 – 50, 2002

## BC 25 Beer

The mechanical processing technology differentiates filtration processes according to their working principles by surface and deep filtration (1). Cake filtration is the process which in the case of the filter cake takes over the job of the filter medium in the course of the process and is classified as surface filtration and as such the usual models (1, 2, 3, 4) have been

**Symbolverzeichnis**

K	Durchflusskoeffizient
$V_{F,A}$	flächenbezogenes Filtratvolumen
$V_{F,A}$	flächenbezogener Filtratvolumenstrom
c	Integrationskonstante
$d_{ST}$	Sauter-Durchmesser
h	Filterkuchenhöhe
n	Exponent zur Beschreibung der Filtrationsart
t	Zeit
$\Delta p$	Druckdifferenz zwischen Filtereinlauf und -auslauf
$\alpha$	spezifischer Filterkuchenwiderstand
$\beta_0$	Filterkuchenwiderstand der Primärschicht
$\epsilon$	äußere Volumenporosität
$\eta_l$	dynamische Viskosität des Fluides
$\varphi_{FHM}$	Feststoffvolumenanteil des Filterhilfsmittels

studied. However, the authors admit that in this case both working principles can be superimposed. The kieselguhr filtration of beer is considered to be deep filtration, although the proportion of deep filtration is only given little consideration in literature. Deep filtration generally does not play any role (5, 6, 7) when determining filtration processes. In a joint project of the Technical University Mining Academy Freiberg and the Freiburger Brauhaus AG the significance of deep filtration for kieselguhr filtration of beer has been examined more closely.

**Husemann, K., Hebmüller, F., et EBlinger, M.: Influence de la filtration en profondeur de la filtration sur kieselguhr de la bière —** Monatsschrift für Brauwissenschaft 55, No. 3/4, 44 – 50, 2002

**BC 25 Bière**

Le génie des procédés mécaniques différencie le procédé de filtration suivant le principe d'action en filtration superficielle ou filtration en profondeur (1). Dans la filtration sur gâteau, le gâteau occupe la fonction du support pendant le procédé. Ce type de filtration est classé dans la filtration superficielle et est considéré comme tel dans les modèles courants (1, 2, 3, 4). Les auteurs considèrent toutefois que les deux principes peuvent se superposer. La filtration sur kieselguhr de la bière est considérée comme filtration sur gâteau. La littérature porte peu d'attention sur la filtration en profondeur. Pour l'établissement de procédés de

filtration, la filtration en profondeur n'a souvent aucun rôle (5, 6, 7). Dans un projet commun avec l'Académie de montagne de Fribourg et le Brauhaus de Freiberg S.A., on a examiné de plus près l'influence de la filtration en profondeur de la filtration sur kieselguhr de la bière.

**7 Literatur**

1. Schubert, H., et al.: Mechanische Verfahrenstechnik, Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1990.
2. Alt, C.: Stand der Filtrationstheorie und seine Bedeutung für die praktische Anwendung, Aufbereitungstechnik 16, 177-18, 1980.
3. Zogg, M.: Einführung in die Mechanische Verfahrenstechnik, B.G. Teubner-Verlag, Stuttgart, 1993.
4. Stahl, W., et al.: Fest-Flüssig-Trennung, Skript zum gleichnamigen Kursus an der Universität Karlsruhe, 20. – 24. September 1993.
5. Autorenkollektiv: Beer Filtration, Stabilisation and Sterilisation, (EBC Manual of good practice), Fachverlag Hans Carl, Nürnberg, 1999.
6. Eßlinger, H.M.: Einflußfaktoren auf die Filtrierbarkeit von Bier, Dissertation TU München, 1985.
7. Lindemann, B.: Bewertung der Kieselgurfiltration von Bier, Dissertation TU Berlin, 1992.
8. Kunze, W.: Technologie Brauer und Mälzer, Verlag der VLB, Berlin, 1998.
9. Persönliche Mitschriften FTS 2000, Filtrationstechnisches Symposium an der TU München, 23. – 24. Oktober 2000.
10. Mende, S.: Untersuchung verschiedener Kieselguren zur Verwendung bei der Anschwemmfiltration, Diplomarbeit TU Bergakademie Freiberg, 1999.
11. Falbe, J., und Regitz, M.: Römpp Chemie Lexikon, 9. korr. und verb. Auflage.
12. Fischer, W., Dülsen, R., und Schick, T.: Die Kieselgur – wichtigstes Filterhilfsmittel der Anschwemmfiltration, Brauwelt 137, 544 – 548, 1997.
13. Zogg, M.: Filtration mit kompressiblen Filterkuchen, Swiss Chem., S. 27 – 34, 1979.
14. Drost, M.A., und Windhab, E.J.: Nicht-newton'sches Fließverhalten von Bier beim Durchströmen von porösen Medien als mögliche Erklärung für einen plötzlichen Anstieg der Druckdifferenz bei der Kieselgurfiltration Monatsschrift für Brauwissenschaft 54, 44 – 47, 2001.
15. Tittel, R.: Die Anschwemmfiltration als ein Prozeß zur Klärung von Flüssigkeiten, Dissertation TU Dresden, 1987.
16. Narziß, L.: Abriß der Bierbrauerei, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 1986.
17. Heyse, K.-U.: Handbuch der Brauerei-Praxis, Verlag Hans Carl, Nürnberg, 1989.
18. Halpap, J.: Untersuchung von Filtrationsvorgängen und Filterkuchen aus der Kieselgurfiltration von Bier, Diplomarbeit TU Bergakademie Freiberg, 2000.

(Manuskripteingang: 24. 1. 2002)