

M. A. Drost und E. J. Windhab

Nicht-newton'sches Fließverhalten von Bier beim Durchströmen von porösen Medien als mögliche Erklärung für einen plötzlichen Anstieg der Druckdifferenz bei der Kieselgurfiltration

Obwohl Bier in der Regel als Newton'sches Fluid einzustufen ist, verhält es sich unter den besonderen Strömungsbedingungen in einem porösen Medium ausgesprochen untypisch für ein Newton'sches Fluid. Kolloidal gelöste Bierbestandteile sind beim Durchströmen von porösen Medien mechanischer Belastung ausgesetzt. Ab einer bestimmten Durchströmungsgeschwindigkeit kann daraus ein sprunghafter Anstieg des Durchströmungswiderstandes resultieren, wobei dieser Anstieg mit der Deformation von gelösten Bierbestandteilen gekoppelt ist. Die Resultate der vorliegenden Untersuchung legen den Schluss nahe, dass die Filtrierbarkeit von Bier neben der Scherviskosität auch erheblich von dessen Dehnviskosität beeinflusst wird.

BC 24 Abfüllung

(Deskriptoren: Kieselgurfiltration, Druckanstieg, Rheologie, Modellsystem, nicht-newton'sches Fließverhalten.

Descriptors: Main stream beer filtration, kieselguhr, pressure-rise, rheology, non-newtonian flow-behaviour).

Es ist verschiedentlich der Fall, dass der Druck in einem Kieselgurfilter bei der Bierfiltration rasch ansteigt, wodurch die zu filtrierende Menge pro Filtrationszyklus nicht erreicht werden kann, da dem Druckanstieg apparative Grenzen gesetzt sind.

In der Dissertation von Drost (1999) wurde belegt, dass die Bestandteile in Bier beim Durchströmen einer Kieselgurpackung mechanisch belastet werden, wodurch maßgeblich Veränderungen von makromolekularen und partikulären Strukturen und daraus Veränderungen des Durchströmungsverhaltens resultieren können (siehe Abb. 1).

Um diese Zusammenhänge zu überprüfen, wurden die rheologischen Eigenschaften von Bier beim Durchströmen poröser Medien untersucht. Um die Strömung bzw. die mechanische Belastung in einem Kieselgurfilterkuchen zu simulieren erfolgte das Durchströmen feinkörniger Glaskugelpackungen (Glaskugeldurchmesser 400 µm, 730 µm und 1000 µm) mit filtriertem Bier bei gleichzeitiger Erfassung der Druckdifferenz über der Glaskugelpackung bei verschiedenen Fließgeschwindigkeiten.

Autoren: Dr. sc. techn. Martyn A. Drost, Feldschlösschen Produktion AG, Brauerei Feldschlösschen, CH-4310 Rheinfelden und Prof. Dr.-Ing. Erich J. Windhab, Laboratorium für Lebensmittelverfahrenstechnik, Institut für Lebensmittelwissenschaft der Eigenössischen Technischen Hochschule (ETH) Zürich, CH-8092 Zürich

Die Verwendung von filtriertem Bier hatte den Vorteil, dass das Durchströmungsverhalten in den Glaskugelpackungen nicht durch Verstopfungseffekte beeinträchtigt werden konnte.

Bei der Beschreibung des Durchströmungswiderstandes in porösen Medien ist es gebräuchlich, die dimensionslose Widerstandszahl Λ als Funktion der dimensionslosen Reynolds-Zahl (Re) darzustellen. Die Berechnung von Λ und Re kann für Glaskugelpackungen mit folgenden Gleichungen erfolgen:

$$\Lambda = \frac{\Delta p \cdot \bar{d}_p \cdot \varepsilon^3}{\bar{v} \cdot \eta \cdot L \cdot (1 - \varepsilon)^2} \quad [1]$$

$$Re = \frac{\bar{v} \cdot \bar{d}_p \cdot \rho}{\eta \cdot (1 - \varepsilon)} \quad [2]$$

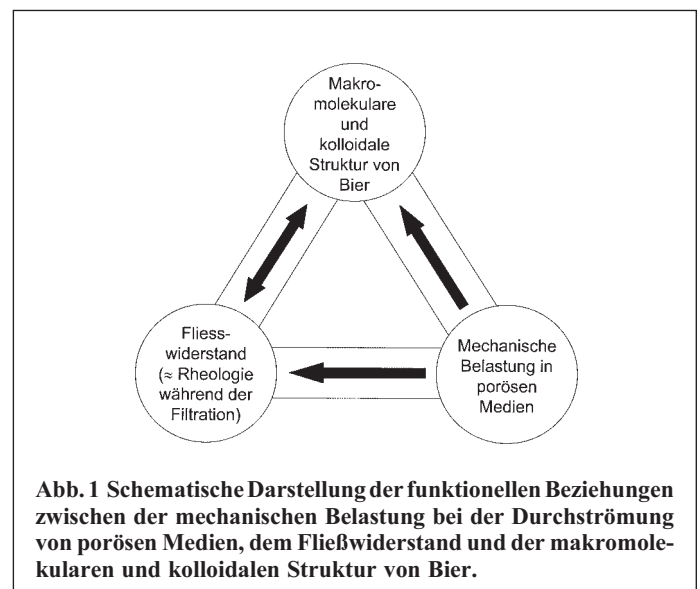
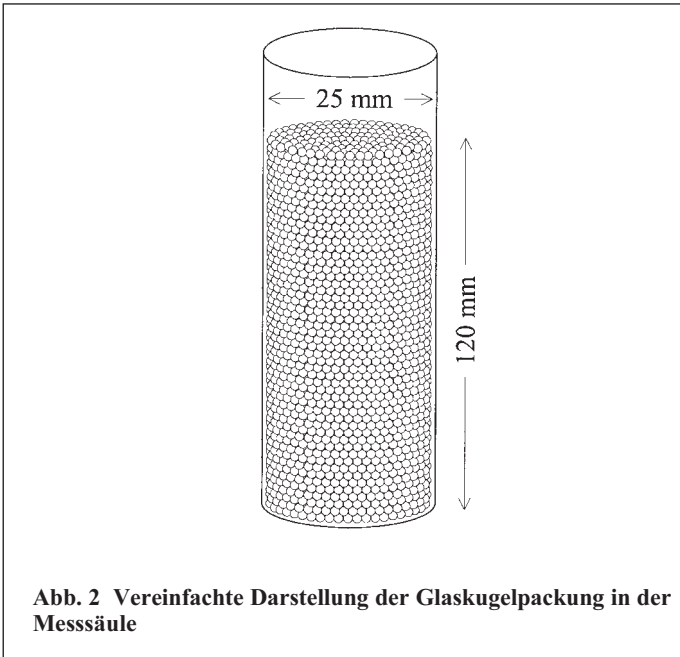


Abb. 1 Schematische Darstellung der funktionellen Beziehungen zwischen der mechanischen Belastung bei der Durchströmung von porösen Medien, dem Fließwiderstand und der makromolekularen und kolloidalen Struktur von Bier.



Dabei kennzeichnet Δp die Druckdifferenz über der Packung, \bar{d}_p den mittleren Glaskugeldurchmesser, ε die Porosität, η die Scherviskosität der Flüssigkeit, L die Länge der Packung und \bar{v} die mittlere Fließgeschwindigkeit bezogen auf Leerrohrquerschnitt. Die zylindrische „Messsäule“ hatte eine Länge von $L = 120$ mm und einen Durchmesser von 25 mm (vgl. Abb. 2).

Die Kennzahl Λ charakterisiert im vorliegenden Fall den Durchströmungswiderstand und Re die Strömungsgeschwindigkeit. Die Funktion $\Lambda = f(Re)$ kann damit indirekt zur Charakterisierung des Fließverhaltens einer Flüssigkeit in Abhängigkeit der Fluiddeformation in einem porösen Medium betrachtet werden. Für Newton'sche Fluide, wie z.B. Wasser, ergibt sich im $\Lambda(Re)$ -Diagramm unabhängig von der Viskosität und unabhängig vom mittleren Durchmesser \bar{d}_p der gepackten Glaskugeln immer der gleiche charakteristische Verlauf (vgl. Abb. 3), für welchen im Bereich unterhalb von $Re \approx 200$ die empirische Beziehung

$$\Lambda = 182 + 1.75 Re \quad [3]$$

nach Ergun (Durst 1987) gültig ist.

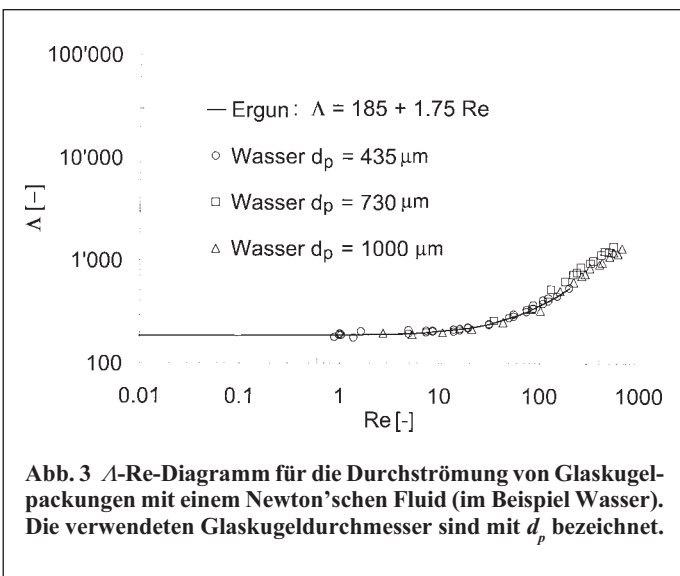
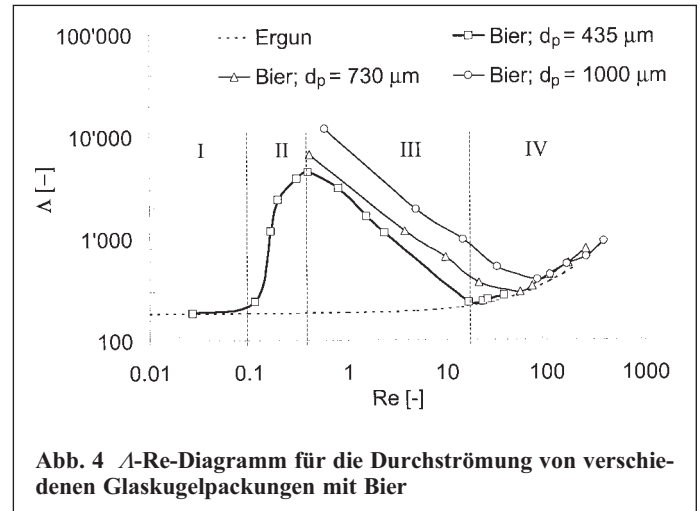
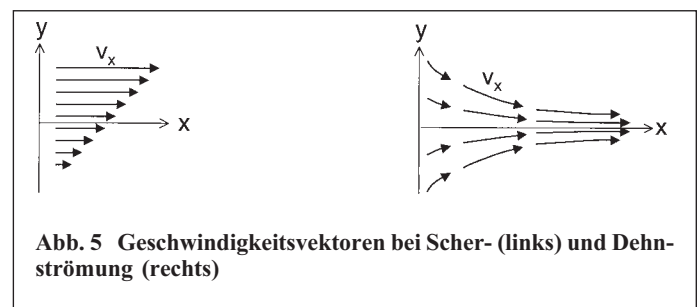


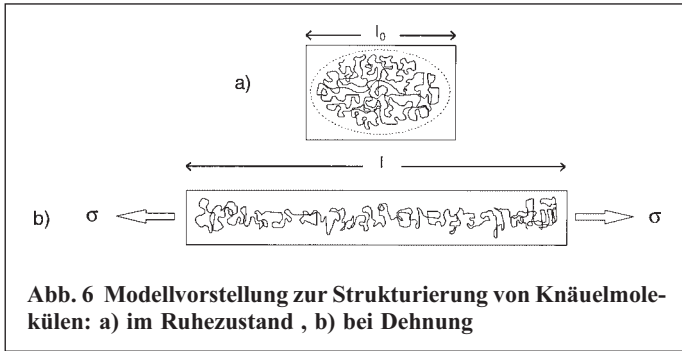
Abbildung 4 zeigt den Verlauf von Λ über Re in verschiedenen Glaskugelpackungen (435 μm -, 730 μm - und 1000 μm -Glaskugeldurchmesser) für filtriertes Bier im Vergleich mit einem Newton'schen Fluid.



Da die Λ -Kurve von Bier deutlich von der Newton'schen Charakteristik abweicht, kann bei Bier von einem für Newton'sche Fluide ausgeprägt untypischen Verhalten unter den gegebenen Bedingungen gesprochen werden. Dabei ist auffallend, dass das die Widerstandszahl Λ von Bier den bis zu 24-fachen bis 50-fachen Wert (bei 435 bzw. 1000 μm -Glaskugeln) gegenüber dem Λ von Wasser erreicht. Als Ursache dafür kann das Auftreten von Dehnströmungen in den Poren der Glaskugelpackung geltend gemacht werden. Dehnströmungen treten z.B. bei Querschnittsänderungen von Rohrleitungen sowie bei Poreneintrittsströmungen wie z.B. in porösen Medien bzw. Packungen sowie in Pumpen und Ventilen auf. Die Abbildung 5 zeigt eine Dehnströmung im Vergleich mit einer Scherströmung.



In einer Dehnströmung können makromolekulare/disperse Bierbestandteile Zugspannungen in Strömungsrichtung ausgesetzt sein, da diese in Strömungsrichtung beschleunigt werden. Das Auftreten von Dehn- bzw. Zugspannungen in Strömungen durch poröse Medien kann auch anhand numerischer Simulation von Kugelhauendurchströmungen quantifiziert werden (Debus 1997, Hövekamp 1998). Den in derartigen „Strömungsverengungen“ auftretenden Dehnströmungen sind in allen Fällen Scherströmungsanteile überlagert, so dass von gemischten Scher-Dehnströmungen gesprochen werden kann. Es ist bekannt, dass Knäuelmoleküle in Scher-Dehnströmungen deformiert und bei hinreichen-



der Dehnung auch aufgefaltet werden können. Abbildung 6 zeigt eine derartige Modellvorstellung zum Orientierungsverhalten von Knäuelmolekülen in Dehnströmungen (Pahl et al. 1991).

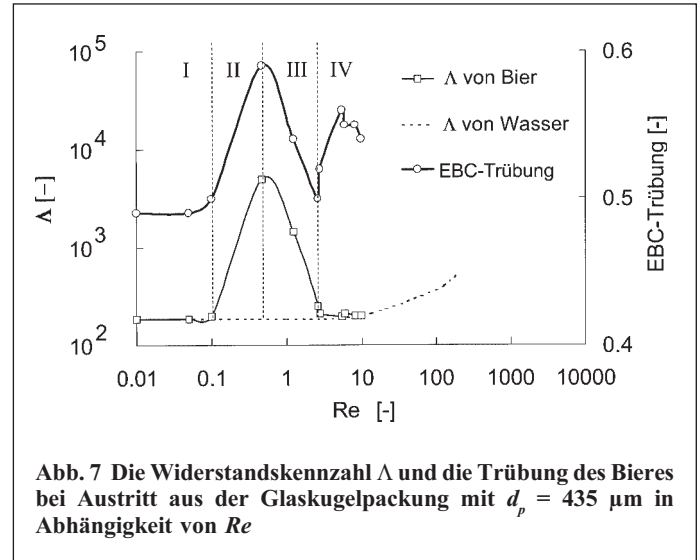
Für den Anstieg von Λ in Abb. 4 (und Abb. 7) werden reibungsbedingte Energieverluste bei der Auffaltung bzw. der viskosen Dehn deformation von Knäuelmolekülen vermutet. Dabei wird allgemein angenommen, dass während der Auffaltung eines Knäuelmoleküles verschiedene Abschnitte der Molekülkette aneinander reiben. Aus rheologischer Sicht kann aufgrund des vorliegenden Dehnströmungscharakters von einer Erhöhung der effektiven Dehnviskosität von Bier gesprochen werden. Die Dehnviskosität η_D ist eine Materialfunktion, welche das viskose Verhalten einer Flüssigkeit bei Dehnbeanspruchung beschreibt. Die Dehnviskosität kann eine Funktion der Dehnrate $\dot{\epsilon}$ sein. Die uniaxiale Zugspannung σ_{xx} errechnet sich für eine uniaxiale Dehnströmung in Analogie zum Newton'schen Schubspannungsansatz für die Scherströmung aus der Dehnviskosität η_D und der Dehnrate $\dot{\epsilon}$:

$$\sigma = \eta_D \cdot \dot{\epsilon} \quad [4]$$

Die Resultate dieser Untersuchung legen die Vermutung nahe, dass die Filtrierbarkeit von Bier neben der Scherviskosität auch erheblich von dessen Dehnviskosität beeinflusst wird. Obwohl bereits eine erhöhte Scherviskosität von Bier häufig als Indikation von filtrationsverschlechternden Stoffen in Bier dienen kann, lässt sich die Filtrierbarkeit von Bier bzw. das Auftreten von Filtrationsproblemen nämlich letztendlich nicht alleine mit der Scherviskosität von Würze bzw. Bier erklären, da ein plötzlicher Anstieg des Druckes in einem Filter nicht in Einklang mit dem Newton'schen (= schergeschwindigkeitsunabhängigen) Scherviskositätsverhalten von Bier gebracht werden kann. Dennoch wurde in keiner der Untersuchungen zur Filtrierbarkeit von Bier in den vergangenen Jahrzehnten der Einfluss der Dehnviskosität auf das Filtrationsverhalten bewusst näher betrachtet.

Zweckmäßige Methoden zur Vorhersage der Filtrierbarkeit stellen die Filtrationstests nach Raible und Esser dar (Lindemann 1992). Es ist somit denkbar, dass der typische Verlauf der Filtrationstests nach Raible und nach Esser zu einem beachtlichen Teil von der Dehnviskosität des unfiltrierten Bieres und den dehnströmungsinduzierten strukturellen Änderungen der Bierinhaltsstoffe abhängt. Die Poren eines Membranfilters und eines Kieselgurfilterkuchens besitzen die zur Erzeugung von Dehnströmungen charakteristisch verengenden Geometrien.

Parallel zum beschriebenen Anstieg der Druckdifferenz über der Glaskugelpackung kam es beim Durchströmen der Glaskugelpackung zu einer Bildung von Aggregaten in Bier, welche mittels dynamischer Lichtstreuungsmessungen (auch Photonenkorrelationspektroskopie genannt) anschaulich quantitativ nachgewiesen werden konnten, sich jedoch auch anhand von EBC-Trü-



bungsmessungen feststellen ließen. Abbildung 7 zeigt den parallelen Verlauf der EBC-Trübung und Λ als Funktion von Re .

Die Parallelität zwischen dem Durchströmungswiderstand und der streulichttechnisch aufgezeigten, strömungsinduzierten Mikro-Aggregation erhärteten die Vermutung, dass der Anstieg des Durchströmungswiderstandes an die Deformation von Bierbestandteilen gekoppelt ist. Bei einer Auffaltung eines Knäuelmoleküles nimmt aufgrund der vergrößerten räumlichen Ausdehnung die Wahrscheinlichkeit der Berührung mit benachbarten Molekülen zu. Zusätzlich wird durch die verminderte Abschirmung von reaktiven Seitengruppen im aufgefalteten Zustand die intermolekulare Reaktivität des Moleküles erhöht. Durch die beiden genannten Effekte können benachbarte deformierte Teilchen bevorzugt miteinander aggregieren. Abbildung 7 zeigt, dass je größer der Anteil an aufgefalteten Knäuelstrukturen bzw. an dadurch exponierten reaktiven Seitengruppen ist, desto stärker ist sowohl die Aggregation als auch der Durchströmungswiderstand (im Bereich I-III). Im Bereich IV wird die Trübung in Bier nicht mehr in laminaren Scher-Dehnströmungen, sondern durch die mechanische Belastung in turbulenten Strömungszonen innerhalb der Glaskugelpackung verursacht, wodurch die Parallelität zwischen EBC-Trübung und Λ im Bereich IV verloren geht. Da sämtliche gezeigten Versuche mit filtriertem Bier durchgeführt wurden, konnte auch nachgewiesen werden, dass das Filtrationsverhalten von Bier in einem Kieselgurfilterkuchen stärker als bisher bekannt von der „kolloidalen Fraktion“ im Bier bzw. den vom Auge nicht als Trübung wahrnehmbaren dispersen Teilchen in Bier beeinflusst wird. Dies ist insofern in Übereinstimmung mit der Tatsache, dass die Filtrierbarkeit von Bier sich nur sehr bedingt allein durch den Anteil, die Größenverteilung oder die Zusammensetzung der Trubstoffe im unfiltrierten Bier erklären lässt (Narziß und Eßlinger 1987). In der Arbeit von Drost (1999) konnte bei Untersuchungen zur funktionellen Beziehung zwischen der kolloidalen Struktur und der Filtrierbarkeit von Bier gezeigt werden, welchen Einfluss die Molekülgrößen der Kolloide auf die Filtrierbarkeit haben können.

Zusammenfassung

Anhand von Untersuchungen zum Strömungsverhalten von Bier im Innern von Glaskugelpackungen wurde festgestellt, dass ein sprunghafter Anstieg des Durchströmungswiderstandes mit der Deformation bzw. der Auffaltung von kolloidal gelösten Bierbe-

standteilen gekoppelt ist. Das beobachtete Phänomen zeigt große Ähnlichkeit zum plötzlichen Anstieg der Druckdifferenz bei der Kieselgurfiltration schlecht filtrierbarer Biere. Die Resultate dieser Untersuchung legen den Schluss nahe, dass die Filtrierbarkeit von Bier neben der Scherviskosität maßgeblich von der Dehnviskosität und gekoppelten strömungsinduzierten Mikrostrukturierungs-Vorgängen der kolloidalen Fraktion beeinflusst wird.

Dank

Dieses Forschungsprojekt wurde unterstützt von der Stiftung für wissenschaftliche Forschung des Schweizerischen Bierbrauervereins (SBV) und der Kommission für Technologie und Innovation (KTI) des Bundes der Schweiz.

Summary

Drost, M. A., and Windhab, E.J.: Non-Newton flow behaviour of beer — Monatsschrift für Brauwissenschaft 54, Nr. 3/4, 44 – 47, 2001

BC 24 Filling

Although beer is considered being a Newtonian fluid, it can be shown that mechanical stress in the laminar flow through porous media (packed beds of superfine glass spheres were used to simulate the porous structure of kieselguhr) can evoke a distinct non-Newtonian flow behaviour: This phenomenon is coupled with partly irreversible changes of the colloidal structure of beer and a strong increase of flow resistance. These microstructurisation processes and the increase of flow resistance are both caused by the elongation of colloidal beer compounds through elongational forces in the flow within the pores. The results of this study lead to the conclusion that filterability of beer is dependent not only on shear viscosity but decisively on elongational viscosity.

Drost, M. A., et Windhab, E.J.: Comportement d'écoulement non-newtonien de la bière — Monatsschrift für Brauwissenschaft 54, Nr. 3/4, 44 – 47, 2001

BC 24 Emballages

A partir d'essais pour évaluer le comportement de l'écoulement de la bière à l'intérieur de collones de billes de verre fines on a observé un forte

augmentation de la résistance de l'écoulement. Celle-ci est liée à la déformation, de composés colloïdaux solubles de la bière. Le phénomène observé montre une forte ressemblance avec l'augmentation rapide de la différence de pression pour la filtration sur kieselguhr pour la bière de mauvaise filtrabilité. Les résultats de ces essais rejoignent la conclusion suivante: la filtrabilité de la bière est influencée, à côté de la viscosité de cisaillement, par la viscosité élastique relié par des phénomènes de microstructures induits par l'écoulement de la fraction colloïdale.

Literatur

Debus, K.: Numerische Untersuchung der Kugelhaufendurchströmung – Ansätze zur Berechnung strömungsbedingter Deformation verformbarer Körper, Diss. TU München, Fakultät Brauwesen, Lebensmitteltechnologie und Milchwissenschaften, 1997.

Drost, M.: Methoden zur Untersuchung der Auswirkungen mechanischer Belastung auf kolloidale Struktur, Rheologie und Filtrationsverhalten von Bier, Diss. ETH Nr. 13218, Zürich, 1999.

Durst, F., Haas, R., und Interthal, W.: The nature of flows through porous media. J. Non-Newtonian Fluid. Mech. **22**, 169 – 189, 1987.

Hövekamp, T.: Characterization of Structure and Flow through Compressible Porous Media. Bale Meeting: Chemical and Physical Process Development and Process Saffey/Thermal Analysis in Food Science. 26 – 28 May 1998. Novartis AG, Basel, 1998.

Lindemann, B.: Bewertung der Kieselgurfiltration von Bier. Diss D83/FB13 Nr. 317, TU Berlin, 1992.

Narziß, L., und Eßlinger, H.M.: Einflussfaktoren auf die Filtrierbarkeit des Bieres – Teil 4: Ergebnisse von Filtrationen im Klein- und Grossmassstab, Mschr. f. Brauwiss. **40**, 169 – 172, 1987.

Pahl, M., Gleissle, W., und Laun, H.-M.: Praktische Rheologie der Kunststoffe und Elastomere (Ed.: Kunststofftechnik, VDI-Gesellschaft) Düsseldorf, VDI-Verlag, 327-329, 1991.

(Manuskripteingang: 30. 9. 2000)



FACHVERLAG HANS CARL
NÜRNBERG
FACHBUCHHANDLUNG

Postfach 99 01 53 90268 Nürnberg

Fax: (0911) 9 52 85-61

E-Mail: fachbuch@hanscarl.com

Besuchen Sie unser gesamtes

Buchangebot im Internet: www.hanscarl.com

FARBATLAS UND HANDBUCH DER GETRÄNKEBIOLOGIE

Teil 2: Fruchtsaft- und Limonadenbetriebe, Wasser/Betriebs-
hygiene, Milch- und Molkereiprodukte, Begleitorganismen
Von Prof. Dr. Werner Back

252 Seiten, 57 ganzseitige, zum Teil vierfarb. Tafeln, zahlreiche Schemata u.
Tabellen, Format 24,5 x 34 cm, Pappeband m Schutzumschlag. DM 278,-
Bestell-Nr. 0760 Ex.

Teil 1 Kultivierung/Methoden Brauerei/ Winzerei DM 248,-
Bestell-Nr. 0704 Ex
(Preise zuzüglich Versandkosten.)

FAX-BESTELLUNG: 0911 / 9 52 85-61

_____	_____
Name	Kunden-Nr.
_____	_____
Firma	UsSt.-Id.-Nr.
_____	_____
Straße	PLZ/Ort
_____	_____
Datum	Stempel/Unterschrift