



Bild 7. Das Auffinden von abgebrochenen Rüben und zu tiefen Köpfen, wie es hier im Bild an Verlustrüben ersichtlich ist, ist Folge falscher Maschineneinstellung



Bild 8. Überblasverluste, eine Verlustquelle, die nicht nur beim Rübenblattköpfen, sondern besonders auch bei der Futterernte häufig auftritt

— Futter (Mais) mindestens bei 2 dt/ha \triangleq 9,00 M/ha.

Bezogen auf eine Betriebsfläche von 235 ha für Kartoffeln, 584 ha für Zuckerrüben und 301 ha für Futter, ergibt sich ein Gesamtnutzen von mindestens 39534,00 M.

Damit werden die Kosten für die Verlustprüfung, die etwa insgesamt 4000,00 M betragen, mehrfach realisiert.

Gleichzeitig — und darin liegt der besondere Wert der Messungen, der finanziell hier nicht ausgewiesen wurde — werden durch die ständige Maschinenüberwachung das Erntetempo erhöht und die Qualität des Erntegutes (Kartoffeln) verbessert. Es sinken neben den Verlusten auch die Verfahrenskosten. Diese

Kostensenkung wird mindestens immer 8,00 M je Hektar betragen.

Zu den weiteren Aufgaben der Forschung und Entwicklung wird gehören, daß entsprechend Bodenart (Siebfähigkeit), Witterung, Ertrag und anderen Faktoren analog dem Tabellenschieber für Qualitätsprüfer im Mähdrusch den Leistungs-, Verlust- und Qualitätsprüfern auch in der Futter- und Hackfrüchtereinte exakte Normative vorgegeben werden. Wie wichtig das ist, zeigen die Spannen der bei Untersuchungen in den letzten drei Jahren ermittelten Verluste. Sie schwanken bei Kartoffeln von 4 bis 12 dt/ha bei etwa gleichem Ertragsniveau. Bei Zuckerrüben variieren sie sogar zwischen 8 bis über 60 dt/ha, ebenfalls bei etwa gleichem Ertragsniveau.

Diese Kontrollen haben die Verluste auf den unteren Wert gesenkt und zeigen auch damit ihre besondere Notwendigkeit.

Literatur

- [1] Vogel, G.; Fröhlich, H.: Produktionskontrolle als Bestandteil der WAO — Voraussetzung für hohe und stabile Erträge in der Gemüseproduktion. iga-Ratgeber, Erfurt (1974).
- [2] Technologische Musterkarten der Saatgutproduktion. VVB Saat- und Pflanzgut Quedlinburg, 1969.
- [3] Feiffer, P.: Bedienanleitung zur Gütesicherung im Mähdrusch, 3. Auflage. Quedlinburg/Leipzig 1978.
- [4] Feiffer, P., u. a.: Meßbesteck zur Gütesicherung im Mähdrusch. Quedlinburg/Leipzig 1978.
- [5] Feiffer, P., u. a.: Dokumentarischer Nachweis Erntetempo und Gütesicherung. Quedlinburg/Leipzig 1978.

A 2322

Zum Fließverhalten technischer Zuckerlösungen

Dr.-Ing. M. Türk, KDT, Forschungszentrum für Mechanisierung der Landwirtschaft Schlieben/Bornim der AdL der DDR

Verwendete Formelzeichen

A	—	Konstante
A ₀	—	Konstante*
A ₁	—	Konstante
B	—	Konstante
B ₁	—	Konstante
d	mm	Rohrinnendurchmesser
m _w	kg/kg	Wasseranteil
Δp/Δl	Pa/m	spezifischer Druckverlust
Re	—	Reynoldszahl
Re _{krit.}	—	kritische Reynoldszahl
T	K	absolute Temperatur der Förderflüssigkeit
Tr	%	Trockensubstanzgehalt, Konzentration
v	m/s	mittlere Strömungsgeschwindigkeit
V̇	m ³ /h	Volumendurchsatz
γ̇	1/s	Newtonsche Schergeschwindigkeit
ϑ	°C	Temperatur der Förderflüssigkeit
λ	—	Rohrreibungszahl
ρ	kg/m ³	Dichte des Fördermediums
ρ ₂₀	kg/m ³	Dichte des Fördermediums bei ϑ = 20 °C
η	mPa · s; Pa · s	dynamische Viskosität
τ _w	Pa	Wandschubspannung

1. Problemstellung

Zuckerrübenmelasse findet auch in der industriemäßigen Tierproduktion verstärkt Anwendung, soweit es volkswirtschaftlich zweckmäßig ist. Dabei werden vor allem die spezifischen Eigenschaften als Preßhilfsmittel bei der Pelletierung genutzt, andererseits hat Melasse infolge des hohen Zucker- (≈ 50 %) und Mineralstoffgehalts einen hohen Futterwert und dient als Ausgleich des Eiweiß-Stärke-Verhältnisses im Futter. Laut Definition [1] ist Zuckerrübenmelasse „die in den Zuckerfabriken bei der Kristallisation anfallende Mutterlauge, aus der ohne vorherige chemische und physikalische Reinigung kein Zucker mehr auskristallisiert“ und wird in drei verschiedenen Qualitätssorten mit Tr = 70...75 % abgegeben. Es sind jedoch auch höhere Konzentrationen möglich (Tr = 80...88 %).

Zur Berechnung und maschinentechnischen Gestaltung der technischen Grundprozesse in der verarbeitenden Industrie (Lagern, Fördern, Mischen, Dosieren, Verteilen) ist die Kenntnis der Stoff-, insbesondere aber der Fließeigenschaften, erforderlich.

Die Viskosität η und die Dichte ρ technischer Zuckerlösungen hängen wesentlich von der Konzentration Tr und der Temperatur ϑ ab [2

bis 8]. Das Dichte-Konzentrations-Verhältnis hat dabei eine besondere Bedeutung, da die indirekte Konzentrationsbestimmung zumeist über die experimentell einfacher zu ermittelnde Dichte erfolgt. Dabei ist allerdings auch der Temperatureinfluß zu berücksichtigen.

Ein komplexer Ausdruck für die dynamische Viskosität η in Abhängigkeit von Tr und ϑ ist bislang nicht bekannt. Um die Viskositäts- und Dichteberechnung vor allem für die Projektierung zu vereinfachen, wurden auf der Grundlage bekannter Literaturdaten und eigener Messungen Abhängigkeiten ermittelt, die nachfolgend dargestellt und diskutiert werden sollen.

Diese Berechnungshinweise für Zuckerrübenmelasse, konzentrierte und verdünnte Zuckerlösungen werden für Projektierungsaufgaben in der Zuckerindustrie, aber auch im landtechnischen Anlagenbau nutzbar sein.

2. Allgemeine Grundlagen der Rohrströmung

Die Förderung von Melasse mit Pumpen in Rohrleitungen ist nur bei einer gleichzeitigen Erwärmung realisierbar. Die Temperatur des Fördermediums hat einen bedeutenden Einfluß. Grundsätzlich können alle technischen Zuk-

kerlösungen als Newtonsche Flüssigkeiten angesehen werden [2, 3, 4], d. h. die dynamische Viskosität η charakterisiert hinreichend das Reibungsverhalten beim Transport in Rohrleitungen. Zur Bemessung von Pumpen und Rohrleitungen ist der statische Druckverlust infolge Flüssigkeitsreibung bei stationärer Rohrströmung rechnerisch zu bestimmen. Das Newtonsche Reibungsgesetz

$$\tau = \eta \gamma \quad (1)$$

führt mit der Wandschubspannung

$$\tau_w = \frac{\Delta p d}{\Delta l 4} \quad (2)$$

und der Schergeschwindigkeit an der Rohrwand

$$\dot{\gamma} = \frac{8 v}{d} \quad (3)$$

zur bekannten Hagen-Poiseuilleschen Gleichung für laminare Rohrströmung

$$\frac{\Delta p}{\Delta l} = \frac{32 v}{d^2} \eta \quad (4)$$

Das Widerstandsgesetz

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (5)$$

entspricht Gl. (4), wenn die Rohrreibungszahl

$$\lambda = \frac{\Delta p}{\Delta l} \frac{2 d}{v^2 \rho} \quad (6)$$

und die Reynoldszahl

$$Re = \frac{v d \rho}{\eta} \quad (7)$$

als dimensionslose Ähnlichkeitskennzahlen eingesetzt werden. Damit ist auch die Kennzeichnung der turbulenten Rohrströmung möglich, die bei ungestörter Strömung bei $Re_{krit} = 2\,300$ beginnt. Das Widerstandsgesetz im hydraulisch glatten Bereich lautet dann wie folgt (Prantl-Gleichung):

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log \left(\frac{Re \sqrt{\lambda}}{2,51} \right) \quad (8)$$

oder näherungsweise

$$\lambda = \frac{0,3086}{\left(\log \frac{Re}{7} \right)^2} \quad (9)$$

Die dynamische Viskosität und die Dichte der Förderflüssigkeit gilt es also entsprechend genau zu bestimmen und zur Ermittlung von Druckverlusten in die genannten Berechnungsgleichungen einzusetzen.

3. Berechnung der Viskosität

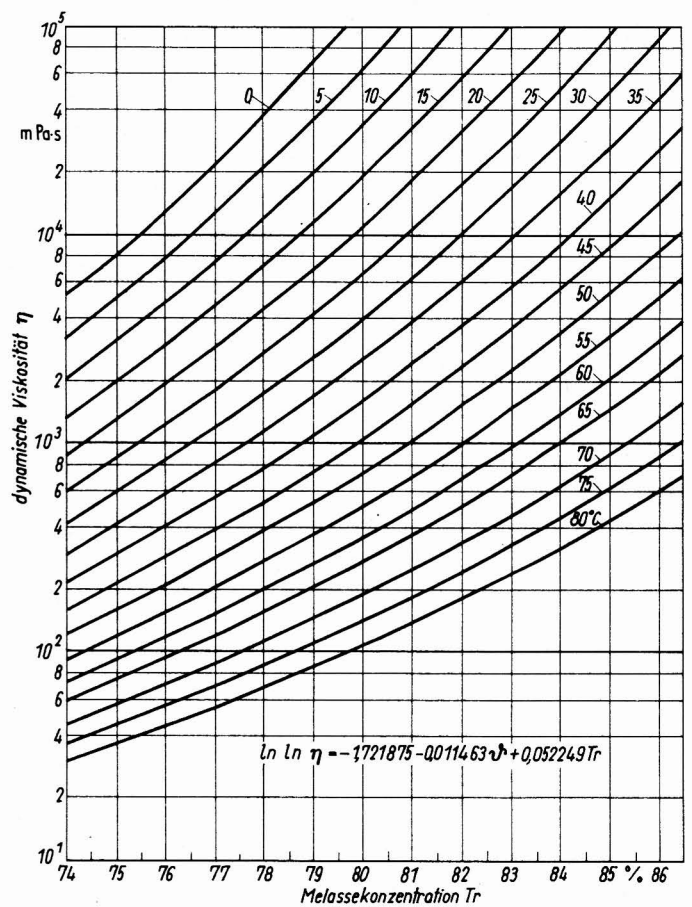
Zur Beschreibung des Viskositäts-Temperatur-Verhaltens sind verschiedene Modellbeziehungen bekannt. Für technische Zuckerlösungen findet die Formel von Frenkel [7, 8] am häufigsten Anwendung:

$$\eta = A e^{B/T} \quad (10)$$

Dabei sind A und B Konstanten und T ist die absolute Temperatur. Gl. (10) kennzeichnet in guter Näherung den Temperatureinfluss als lineare Funktion $\ln \eta = f(1/T)$.

Da im vorliegenden Beitrag jedoch die Aufgabe gestellt ist, die Abhängigkeiten $\eta = f(\vartheta)$ und

Bild 1
Konzentrations- und
Temperaturabhängigkeit
der Viskosität von Zuk-
kerrübenmelasse



$\eta = f(Tr)$ durch eine komplexe Funktion $\eta = f(\vartheta, Tr)$ auszudrücken, wurde von folgenden linearen Modellen ausgegangen:

$$\ln \ln \eta = f(\vartheta) \quad (11)$$

$$\ln \ln \eta = f(Tr) \quad (12)$$

Als Berechnungsgleichung ergibt sich:

$$\ln \ln \eta = A_0 + A_1 \vartheta + B_1 Tr \quad (13)$$

Ist $Tr = \text{konst.}$, so erhält man eine lineare Abhängigkeit der Viskosität von der Temperatur der Form

$$\ln \ln \eta = (\text{Konst.}) + A_1 \vartheta$$

mit der Konstanten $(B_1 Tr + A_0)$, und ist $\vartheta = \text{konst.}$, so ist Gl. (13) ebenfalls eine lineare Funktion mit der Konstanten $(A_0 + A_1 \vartheta)$. Die Gültigkeit von Gl. (13) konnte für Zuckerrübenmelasse, konzentrierte und verdünnte Zuckerlösungen nachgewiesen werden. So wurden auf der Grundlage der umfangreichen und repräsentativen Literaturangaben (Meßwerte) von Breitung [2] für Durchschnitts-Zuckerrübenmelassen im Konzentrationsbereich

$70\% \leq Tr \leq 85\%$ die Konstanten A_0 , A_1 und B_1 der Gl. (13) berechnet und im Bild 1 einfach-logarithmisch dargestellt.

$$A_0 = -1,721875$$

$$A_1 = -0,011463$$

$$B_1 = 0,052249 \quad (14)$$

Dabei ergibt sich die dynamische Viskosität η in $\text{mPa} \cdot \text{s}$ (d. h. cP).

Die Gln. (13) und (14) wurden mit bekannten Literaturangaben [3, 6, 7] und eigenen Messungen mit Melasse aus der Zuckerfabrik Nauen, Bezirk Potsdam, bei $\vartheta = 40^\circ\text{C}$ verglichen (Bild 2) und es zeigt sich, daß die berechneten Werte gut als Mittelwert angesehen werden können.

Mit der gezeigten Berechnungsgleichung sind Projektierungsrechnungen zu vereinfachen, wie an folgendem Beispiel gezeigt werden soll. Wird eine Zuckerrübenmelasse mit $Tr = 82,5\%$ und $\vartheta = 63^\circ\text{C}$ durch eine Rohrleitung ($d = 50 \text{ mm}$)

mit $\dot{V} = 5 \text{ m}^3/\text{h}$ gefördert, so ergeben sich nach den Gln. (13) und (14) eine Viskosität von $\eta = 642,66 \text{ mPa} \cdot \text{s}$

und nach Gl. (4) für $v = 0,7074 \text{ m/s}$ ein spezifischer Druckverlust von

$$\Delta p/\Delta l = 5819,11 \text{ Pa/m} = 0,0593 \text{ kp/cm}^2 \cdot \text{m}$$

Wird die Temperatur beispielsweise auf $\vartheta = 35^\circ\text{C}$ vermindert, so erhöhen sich die Viskosität auf

$$\eta = 7424,71 \text{ mPa} \cdot \text{s}$$

$$\Delta p/\Delta l = 67228,67 \text{ Pa/m} = 0,6853 \text{ kp/cm}^2 \cdot \text{m}$$

Der Druckverlust soll auch nach der Temperaturverminderung konstant bleiben, die Melasse muß also mit Wasser entsprechend verdünnt werden. Aus Gl. (13) ergibt sich die gesuchte Konzentration der Mischung:

$$Tr = \frac{\ln \ln \eta - (A_0 + A_1 \vartheta)}{B_1} \quad (15)$$

$$Tr = 76,4\%$$

Es ist also ein Verhältnis Melasse:Wasser = 1: m_w herzustellen, damit der gleiche Druckverlust wie bei $\vartheta = 63^\circ\text{C}$ erreicht wird. Der Wasseranteil ergibt sich dabei wie folgt:

$$m_w = (82,5/76,4) - 1 = 0,0798 \text{ kg/kg}$$

Wird Melasse auf $Tr < 70\%$ verdünnt, entspricht die Viskosität in guter Näherung der von verdünnten reinen Saccharoselösungen [2]. Für den Bereich $50\% \leq Tr \leq 70\%$ und $20^\circ\text{C} \leq \vartheta \leq 80^\circ\text{C}$ wurden folgende Konstanten der Gl. (13) auf Grundlage der Literaturwerte von Breitung [2] ermittelt:

$$A_0 = -0,685676$$

$$A_1 = -0,016813$$

$$B_1 = 0,40524 \quad (16)$$

Durch die Gln. (13) und (16) wurde eine weitgehende Übereinstimmung mit den Diagrammen von Baloh [5] erreicht.

Für konzentrierte reine Saccharoselösungen ergaben sich auf der Grundlage der Meßwerte

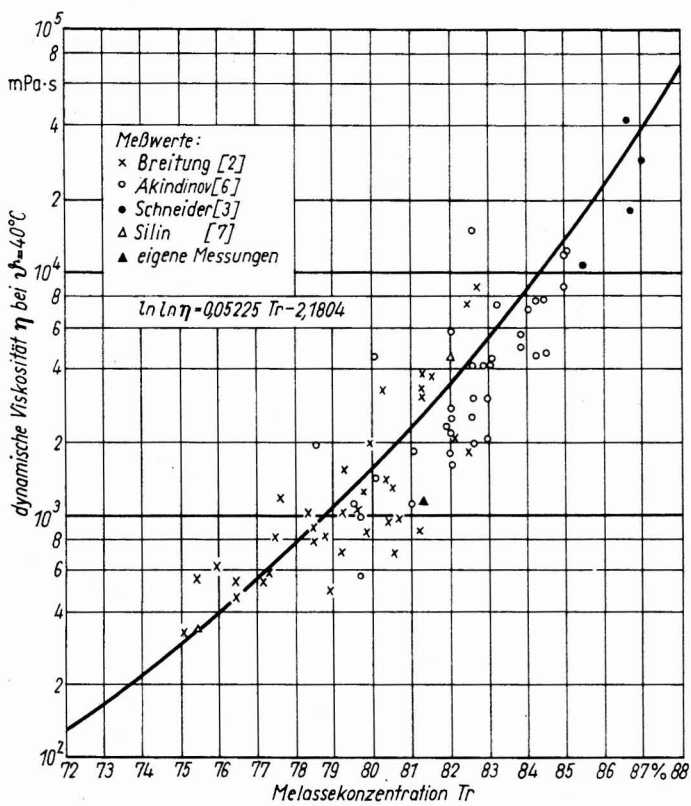
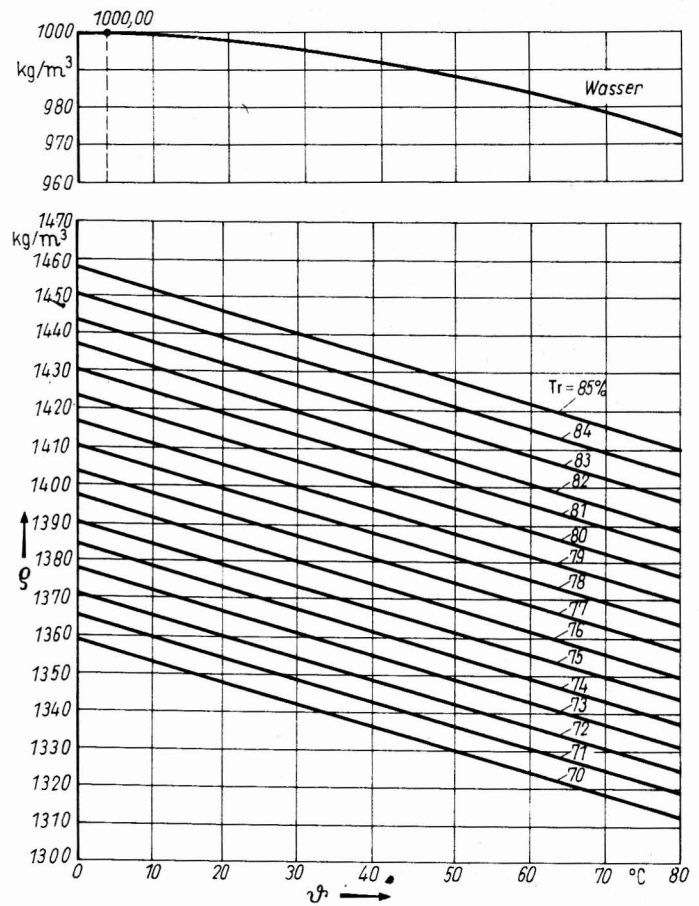


Bild 2. Berechnung der Viskosität von Zuckerrübenmelasse nach den Gln. (13) und (14) und Vergleich mit Literaturangaben ($\vartheta = 40^\circ\text{C}$)

Bild 3. Temperaturabhängigkeit der Dichte konzentrierter technischer Zuckerlösungen



von Schneider [4] und Breitung [2] für den Bereich $75\% \leq Tr \leq 86\%$ und $5^\circ\text{C} \leq \vartheta \leq 80^\circ\text{C}$ folgende Konstanten von Gl. (13):

$$\begin{aligned} A_0 &= -1,739818 \\ A_1 &= -0,013125 \\ B_1 &= 0,0540897 \end{aligned} \quad (17)$$

Es ist kennzeichnend, daß die Viskositätswerte von Melasse geringer als die von konzentrierten reinen Zuckerlösungen sind, wie aus dem Vergleich der Konstanten (17) und (14) zu ersehen ist.

4. Dichteberechnung

Auch die Dichte technischer Zuckerlösungen ist konzentrations- und temperaturabhängig. Die Regressionsfunktion $\rho = f(Tr)$ hat einen streng funktionalen Charakter, d. h. es liegt ein Bestimmtheitsmaß von 1 vor. Für die Temperatur $\vartheta = 20^\circ\text{C}$ ergab sich:

$$\rho_{20} = 998,4980 + 37,956 \cdot 10^{-1} Tr + 15,7 \cdot 10^{-3} Tr^2 + 17,6 \cdot 10^{-6} Tr^3 \quad (18)$$

Die Umkehrung dazu lautet:

$$Tr = -288,146 + 0,31848 \rho - 0,289 \cdot 10^{-7} \rho^3 \quad (19)$$

Im Bild 3 ist erkennbar, daß auch eine Temperaturabhängigkeit der Dichte vorliegt, die mit Hilfe folgender zugeschnittener Gleichung berücksichtigt werden kann:

$$\rho(\vartheta) = \rho_{20} - [0,5830 + 10^{-3} (Tr - 65)] (\vartheta - 20) \quad (20)$$

Dabei ist ρ_{20} aus Gl. (18) einzusetzen. Die

erreichten Rechenergebnisse (Bild 3) stimmen mit den Werten von Baloh [5] und Schneider [9] gut überein.

5. Zusammenfassung

Es wird eine komplexe Funktion $\eta = f(\vartheta, Tr)$ zur Berechnung der Viskosität technischer Zuckerlösungen in Abhängigkeit von Temperatur und Konzentration vorgeschlagen, mit bekannten Literaturangaben verglichen und diskutiert. Weiterhin wird eine Berechnungsgleichung zur Ermittlung der Dichte $\rho = f(Tr, \vartheta)$ angegeben.

Damit liegen hinreichende Berechnungsangaben für die Projektierung technischer Einrichtungen der verarbeitenden Industrie und des landtechnischen Anlagenbaus vor.

Literatur

[1] TGL 3068 Melasse, Qualitätsanforderungen. Ausgabe v. Nov. 1968.
 [2] Breitung, H.: Über die Viskosität technischer Zuckerlösungen. Zeitschrift für die Zuckerindustrie, Berlin 6 (1956) H. 4, S. 185—193; H. 5, S. 254—260.
 [3] Schneider, F.; Emmerich, A., Finke, D.: Zur Viskosität hochkonzentrierter Zuckersirupe. Zucker, Hannover 20 (1967) H. 18, S. 487—492.
 [4] Schneider, F.; Schliephake, D.; Klimmek, A.: Über die Viskosität von reinen Saccharoselösungen. Zucker, Hannover 16 (1963) H. 17, S. 465—473.

[5] Baloh, T.: Einige Diagramme für wäßrige Zuckerlösungen. Zucker, Hannover 20 (1967) H. 24, S. 668—679.
 [6] Akindinov, I. N.; Poljakova, N. D.: Issledovanie vjazkosti kormovych patok kubanskyh sacharnych zavodov (Untersuchung der Viskosität von Melasse aus den Zuckerfabriken des Kuban). Sacharnaja Promyšlennost', Moskva 36 (1962) H. 2, S. 28—31.
 [7] Silin, P. M.: Nomogrammy vjazkosti sacharnych rastvorov i melass (Nomogramme für die Viskosität von Zuckerlösungen und Melassen). Sacharnaja Promyšlennost', Moskva 31 (1957) H. 12, S. 37—40.
 [8] Manzke, E.; Lier, S.: Druckverluste in Dicksaftrohrleitungen. Die Lebensmittelindustrie, Leipzig 23 (1976) H. 1, S. 25—27.
 [9] Schneider, F.; Schliephake, D.; Klimmek, A.: Dichtetabelle für wäßrige Saccharoselösung. Zucker, Hannover 16 (1963) H. 10, Sonderbeilage, S. 1—19. A 2304

Folgende Fachzeitschriften des Maschinenbaus erscheinen im VEB Verlag Technik:

agrartechnik; Die Eisenbahntechnik; die Technik; Feingerätetechnik; Fertigungstechnik und Betrieb; Hebezeuge und Fördermittel; Kraftfahrzeugtechnik; Luft- und Kältetechnik; Maschinenbautechnik; Metallverarbeitung; Schmierungstechnik; Schweißtechnik; Seewirtschaft