

der Anwendung beschränkt wegen des Entmischungsverhaltens und der Restentleerung. Eine sichere Lagerung von erntefeuchtem Getreide im Flachsilo ist möglich, wenn täglich bestimmte Mindestmengen entnommen werden. Durch den Einsatz von Propionsäure können die Verluste vermindert und das Konservat stabilisiert werden.

Die verfahrenstechnische Beurteilung zeigte, daß das Schroten der Körner den größten Engpaß darstellt. In diesem Zusammenhang ist es günstig, daß für die Fütterung von Feuchtgetreide eine gegenüber Trockengetreide gröbere Zerkleinerung ausreicht.

Mit der Verfütterung von Feuchtgetreide an Mastschweine können ebenso gute Mast- und Schlachtleistungen erzielt werden wie mit Trockengetreide. Dabei sollte das Ergänzungsfutter einen höheren Lysinanteil aufweisen, da mit einem geringeren Lysingehalt im Konservat zu rechnen ist.

Schrifttum

- [1] Lotz, A.: Feuchtgetreidekonservierung durch chemische Zusätze. Grundl. Landtechnik Bd. 33 (1983) Nr. 5, S. 148/52.
- [2] Riemann, U.: Das Arbeitsverfahren Feuchtgetreidesilage. KTBL-Berichte über Landtechnik Nr. 90 (1965).
- [3] Jungbluth, T. u. M. Dederer: Verfahrenskennwerte der Konservierung von Feuchtgetreide in gasdichten Behältern und unter Wasserzusatz. KTBL-Schrift Nr. 312, S. 121/36.
- [4] Oh, I.-H.: Verfahren der Flüssigkonservierung von Getreide und Mais. Diss. Univ. Kiel 1985.
- [5] Oh, I.-H. u. H.J. Heege: Fließeigenschaften von Corn-Cob-Mix sowie Pumpleistung bei der Flüssigkonservierung. Grundl. Landtechnik Bd. 37 (1987) Nr. 2, S. 47/53.
- [6] Lotz, A. u. K.J. von Oy: Zur Beurteilung der Konservierung von Körnerfrüchten unter Wasserzusatz. Grundl. Landtechnik Bd. 32 (1982) Nr. 6, S. 208/11.
- [7] Grimmlinger, G.: Der Stand des Verfahrens der Flüssigkonservierung von Getreide/CCM in der Praxis — Eine Umfrage unter Anwendern. Studienarbeit Inst. für Agrartechnik, Univ. Hohenheim 1986.
- [8] Jungbluth, T. u.a.: Verfahren zur Konservierung und Lagerung von Getreide. ALB-Hessen Informationsbericht Nr. 43.
- [9] Ratschow, J.-P.: Konservierung und Lagerung von Getreide in Flachsilos. RKL-Schrift 4.3.1.1.1, S. 851/72, Kiel, April 1986.
- [10] Fiedler, E.: Versuchs- und Erfahrungsbericht 1980 der Landesanstalt für Schweinezucht, Forchheim.
- [11] Livingstone, R.M. u. D.M.S. Livingstone: The use of moist barley in diets for growing pigs. Anim. Prod. Bd. 12 (1970) S. 561/68.
- [12] Göransson, L. u. R.B. Ogle: Anaerobically stored high moisture cereals for growing pigs. Food Sci. Techn. Bd. 12 (1985) S. 159/69.
- [13] Wenk, C. u. J. Landis: Warum nicht Gerstensilage als Futterkomponente für Mastschweine. Schweizer landw. Monatshefte Bd. 61 (1983) Nr. 4, S. 139/42.
- [14] Thomke, S.: Einfluß des Wassergehaltes und des Zerkleinerungsgrades auf die Verdaulichkeit silierten Getreides bei Schweinen. Das wirtschaftseig. Futter Bd. 14 (1968) Nr. 2, S. 93/101.
- [15] Ringel, R., M. Estler u. J.-P. Ratschow: Mühlen zum Zerkleinern von Feuchtgetreide und Maiskorn-Spindel-Gemisch (Corn-Cob-Mix). KTBL-Arbeitsblatt Nr. 1076, Münster 1987.
- [16] Fiedler, E.: Versuchs- und Erfahrungsbericht 1985/86 der Landesanstalt für Schweinezucht, Forchheim.
- [17] Grimmlinger, G.: Verfahrenskennwerte zur Flüssigsilierung von Getreideschrot und CCM, insbesondere Entmischung und Entnahme mit und ohne Umpumpen. Diplomarbeit, unveröffentlicht, Univ. Hohenheim 1987.

Die Niederschlagsintensität bei der Impulsberechnung

Von Dietrich Voigt, Schlieben-Bornim*)

DK 631.347:621.647.7

Die Niederschlagsintensität bei der Berechnung ist eine wichtige Größe sowohl für die Wirkung der Wassergabe auf Boden und Pflanze als auch für die Auslegung der Wasserversorgung.

Für die Impulsberechnung, bei der auf der Berechnungsfläche verteilte Druckbehälter zyklisch befüllt und entleert werden, werden die Zeiten des Füll- und Entleerungsvorganges berechnet, aus denen die Intensität der Berechnung zu bestimmen ist.

1. Einleitung

Von jeher wird von der künstlichen Berechnung gefordert, daß sie hinsichtlich Tropfenfall und Niederschlagsintensität einem natürli-

*) Dr.-Ing. D. Voigt ist wissenschaftlicher Mitarbeiter des Forschungszentrums für Mechanisierung der Landwirtschaft Schlieben-Bornim (Direktor: Prof. Dr. Algenstaedt) der Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR.

chen Niederschlag (Landregen) entsprechen soll. Für die Erhaltung der Bodenstruktur und die Vermeidung von oberirdischem Abfluß und Erosion ist die Niederschlagsintensität besonders wichtig.

Unter der Niederschlagsintensität i wird die in einer Zeiteinheit t gefallene Regengabe h verstanden:

$$i = h/t \quad (1)$$

Die Regengabe h eines Regners ist der Quotient aus der verteilten Wassermenge V und der entsprechenden berechneten Fläche A_B :

$$h = V/A_B \quad (2)$$

Durch Einsetzen von Gl. (2) in Gl. (1) ergibt sich danach für die Niederschlagsintensität:

$$i = V/(t A_B) \quad (3)$$

Die Niederschlagsintensität eines Regners hängt entscheidend von seiner technischen Gestaltung ab. Einfache Standregner, die aus einer feststehenden Düsenöffnung ununterbrochen die gleiche Fläche beregnen, haben eine außerordentlich hohe Niederschlagsintensität, so daß sie für viele Einsatzbereiche nicht geeignet sind.

Prinzipiell kann entsprechend Gl. (3) bei vorgegebener Wassermenge die Niederschlagsintensität durch eine Vergrößerung der beregneten Fläche oder durch eine Verlängerung der Beregnungsdauer verringert werden. Beide Möglichkeiten werden von den Schwenkregnern und besonders wirkungsvoll von den Drehstrahlregnern ausgenutzt. Durch die Bewegung der Düsen wird eine größere Fläche beregnet, und außerdem erhält ein bestimmtes Flächenelement den Regen mit Unterbrechungen.

Die Niederschlagsintensität wird für diesen Fall ermittelt aus:

$$i = \Delta h / (\Delta t + t_p) \quad (4),$$

mit

Δh Teilregengabe
 Δt Beregnungsdauer
 t_p Unterbrechungsdauer.

Sie wird als mittlere Niederschlagsintensität bezeichnet [1].

Durch die ballistische Flugbahn des Wasserstrahls bzw. der Wassertropfen und aus energetischen Gründen sind der Vergrößerung der Fläche enge Grenzen gesetzt. Auch die mögliche Unterbrechungsdauer t_p zwischen den Teilregengaben Δh ist konstruktiv eng begrenzt. Die erzielten Niederschlagsintensitäten (10–20 mm/h) liegen deshalb zumeist noch über den Infiltrationsraten vieler Bodenarten und um ein Vielfaches höher als der eigentliche Wasserbedarf der Pflanzen. Der einzelne Regner ist in der Lage, den Wasserbedarf eines Pflanzenbestands von z.B. 10 Tagen in 1 bis 2 Stunden auszubringen, was u.a. auch eine erhebliche Überdimensionierung der Rohrleitungen auf dem Feld nach sich zieht. Ausreichend wäre aber eine Niederschlagsintensität der Regner, die dem Wasserverbrauch der Pflanzen (Evapotranspiration von 2–5 mm/d) entspricht. Damit wären eine kontinuierliche, gleichmäßige Auslastung der Regner und wesentlich kleinere Rohrleitungen möglich.

2. Aufbau und Funktionsweise der Impulsberegung

Eine beliebige Verringerung der Niederschlagsintensität ist durch eine gesteuerte Unterbrechung des Wasserausstoßes der Regner möglich. Dieses Verfahren ist als Synchron-Impulsberegung (SIB) bekannt geworden [2]. Eine SIB-Anlage ist eine automatisierte ortsfeste Beregnungsanlage, die im wesentlichen aus Impulsregner, Rohrnetz und Steuerzentrale besteht. Weiterhin gehören noch Zuleitungen und Pumpstation dazu. Der Impulsregner, **Bild 1**, besteht aus einem Drehstrahlregner, einem Speicherbehälter und einem Steuerventil. Die Steuerzentrale, **Bild 2**, setzt sich hauptsächlich aus einem Hauptabsperrventil, einer Druckentlastung und einer Steuereinrichtung zusammen.

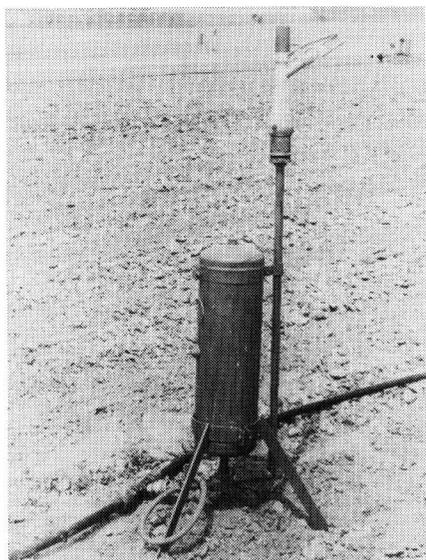


Bild 1. Impulsregner; Drehstrahlregner U 64 mit einem Düsendurchmesser von 8 mm und einem 22 l-Speicherbehälter.

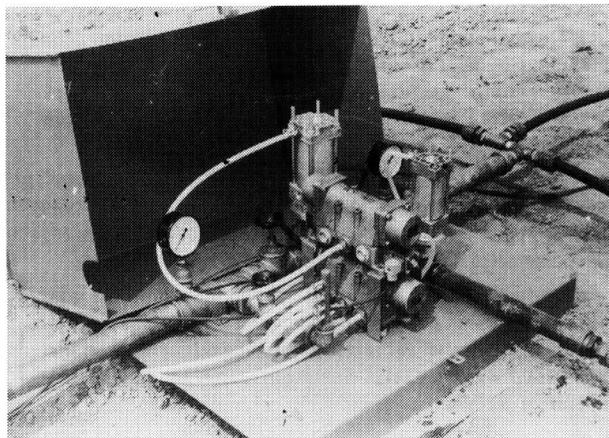


Bild 2. Steuerzentrale; hydromechanischer Impulsgenerator für eine Beregnungsfläche bis zu 10 ha.

Die SIB-Anlage arbeitet diskontinuierlich, zyklisch. Unterschieden werden eine Füllphase und eine Entleerungs- oder Schußphase. In der Füllphase nimmt das System, besonders die Speicherbehälter an den Regnern, Wasser auf. Dabei wird die in den Behältern vorhandene Luft verdichtet. Hat der Druck in den Behältern den maximal vorgesehenen Wert erreicht, wird der Zufluß zum System durch die Steuerzentrale unterbrochen und der Druck im Rohrnetz abgesenkt. Dadurch werden die Ventile in den Impulsregnern umgesteuert, das in den Behältern gespeicherte Wasser wird durch die verdichtete Luft herausgedrückt und von den Regnern schußartig verteilt. Ist der Druck in den Behältern auf einen bestimmten minimalen Wert abgesunken, wird durch die Steuerzentrale der Zufluß zum System freigegeben, und das System wird erneut mit Wasser gefüllt.

3. Niederschlagsintensität bei der Impulsberegung

Das zentrale Problem der Gestaltung einer SIB-Anlage ist die Berechnung der Niederschlagsintensität. Grundsätzlich gilt auch hier Gl. (3). Entsprechend der beschriebenen Arbeitsweise der Impulsberegung setzt sich die Bezugszeit t aus einer Füllzeit T_F und einer Schußdauer T_S zusammen. Beide Teilzeiten werden maßgeblich durch die Speicherbehälter an den Regnern bestimmt.

Das dynamische Verhalten der Speicherbehälter läßt sich durch die Differentialgleichung

$$Q dt - dV = 0 \quad (5)$$

beschreiben. Darin bedeuten

Q Volumenstrom (Zu- oder Abfluß)

t Zeit

V Volumen.

Für den Volumenstrom Q gilt [4]:

$$Q = \mu A \sqrt{2 \Delta p / \rho} \quad (6),$$

mit

μ Ausflußzahl

A Durchflußquerschnitt

Δp Druckdifferenz

ρ Dichte.

Da sich die Druckdifferenz Δp ständig ändert, handelt es sich um eine instationäre Strömung.

Beim Einströmen (Füllen) gilt

$$\Delta p = a - p$$

mit a Eingangsdruck und p Druck im Behälter, beim Ausströmen (Leeren) ins Freie

$$\Delta p = p - a$$

mit a Atmosphärendruck.

Für das Füllen wird unterstellt, daß der Eingangsdruck a in der Zu-
leitung konstant ist.

Um die Gleichung

$$dV = \pm Q dt \quad (+ \text{Einströmen}; - \text{Ausströmen}) \quad (7)$$

lösen zu können, ist es notwendig, die Volumenänderung dV durch die Druckänderung im Speicherbehälter auszudrücken.

Nach Boyle-Mariotte besteht für gasgefüllte Behälter bei konstanter Temperatur zwischen Druck und Volumen der Zusammenhang:

$$p V = p_0 V_0 = \text{konst.}$$

Nach Umformen und Differenzieren erhält man

$$dV = -p_0 V_0 dp/p^2 \quad (8)$$

Durch Einsetzen dieses Ausdruckes in Gl. (7) ergibt sich die Differentialgleichung

$$\pm Q dt = -p_0 V_0 dp/p^2 \quad (9)$$

bzw. mit Gl. (6)

$$\pm \mu A \sqrt{2 \Delta p / \rho} dt = -p_0 V_0 dp/p^2$$

oder

$$dt = \mp \frac{p_0 V_0 dp}{\mu A \sqrt{2/\rho} p^2 \sqrt{\Delta p}} \quad (10)$$

Die Zeit T für das Füllen bzw. Leeren des Behälters ergibt sich durch Integration der Differentialgleichung:

$$T \int_0^T dt = \mp \frac{p_0 V_0}{\mu A \sqrt{2/\rho}} \int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{p^2 \sqrt{\Delta p}} \quad (11)$$

3.1 Fülldauer

Für das Füllen gilt:

$$T_F = - \frac{p_0 V_0}{\mu A \sqrt{2/\rho}} \int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{p^2 \sqrt{a-p}} \quad (12)$$

Die Lösung dieses Integrals ist mit einigem Aufwand analytisch möglich.

Zunächst wird umgeformt:

$$\int \frac{dp}{p^2 \sqrt{a-p}} = \frac{1}{\sqrt{a}} \int \frac{dp}{p^2 \sqrt{1-p/a}} \quad (13)$$

Durch die Substitution

$$\sqrt{1-p/a} = z \quad (14)$$

und dementsprechend

$$dp = -2 a z dz,$$

wird

$$\frac{1}{\sqrt{a}} \int \frac{dp}{p^2 \sqrt{1-p/a}} = -2 \sqrt{a} \int \frac{dz}{p^2} \quad (15)$$

und mit

$$p = a (1 - z^2)$$

nach Gl. (14) erhält man:

$$-2 \sqrt{a} \int \frac{dz}{p^2} = - \frac{2}{a \sqrt{a}} \int \frac{dz}{(1-z^2)^2} \quad (16)$$

Dieses Integral läßt sich durch Partialbruchzerlegung bzw. Rückführen auf ein bekanntes Integral lösen:

$$\frac{-2}{a \sqrt{a}} \int \frac{dz}{(1-z^2)^2} = - \frac{2}{a \sqrt{a}} \left[\frac{1}{2} \frac{z}{1-z^2} + \frac{1}{4} \ln \frac{1+z}{1-z} \right]$$

und mit den ursprünglichen Größen eingesetzt in Gl. (12) ergibt sich die Fülldauer

$$T_F = \frac{p_0 V_0}{\mu A \sqrt{2/\rho}} \frac{1}{a \sqrt{a}} \left[\frac{\sqrt{1-p/a}}{p/a} + \frac{1}{2} \ln \frac{1+\sqrt{1-p/a}}{1-\sqrt{1-p/a}} \right] \Bigg|_{p_1}^{p_2} \quad (17)$$

Setzt man

$$p/a = \epsilon; \quad \frac{p_0 V_0}{a} = V'; \quad \mu A \sqrt{2 a/\rho} = Q_0; \quad \frac{V'}{Q_0} = \tau$$

und

$$\psi(\epsilon) = \frac{\sqrt{1-\epsilon}}{\epsilon} + \frac{1}{2} \ln \frac{1+\sqrt{1-\epsilon}}{1-\sqrt{1-\epsilon}} \quad (18)$$

so erhält man den einfachen Ausdruck

$$T_F = \tau [\psi(\epsilon_1) - \psi(\epsilon_2)] \quad (19)$$

Mit dem Wert ϵ_1 wird das Druckverhältnis p_1/a zu Beginn, mit ϵ_2 das Druckverhältnis p_2/a am Ende des Füllens definiert.

Gl. (18) wird als Strömungsfunktion bezeichnet und zur leichteren Handhabung graphisch dargestellt, **Bild 3**. Die Drücke (a, p) sind sämtlich als absolute Drücke zu verstehen.

Da das Füllen im allgemeinen über hydraulische Widerstände (Drosseln) erfolgt, ist hier anstelle der Ausflußzahl μ die Widerstandszahl ζ einzusetzen.

Es besteht folgender Zusammenhang:

$$\mu = 1/\sqrt{\zeta}$$

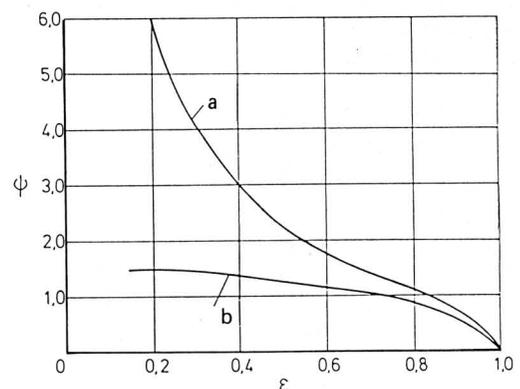


Bild 3. Strömungsfunktionen $\psi = f(\epsilon)$ für das Füllen (Kurve a) und Leeren (Kurve b) des Speicherbehälters.

3.2 Schußdauer

Für das Ausströmen (Schußdauer) gilt analog:

$$T_S = \frac{p_0 V_0}{\mu A \sqrt{2/\rho}} \int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{p^2 \sqrt{p-a}} \quad (20)$$

Das Integral wird wieder umgeformt:

$$\int \frac{dp}{p^2 \sqrt{p-a}} = \int \frac{dp}{p^2 \sqrt{p} \cdot \sqrt{1-a/p}}$$

Die Substitution

$$\sqrt{1-a/p} = z \text{ und entsprechend } dp = -\frac{2p^2 z dz}{a} \quad (21)$$

liefert

$$\int \frac{dp}{p^2 \sqrt{p-a}} = -\frac{2}{a} \int \frac{p^2 z dz}{p^2 \sqrt{p} z} = -\frac{2}{a} \int \frac{dz}{\sqrt{p}}$$

Mit

$$p = \frac{a}{1-z^2}$$

aus Gl. (21) wird

$$\int \frac{dp}{p^2 \sqrt{p-a}} = -\frac{2}{a\sqrt{a}} \int \sqrt{1-z^2} dz$$

Die Lösung dieses Integrals ist bekannt:

$$\int \sqrt{1-z^2} dz = \frac{1}{2} (z\sqrt{1-z^2} + \arcsin z)$$

Man erhält dann mit den ursprünglichen Größen die Schußdauer

$$T_S = -\frac{p_0 V_0}{\mu A \sqrt{2/\rho}} \frac{i}{a\sqrt{a}} (\sqrt{a/p} \sqrt{1-a/p} + \arcsin \sqrt{1-a/p}) \Big|_{p_1}^{p_2}$$

Substituiert man wieder in gleicher Weise wie vorher, erhält man denselben Ausdruck

$$T_S = \tau [\psi(\epsilon_1) - \psi(\epsilon_2)],$$

wobei hier die Strömungsfunktion

$$\psi(\epsilon) = \sqrt{\epsilon} \sqrt{1-\epsilon} + \arcsin \sqrt{1-\epsilon}$$

lautet,

mit $\epsilon = a/p$ bzw. $\epsilon_1 = a/p_1$ und $\epsilon_2 = a/p_2$.

Die gesuchte Niederschlagsintensität berechnet sich nach Gl. (3):

$$i = \frac{V}{t A_B},$$

wobei die Regengabe auf die Zykluszeit (den Impulsabstand)

$$t = T_F + T_S$$

bezogen wird.

Die bei diesem Arbeitszyklus verteilte Wassermenge berechnet sich nach Boyle-Mariotte aus

$$V = p_0 V_0 (1/p_1 - 1/p_2)$$

Die berechnete Bezugsfläche A_B ergibt sich aus der Verbandsaufstellung der Regner

$$A_B = a_R a_L,$$

wobei

a_R Regnerabstand
 a_L Rohrleitungsabstand

bedeuten.

Die für die Berechnung maßgebenden Größen μ bzw. ζ müssen experimentell bestimmt werden.

4. Schlußbemerkungen

In den vergangenen Jahren wurde eine Versuchsanlage zur Synchron-Impuls-Beregnung (SIB) entwickelt und in einem Apfelbestand erprobt [3]. Dabei wurde die Anlage über die Steuerzentrale mit Hilfe eines batteriegespeisten elektronischen Steuergeräts in Abhängigkeit von Luftfeuchte und Lufttemperatur automatisch ein- und ausgeschaltet. In **Tafel 1** sind die wichtigsten technischen Daten dieser SIB-Anlage zusammengestellt.

Neben der bodenschonenden geringen Niederschlagsintensität zeichnen sich SIB-Anlagen durch relativ geringen Materialaufwand (kleine Rohrdimensionen) und sparsamen Wasser- und Energieverbrauch aus. Die kontinuierliche Wasserausbringung hat durch die ständige Erhöhung der Luftfeuchte und Verringerung der Lufttemperatur im Bestand zusätzliche pflanzenphysiologische Effekte, die besonders für bestimmte Obst- und Gemüsearten von Bedeutung sind.

Regnertyp		U 64
Düsenweite	mm	8
Nennweite der Regnerleitungen (PE-h-Rohr ND 10)	mm	32
Wurfweite	m	12 ... 15
Verbandsaufstellung	m	24 x 24
max. Druck im Speicherbehälter	kPa	450 ... 550
min. Druck im Speicherbehälter	kPa	150 ... 250
Volumen des Speicherbehälters	l	40 (22)
Wasserverbrauch je Schuß	l	7 ... 8
Schußdauer	s	5 ... 10
Impulsabstand	s	60 ... 120
Niederschlagsintensität	mm/h	0,2 ... 0,5
Hydromodul	m ³ /(ha h)	2 ... 5

Tafel 1. Kenngrößen der SIB-Versuchsanlage.

Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [1] *Schinke, H., D. Voigt, H.J. Krienbrink u. D. Streuber:* Zur Frage der Niederschlagsintensität des künstlichen Regens. Archiv Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde Bd. 24 (1980) Nr. 3, S. 181/89.
- [2] Tropfenbewässerung und Synchron-Impulsberegnung aus internationaler Sicht. Wissenschaftlich-technische Informationen für das Meliorationswesen. VEB Ingenieurbüro für Meliorationen Bad Freienwalde (1976) 45.
- [3] *Blasse, W., G. Al-Nabulsi u. D. Voigt:* Impulsberegnung in der Apfelproduktion. Gartenbau (Berlin) Bd. 33 (1986) Nr. 8, S. 244/46.
- [4] • *Bohl, W.:* Technische Strömungslehre. Würzburg: Vogel-Buchverlag 1984.



VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1988

Schriftleitung: Dr. F. Schoedder, Braunschweig

Printed in Germany. Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil dieser Schriftenreihe darf in irgendeiner Form — durch Photokopie, Mikrokopie oder ein anderes Verfahren — ohne schriftliche Genehmigung des Verlages, auch nicht auszugsweise, reproduziert werden. — All rights reserved (including those of translation into foreign languages). No part of this issue may be reproduced in any print, microfilm, or any other means, without written permission from the publishers. — Herstellung: Druckerei Ruth, Braunschweig.