

154 | Oktober 1965

SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

K. Wieghardt

Bemerkungen zu zwei Methoden zur Verringerung des Reibungswiderstandes

TUHH

Technische Universität Hamburg-Harburg

Bemerkungen zu zwei Methoden zur Verringerung des Reibungswiderstandes

Von K. Wieghardt, Hamburg

a) Bekanntlich könnte der Reibungswiderstand, und damit auch der Gesamtwiderstand eines Schiffes, auf einen Bruchteil des gewöhnlichen Wertes gesenkt werden, wenn die ganze Reibungsschicht durch kontinuierliche Absaugung laminar gehalten werden könnte. An Tragflügeln von Versuchsflugzeugen [1] sind bei Re-Zahlen bis zu $2 \cdot 10^7$ (und $Ma < 0,8$) bereits Widerstandsverringerungen um mehr als die Hälfte verwirklicht worden, — auch bei Einbeziehung der erforderlichen Absaugarbeit in die Widerstandsleistung. Allerdings wird diese nun laminare Grenzschicht so dünn, daß nur noch Rauigkeitshöhen bis zu etwa $1/10$ mm zulässig sind. Immerhin könnte an einem Schiffmodell mit solcher Absaugung z. B. die linearisierte Theorie für den Wellenwiderstand experimentell besser geprüft werden als bei der sonst stärkeren Wechselwirkung mit dem Reibungswiderstand; die Dosierung der kontinuierlichen Absaugungsgeschwindigkeit (rd. 10^{-4} der Fahrtgeschwindigkeit) müßte allerdings vor allem in Kimmnähe vorher experimentell genau ermittelt werden.

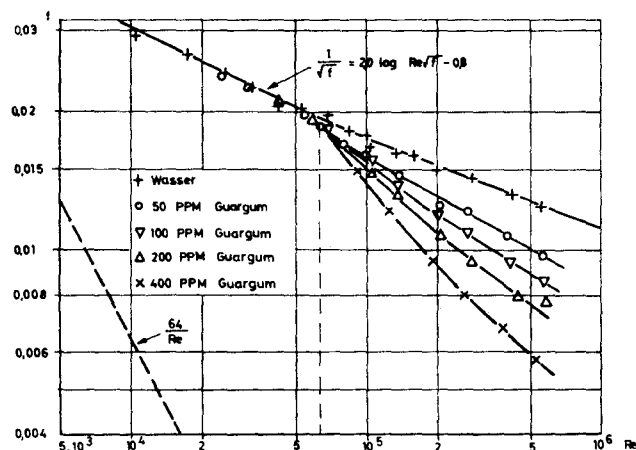


Abb. 1: Widerstandsziffer f im Rohr für Guar gum-Lösungen in Wasser, abhängig von der Reynolds-Zahl nach Elata und Tirosh [4]

b) Eine andere Methode, Strömungswiderstände in Wasser wesentlich zu reduzieren, ist in Schiffbaukreisen durch Messungen von J. W. Hoyt und A. G. Fabula [2] bekannt geworden: der turbulente Reibungswiderstand in Wasser — etwa von rotierenden Scheiben oder auch im Rohr — kann durch geringfügige Zusätze von gewissen Polymeren oft ganz wesentlich verkleinert werden. Erklärungsversuche hierzu mit Hilfe von Ansätzen, die für nicht-Newton'sche Flüssigkeiten oder für visko-elastische Medien aufgestellt wurden, sind sicher nur Notbehelfe. Denn derartige Effekte sind schon bei Verunreinigungen des Wassers von nur 5 ppm (5 Teile auf 10^6) festgestellt worden, die die physikalischen Eigenschaften des Wassers nicht derart grundsätzlich verändert haben können.

Die wirksamen Zusätze bestehen aus kettenförmigen Molekülen mit einem Molekulargewicht der Ordnung 10^7 , deren Länge l_M durchaus etwa 0,1 mm erreichen kann. Man kann solche Lösungen in Wasser als disperses System auffassen: Wasser mit (absolut betrachtet) zahlreichen Fäden. In laminarer Strömung legen sich diese Fäden parallel zur Strömungs-

richtung und erhöhen etwas die Zähigkeit des Wassers (proportional ihrer Konzentration, vgl. etwa [3]), stören aber sonst die Strömung kaum. In turbulenter Strömung werden aber Wirbel erzeugt, deren Abmessungen von der Größenordnung der Apparatur sind, z. B. des Rohrdurchmessers oder der Grenzschichtdicke. Diese Wirbel zerfallen in kleinere, wobei die kinetische Energie an diese weitergegeben wird; am Ende dieses kaskadenartigen Wirbelzerfalls stehen die kleinsten Wirbel mit der Abmessung λ , innerhalb derer Laminarströmung herrscht und die kinetische Energie in Wärme dissipiert wird. Es ist nun einleuchtend, daß „Fäden“ diesen Vorgang — und damit die turbulente Nebenbewegung überhaupt — zumindest im hochfrequenten und kleinräumigen Ende des Schwankungsspektrums dämpfen, falls ihre Länge l_M die Größenordnung der kleinsten Wirbel λ erreicht.

Als Beispiel ist Abb. 1 einer Arbeit von C. Elata und J. Tirosh [4] entnommen: die Verkleinerung der Widerstandsziffer f in einem Rohr (Durchmesser $d = 50$ mm), abhängig von der Re-Zahl bei Zusatz von Guar gum zu Wasser in verschiedener Konzentration. Erst ab $Re > 6 \cdot 10^4$ — also weit oberhalb des laminar-turbulenten Umschlags — tritt der Effekt (auch bei starker Konzentration) überhaupt auf, vermutlich weil erst dann die kleinsten Wirbel λ vergleichbar mit den Moleküllängen l_M werden. Daß die Abmessung λ dieser kleinsten Wirbel, bezogen auf den Rohrdurchmesser, mit wachsender Re-Zahl kleiner wird, kann man folgendermaßen zeigen. Nach den Messungen von J. Laufer [5] (Rohrströmung mit Luft bei $Re = 5 \cdot 10^4$ und $5 \cdot 10^6$) sind die Mittelwerte der Geschwindigkeitsschwankungen u' , bezogen auf die Schubspannungsgeschwindigkeit u_* , kaum von der Re-Zahl abhängig. Für die Dissipation je Volumen- und Zeiteinheit D — ausgedrückt durch λ — folgt daraus:

$D \sim \mu u_*^2 / \lambda^2 \sim \mu^2 / \lambda^2$ (μ = Zähigkeit). Andererseits ist im Rohr $D \sim U dp/dx \sim \rho U^3 f/d$, mit U = Durchfließgeschwindigkeit, dp/dx = Druckgefälle und ρ = Dichte. Wegen der Definitionen von u_* und f gilt noch $f/8 = (u_*/U)^2$. Damit folgt aus $\mu u_*^2 / \lambda^2 \sim \rho U^3 f/d$ schließlich $\lambda/d \sim 1/\sqrt{Re}$. Bei den von Elata und Tirosh angekündigten Versuchen mit anderen Rohrdurchmessern wäre demnach $Re \sim d^2$ zu erwarten, wenn sich l_M/λ als wesentlicher Parameter erweist.

Allgemein müßte man dann erwarten, daß in turbulenten Wasserströmungen Effekte durch solche Zusätze außer von deren Konzentration nur noch abhängen von l_M/λ ; erst wenn dieses Verhältnis einen gewissen Wert erreicht, ist überhaupt ein Effekt zu erwarten.

Schrifttum:

- [1] AGARDograph 97: Recent Developments in Boundary Layer Research, Part IV, May 1965.
- [2] Hoyt, J. W., und Fabula, A. G.: The Effect of Additives on Fluid Friction, V. Symp. on Naval Hydrodynamics, Bergen, 1964.
- [3] Hermans, J. J.: Flow Properties of Disperse Systems, Amsterdam, 1953.
- [4] Elata, C., und Tirosh, J.: Frictional Drag Reduction, Israel. Journal of Technology, Vol. 3, 1965.
- [5] Laufer, J.: The Structure of Turbulence in Fully Developed Pipe Flow, NACA-Report 1174, 1954.

Zu: Bemerkungen zu zwei Methoden zur Verringerung des Reibungswiderstandes

In der obigen Arbeit in „Schiff und Hafen“, Bd. 17 (1965), Seite 806, wird die These aufgestellt, daß die Widerstandsverringierung von Wasserströmungen durch Zusatz gewisser Polymere außer von deren Konzentration und der Re-Zahl nur noch von l_M/λ abhängt; dabei ist l_M die Moleküllänge und λ die Größenordnung der kleinsten Wirbel in der betrachteten turbulenten Strömung. Bei der Abschätzung von λ für die Rohrströmung wurde jedoch fälschlich die Dissipationsdichte D je Volumeneinheit (und Zeiteinheit) in diesen kleinsten Wirbeln verglichen mit der mittleren Dissipationsdichte im ganzen Rohr. Vergleichbar ist aber nur die jeweilige Gesamtdissipation (je Zeiteinheit). Nach den zitierten Messungen von J. Laufer findet nun die turbulente Dissipation nur in unmittelbarer Nähe der Rohrwand statt, etwa bis zu einem Wandabstand von $50 \nu/u_*$. Die Gesamtdissipation in diesem Ringraum wird somit von der Größenordnung:

$$\int D \, dV \sim (\mu u_*^2 / \lambda^2) \cdot \pi d \cdot (\nu / u_*) \cdot \Delta x.$$

Ausgedrückt durch die Bruttogrößen der mittleren Hauptbewegung wird die Gesamtdissipation auch gleich

$$\int D \, dV = (\rho U^3 f / 2d) \cdot (\pi d^2 / 4) \cdot \Delta x.$$

Der Vergleich dieser beiden Ausdrücke gibt jetzt — mit $f = 8 (u_* / U)^2$ und $Re = Ud/\nu : \lambda/d \sim \sqrt{U/u_*} / Re$. Aus der Näherungsformel von Blasius für den Rohrwiderstand: $f = 0,316/Re^{1/4}$ folgt weiter: $u_* / U \sim Re^{-1/8}$ und $\lambda/d \sim Re^{-15/16}$, so daß $l_M/\lambda \sim l_M Re^{15/16}/d$. Für diejenige Re-Zahl, von der ab eine Widerstandsverringierung in Rohren verschiedener Durchmesser (bei gleicher Konzentration der Wasserlösung) überhaupt erst auftritt, ist demnach $Re_* \sim d^{16/15}$ (statt d^2) zu erwarten, weil dann l_M/λ einen gewissen kritischen Wert erreicht. Für $Re > Re_*$ müßte der Widerstandsbeiwert f eine Funktion von Re und $l_M Re^{15/16}/d$ sein; erst dann ist die Turbulenz so feinkörnig, daß l_M mit λ vergleichbar wird.

Fast das gleiche Ergebnis gibt die folgende Dimensionsanalyse: da der Widerstand in der dünnen Wandschicht entsteht, in der ν/u_* wesentlicher Längenmaßstab ist, und da die Wirkung der Zusätze auf deren abnormen Moleküllänge l_M beruht, ist $l_M u_* / \nu$ bzw. $l_M Re^{7/8}/d$ der wesentliche Parameter. Der direkte Vergleich der Moleküllänge mit der Abmessung der kleinsten Turbulenzwirbel erscheint aber wesentlich anschaulicher, vor allem zur Erklärung dafür, daß ein hydraulischer Effekt erst bei großen Re-Zahlen beobachtet wird.

K. Wieghardt, Hamburg