

SONDERDRUCK aus der Zeitschrift

CHEMIE-INGENIEUR-TECHNIK

Zeitschrift für technische Chemie, Verfahrenstechnik und Apparatewesen

37. Jahrgang 1965

Nr. 11

Seite 1102-1106

Verlag Chemie GmbH · Weinheim/Bergstr.

Hydrodynamisches Verhalten von Quecksilber bei laminarer und turbulenter Rohrströmung

PROF. DR.-ING. U. GRIGULL UND DIPL.-ING. H. TRATZ

Institut für Technische Thermodynamik der Technischen Hochschule München

Hydrodynamisches Verhalten von Quecksilber bei laminarer und turbulenter Rohrströmung

PROF. DR.-ING. U. GRIGULL UND DIPL.-ING. H. TRATZ*

Institut für Technische Thermodynamik der Technischen Hochschule München

Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Hausen zum 70. Geburtstag

Die beschriebenen Versuche hatten den Zweck, gewisse Unstimmigkeiten im hydrodynamischen Verhalten von Quecksilber aufzuklären. Es zeigte sich, daß reines entgastetes Quecksilber an reinen Rohroberflächen sich im laminaren und turbulenten Strömungsbereich wie eine gewöhnliche Flüssigkeit verhält. Auch der Einfluß des Schutzgases und die Strömung durch eine Blende wurden untersucht.

Flüssige Metalle spielen sowohl in der Kerntechnik wie in der Raumfahrttechnik eine Rolle als Wärmetransportmittel oder als Arbeitsmedium für Wärmekraftwerke. Um Daten für die richtige Auslegung derartiger Kreisläufe zu gewinnen, wurden in den letzten Jahrzehnten viele Experimentalarbeiten über das hydrodynamische und thermische Verhalten von flüssigen Metallen ausgeführt. Dabei war vor allem die Frage zu klären, ob die für gewöhnliche Flüssigkeiten abgeleiteten Gleichungen auch für flüssige Metalle gültig blieben, oder, mit anderen Worten, ob flüssige Metalle „normale“ Flüssigkeiten sind oder nicht. Flüssige Metalle unterscheiden sich von gewöhnlichen Flüssigkeiten vor allem durch die schlechte Benetzung gegenüber vielen Materialien und durch den extrem niedrigen Wert der Prandtl-Zahl $Pr = \eta c_p / \lambda$, der die Größenordnung von 1/100 hat, hervorgerufen durch die hohe Wärmeleitfähigkeit λ .

Die Ergebnisse der erwähnten Experimentalarbeiten waren recht widerspruchsvoll. Hinsichtlich des hydrodynamischen Verhaltens, von dem im folgenden allein die Rede sein soll, wurden die für gewöhnliche Flüssigkeiten geltenden Widerstandsgesetze der Rohrströmung in einigen älteren Veröffentlichungen im Rahmen der Meßgenauigkeit bestätigt [1 bis 4]. In neueren Arbeiten wurden aber unerklärliche Streuungen der Versuchswerte beobachtet, die bis zu $\pm 15\%$ betragen, obwohl nach der Meßgenauigkeit der Apparatur nur Streuungen von $\pm 3\%$ zu erwarten waren [5, 6]. Auch die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse war schlecht. Als mögliche Ursachen wurde neben der schlechten Benetzbarkeit der Einfluß des Schutzgases, in diesem Falle Helium, vermutet, das mit der Strömung in das Versuchsrohr eingeschleppt sein sollte. Es war also nicht eindeutig geklärt, ob flüssige Metalle als normale Flüssigkeiten angesehen werden können. Damit war aber auch die Vorausberechnung von Kreisläufen in Frage gestellt, da der Druckabfall in Rohrleitungen und deshalb die Förderleistung von Umwälzpumpen nicht eindeutig angegeben werden konnten. Bei dieser Sach-

lage schienen weitere Versuchsarbeiten notwendig, über die im folgenden berichtet wird.

Beschreibung der Apparatur

Wegen seiner leichten Handhabung wurde Quecksilber als Versuchsstoff gewählt, für das außerdem die notwendigen Stoffwerte mit ausreichender Genauigkeit bekannt waren [7, 8]. Um alle denkbaren Fehlerquellen auszuschließen, mußte die Apparatur bestimmten Bedingungen genügen.

Das Quecksilber durfte bei der Vorbehandlung und in der Apparatur nur mit solchen Materialien in Berührung kommen, mit denen es im gewählten Temperaturbereich (25°C) mit Sicherheit chemisch nicht reagiert. Für unsere Zwecke kamen nach der einschlägigen Literatur [9, 10] im Bereich der Raumtemperatur unlegierte Stähle mit geringem Kohlenstoff-Gehalt, ferritische nickel-freie Chromstähle und Quarzglas in Frage.

Danach wurden ausgewählt:

unlegierter Kohlenstoffstahl St 37,
Werkstoff-Nr. 1.0110 nach DIN 1611,

ferritischer Chromstahl X 8Cr Ti 17,
Werkstoff-Nr. 4510 nach DIN 17006,

Duran-Glas der Jenaer Glaswerke Schott u. Gen., Mainz.

Da auch die genannten Stähle auf die Dauer nur bei Abwesenheit von Sauerstoff gegen Quecksilber beständig sind, mußte es möglich sein, die Apparatur vollständig zu entlüften. Um auch ohne Schutzgas arbeiten zu können, mußte sie weiterhin vakuumdicht gebaut sein, da der Dampfdruck von Quecksilber bei 25°C nur etwa $2 \cdot 10^{-3}$ Torr beträgt. Ferner mußte sich die Apparatur auch während des Betriebes mit Schutzgas (in unserem Falle Argon) auffüllen lassen, um dessen Einfluß zu studieren. Alle Dichtungen mußten ohne Zwischenlagen von Gummi, Kunststoffen oder Weichmetallen ausgeführt, d. h. es mußte Stahl gegen Stahl oder Stahl gegen Quarzglas gedichtet werden. Den Aufbau der Apparatur zeigt Abb. 1. Eine früher beschriebene [11] Spiral-Induktionspumpe *a* fördert das Quecksilber aus dem Sammelbehälter *b* durch den Kühler *c* und das Drosselventil *d* zum Hochbehälter *e*. Der Kühler *c* brachte das in der Pumpe erwärmte Quecksilber wieder auf etwa 25°C . Zu viel gefördertes Quecksilber floß durch das Überlaufrohr des Hochbehälters *e*

*) Diese Arbeit enthält Teilergebnisse der Dissertation von H. Tratz, die der Fakultät für Maschinenwesen und Elektrotechnik der Technischen Hochschule München eingereicht werden soll. Auf dem VDI-Thermodynamik-Kolloquium 1964 in Trier (29. bis 30. Oktober) wurde über dieses Thema von H. Tratz berichtet.

in den Sammelbehälter *b* zurück, so daß vor der Meßstrecke *f* stets gleichbleibender Druck vorhanden war. Vom Hochbehälter *e* floß der zur Messung verwendete Quecksilberstrom in den Wärmeaustauscher *r*, in dem mit Hilfe des Thermostaten *n* die Meßtemperatur von 25 °C eingestellt wurde. Auch die anschließende Meßstrecke *f* wurde durch den Thermostaten *o* auf Meßtemperatur gehalten. Der Druckabfall in der Meßstrecke *f* wurde am U-Rohr-Manometer *g* mit Hilfe eines Kathetometers bestimmt. Das Quecksilber floß dann über das Regulierventil *h* in den Meßbehälter *i* und in den Sammelbehälter *b* zurück.

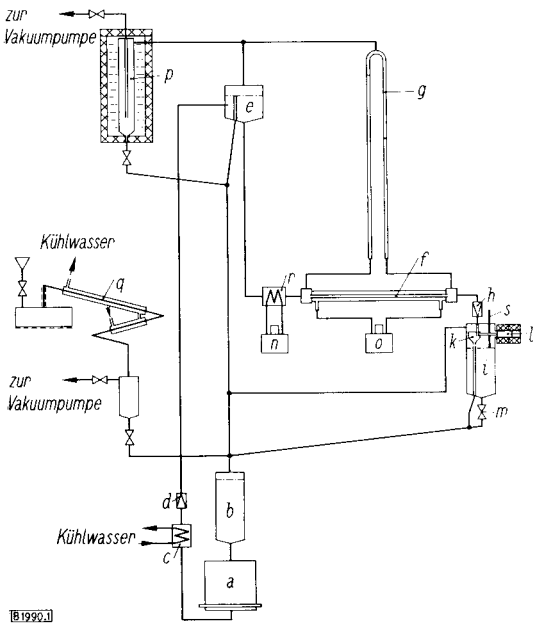


Abb. 1. Schema der Versuchsanordnung
a Spiral-Induktionspumpe, *b* Sammelbehälter, *c* Kühler, *d* Drosselventil, *e* Hochbehälter, *f* Meßstrecke, *g* U-Rohr-Manometer, *h* Regulierventil, *i* Meßbehälter, *k* Trichter, *l* Kolben, *m* Absperrventil, *n* und *o* Thermostate, *p* Kühlfalle, *q* Destillieranlage, *r* Wärmeaustauscher, *s* Kontaktstift.

Im Meßbehälter *i* wurde der Volumenstrom dadurch bestimmt, daß die zum Auffüllen des bekannten Behältervolumens benötigte Zeit mit einer elektrisch gesteuerten Stoppuhr gemessen wurde. Zu Beginn der Messung wurde der Trichter *k*, der in Normalstellung das Quecksilber durch einen Bypass abströmen ließ, durch den Kolben *l* mit Hilfe eines Elektromagneten in Meßstellung geschlossen. Das Ende der Meßzeit wurde durch Berühren des Quecksilber-Spiegels mit dem unter elektrischer Spannung stehenden Kontaktstift *s* angezeigt. Der obere, bei Messungen ohne Schutzgas mit Quecksilber-Dampf gefüllte Teil des Meßbehälters *i* war über die nie vollständig mit Quecksilber gefüllte Rücklaufleitung vom Hochbehälter *e* zum Sammelbehälter *b* und über eine mit Eis gekühlte Kühlfalle *p* mit der Vakuumanlage verbunden, die aus Rotations- und Olfusionspumpe bestand. Dadurch wurde erreicht, daß die Meßstrecke *f* immer unter einem konstanten geodätischen Gefälle stand. Zur Messung wurde chemisch reines Quecksilber verwendet, das in der Destillieranlage *q* vor dem Einfüllen unter Vakuum nochmals destilliert und dadurch entgast wurde.

Während der Versuche ohne Schutzgas war die Vakuumanlage ständig in Betrieb, um etwa durch die Apparatewände eindiffundiertes Gas kontinuierlich zu entfernen. Das Quecksilber wurde besonders wirksam in der Rücklaufleitung entgast, da dort durch Verspritzen eine große Oberfläche gebildet wurde.

Der an der Kühlfalle *p* kondensierte Quecksilber-Dampf unterstützte den Gastransport zur Vakuumanlage. Die Meßstrecke, Abb. 2, bestand aus einer Stahlkapillare *a* aus Werkstoff 4510 mit einer Bohrung von 1,234 mm Dmr. und einer Länge von 1000,1 mm. Sie war von dem Mantelrohr *e* von 15 mm Dmr. umgeben, gegen das sie an drei Stellen durch gelochte Scheiben abgestützt war. Der Ringraum wurde von Kühlwasser durchflossen. Die Länge der Kapillare wurde auf einem Leitz-Strassmann-Meßstand durch Vergleich mit einem Eichmaßstab bestimmt. Der Durchmesser wurde durch

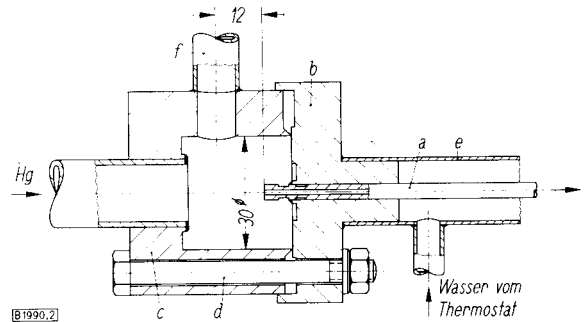


Abb. 2. Meßstrecke
a Kapillare, *b* Flansch, *c* Druckkammer, *d* Schraube, *e* Mantelrohr, *f* Druckentnahmerohr.

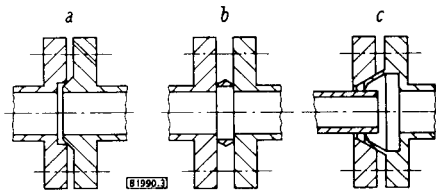


Abb. 3. Flanschdichtungen
a Kegel auf Kante, *b* Schneidenring, *c* Kegel mit schneidenförmiger Kante.

Eichung nach der Durchflußmethode mit Stickstoff ermittelt, dessen Viscosität zu $\eta = 1,7796 \cdot 10^{-5}$ kg/(ms) bei 25 °C und 1 bar angenommen wurde [12].

Abb. 3 zeigt drei der verwendeten Flanschdichtungen ohne weiche Zwischenlagen. Zum Verbinden von Rohrleitungen diente die Form *a*, bei der ein Kegel auf eine scharfe Kante gepreßt wurde. Beide Teile verformten sich leicht plastisch. Die Verbindung ließ sich leicht herstellen und war selbst nach mehrmaligem Lösen noch brauchbar. Zum Verbinden von Planflächen wurde Form *b* verwendet, bei der ein Schneidenring durch Anpressen leicht plastisch verformt wurde. Auch diese Verbindung ließ sich leicht lösen und mehrmals verwenden. Zum Verbinden des Quarzrohrs des U-Rohr-Manometers mit den Stahlteilen der Apparatur diente Form *c*. Hierbei wird ein dünnwandiger elastischer Kegel in einen passenden Ring gepreßt, wodurch sich die Bohrung des Kegels verengt. Seine schneidenförmige Kante drückt auf das Quarzrohr und verformt sich plastisch. Die Verbindung ist überraschend erschütterungsfest. Alle drei Dichtungsformen hielten noch bei einem Unterdruck von 10^{-5} Torr dicht.

Die Temperatur des Quecksilbers wurde vor dem Eintritt in die Meßstrecke und im Meßbehälter mit Thermoelementen bestimmt.

Ausführung der Versuche

Alle Teile der Apparatur wurden vor dem Zusammenbau gründlich gereinigt. Sie wurden hierzu mit Petroläther entfettet, mit einer Beize aus 40proz. Salzsäure und 7proz. Salpetersäure gebeizt, mit Leitungswasser gespült und die Beize danach mit 1proz. Natronlauge neutralisiert. Nach mehrmaligem Spülen mit Leitungswasser und destilliertem Wasser wurden die Teile im Vakuum getrocknet und montiert.

Die im Argonarc-Verfahren hergestellten Schweißnähte und alle übrigen Verbindungen der Apparatur wurden mit Hilfe eines Halogen-Lecksuchers bei einem Innendruck von 10^{-5} Torr auf Dichtheit geprüft.

Die fertig zusammengebaute Apparatur wurde evakuiert und mit Quecksilber gefüllt. Nach Einschalten der Pumpe wurde der gewünschte Volumenstrom durch das Regulierventil h (Abb. 1) eingestellt. Nach Erreichen des thermischen und mechanischen Beharrungszustandes begann die Messung, die je nach den Versuchsbedingungen 9 bis 80 min dauerte. In dieser Zeit wurde in Abständen von einigen Minuten die Druckdifferenz am U-Rohr-Manometer abgelesen und der Mittelwert gebildet. Die Schwankungen waren äußerst gering. Gleichzeitig wurde in der oben beschriebenen Weise im Meßbehälter der Volumenstrom des Quecksilbers gemessen. Bei den Versuchen ohne Schutzgas waren die Vakuumpumpen ständig in Betrieb.

Die Versuche erstreckten sich über einen Bereich der Reynolds-Zahl $Re = wD/\nu$ von 870 bis 7500.

Auswertung der Versuche

Ziel der Messungen war der Widerstandskoeffizient λ_R der Rohrströmung, der durch die Gleichung

$$\Delta p = \lambda_R \frac{L}{D} \frac{\rho w^2}{2} + k \frac{\rho w^2}{2} \quad (1)$$

definiert ist. Der Korrekturfaktor k berücksichtigt den Druckabfall, der zur Beschleunigung der Strömung am Rohreintritt, zur Ausbildung des endgültigen Geschwindigkeitsprofils und zur Deckung der zusätzlichen Reibungsverluste beim hydrodynamischen Einlauf dient. Ein Druckrückgewinn am Austritt der Kapillare ist bei den hier verwendeten Druckmeßkammern (Abb. 2) nicht zu erwarten.

Der Zahlenwert von k ist in mehreren Veröffentlichungen [13 bis 16] theoretisch und experimentell bestimmt worden, wobei die Ergebnisse bei laminarer Strömung zwischen 2,115 und 2,45 lagen. In der vorliegenden Arbeit wurde im laminaren Bereich ($Re \leq 1900$) $k = 2,24$ gewählt in Übereinstimmung mit einer neueren theoretischen Untersuchung [17]. Für den Übergangsbereich und in turbulenter Strömung wurde der experimentell gut belegbare Wert $k = 1,4$ verwendet [13]. Zur Auswertung der Versuche wurden folgende Stoffwerte von Quecksilber bei 25 °C benutzt [7]:

Dichte $\rho = 13534 \text{ kg/m}^3$,
kinematische Viscosität $\nu = \eta/\rho = 11,2 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$.

Fehlerabschätzung

Der gemessene Differenzdruck Δp konnte mit dem Kathetometer auf etwa $\pm 0,15$ Torr genau bestimmt werden. Hierdurch entstand ein relativer Fehler von 0,8% bei kleinen und von 0,02% bei großen Reynolds-Zahlen. Die mittlere Geschwindigkeit w wurde, wie oben beschrieben, aus dem Volumen des Meßbehälters i (Abb. 1) und der Fülldauer sowie dem Durchmesser der Kapillare in der Meßstrecke berechnet. Die Fehler in der Eichung des Meßbehälters und des Kapillarendurchmessers betragen zusammen etwa 0,09%. Durch Schwankungen des Quecksilber-Spiegels im Meßbehälter entstand, wie Kontrollversuche zeigten, ein Fehler von 0,1% bei kleinen und von 0,6% bei großen Durchsätzen. Hieraus ergab sich ein mittlerer Fehler für den Widerstandskoeffizienten λ_R von etwa 1,1% unter der Annahme, daß alle verwendeten Stoffwerte genau bekannt waren. Der den Korrekturfaktor k enthaltende Summand in Gl. (1) macht bei kleinen Reynolds-Zahlen etwa 3,7% und bei großen etwa 7,4% des gemessenen Druckabfalls Δp aus. Die Unsicherheit des nach dem heutigen Stand des Wissens gewählten Bestwertes $k = 2,24$ kann danach das Ergebnis bei $Re = 870$ um + 0,24% bzw. - 0,08% und bei $Re = 1900$ um + 0,3% bzw. um - 0,1% beeinflussen. Dieser systematische Fehler kann nicht der Versuchstechnik zur Last gelegt werden, und die gemessenen Größen lassen sich jederzeit mit anderen Zahlenwerten von k auswerten, sofern in Zukunft solche bekannt werden sollten.

Ergebnisse der Versuche ohne Schutzgas

In Tabelle 1 sind die gemessenen Widerstandskoeffizienten λ_R zusammengestellt und in Abb. 4 als Funktion der Reynolds-Zahl Re wiedergegeben. Zum Vergleich sind die bekannten Widerstandsgesetze im laminaren Bereich nach *Hagen* und *Poiseuille*

$$\lambda_R = 64 Re^{-1} \quad (2)$$

und im turbulenten Bereich nach *Blasius*

$$\lambda_R = 0,3164 Re^{-0,25} \quad (3)$$

in Abb. 4 eingetragen.

Die Meßpunkte streuen um eine mittelnde Kurve mit einer Abweichung von etwa $\pm 0,2\%$. Sie sind sowohl im laminaren wie im turbulenten Bereich kleiner als die Werte nach Gl. (2) und (3), und zwar beträgt der größte Unterschied - 1,8% bei $Re = 874$ und der mittlere Unterschied - 1,1% im laminaren Bereich. Im turbulenten Bereich sind die gemessenen λ_R -Werte um 1,1% bei $Re = 5000$ und um 0,7% bei $Re = 7500$ kleiner als die Werte nach Gl. (3). Diese Abweichungen können teilweise auch durch die Unsicherheiten in der Visko-

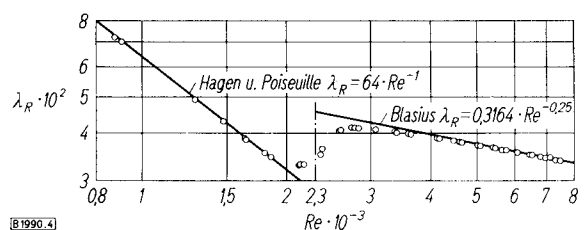


Abb. 4. Gemessener Widerstandskoeffizient λ_R als Funktion der Reynolds-Zahl bei entgastem Quecksilber.

Tabelle 1. Zusammenstellung der gemessenen und berechneten Größen für entgastes Quecksilber

Re	λ_R	Δp [bar]	w [m/s]	Re	λ_R	Δp [bar]	w [m/s]
875	0,07186	0,02588	0,07942	4157	0,03863	0,31575	0,3774
902	0,06993	0,02681	0,08187	4479	0,03812	0,36207	0,4067
1281	0,04910	0,03849	0,1163	4613	0,03793	0,38198	0,4188
1468	0,04299	0,04459	0,1333	4632	0,03772	0,38330	0,4206
1633	0,03876	0,05004	0,1482	5039	0,03716	0,44714	0,4575
1635	0,03869	0,05017	0,1484	5065	0,03702	0,45020	0,4599
1801	0,03548	0,05614	0,1635	5431	0,03664	0,51231	0,4931
1851	0,03451	0,05787	0,1681	5458	0,03650	0,51563	0,4956
2126	0,03291	0,07087	0,1930	5646	0,03598	0,54430	0,5127
2137	0,03302	0,07180	0,1940	5756	0,03602	0,56633	0,5226
2163	0,03300	0,07366	0,1964	5760	0,03599	0,56660	0,5230
2349	0,03500	0,09184	0,2133	6094	0,03552	0,62632	0,5533
2369	0,03617	0,09636	0,2151	6102	0,03543	0,62645	0,5541
2561	0,04047	0,12529	0,2325	6484	0,03500	0,69905	0,5887
2580	0,04057	0,12741	0,2342	6490	0,03495	0,69958	0,5893
2739	0,04126	0,14600	0,2487	6541	0,03498	0,71113	0,5939
2762	0,04135	0,14878	0,2508	6546	0,03499	0,71246	0,5943
2779	0,04119	0,15011	0,2523	6806	0,03459	0,76183	0,6180
2829	0,04116	0,15542	0,2569	6808	0,03457	0,76170	0,6181
3072	0,04090	0,18210	0,2789	6974	0,03434	0,79448	0,6333
3361	0,04034	0,21514	0,3051	7124	0,03420	0,82567	0,6468
3389	0,04007	0,21740	0,3077	7129	0,03420	0,82687	0,6437
3593	0,03987	0,24328	0,3263	7333	0,03387	0,86682	0,6658
3636	0,03972	0,24806	0,3301	7497	0,03375	0,90305	0,6807
4147	0,03873	0,31508	0,3765	7500	0,03376	0,90384	0,6810

Um Rundungsfehler zu vermeiden, wurde eine Ziffer mehr angegeben, als dem Meßfehler entspricht.

sität von Stickstoff, der als Eichsubstanz für den Kapillarendurchmesser verwendet wurde, und in der Viskosität von Quecksilber verursacht sein. Es wurde darauf verzichtet, durch Wahl anderer Viskositätswerte für Stickstoff oder Quecksilber die gemessenen Werte besser den Gln. (2) und (3) anzupassen.

Die gemessenen Werte wurden in mehreren Versuchsreihen gewonnen, wobei die Pumpe vor Beginn einer neuen Reihe abgestellt und die Meßstrecke entleert wurde. Einmal wurde die Apparatur zwischen zwei Versuchsreihen mit Argon begast und anschließend wieder evakuiert. Durch diese Maßnahmen entstanden keine größeren Streuungen als die oben angegebenen. Die Versuchsergebnisse sind also vollständig reproduzierbar.

Ergebnisse der Versuche mit Schutzgas

Um den Einfluß von Schutzgas auf den Strömungswiderstand der Kapillare zu untersuchen, wurden zwei verschiedene Methoden angewendet. Bei der ersten wurde während des Laufes der Apparatur Argon ein-

geleitet und die Vakuumpumpe abgestellt. Das Quecksilber konnte sich an allen freien Oberflächen insbesondere im Fallrohr, mit Argon sättigen, das einen Druck von etwa 720 Torr hatte. In Abb. 5 sind die auf diese Weise erhaltenen 18 Meßpunkte eingetragen und mit denen ohne Schutzgas verglichen. Diese 18 Meßpunkte wurden innerhalb eines ununterbrochenen Laufes der Apparatur von 22 h Dauer gewonnen. Der Einfluß des Schutzgases zeigte sich nach etwa 40 min in einer zunehmenden Streuung der Meßpunkte, die schließlich 1% erreichte gegenüber 0,2% ohne Schutzgas. Bei diesen Messungen blieb also die Kapillare ständig mit Quecksilber gefüllt, und das Gas konnte nur durch das Quecksilber in die Kapillare eingeschleppt werden.

Nach einer zweiten Methode wurde vor jeder von 6 Meßreihen die Kapillare durch Abstellen der Spiral-Induktionspumpe geleert und die ganze Apparatur mit Argon von etwa 720 Torr aufgefüllt. Das Gas hatte hierbei unmittelbaren Kontakt mit der Wand der Kapillaren und konnte dort adsorbiert werden. Außerdem war das Quecksilber wie auch bei der ersten Methode mit Argon gesättigt. Die Meßpunkte streuten wiederum um etwa $\pm 1\%$.

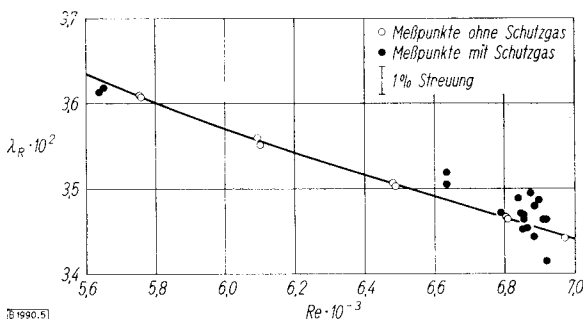


Abb. 5. Einfluß des Schutzgases auf den Widerstandskoeffizienten. Argon wurde durch Quecksilber in die Kapillare eingeschleppt.

Druckabfall in einer Meßblende

Bei weiteren Versuchsreihen wurde an Stelle der Meßstrecke f in Abb. 1 eine Meßblende eingebaut, die in Abb. 6 dargestellt ist. Der Druckabfall wurde mit dem U-Rohr-Manometer g (Abb. 1) gemessen, und zwar einmal bei entgastem und ein andermal bei mit Argon gesättigtem Quecksilber. Die Blendscheibe d in Abb. 6 aus gehärtetem Stahl war 3 mm dick und hatte eine geläppte Bohrung von 0,8 mm Dmr. mit schwach abgerundeten Kanten. Der gemessene Druckabfall Δp ist in Abb. 7 über dem Massenstrom \dot{m} aufgetragen. Während die Meßpunkte bei entgastem Quecksilber mit einer mittleren Streuung von etwa 0,2%, bezogen auf

den Massenstrom, auf der ausgezogenen Linie liegen, ist die Streuung bei mit Argon gesättigtem Quecksilber wesentlich stärker und nimmt mit der Dauer der Versuche, die sich über 14 h erstreckten, zu. Die Abweichung von der ausgezogenen Linie betrug nach etwa 10 min (Punkt 1) 0,6%, nach 2 h (Punkt 6) etwa 1,7% und erreichte schließlich den Endwert von etwa 2%.

1% an. Der Druckabfall in einer Meßblende von 0,8 mm Dmr. zeigte einen Anstieg der Streuung von 0,2% bei entgastem, auf 2% bei begastem Quecksilber. Alle Versuchsergebnisse ließen sich vollständig reproduzieren.

Eingegangen am 12. August 1965 [B 1990]

Formelzeichen

c_p	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck
D	Durchmesser der Kapillare
k	Korrekturfaktor nach Gl. (1)
L	Länge der Kapillaren
\dot{m}	Massenstrom
Δp	gemessener Druckabfall
w	mittlere Geschwindigkeit
η	dynamische Viskosität
λ	Wärmeleitfähigkeit
λ_R	Widerstandskoeffizient nach Gl. (1)
ν	kinematische Viskosität $\nu = \eta/\rho$
ρ	Dichte
$Re = wD/\nu$	Reynolds-Zahl
$Pr = \eta c_p / \lambda$	Prandtl-Zahl

Literatur

- [1] J. A. Hartmann, Danske Videnskabernes Selskabs Skrifter, Series 8, 10, Nr. 5, 385/413 (1926).
- [2] Hydraulic resistance in the flow of liquid metals, in Liquid metal heat transfer, herausgegeben von S. S. Kutadeladze, V. M. Borishanskii, J. J. Novikov u. O. S. Fedynskii, London 1959, S. 16/17.
- [3] N. S. Kondratev u. O. S. Fedynskii: Heat transfer and thermal simulation (russisch), Moscow 1958.
- [4] M. A. Styrikovich, J. E. Semenovker u. A. R. Sorin, Sovetskoe Kotloturbostroenie, 9, 316 [1940].
- [5] H. A. Johnson, J. P. Hartnett, W. J. Clabaugh u. L. Fried, Trans. ASME, 79, 1079/84 [1957].
- [6] R. A. Seban, W. T. Schrank u. D. Barth, Flow metering of molten lead-bismuth eutectic. Inst. Engng. Research Division Report, University of California, Berkeley, May 1949.
- [7] R. R. Miller: Physical properties of liquid metals, in Liquid-metals-handbook, herausgegeben von R. N. Lyon, 2. Aufl., Washington 1954.
- [8] N. B. Vargaftik: Handbuch über wärmephysikalische Eigenschaften von Gasen und Flüssigkeiten (russisch) Fizmatgiz 1963.
- [9] L. F. Epstein: Corrosion by liquid metals, in Progress in nuclear energy, Serie IV, Technology and Engineering, Bd. 1, S. 366/77, London 1956.
- [10] Stability of heat resistant material in liquid metals, in Liquid metal heat transfer, herausgegeben von S. S. Kutadeladze, V. M. Borishanskii, J. J. Novikov u. O. S. Fedynskii, London 1959, S. 119/37.
- [11] H. Tratz u. U. Grigull, diese Ztschr. 37, 53/56 [1965].
- [12] J. Kestin u. W. Leidenfrost, Physica, 25, 1033/62 [1959].
- [13] L. Schiller, VDI-Forschungsheft 248, Berlin 1922.
- [14] W. Riemann, J. Am. Chem. Soc., 50, 46/55 [1928].
- [15] H. L. Langhaar, J. appl. Mech. 9, 55/58 [1942].
- [16] S. Goldstein: Modern developments in fluid dynamics, Bd. 1. Oxford/England. 1938, S. 304.
- [17] E. M. Sparrow u. S. H. Lin, Physics of Fluids 7, 338/47 [1964].

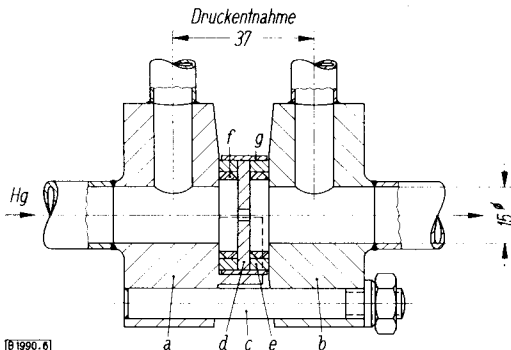


Abb. 6. Schnittzeichnung der Meßblende
a und b Flansche, c Paßstifte, d Blendenscheibe, e Distanzring, f Dichtung, g Zentrierhülse.

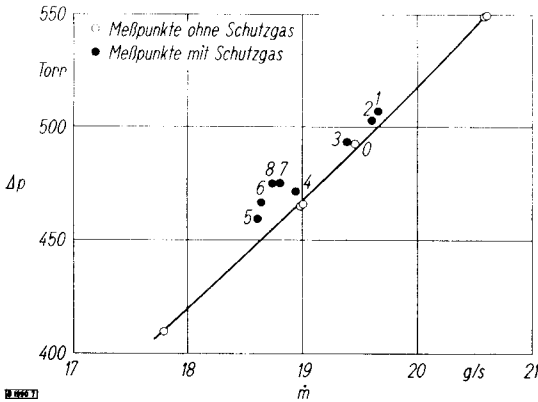


Abb. 7. Druckabfall Δp in der Meßblende nach Abb. 6 als Funktion des Massenstroms \dot{m} bei entgastem und begastem Quecksilber. Die Zahlen an den Meßpunkten zeigen die Reihenfolge der Messungen an.

Zusammenfassung

In einem geschlossenen Kreislauf wurde der Druckabfall von Quecksilber, das bei Raumtemperatur durch eine Kapillare von 1000,1 mm Länge und 1,234 mm Dmr. strömte, im laminaren und turbulenten Bereich gemessen. Das Quecksilber kam im Kreislauf nur mit Stahl und Quarzglas in Berührung und konnte während der Versuche ständig entgast werden. Unter diesen Bedingungen betrug die mittlere Streuung des aus den gemessenen Werten nach Gl. (1) berechneten Widerstandskoeffizienten 0,2%. Diese gemessenen Widerstandskoeffizienten liegen um 0,7 bis 1,8% unter den nach den Gleichungen von Hagen und Poiseuille und von Blasius berechneten Werten. Zur Auswertung wurden Literaturwerte für die Viskosität von Quecksilber und von Stickstoff (als Eichsubstanz) sowie für den Korrekturfaktor k nach Gl. (1) benutzt.

Wurde das Quecksilber mit Argon gesättigt, stieg die Streuung der gemessenen Widerstandskoeffizienten auf