

# Strömungs- und Wärmeübergangsverhalten von flüssigem Quecksilber bei Benetzung und Nichtbenetzung\*

B. Sturm, U. Grigull und H. Schmücker, München

## Fluid flow and heat transfer of liquid mercury in wetted and nonwetted tubes

**Abstract.** In wetted and nonwetted tubes the hydrodynamics and heat transfer of liquid metal flow were investigated. Mercury was used as test fluid. For the laminar flow no hydraulics anomalies were indicated. In the case of the wetted tube a steady change of diameter and an increase of the surface roughness were observed. This is due to the formation and removing of a viscous amalgam layer at the tube wall.

In the laminar region heat transfer measurements show very good agreement with theory. In the turbulent region the experimental results are comparable with heat transfer coefficients valid for the nonwetted tube published in literature. The influence of different surface contact conditions to heat transfer can be excluded. A thermal contact resistance could not be found.

**Zusammenfassung.** Das hydrodynamische und thermische Verhalten einer Flüssigmetallströmung wurde bei benetzter und nichtbenetzter Rohrwand untersucht. Als Modellfluid diente Quecksilber. Bei laminarer Strömung wurden keine hydraulischen Anomalien nachgewiesen. Beim benetzten Rohr wurde eine ständige Durchmesseränderung und Erhöhung der Rauigkeit beobachtet, die auf die Bildung und Abtragung einer Amalgamschicht an der Wand zurückzuführen ist.

Im Rahmen der Wärmeübergangsuntersuchungen zeigen im laminaren Strömungsgebiet die im benetzten Rohr gemessenen Wärmeübergangskoeffizienten sehr gute Übereinstimmung mit der Theorie. Im turbulenten Bereich sind die Meßergebnisse mit zuverlässigen Werten der Literatur bei nichtbenetztem Rohr vergleichbar. Eine Beeinflussung des Wärmeübergangs durch unterschiedliche Benetzungszustände ist auszuschließen.

### Bezeichnungen

$D$  Rohrdurchmesser  
 $I$  Stromstärke

$k$  Hagenbachscher Korrekturfaktor  
 $L$  Länge  
 $p$  Druck  
 $\dot{q}$  Wärmestromdichte  
 $T$  Temperatur  
 $U$  elektrische Spannung  
 $\dot{V}$  Volumenstrom  
 $w$  mittlere Strömungsgeschwindigkeit  
 $\psi$  Rohrreibungszahl  
 $\theta$  Randwinkel  
 $\alpha$  Wärmeübergangskoeffizient

### Stoffwerte

$\eta$  dynamische Zähigkeit  
 $\lambda$  Wärmeleitfähigkeit  
 $\nu$  kinematische Zähigkeit  $\nu = \frac{\eta}{\rho}$   
 $\rho$  Dichte  
 $c_p$  spezifische Wärmekapazität

### Dimensionslose Kennzahlen

$Nu$  Nußelt-Zahl  $Nu = \frac{\alpha \cdot D}{\lambda}$   
(auf die Temperaturdifferenz zwischen Wand- und Mischtemperatur der Flüssigkeit bezogen)  
 $Pr$  Prandtl-Zahl  $Pr = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda}$   
 $Re$  Reynolds-Zahl  $Re = \frac{w \cdot D}{\nu}$   
 $Pe$  Péclet-Zahl  $Pe = \frac{\rho \cdot c_p \cdot w \cdot D}{\lambda} = Re \cdot Pr$

### Indizes

$c$  Rohrmitte  
 $w$  Wand  
 $p$  konstanter Druck

\* Die Arbeit enthält Ergebnisse der Dissertation von B. Sturm, die am 6. Juli 1982 der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München eingereicht wurde. Die mündliche Prüfung fand am 15. Dezember 1982 statt. Über das gleiche Thema wurde von B. Sturm auf dem Kolloquium für „Wärme- und Stoffübertragung“ der VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen am 15. April 1983 in Lindau berichtet.

## 1 Einleitung

Flüssigmetalle weisen Stoffeigenschaften auf, die sie für den Einsatz als Wärmetransportmittel überall dort prädestinieren, wo große Wärmeströme zu übertragen sind und hohe Temperaturen auftreten. Man macht sich diese

Eigenschaften vor allem in der Kern- und Heat Pipe-Technik sowie in Solarkraftwerken zunutze.

Bekanntester Vertreter flüssiger Metalle ist das Quecksilber. Zwischen Quecksilber und metallischen Oberflächen sind die Kontaktarten Benetzung mit gleichzeitiger Amalgamierung der Oberfläche sowie Nichtbenetzung möglich. Als Beurteilungskriterium für den Benetzungszustand wird im allgemeinen der Randwinkel herangezogen. Gut benetzt werden Metalle wie Kupfer, Gold, Silber, Zinn und Zink. Bei der Amalgamierung handelt es sich um die Bildung einer intermetallischen Verbindung an der Phasengrenze zwischen dem Flüssig- und Festmetall, wobei beide Metalle ineinander in Lösung gehen. Sie tritt immer mit der Benetzung zusammen auf und verursacht eine starke Oberflächenaufrauhung.

Die Erforschung der Gesetzmäßigkeiten der Hydraulik und des Wärmeübergangs von Flüssigmetallen war in der Vergangenheit häufig Gegenstand experimenteller Arbeiten, um die Grundlagen für die Berechnung von Flüssigmetallkreisläufen zu schaffen.

### 1.1 Frühere Forschungsarbeiten

In der Literatur sind Anomalien im hydrodynamischen und thermischen Verhalten flüssiger Metalle bekanntgeworden, die dem Einfluß unterschiedlicher Kontaktarten an der Wand zugeschrieben werden. Im Zusammenhang mit Zähigkeitsmessungen an Quecksilber nach dem Ausflußverfahren haben Tammann und Hinnüber [1] in den zwanziger Jahren bei Verwendung von vollständig amalgamierten, benetzten Kupferkapillaren einen rund dreimal so hohen Wert für die Viskosität ermittelt wie bei Verwendung nichtbenetzter Stahl- und Nickelkapillaren. Von diesen Autoren wurde die in der Theorie vorausgesetzte Erfüllung der Haftbedingung für den Fall der Nichtbenetzung bezweifelt und ein Gleiten an der Wand für möglich gehalten.

In neueren Untersuchungen des hydraulischen und thermischen Verhaltens von Quecksilber wurde bei turbulenter Strömung in Ringspalten mit unterschiedlichen Benetzungszuständen des Innen- und Außenrohres eine deutliche Verschiebung des Geschwindigkeitsmaximums von der benetzten zur nichtbenetzten Wand sowie eine starke Streuung der gemessenen Rohrreibungszahl festgestellt [2–4].

Wärmeübergangsmessungen an Flüssigmetallen haben in Kreisrohren kleinere Wärmeübergangskoeffizienten ergeben, als nach den theoretischen Beziehungen zu erwarten sind. Die Abweichungen wurden um so größer, je kleiner die Strömungsgeschwindigkeit wurde. So wurden bei laminarer Strömung Wärmeübergangskoeffizienten gemessen, die bis zu 78% unter dem theoretischen Wert nach Eagle und Ferguson [5] liegen. Außerdem war bei allen Versuchen eine sehr große Streuung der Meßergebnisse zu verzeichnen. In diesem Zusammenhang sind hauptsächlich die Messungen von Johnson [6], Bailey,

Cope, Watson [7], Elser [8] und Doody, Younger [9] zu nennen.

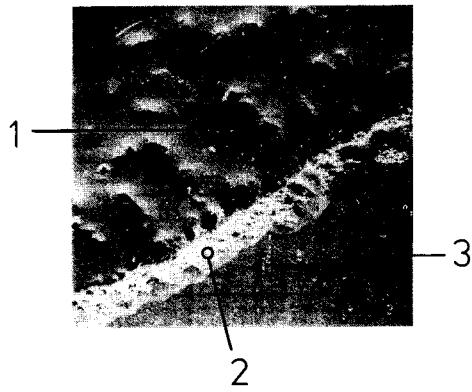
Als Ursache für die beobachteten Anomalien bei den Wärmeübergangsuntersuchungen wurde erstens die Existenz eines thermischen Kontaktwiderstandes angenommen, der als Folge der hohen Oberflächenspannung des Flüssigmetalls auftritt. Zweitens wurde bezweifelt, daß die Übertragung von Impuls und Energie dem physikalischen Ähnlichkeitsgesetz folge und die Reynolds-Analogie bei der Herleitung theoretischer Beziehungen nicht anzuwenden sei.

In der Literatur liegen absolut gesicherte Aussagen zum hydrodynamischen und thermischen Verhalten von Flüssigmetallen noch nicht vor. Vor allem die Versuche von Tammann und Hinnüber [1], Johnson [6] sowie Dwyer et al. [2] bildeten deshalb den Anlaß, dem beschriebenen Phänomen nachzugehen und Messungen unter definierten Bedingungen durchzuführen.

### 1.2 Eigene Untersuchungen zur Benetzbarkeit von Metallen

Benetzungs- und Haftprobleme sind eng mit den Grenzflächenerscheinungen verbunden. Die Wechselwirkung zwischen den grenzflächenenergetischen Grundgrößen führt zur Ausbildung eines für die Stoffkombination charakteristischen Randwinkels  $\theta$ . Dieser Winkel stellt eine geeignete Größe zur phänomenologischen Beschreibung des Benetzungszustandes dar. Definitionsgemäß liegt Benetzung vor, wenn er Werte zwischen  $0^\circ$  und  $90^\circ$  annimmt, und Nichtbenetzung, wenn die Werte zwischen  $90^\circ$  und  $180^\circ$  liegen [10].

Zur Auswahl geeigneter Werkstoffe für die Versuchsstrecken wurden Randwinkelmessungen an Quecksilber auf sorgfältig gereinigten rostfreien Stahl-, Fe-, Ni-, Al-, Co- und Cu-Oberflächen durchgeführt. Auf allen Materialien zeigten sich Randwinkel von  $136$  bis  $145^\circ$ . Bei Kupfer als einzigem Werkstoff trat nach etwa 24stündiger Kontaktzeit ein Spreiten des Quecksilbers und eine Amalgamierung ein. Die Kupferoberfläche hatte sich mit einer dünnen zähflüssigen Amalgamschicht überzogen und merklich aufgeraut. Bild 1 zeigt eine elektronenmikroskopische Aufnahme der Amalgamschicht und des reinen Kupfers bei 200facher Vergrößerung. Bei dem mit 1 bezeichneten Bereich handelt es sich um ein zähflüssiges Amalgam, das aus nadelförmigen Kristallen und flüssigem Quecksilber besteht. Die Amalgamkristalle werden vom Quecksilber benetzt. Die Oberfläche zeigt deshalb den silbernen, metallischen Glanz. Die Kupferkonzentration ist in diesem Zustand noch so gering, daß das Amalgam in zäher Form vorliegt. Im Bereich 2, der die Randschicht zwischen blankem Kupfer und dem benetzten Amalgam darstellt, ist die Kupfer-Konzentration im Quecksilber so hoch, daß die ursprünglich zähe Masse bereits nach kurzer Zeit aushärtet und sich verfestigt. Die feste Amalgamschicht wächst langsam in den Bereich 1 hinein aufgrund der zunehmenden Anreicherung mit Kupfer. Ab



**Bild 1.** Elektronenmikroskopische Aufnahme der Kupfer- und Amalgamoberfläche, 200fache Vergrößerung. 1 Amalgam mit einem Kupfer-Gehalt von 0 bis etwa 20 Massen-% Kupfer; 2 Festes Amalgam mit einem Kupfer-Gehalt größer als 20 Massen-% Kupfer (Randzone); 3 Blanke Kupferoberfläche.

einer Kupferkonzentration von etwa 20 Massen-% [11] erscheint das Amalgam in fester Form. Der in Bild 1 mit 3 bezeichnete Bereich zeigt die blanke Kupferoberfläche.

Aufgrund der Ergebnisse der oben beschriebenen Untersuchungen wurden die Werkstoffe Kupfer für die Versuche bei Benetzung und rostfreier Stahl bei Nichtbenetzung gewählt.

## 2 Hydrodynamische Untersuchungen

Den theoretischen Hintergrund bilden bei laminarer Strömung das Hagen-Poiseuille-Gesetz

$$\psi = 64/Re \quad (1a)$$

und bei turbulenter Strömung das empirische Blasius-Gesetz

$$\psi = 0,3164 \cdot Re^{-0,25} \quad (1b)$$

für das hydraulisch glatte Rohr. Hierbei sind  $\psi$  die Rohrreibungszahl, die durch die Gleichung

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

definiert wird, und  $Re$  die dimensionslose Strömungsgeschwindigkeit.

$\Delta p$  stellt den Druckabfall über der Rohrlänge  $L$  dar,  $w$  die mittlere Strömungsgeschwindigkeit,  $\rho$  kennzeichnet die Dichte des Fluids über dem Rohrquerschnitt und  $D$  den Rohrdurchmesser. Der zweite Term in Gleichung (2) berücksichtigt die Einlaufverluste bis zur Ausbildung des endgültigen Geschwindigkeitsprofils. Unter  $k$  ist der Hagenbachsche Korrekturfaktor zu verstehen. Bei laminaren Strömungsverhältnissen gilt der Wert 2,24 und bei Übergangs- bzw. turbulenter Strömung der Wert 1,4 als zuverlässig [12].

Der Ausdruck (1a) entsteht durch Verknüpfung der sog. Ausflußgleichung nach Poiseuille [1]

$$\Delta p = \frac{128 \cdot \eta \cdot L \cdot \dot{V}}{\pi \cdot D^4} \quad (3)$$

mit der Definitionsgleichung (2), wobei anstelle des Volumenstroms  $\dot{V}$  bzw. der Strömungsgeschwindigkeit  $w$  die dimensionslose Geschwindigkeit  $Re$  eingeführt wurde. Bei der Herleitung der Ausflußgleichung wurde ein ausgebildetes Geschwindigkeitsprofil vorausgesetzt, das an der Wand den Wert Null annimmt (Haftbedingung). Aufgrund der obigen Voraussetzung entfällt bei der Verknüpfung der Korrekturterm in Gl. (2).

Gleichung (3) kann u.a. auch zur Bestimmung der dynamischen Zähigkeit  $\eta$  von Fluiden nach der Ausflußmethode [1] und zur Ermittlung des hydraulischen Durchmessers  $D$  von Kapillaren herangezogen werden. Die Meßgrößen sind dabei die zeitliche Ausflußmenge und der Druckabfall.

Ziel der eigenen experimentellen Untersuchungen ist die Bestimmung der Rohrreibungszahl  $\psi$  in Abhängigkeit vom Benetzungszustand. Durch einen Vergleich dieser Ergebnisse soll die Ursache für die bislang in der Literatur vorliegenden Diskrepanzen im hydrodynamischen Verhalten geklärt werden. Grundlage hierfür ist die Gleichung

$$\psi = \frac{\frac{\Delta p \cdot D^4 \cdot \pi^2}{8 \cdot \rho \cdot \dot{V}^2} - k}{L/D} \quad (4)$$

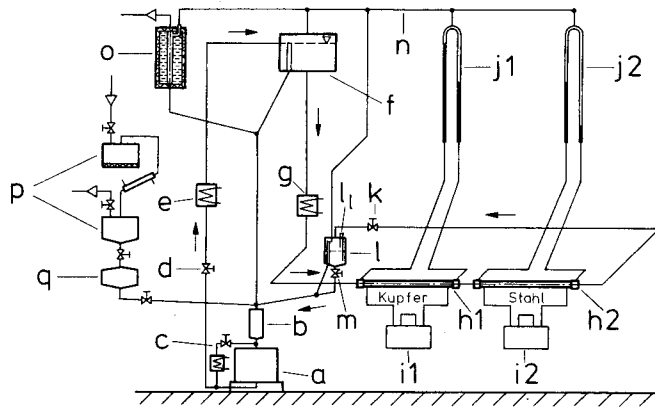
die aus Gl. (2) durch Einführen des Volumenstroms anstelle der Geschwindigkeit  $w$  entsteht. Die Meßgrößen sind bei bekanntem Durchmesser und bekannter Länge des Versuchsrohres der Druckabfall  $\Delta p$  und der Volumenstrom  $\dot{V}$ .

Die zur Bestimmung der Rohrreibungszahl entwickelte Versuchsapparatur ist in Bild 2 schematisch dargestellt und wird nachfolgend beschrieben.

### 2.1 Versuchsaufbau

Zum unmittelbaren Vergleich des Verhaltens bei Benetzung und Nichtbenetzung wurden in den Meßstreckenabschnitt der Versuchsapparatur eine amalgamierte, benetzte Kupferkapillare und eine nichtbenetzte Kapillare aus rostfreiem Stahl eingebaut. Der Einbau erfolgte so, daß erst die Kupferkapillare und dann die Stahlkapillare durchströmt werden. Diese Anordnung ermöglicht durch Vergleichsmessungen an der Stahlkapillare eventuelle Änderungen der Viskosität durch gelöstes Kupfer im Quecksilber nach Gl. (3) nachzuweisen.

Die Versuchsapparatur besteht aus einem geschlossenen, bis auf den Dampfdruck von Quecksilber evakuierbaren Kreislauf. Vom Flüssigmetall mitgeführte Gasblasen und Gasadsorption an der Wand sind somit ausgeschlossen. Die Spiralinduktionspumpe a fördert das Quecksilber aus dem Sammelbehälter b in den Hoch-



**Bild 2.** Schema der Versuchsanordnung für die hydrodynamischen Vergleichsmessungen; a Spiralinduktionspumpe; b Sammelbehälter; c Bypass-Leitung; d Drosselventil; e Kühler; f Hochbehälter; g Wärmetauscher; h1, h2 Versuchskapillaren; i1, i2 Thermostaten; j1, j2 U-Rohr-Manometer; k Nadeldrosselventil; l Mengenmeßbehälter; l1 elektr. Kontaktstifte; m Absperrventil; n Quecksilberdampf-Sammelleitung; o Kühlfalle; p Destilliervorrichtung; q Speicherbehälter

behälter f. Die in der Pumpe entstehende Verlustwärme wird durch Kühlwasser abgeführt. Im Kühler e wird das Flüssigmetall rückgekühlt. Vom Hochbehälter, an dem eine Überlaufleitung für ein konstantes Druckniveau am Meßstreckeneintritt sorgt, strömt das Fluid durch Schwerkrafteinfluß zunächst durch den Wärmetauscher g. Er ist an einen Ölthermostat angeschlossen und temperiert das Versuchsmedium vor dem Eintritt in die beiden Kapillaren h1 und h2 auf 25 °C. Zur Abführung der in den Kapillaren entstehenden Dissipationswärme sind die Versuchsröhren mit einem Mantelwärmetauscher umgeben. Dieser besteht aus einem konzentrisch angeordneten Messingrohr. Der Ringspalt wird mit Öl aus einem Thermostat durchspült. An den an den Mischkammern vor und hinter den Kapillaren angeschlossenen U-Rohr-Manometern j1 und j2 kann mit einem Kathetometer die auftretende Druckdifferenz an den Meßstrecken abgelesen werden. Mit dem Nadeldrosselventil k wird der gewünschte Mengenstrom eingestellt und im Mengenmeßbehälter l der Volumenstrom gemessen. Vom Meßbehälter gelangt das Quecksilber in den Sammelbehälter b und wird wieder der Spiralinduktionspumpe zugeführt. Das an den freien Oberflächen im Sammel-, Hoch- und Mengenmeßbehälter sowie über den Flüssigkeitssäulen in den Manometern abdampfende Quecksilber wird in der Sammelleitung n zur Kühlfalle o geführt, in der es kondensiert. Das anfallende Kondensat gelangt über eine Falleitung in den Sammelbehälter b. Mit der in den Versuchsstand eingebauten Destilliervorrichtung p wird das Quecksilber vor Durchführung der Versuchsreihen unter Vakuum destilliert, entgast und anschließend in den Kreislauf eingespeist.

## 2.2 Meßtechnik

Die Mengenstrommessung erfolgt bei geschlossenem Absperrventil m mittels eines kalibrierten zylindrischen Meß-

behälters durch Messung der Einströmzeit einer definierten Flüssigkeitsmenge zwischen zwei markierten Füllständen. Der Behälter wurde im eingebauten Zustand durch Auslüften vor den Versuchsreihen kalibriert. Eine Überlaufleitung verhindert das Überspeisen des Meßbehälters.

Die an den Kapillaren auftretende Druckdifferenz wird mit U-Rohr-Manometern gemessen. Mit dem Fadenkreuz eines Fernrohres werden die Quecksilbermenisken in den Glasschenkeln der U-Rohre anvisiert und mit einem Nonius der Druckabfall an den Kapillaren abgelesen.

Zur Temperaturkontrolle des Fluids in den Mischkammern und dem Meßbehälter dienen Thermoelemente, die auf die Behälteroberfläche aufgeklebt bzw. in einer Tauchhülse in die Mischkammern eingeführt sind.

Der hydraulische Durchmesser der Kapillaren wurde nach dem Durchflußverfahren mit nachgereinigtem Stickstoff, Reinheitsgrad 99,999%, aus der Ausflußgleichung nach Poiseuille ermittelt.

## 2.3 Umfang der Versuche

Die Untersuchungen des hydraulischen Verhaltens erstreckten sich auf zwei Versuchsreihen bei Raumtemperatur von 25 °C. In der ersten Versuchsreihe wurde eine bereits mit Quecksilber benetzte und amalgamierte Kupferkapillare eingebaut. In der zweiten Versuchsreihe wurden eine blanke Kupfer- und eine Stahlkapillare eingesetzt, um den zeitlichen Einfluß der während des Versuchsbetriebes stattfindenden Amalgamierung des Kupfers auf die Rohrrauigkeit und das Verhalten der turbulenten Strömung zu klären.

### 2.3.1.1 Vergleichsmessungen zwischen Benetzung, Amalgamierung und Nichtbenetzung (1. Versuchsreihe)

Vor dem Einbau in die Versuchsanordnung wurde die Kupferkapillare amalgamiert. Damit lag ein definierter Oberflächenzustand vor. Zur Amalgamierung wurde die blanke Kapillare im ausgebauten Zustand mit Quecksilber aufgefüllt, etwa 70 Stunden stehengelassen und danach entleert.

Vor der Amalgamierung wurde nach dem Durchflußverfahren mit Stickstoff der Durchmesser der blanken Kupferkapillare zu  $D = (1,186 \pm 0,002)$  mm und der Durchmesser der Stahlkapillare zu  $D = (1,235 \pm 0,002)$  mm bestimmt. Unmittelbar nach der Amalgamierung wurde der hydraulische Durchmesser der Kupferkapillare noch einmal überprüft. Er hatte sich um 0,028 mm auf 1,158 mm verringert. Daraus ergibt sich eine mittlere Dicke der entstandenen Amalgamschicht von 0,014 mm. Dies stimmt mit dem Wert von 0,0135 mm, wie er von Tammann und Hinüber [1] angegeben wird und mit eigenen Messungen an Kupferflächproben von 0,010 bis 0,015 mm recht gut überein.

### 2.3.1.2 Ergebnisse und Diskussion

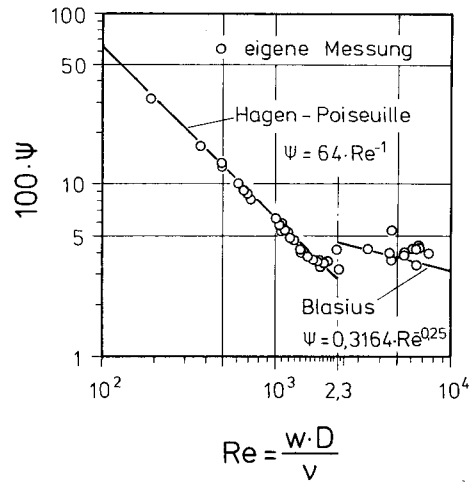
Die gemessenen Rohrreibungszahlen sind in den Bildern 3 und 4 dargestellt. Im Fall der Kupferkapillare (Bild 3)

liegt bei der ersten Messung bei  $Re = 492,2$  unter Zugrundelegung des Viskositätswertes nach [13] für eine Temperatur von  $25\text{ }^\circ\text{C}$  und des Durchmessers des amalgamierten Rohres unmittelbar nach der Amalgamierung ( $D = 1,158\text{ mm}$ ) die gemessene Rohrreibungszahl  $3,3\%$  über dem theoretischen Wert. In den darauffolgenden Messungen liegt im laminaren Bereich die Rohrreibungszahl bei Auswertung mit dem gleichen Durchmesser im Mittel  $8\%$  unter dem theoretischen Wert, wogegen sie in den gleichzeitig durchgeführten Versuchen in der nichtbenetzten Stahlkapillare (Bild 4) mit dem theoretischen Wert sehr gut übereinstimmt ( $\pm 2,2\%$ ). Als Ursache für die Verringerung der gemessenen Rohrreibungszahl an der Kupferkapillare könnte eine Vergrößerung des hydraulischen Durchmessers durch Abtragung der entstandenen Amalgamschicht in Betracht kommen. Werden die Messungen an der Kupferkapillare mit dem Durchmesser der blanken Kapillare ( $D = 1,186\text{ mm}$ ) ausgewertet, zeigen sich Abweichungen von durchschnittlich  $1,6\%$ . Im weiteren Verlauf der Meßreihe tritt eine ständige Abnahme der Rohrreibungszahl auf, wenn die Messungen mit dem Durchmesser der blanken Kapillare ausgewertet werden. Nach rund 70 Stunden Versuchsdauer zeigen sich mittlere Abweichungen bis zu  $-10\%$  vom theoretischen Wert, die sich nach weiteren 70 Stunden bis auf  $-30\%$  vergrößern. Die in Bild 3 eingetragenen Meßwerte sind auf die Durchmesser bezogen, die dem Zeitpunkt ihrer Aufnahme entsprechen, d. h. die jeweils dem Anfang bzw. dem Ende der Meßreihe zuzuordnen sind.

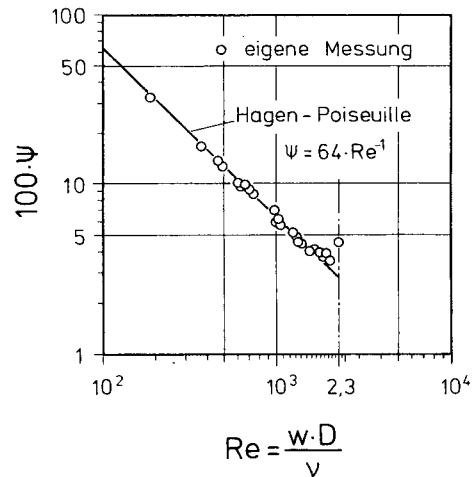
Die gleichzeitig durchgeführten Messungen in der Stahlkapillare zeigen sehr gute Übereinstimmung mit den Werten nach Gl. (1a).

Neben Messungen im laminaren Bereich wurden Messungen im turbulenten Gebiet durchgeführt. Hier belaufen sich bei der Kupferkapillare die Abweichungen von der Blasius-Geraden bei Einsetzen des Durchmessers der blanken Kapillare bis zu  $+25\%$ .

Da die physikalische Aussage von Gl. (3), nach der die dynamische Zähigkeit berechnet werden kann, in Gl. (1a) enthalten ist, kann aus den Ergebnissen an der Stahlkapillare gefolgert werden, daß sich die Zähigkeit des Quecksilbers beim Durchströmen der Kupferkapillare nicht verändert hat. Die laufende Verringerung der Rohrreibungszahl in der amalgamierten Kupferkapillare läßt daher eine ständige Abtragung der gebildeten Amalgamschicht durch die an der Wand angreifenden Scherkräfte vermuten. Um diese Vermutung auf anderem Wege zu bestätigen, wurden die Kapillaren nach einer Versuchszeit von etwa 200 Stunden ausgebaut und der hydraulische Durchmesser nach dem Durchflußverfahren mit Stickstoff nochmals vermessen. Die Stahlkapillare hatte ihren ursprünglichen Durchmesser von  $1,235\text{ mm}$  beibehalten, während er sich bei der Kupferkapillare von anfänglich  $1,186\text{ mm}$  im blanken Zustand zunächst auf  $1,158\text{ mm}$  zusetzte und während der Messungen auf  $1,238\text{ mm}$  erhöhte. Legt man der Auswertung der letzten Messungen



**Bild 3.** Rohrreibungszahl  $\psi$  einer amalgamierten Kupferkapillare bei Benetzung mit zeitlich veränderlichem Durchmesser infolge Amalgamierung;  $L = 1000,0\text{ mm}$  (1. Versuchsreihe)



**Bild 4.** Rohrreibungszahl  $\psi$  der nichtbenetzten rostfreien Stahlkapillare mit  $D = 1,235\text{ mm}$  und  $L = 1000,1\text{ mm}$  (Vergleichsmessung zwischen Kupfer- und Stahlkapillare, 1. Versuchsreihe)

der Versuchsreihe, die kurz vor dem Ausbau der Kapillaren aufgenommen wurden, den Durchmesser zugrunde, der nach dem Ausbau nach dem Durchflußverfahren ermittelt worden ist, so läßt sich das Hagen-Poiseuille-Gesetz auch für die benetzte und amalgamierte Kupferkapillare sehr gut erfüllen. Die Abweichungen der Rohrreibungszahl vom theoretischen Wert der Laminarströmung gehen auf durchschnittlich  $\pm 2,9\%$  zurück und bei den Messungen im turbulenten Bereich auf ca.  $+17\%$ . Dieser Effekt ist jetzt eindeutig dem Einfluß der Rohrrauigkeit durch Amalgamierung zuzuschreiben.

Im turbulenten Bereich sind die Effekte der Durchmesseränderung und Rauigkeit überlagert. Während der Versuchsreihen konnten diese Einflüsse nicht getrennt bei jeder einzelnen Messung untersucht werden, da der Kapillardurchmesser nur zu Beginn und nach Beendigung

der Messungen bestimmt wurde. In einer zweiten Meßreihe wurde daher versucht, den Rauigkeitseinfluß separat zu ermitteln, wozu der zeitlich veränderliche Durchmesser genau bekannt sein muß.

### 2.3.2.1 Zeitlicher Einfluß der Amalgamierung auf die turbulente Strömung (2. Versuchsreihe)

Im Gegensatz zur ersten Meßreihe wurde die Kupferkapillare im blanken Zustand eingebaut. Sie wurde erst während der Versuche allmählich vom Quecksilber amalgamiert. Zur Kontrolle des augenblicklichen Durchmessers wurde nach ein bis zwei Messungen im turbulenten Gebiet eine Messung im laminaren Bereich durchgeführt, aus der nach dem Hagen-Poiseuille-Gesetz unter Annahme des Zähigkeitswertes nach [13] der momentane hydraulische Durchmesser der Kapillare bestimmt wurde. Mit diesem Durchmesser wurden die vorangegangenen Messungen im turbulenten Bereich ausgewertet. Nur auf diese Weise läßt sich der zeitliche Einfluß der Rohrrauigkeit auf die Widerstandszahl hinreichend genau erfassen.

Vor dem Einbau in die Versuchsanlage und nach Beendigung der Meßreihen wurden die Durchmesser der Kupfer- und Stahlkapillaren zur Kontrolle nach dem Durchflußverfahren mit Stickstoff ermittelt. Der Durchmesser der Stahlkapillare betrug unverändert 1,235 mm, der Durchmesser der Kupferkapillare erhöhte sich während des Versuchszeitraumes von 1,181 mm auf 1,248 mm.

### 2.3.2.2 Ergebnisse und Diskussion

In Bild 5 sind die Werte der gemessenen Rohrreibungszahl für die Stahlkapillare eingezeichnet. Wie man an diesem Beispiel deutlich erkennt, lag ein hydraulisch glattes Rohr vor. In Bild 6 sind die Ergebnisse der Kupferkapillare aufgetragen. Bis zu einer Kontaktzeit von ungefähr 40 Stunden stimmen die gemessenen Rohrreibungszahlen mit denen nach dem Blasius-Gesetz berechneten im Mittel auf 1,3% überein. Nach dieser Zeit zeigt sich bereits eine Durchmesseränderung, während sich die Aufrauung der Kapillaroberfläche durch die Korrosion erst schwach bemerkbar macht. Erst nach weiteren 20 Stunden Versuchszeit steigen die Widerstandszahlen an. Ab jetzt nimmt der Rauigkeitseinfluß stetig zu, so daß bei Beendigung der Messungen nach rund 220 Stunden die Rohrreibungszahl rund 70% über der theoretischen liegt. Bemerkenswert ist, daß sich während Standzeiten von mehreren Stunden, in denen die Anlage nicht in Betrieb war, die Kapillare wieder zusetzt. Es bildet sich im Ruhezustand an der Wand eine erneute Amalgamschicht, die den Durchmesser verkleinert.

### 2.4 Vergleich mit den Messungen anderer Autoren

Mit den erzielten Ergebnissen kann das Ergebnis von Tammann und Hinnüber [1], die wahre Zähigkeit von

reinem, flüssigem Quecksilber betrage  $4,931 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m} \cdot \text{sec}$  bei  $13,5^\circ \text{C}$ , nicht bestätigt werden. Selbst nach Umrechnung des Zähigkeitswertes obiger Autoren auf die Temperatur von  $25^\circ \text{C}$  wie bei den eigenen Messungen, ändert sich die Viskosität unter Zugrundelegung des Temperaturkoeffizienten von  $0,0012 \text{ K}^{-1}$ , wie er von Tammann und Hinnüber angegeben wird, nur um ca. 1,25%. Die Autoren gehen davon aus, daß im Fall der Nichtbenetzung das Fluid an der Wand gleitet, was bei konstantem Druckabfall einen größeren Durchfluß zur Folge hätte. Nach Hagen-Poiseuille ist der Viskositätswert der Durchflußmenge umgekehrt proportional. Dadurch lassen die größeren Ausflußmengen bei Nichtbenetzung die Viskosität zu klein erscheinen. Nur im Fall der Benetzung ist nach Meinung der Autoren die Haftbedingung und damit die Voraussetzung zur Bestimmung der Zähigkeit erfüllt.

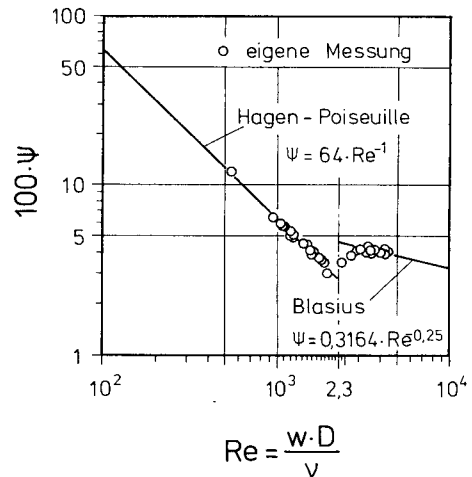


Bild 5. Rohrreibungszahl  $\psi$  in der Stahlkapillare bei Nichtbenetzung mit  $D = 1,235 \text{ mm}$  und  $L = 1000,1 \text{ mm}$  (2. Versuchsreihe)

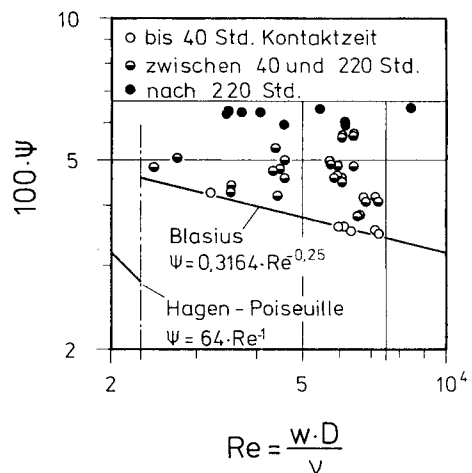


Bild 6. Zeitliche Entwicklung des Einflusses der Amalgamierung der im blanken Zustand eingebauten Kupferkapillare auf die Rohrreibungszahl (2. Versuchsreihe)

Der Interpretation von Tammann und Hinnüber [1] kann nicht zugestimmt werden. Die von ihnen durchgeführten Ausflußversuche können aufgrund der Ergebnisse der eigenen Arbeit in der folgenden Weise gedeutet werden:

1. Durch die Bildung einer hochviskosen Amalgamschicht an der Wand hat sich in den ersten Stunden der Kapillardurchmesser verringert und so bei konstantem Druckabfall eine geringere Ausflußmenge ergeben. Dies täuscht bei Auswertung mit dem ursprünglichen, größeren Durchmesser einen zu hohen Zähigkeitswert vor. Da der Durchmesser der von Tammann und Hinnüber benutzten Kapillare nur 0,4272 mm betrug im Gegensatz zu rund 1,2 mm bei den eigenen Messungen, ergeben sich bei den Messungen der genannten Autoren zwangsläufig zu hohe, „fiktive“ Zähigkeitswerte. Der Einfluß der Durchmesser- verringerung durch die Amalgamschicht ist hier – relativ gesehen – größer. Eine Durchmesser- verringerung von 0,03 mm, was grob der zweifachen Dicke der Amalgamschicht entspricht, würde die Viskosität um etwa 33,8% zu groß erscheinen lassen. Die Abweichungen vom Zähigkeitswert, wie er in Stahl- und Glaskapillaren ermittelt worden ist, ist damit jedoch nur teilweise zu erklären.

2. Entscheidend dürfte folgendes sein: Tammann und Hinnüber arbeiteten mit einer verhältnismäßig geringen Quecksilbermenge (von vielleicht 7,5 kg<sup>1</sup>), die nach Durchlauf gesammelt und wieder verwendet wurde [1]. Daher konnte sich das Quecksilber durch Auflösen mit Kupfer sättigen; der Sättigungsgehalt als Massenverhältnis beträgt 20 ppm bei 20 °C [14]. Unsere Quecksilbermenge betrug etwa 110 kg, so daß (bei etwa derselben Versuchsdauer) eine Sättigung nahezu ausgeschlossen war. Das mit Kupfer gesättigte Quecksilber bei Tammann konnte aber weder das Amalgam, das sich besonders bei Stillstand der Apparatur gebildet hatte, wieder auflösen, noch während des Betriebs neues Kupfer lösen. Der durch Amalgambildung verengte Querschnitt blieb erhalten und konnte möglicherweise durch die stopfende Wirkung eines Breies aus Quecksilber-Kupfer-Kristallen weiter verengt werden (vgl. auch [15a]). Im Gegensatz dazu arbeiteten wir bei unseren Versuchen in gehörigem Abstand von der Sättigungsgrenze des Quecksilbers in einem Hg-Cu-Zustandsdiagramm.

Der Vergleich der eigenen Meßergebnisse bei Benetzung und Nichtbenetzung läßt den Schluß zu, daß auch bei Nichtbenetzung kein Gleiten des Fluids an der Rohrwand auftritt, sondern die Haftbedingung erfüllt ist. Das stellt eine experimentelle Bestätigung der von S. Erk [16] auf theoretischem Weg gefundenen Aussage dar. Ein Einfluß der Amalgamschicht auf die Viskosität ist im Rahmen der Meßgenauigkeit von 3% nicht erkennbar.

Durch die eigenen Meßergebnisse wird vielmehr bestätigt, daß der in der Literatur in Glas- und Stahlkapillaren bisher ermittelte Zähigkeitswert [1, 15] von reinem Quecksilber als verbindlich anzusehen ist.

### 3 Wärmeübergangsmessungen

Als Ursache für das ungewöhnliche Wärmeübergangsverhalten flüssiger Metalle werden in der Literatur

- der Einfluß des hohen Wärmeleitvermögens des Flüssigmetalls und des Rohrwerkstoffes,
- mitgeführte Gasblasen und Gasadsorption
- und ein thermischer Kontaktwiderstand an der Wand

angegeben, der u. a. auf die Nichtbenetzung zurückgeführt wird. Die Messungen von Petukhov, Yushin [17] und Grigull, Tratz [18] bei nichtbenetztem Rohr zeigen die Bedeutung der hohen Wärmeleitfähigkeit der Flüssigmetalle auf die Ausbildung des Temperaturfeldes. Damit ist die Ursache für den merkwürdigen Verlauf des Wärmeübergangskoeffizienten im laminaren Bereich in der Arbeit von Johnson [6] geklärt. In den Arbeiten von [17, 18] wurde die Apparatur vor Versuchsbeginn evakuiert und das Fluid entgast.

Ziel eigener Untersuchungen war die Klärung der Frage nach der Existenz eines thermischen Kontaktwiderstandes an der wärmeübertragenden Fläche. Zur Beantwortung wird ein Vergleich gezogen zwischen den Meßergebnissen bei benetztem, amalgamiertem Rohr und den Messungen anderer Autoren bei Nichtbenetzung.

#### 3.1 Meßmethode

Die Definitionsgleichung für den Wärmeübergangskoeffizienten  $Nu$  lautet:

$$Nu = \frac{\dot{q}_w \cdot D}{\lambda \cdot \Delta T} \quad (5)$$

Bei bekannter Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  des Fluids und der Länge  $L$  des beheizten Rohrabchnittes sind die Meßgrößen die aufgeprägte Wärmestromdichte  $\dot{q}_w$  und eine Temperaturdifferenz  $\Delta T$ , auf die der Wärmeübergangskoeffizient bezogen wird. Bei elektrischer Beheizung des Versuchsrohres berechnet sich die Wärmestromdichte aus dem Produkt der angelegten Spannung  $U$ , der Stromstärke  $I$  im Heizband und der Heizfläche  $D \cdot \pi \cdot L$ . Gl. (5) schreibt sich dann:

$$Nu = \frac{U \cdot I}{\pi \cdot \lambda \cdot L \cdot \Delta T} \quad (6)$$

Gl. (6) stellt die Grundlage zur experimentellen Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten  $Nu$  dar. Zur genauen Ermittlung der Nußelt-Zahl empfiehlt sich, als Bezugsgröße die Temperaturdifferenz aus der Fluidtemperatur in Rohrmitte und der Wandtemperatur zu bilden.

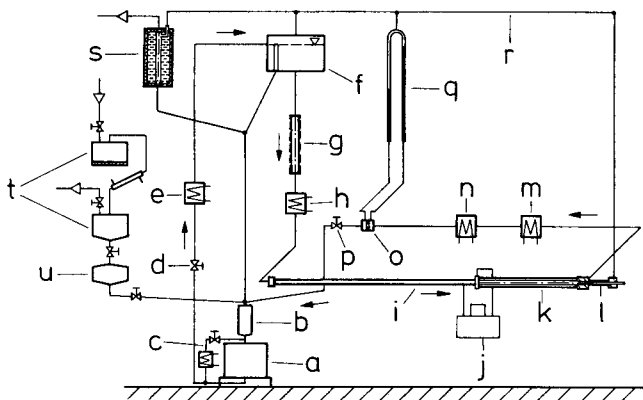
<sup>1</sup> Dies folgt aus der Volumen-Abschätzung der Versuchsanordnung von E. Warburg [15].

Über die radiale Geschwindigkeits- und Temperaturverteilung läßt sich auf die lokale, mittlere Fluidtemperatur umrechnen, die in der Literatur häufig als Bezugstemperatur des Fluids herangezogen wird. Da diese nicht direkt zu messen ist, wurde sie früher häufig durch Interpolation zwischen den Mischkammertemperaturen am Rohrein- und -austritt ermittelt. Dieses Verfahren ist nur eine Näherung, das zu Fehlmessungen führen kann [18], da die Einflüsse aus den Krümmungen des Temperaturfeldes in Mischkammernähe nicht berücksichtigt werden.

### 3.2 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau für die Wärmeübergangsmessungen ist in Bild 7 gezeigt. Es handelt sich genau wie bei den hydrodynamischen Untersuchungen um einen geschlossenen Quecksilberkreislauf, der sich im wesentlichen nur durch das Versuchsrohr, die Vorheizung und die Meßblende zur Durchflußmessung anstelle des Mengenmeßbehälters von dem früher beschriebenen unterscheidet. Alle anderen Anlagenteile sind mit dem Aufbau für die hydraulischen Untersuchungen identisch.

Die stufenlos regelbare Vorheizung *g* bringt das Quecksilber auf das gewünschte Temperaturniveau, bei dem die Messungen durchgeführt werden sollen. Der vorgesehene Wärmetauscher *h* dient zur Feineinstellung und zum Ausgleich von Temperaturschwankungen des Fluids. Nach dem Wärmetauscher tritt das Quecksilber in das Versuchsrohr *i* ein. Hier passiert es zunächst die hydrodynamische Einlaufstrecke und strömt anschließend in den beheizten Rohrabschnitt. Dieser besteht aus dem thermischen Einlauf, der Meßstrecke und der Auslaufstrecke. Die Auslaufstrecke soll die Einwirkung von Störungen aus der Mischkammer auf die ausgebildete Rohrströmung



**Bild 7.** Schematischer Aufbau der Versuchsanlage für die Wärmeübergangsmessungen; *a* Spiralinduktionspumpe; *b* Sammelbehälter; *c* Bypass-Leitung; *d* Drosselventil; *e* Kühler; *f* Hochbehälter; *g* elektr. Vorheizung; *h* Wärmetauscher; *i* Versuchsrohr; *j* Thermostat; *k* Schutzrohr über dem Heizabschnitt; *l* verschiebbliche Temperaturmeßsonde; *m, n* Wärmetauscher für Kühlung und Feintemperierung; *o* Meßblende; *p* Nadeldrosselventil; *q* U-Rohr-Manometer; *r* Quecksilberdampf-Sammelleitung; *s* Kühlfalle; *t* Destillieranlage; *u* Speicherbehälter

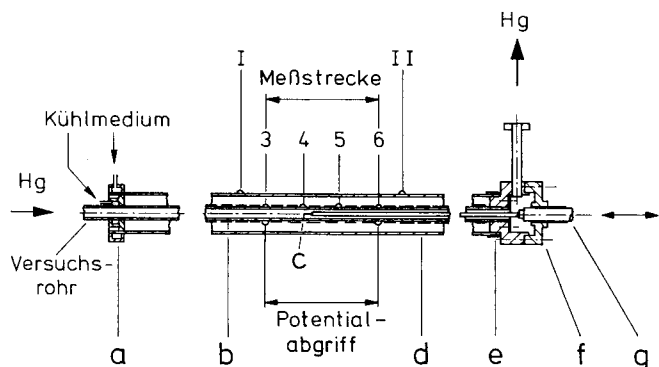
vermeiden. Die Kühler *m, n* temperieren das Fluid auf die Kalibriertemperatur der Meß-Blende *o*. Sie sind an einen Wasserthermostat angeschlossen. Der Druckabfall an der Blende wird am angeflanschten U-Rohr-Manometer *q* abgelesen. Mit dem Nadeldrosselventil *p*, das eine Grob- und Feinregulierung des Durchflusses ermöglicht, wird der gewünschte Mengenstrom durch das Versuchsrohr eingestellt. Nach dem Ventil gelangt das Quecksilber in den Sammelbehälter *b* und von hier zur Spiralinduktionspumpe zurück.

### 3.3 Versuchsrohr

Bild 8 zeigt die Konstruktion des Versuchsrohres. Als Rohrwerkstoff wurde für das Versuchsrohr Kupfer in der Ausführung „hart“ verwendet. Die Werkstoffbezeichnung lautet: Cu-DHP (ISO/R 1430), Werkstoff-Nr. 2.0090. Es handelt sich um ein sauerstofffreies, mit Phosphor desoxidiertes Kupfer mit einem Reinheitsgrad von 99,9% und Phosphorbestandteilen von 0,015–0,04 Massen-%. Der Werkstoff wurde von Quecksilber gut benetzt.

Für alle Flansch- und Anschlußbauteile wurde rostfreier Stahl (Remanit X8CrTi17, Werkstoff-Nr. 1.4510) verwendet. Aus Korrosionsgründen darf zwischen dem Rohrmaterial Kupfer und dem Stahl der Anschlußflansche und sonstigen Bauteilen keine direkte Verbindung bestehen. Es wurde deshalb eine elektrisch isolierende Klebeverbindung gewählt ohne unmittelbaren Kontakt zwischen den beiden Werkstoffen. Im aufzuklebenden Flansch ist in die Bohrung, in der sich das Rohr abstützt, eine Ringnut eingedreht. Senkrecht mündet von der Flanschaußenseite in diese Nut eine 3 mm-Bohrung, durch die von außen der Zweikomponentenklebstoff in die Ringnut eingebracht wurde.

Es wurde ein Versuchsrohr gebaut, mit dem die lokale Fluidtemperatur in Rohrmitte gemessen werden kann. Zu diesem Zweck wird entgegen der Strömungsrichtung eine in eine Sonde *c* eingebaute Temperaturmeßstelle zentrisch über dem Meßstreckenabschnitt verschoben. Auf diese



**Bild 8.** Versuchsrohr mit Temperaturmeßstellen und Potentialabgriff; *a* Wärmetauscher; *b* Heizwicklung; *c* Temperaturmeßsonde; *d* Schutzrohr; *e* Schutzheizung; *f* Mischkammer; *g* Führungskolben



Weise läßt sich auch der axiale Temperaturverlauf im Quecksilber bestimmen. Neben der Temperatur des Fluids wird die lokale Wandtemperatur des Rohres an acht Meßstellen 1 bis 8 über dem Heizabschnitt gemessen. Durch genaue Positionierung der Sondenmeßstelle gegenüber den Wandtemperaturmeßstellen 3 bis 6, welche die Meßstrecke charakterisieren, werden vier Meßebenen zur Bestimmung der Nußelt-Zahl definiert.

Für die Verschiebung der Temperaturmeßsonde wurde eine mechanische Verstellvorrichtung konstruiert. Mit der von Hand betätigten Gewindespindel wird der an den Scherenmechanismus angeflanschte, gehärtete und geschliffene Führungskolben in einem Präzisionsstahlrohr in Längsrichtung verfahren. In diesen Führungskolben ist die Meßsonde eingeschweißt. Am Teller ist eine Steckverbindung für die elektrischen Zuleitungen der Temperaturmeßsonde angeordnet. Mittels eines am Auflager befestigten Maßstabes, auf dem die genauen Abstände der vier Wandtemperaturmeßstellen 3 bis 6 gekennzeichnet sind, und eines am Teller angebrachten Meßstriches läßt sich die Sonde auf die vier Meßebenen fixieren.

Am Eintritt in den beheizten Abschnitt sorgt der an einem Ölthermostat angeschlossene Wärmetauscher *a* für eine definierte thermische Eintrittsbedingung. Die Beheizung des Versuchsrohres erfolgt mit einer Ohmschen Widerstandsheizung *b*, die für eine maximale Leistung von 250 W ausgelegt ist. Sie besteht aus einem 6,0 mm breiten und 0,15 mm starken Konstantanband mit einem spezifischen Widerstand von  $0,899 \Omega/\text{m}$ . Das Heizband ist auf einer Länge von  $(1000 \pm 0,2)$  mm um das Rohr gewickelt. Zwei geteilte, verschraubte Messingklötzchen klemmen das Heizband unter leichter Vorspannung auf dem Rohr fest und sollen ein Lockern durch das Aufheizen verhindern. An ihnen sind die Litzen der elektrischen Zuleitungen für die Stromversorgung befestigt. Die elektrische Isolierung zwischen der Kupferoberfläche und der Heizwicklung übernimmt ein bei  $100^\circ\text{C}$  auf das Rohr aufgeschrumpfter Kunststoffmantel. Zur Kontrolle der konstanten Wärmestromdichte über dem gesamten Heizabschnitt sind vier elektrische Potentialabgriffe vorgesehen.

Um Wärmeverluste im beheizten Teil des Versuchsrohres zu vermeiden, ist dieser mit einem Messingschutzrohr *d* (Außendurchmesser 63,0 mm, Wandstärke 1,5 mm) umgeben. Er ist zum Temperaturabgleich mit dem Versuchsrohr am einen Ende mit dem Kühler *a* und am anderen Ende mit der Schutzheizung *e* versehen. Der Ringspalt zwischen den beiden Rohren ist mit Isolierwolle ausgefüllt. Zur Kontrolle des axialen Temperaturverlaufs im Schutzrohr sind die mit römischen Ziffern im Bild 8 gekennzeichneten Meßstellen vorgesehen.

### 3.4 Meßtechnik

Zur kontinuierlichen Mengenstrommessung wurden Blenden mit 0,8, 1,4 und 2,4 mm Bohrungsdurchmesser ver-

wendet. Vor dem Einbau in das Blendengehäuse wurden die Blenden kalibriert. Der auftretende Druckabfall wurde an dem am Blendengehäuse angeflanschten U-Rohr-Manometer abgelesen.

Für die Temperaturmessungen wurden kalibrierte Thermistoren der Firma Fenwal Electronics, Massachusetts, verwendet.

Der mit der Ohmschen Widerstandsheizung aufgeprägte Wärmestrom wurde durch Messung der Stromstärke *I* und des Spannungsabfalls *U* an der Heizwicklung ermittelt. Zur Datenerfassung war ein Digitalvoltmeter mit integriertem Meßstellenumschalter und Drucker der Firma Esterline Angus eingesetzt. Dieses Gerät hatte eine Auflösungsgenauigkeit von  $10^{-3}$  mV. Damit konnten die Temperaturen auf 0,01 K aufgelöst werden. Bei jeder Einzelmessung des Wärmeübergangskoeffizienten wurden die Temperaturen aller Meßstellen sowie die vier Potentiale an der Heizwicklung ausgedruckt.

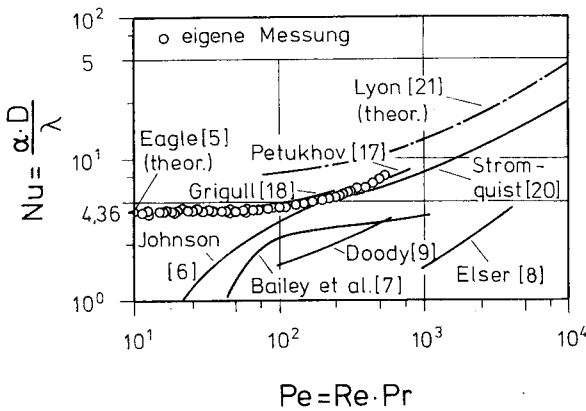
### 3.5 Versuchsdurchführung

Zunächst wurde die Anlage evakuiert und das Flüssigmetall unter Vakuum destilliert. Während des gesamten Versuchsbetriebes war die Apparatur an den Vakuumpumpstand angeschlossen, um die Bildung von Oxidationsprodukten zwischen Quecksilber und Luftsauerstoff durch unvermeidliche Leckagen an der Apparatur zu unterbinden. Danach wurde die Spiralinduktionspumpe eingeschaltet, am Stelltrafo die Förderleistung und mit dem Nadeldrosselventil *p* der Mengenstrom im Versuchsrohr eingestellt, der über den Druckabfall an der Blende zu kontrollieren war. Anschließend wurde die Temperaturmeßsonde auf die jeweilige Meßebene positioniert, die Vorheizung, die Versuchsrohr- und Schutzheizung sowie die Wärmetauscher in Betrieb genommen. Die Raumtemperatur wurde mit einem Quecksilberthermometer überwacht und mit einem Heizlüfter geregelt. War der stationäre Zustand aller Meßgrößen eingetreten, wurden die Meßgrößen aufgezeichnet und daraus der Wärmeübergangskoeffizient berechnet. Bei jeder festen Einstellung der Meßparameter wurden zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit drei bis vier Messungen in zeitlichen Abständen von zehn Minuten durchgeführt.

Neben der Bestimmung der Wärmeübergangskoeffizienten wurden die axialen Temperaturverläufe im Quecksilber überprüft, die aus vier Einzelmessungen ermittelt wurden. Bei diesen Messungen war insbesondere darauf zu achten, daß sich die Temperaturen des Versuchs- und Schutzrohres nicht änderten.

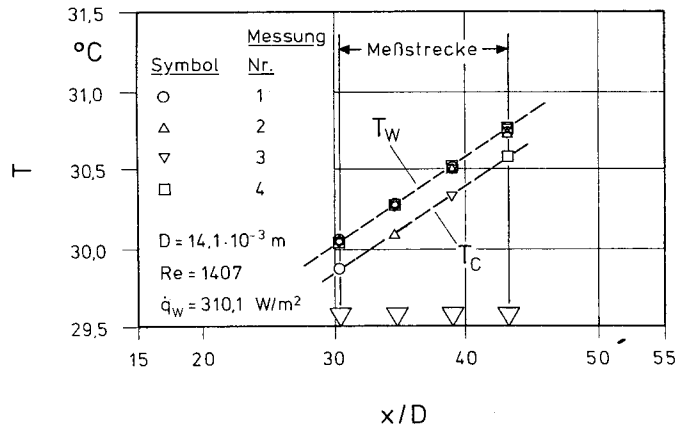
### 3.6 Ergebnisse und Diskussion

Die gemessenen Wärmeübergangskoeffizienten *Nu* sind in Abhängigkeit von der Péclet-Zahl *Pe* im Bild 9 dargestellt. Daneben sind zum Vergleich die Messungen anderer Autoren bei benetztem und nichtbenetztem Rohr eingetragen. In dieser Darstellungsweise ist die Nußelt-Zahl *Nu*



**Bild 9.** Vergleich der eigenen Messungen mit den Messungen und theoretischen Untersuchungen anderer Autoren;

	Benetzung	Fluid
Johnson [6]	Benetzung	Pb-Bi
Bailey et al. [7]	Nichtbenetzung	Hg
Elser [8]	Nichtbenetzung	Hg
Doody [9]	Nichtbenetzung	Hg
Petukhov [17]	Nichtbenetzung	Hg
Grigull [18]	Nichtbenetzung	Hg
Stromquist [20]	Benetzung	Hg-Na
eigene Messung	Benetzung	Hg



**Bild 10.** Axialer Verlauf der Wandtemperatur  $T_w$  und der Quecksilbertemperatur  $T_c$  in Rohrmitte (Beheizung mit konstanter Wärmestromdichte)

auf die Differenz aus Wand- und lokaler Mischtemperatur bezogen. Zu diesem Zweck wurde die mit der Sondenmeßstelle ermittelte, lokale Fluidtemperatur auf die lokale Mischtemperatur umgerechnet. Im laminaren Bereich wurde hierzu die Beziehung von Eagle und Ferguson [5] und im turbulenten Gebiet sowie im Übergangsbereich das von Lykoudis [19] angegebene numerische Verfahren zugrundegelegt.

Bild 10 zeigt an einem Beispiel den gemessenen Temperaturverlauf des Versuchsrohres und des Quecksilbers in Rohrmitte. Die Temperaturgradienten und folglich die Temperaturdifferenz  $\Delta T_c$  zwischen Wand und Rohrachse sind konstant, wie es die Theorie für Beheizung mit konstanter Wärmestromdichte voraussetzt.

Die experimentell ermittelten Wärmeübergangskoeffizienten stimmen im laminaren Bereich bis  $Pe \sim 60$  gut mit der theoretischen Lösung nach Eagle und Ferguson [5] überein. Sie zeigen eine mittlere Abweichung von 1,7% gegenüber der theoretischen  $Nu$ -Zahl von 4,364. Der für Laminarströmung gültige Wert wurde bis zu  $Pe$ -Zahlen von 70 gemessen. Ab hier ist ein leichter Anstieg erkennbar, den die einsetzende Turbulenz bedingt. Die Streuung der Meßwerte liegt zwischen  $Pe = 70$  und 170 bei  $\pm 5\%$ . Zwischen  $Pe = 170$  und 300 nimmt die Streubreite bis auf  $\pm 10\%$  zu. Bei größeren  $Pe$ -Zahlen nimmt hingegen die Streuung wieder auf  $\pm 5\%$  ab. Dieses Verhalten ist folgendermaßen zu erklären:

Ab einer bestimmten Strömungsgeschwindigkeit sind die Wandscherkräfte groß genug, um die haftende Amalgamschicht abzutragen und gleichbleibende Oberflächenbedingungen zu schaffen. Damit lassen sich besser reproduzierbare Meßergebnisse erzielen. Gerade im Übergangsbereich von laminarer zu turbulenter Strömung spielt die Oberflächenrauigkeit eine wichtige Rolle für das Einsetzen der Turbulenz und die Verbesserung des Wärmeübergangs. Die Streuung der Meßwerte kann auf die zunehmende Rauigkeit bei fortschreitender Amalgamierung zurückgeführt werden, da die Streubreite größer ist, als der Meßunsicherheit von 5% entspricht.

### 3.7 Vergleich mit anderen Autoren

Die beste Übereinstimmung der Messungen zeigt sich mit den Arbeiten von Grigull, Tratz [18] und Petukhov, Yushin [17] bei Nichtbenetzung und Stromquist [20] bei Benetzung. Da Stromquist im gesamten Meßbereich die Streuung  $\pm 10\%$  nicht unterschreitet, liegen die eigenen Meßwerte bis zu  $Pe$ -Zahlen von 500 in diesem Streuband. Die Messungen von Grigull, Tratz sind für einen Vergleich besonders geeignet, da diese Autoren den Wärmeübergangskoeffizienten nach dem gleichen Meßverfahren ermittelt haben, wie es in der eigenen Arbeit angewandt wurde. Es liegen mit Ausnahme des Benetzungszustandes dieselben Randbedingungen vor. Im Gegensatz zu dieser Arbeit, in der ein Ansteigen des Wärmeübergangskoeffizienten ab  $Pe \sim 55$  zu beobachten ist, steigt  $Nu$  in der vorliegenden Arbeit erst ab  $Pe \sim 70$  an.

Die von der klassischen Lyonschen Gleichung [21]

$$Nu = 7 + 0,025 \cdot Pe^{0,8} \tag{7}$$

vorausgesagten Werte für den Wärmeübergangskoeffizienten im turbulenten Gebiet werden nicht bestätigt. Bei  $Pe \sim 100$  weichen die eigenen Meßwerte bis zu 74% und bei  $Pe \sim 550$  bis zu 49% von dieser Gleichung ab. Die Übereinstimmung mit dem theoretischen Wärmeübergangskoeffizienten von Eagle und Ferguson [5] im laminaren Bereich ist hingegen sehr gut. Die mittlere Abweichung beträgt 1,7%.

Im Rahmen der Meßunsicherheit zeigt sich durch Amalgamierung, Benetzung und Lösung von Kupfer im

Quecksilber kein Unterschied im Vergleich zum Wärmeübergang bei Nichtbenetzung. Eine nach Beendigung der Meßreihe durchgeführte chemische Analyse des Versuchsfluids ergab einen Cu-Gehalt von 6 ppm und lag somit weit unter der Sättigungsgrenze.

#### 4 Schlußbemerkung

In den durchgeführten Versuchsreihen konnte kein anomales hydrodynamisches und thermisches Verhalten festgestellt werden. Sowohl bei Benetzung als auch bei Nichtbenetzung läßt sich der Druckabfall bei laminarer Rohrströmung von Quecksilber durch das Hagen-Poiseuille-Gesetz und der Wärmeübergang durch die Lösung nach Eagle und Ferguson beschreiben. Schwierigkeiten bereitet allerdings bei Rohren sehr kleiner Nennweite die richtige Erfassung des hydraulischen Durchmessers, der sich durch die Amalgamierung stark verändert.

Die Meßergebnisse der Untersuchungen über das hydraulische Verhalten liefern den experimentellen Beweis, daß auch im Fall einer nichtbenetzten Oberfläche das Fluid haftet und nicht gleitet. Die Viskosität kann in nichtbenetzten Kapillaren richtig gemessen werden, da auch hier die geforderten Randbedingungen erfüllt sind. Bei Benetzung benetzter, amalgamierter Kapillaren wirkt Quecksilber erodierend. Die daraus folgenden Durchmesseränderungen sind schwer zu kontrollieren. Derartige Viskosimeter sind daher zu vermeiden.

Die Wärmeübergangsmessungen zeigen einen stetigen Übergang der Nußelt-Zahl vom laminaren zum turbulenten Strömungsbereich. Der Vergleich der Meßergebnisse bei Benetzung, Amalgamierung und Nichtbenetzung zeigt keinen Einfluß des Wandkontaktes und der hohen Oberflächenspannung. Ein thermischer Kontaktwiderstand, wie er häufig bei Nichtbenetzung angenommen wird, wurde nicht gefunden. Das steht im Einklang mit dem Verhalten von normalen Flüssigkeiten mit Prandtl-Zahlen größer oder gleich eins. Die bei Amalgamierung gemessenen höheren Wärmeübergangskoeffizienten im turbulenten Bereich gegenüber denen der Messungen bei Nichtbenetzung sind durch den zunehmenden Rauigkeitseinfluß zu erklären.

#### Literatur

1. Tammann, G.; Hinnüber, J.: Die innere Reibung von Quecksilber. *Z. anorg. Chemie* 167 (1927) 230–236
2. Hlavac, P. J.; Nimmo, B. G.; Dwyer, O. E.: Experimental study of effect of wetting on turbulent flow of mercury in annuli. *Int. J. Heat Mass Transfer* 15 (1972) 2611–2631
3. Johnson, H. A.; Hartnett, J. P.; Clabaugh, W. J.; Fried, L.: Orifice-metering coefficients and pipe friction factors for the turbulent flow of lead-bismuth eutectic. *Trans. ASME* 79 (1957) 1079–1084
4. Fleming, I. K.; Molloy, N. A.; McCarthy, M. J.: Mercury flow in metallic conduits under nonwetting and amalgamating conditions. *Nature Physical Science* 240 (1972) 69–71

5. Eagle, A.; Ferguson, R. M.: On the coefficient of heat transfer from the internal surface of tube walls. *Proc. Roy. Soc. (A)* 127 (1930) 540–566
6. Johnson, H. A.; Hartnett, J. P.; Clabaugh, W. J.: Heat transfer to lead-bismuth and mercury in laminar and transition pipe flow. *Trans. ASME* 76 (1954) 513–517
7. Bailey, D. L. R.; Cope, W. F.; Watson, G. G.: Heat transfer to mercury. *Mech. Eng. Research Lab. East Kilbride (Glasgow), Heat Div. Paper Nr. 14* (1952)
8. Elser, K.: Wärmeübergangsmessungen an Quecksilber. *Schweizer Archiv angew. Wiss.* 14 (1948) 330–336
9. Doody, T. C.; Younger, A. H.: Heat transfer coefficients for liquid mercury and dilute solutions of sodium in mercury in forced convection. *Preprints of Papers for Heat Transfer Symp. at 44. Annual Meeting, American Inst. of Chem. Eng. New York* (1951) 77–98
10. Wolf, K. L.: Tropfen, Blasen und Lamellen oder von den Formen flüssiger Körper. Springer Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, *Verständliche Wissenschaft Bd. 97*, 1968
11. Tammann, G.; Staßfurth, T.: Über Kupfer- und Silberamalgame. *Z. anorg. Chem.* 143 (1925) 357
12. Tratz, H.: Druckabfall und Wärmeübergang bei der laminaren und turbulenten Rohrströmung von Quecksilber. *Bericht Nr. 6/1967, Institut f. Techn. Thermodynamik, TH München*
13. Schmücker, H.: Sieden von Quecksilber im senkrechten Rohr bei Zwangskonvektion und niedrigen Drücken. *Dissertation, TU München* 1974
14. Jangg, G.; Palman, H.: Die Löslichkeit verschiedener Metalle in Quecksilber. *Z. Metallkunde* 54 (1963) 364–369
15. Warburg, E.: Über den Ausfluß des Quecksilbers aus gläsernen Capillarröhren. *Pogg. Ann.* 140 (1870) 367
- 15a. Bingham, E. C.; Thompson, Th. R.: The fluidity of mercury. *J. Amer. Chem. Soc.* 50 (1928) 2878–2883
16. Erk, S.: Unsere Kenntnis der Zähigkeit von Quecksilber. *Zeitschrift für Physik* 47 (1928) 886–894
17. Petukhov, B. S.; Yushin, A. Ya.: Heat exchange during liquid metal flow in the laminar and transition regions. *Technical Physics, Sov. Physics – Doklady*, 6, No. 2 (1961) 159–161
18. Grigull, U.; Tratz, H.: Wärmeübergang an Quecksilber bei laminarer und turbulenter Rohrströmung. *Wärme-Stoffübertrag.* 1 (1968) 61–71
19. Lykoudis, P. S.; Touloukian, J. S.: Heat transfer in liquid metals. *Trans. ASME* 80 (1958) 653–666
20. Stromquist, W. K.: Effect of wetting on heat transfer characteristics of liquid metals. *Department of Chem. Engineering, AEC Contract At-(40-1)-1310 Report, March 1953*
21. Lyon, R. N.: Liquid metal heat transfer coefficients. *Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, Chem. Engineering Progress* 47 (1951) 75–79

Dr. Ing. B. Sturm  
jetzt TÜV Bayern e.V.  
Postfach 21 04 20  
Westendstraße 199  
D-8000 München 21

Dr. Ing., Dr. Ing. e.h. U. Grigull  
em. o. Professor  
Technische Universität München  
Postfach 20 24 20  
Arcisstraße 21  
D-8000 München 2

Dr. Ing. H. Schmücker  
jetzt Max-Planck-Institut  
für Physik und Astrophysik  
Werner Heisenberg-Institut für Physik  
Föhringer Ring 6  
D-8000 München 40

Der erstgenannte Verfasser dankt der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Bereitstellung der finanziellen Mittel zur Durchführung der Forschungsarbeit.

Eingegangen am 16. Januar 1984