

**Über eine experimentell beobachtete Erscheinung  
an Wirbelringen bei ihrer translatorischen Bewegung  
in wirklichen Flüssigkeiten<sup>1)</sup>**

**Von Carl-Heinz Krutzsch**

(Mit 33 Abbildungen)

**Einleitung**

Anlässlich einer mir von Prof. Tomaschek vorgeschlagenen Untersuchung an Wirbelringen gelang es durch die Besonderheit der angewendeten Färbemethode eine neuartige Erscheinung an Wirbelringen zu beobachten, die in dem Auftreten von Kröpfungen der Wirbelringseele und von Instabilitätsgebieten der Ringe bestehen. Kurze Hinweise auf diese Erscheinungen sind bereits vom Verf. veröffentlicht worden<sup>2)</sup>. Die vorliegende Arbeit gibt eine umfassende Darstellung der beobachteten Erscheinungen insbesondere auch nach der quantitativen Seite und einen Versuch der Deutung der Vorgänge.

**Historisches**

In der Literatur finden sich nur ganz kurze Angaben, welche vielleicht mit den hier beschriebenen Erscheinungen zu tun haben. P. Czermak<sup>3)</sup> schreibt, daß er bei seinen durch Böllerschüsse erzeugten Wirbelringen scheinbare Schwingungen in der Peripherie und regelmäßige Abteilungen im Ring beobachtet hätte. Eine nähere Beschreibung der Vorgänge ist aber nicht gegeben. A. Indra<sup>4)</sup>, der Wirbelringe mit dem Rauchkasten erzeugte, gibt an, daß der Ring nach einiger Laufzeit scheinbar für einen kurzen Augenblick stehen bliebe, um dann mit größerer Anstrengung weiterzulaufen.

1) D 88.

2) C.-H. Krutzsch, Phys. Ztschr. **37**. S. 598. 1936; Ztschr. f. angew. Math. u. Mech. **16**. S. 352. 1936. Ein Film über die Erscheinungen wurde ferner vorgeführt auf der 21. Tagung des Gauvereins Thüringen-Sachsen-Schlesien der Deutschen Physikalischen Gesellschaft am 6. und 7. Juni 1936 zu Halle a. d. S. Ein zweiter Film wurde anlässlich eines Vortrags in der Hauptversammlung der Gesellschaft für angew. Math. u. Mech. in Dresden 1936 vorgeführt.

3) P. Czermak, Wiener Berichte 109 IIa. S. 878. 1900.

4) A. Indra, Wiener Berichte 110 IIa. S. 335. 1901.

**Aufbau der Versuchsanordnung**

Die Versuche wurden meistens in Wasser ausgeführt, da die Bewegungsvorgänge in Wasser bei gleichen Anfangsgeschwindigkeiten langsamer verlaufen als in der Luft. Die Beobachtung wurde auf diese Weise erleichtert.

Die Versuchsanlage besteht aus einem Wassertrog mit den Innenmaßen  $200 \times 40 \times 45$  cm und einem Rohr, das durch die Mitte einer Stirnfläche des Troges ragt. Der Trog ist oben offen und an vier Seiten mit Glasscheiben versehen. Die Stirnseite, durch die das Rohr hindurchragt, besteht aus Glas und Metall (Abb. 1 und 2). Außerdem wurde ein zweiter Trog verwendet mit den Maßen  $80 \times 30 \times 35$  cm, der ebenso gebaut ist wie der erste Trog. Das

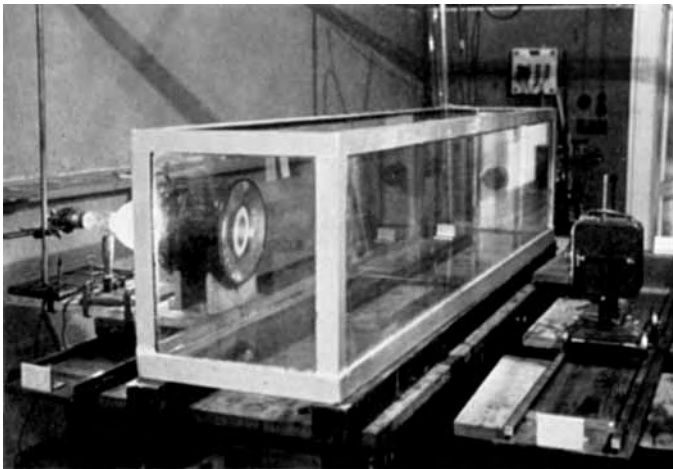


Abb. 1. Der Wassertrog mit der Filmaufnahmeapparatur

Rohr, das in den Trog hineinragt, ist auswechselbar. Es wurden bei den Versuchen vier Rohre benutzt, die folgende Innendurchmesser besitzen:

Rohr 1:	7,6 cm	Durchmesser
Rohr 2:	3,0 cm	„
Rohr 3:	2,0 cm	„
Rohr 4:	1,5 cm	„

In dem Rohr befindet sich ein Kolben, mit dem man die Wassermasse aus dem Rohr ausstoßen kann. Der Kolben muß möglichst wasserdicht ausgeführt sein, damit keine Störung vor dem Versuch die Wirkung der unten beschriebenen besonderen Färbung in Frage stellt.

Um dem Kolben eine genau definierte Stoßlänge und Stoßgeschwindigkeit reproduzierbar erteilen zu können, greift an der Kolbenstange eine Zahnstange an, die mit einem Getriebe von einem Motor in Bewegung gesetzt wird. Zur Messung der Kolbengeschwindigkeit drehte sich unter der Kolbenstange eine Trommel, die mit Registrierpapier versehen wurde. Ein Schreibstift auf der Kolbenstange zeichnete die Weg-Zeitkurve der Kolbenbewegung auf. Die Geschwindigkeit der Registriertrommel wurde dabei durch einen Synchronmotor konstant gehalten (Abb. 2).

Zur Festlegung der Beobachtungen und zu Meßzwecken war die Aufnahme von photographischen Bildern und Filmen notwendig. Dabei wurden zwei Aufnahmerichtungen besonders bevorzugt, in Richtung senkrecht zur translatorischen Bewegungsachse des Wirbelrings und in Richtung der Verlängerung der Bewegungsachse. Bei Aufnahmen senkrecht zur Bewegungsrichtung des Rings wurde der Aufnahmeapparat auf einen Wagen gesetzt, der seitlich am Trog auf Schienen entlangläuft. Auf der anderen Seite des Troges befand sich ein Kondensator ebenfalls auf einer Schienenbahn. Der Kondensator

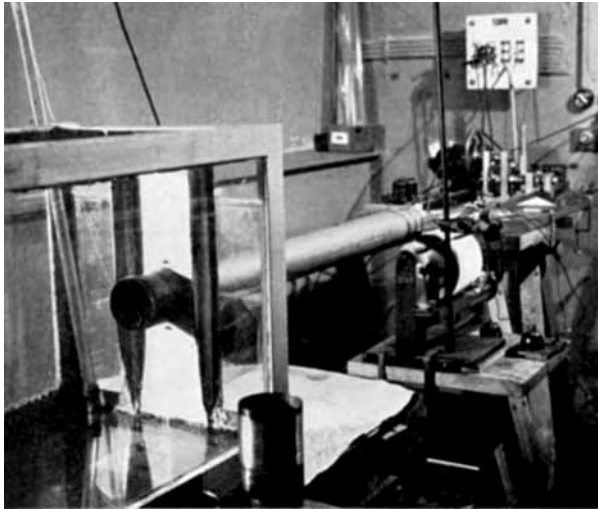


Abb. 2. Die Rohrseite des Troges mit dem Getriebe und der Kolbenstoß-Meßtrommel

konzentrierte das Licht einer gut mattierten 500 Watt Birne durch den Trog auf den Aufnahmeapparat. Der Wirbelring wurde in der Mitte eines Fadenkreuzes im Sucher festgehalten, d. h. der Aufnahmeapparat und der Kondensator mit Lampe wurden parallel zur translatorischen Bewegungsachse des Wirbelrings mit gleicher Geschwindigkeit verschoben bis der günstigste Augenblick der Aufnahme gekommen war. Durch diese Anordnung wurde eine sehr große Tiefenschärfe erreicht, da die Blende bei kurzer Belichtungszeit klein gehalten werden konnte. Die meisten Aufnahmen wurden mit Blende 22 bei einer Belichtungszeit von  $\frac{1}{100}$  Sek. hergestellt. Die Messung der translatorischen Geschwindigkeit der Wirbelringe wurde prinzipiell ebenso ausgeführt, nur daß der Photoapparat durch einen Normalfilmapparat ersetzt wurde. Im Trog befand sich dabei noch eine Meßplatte, die über den Ringen angebracht war und mit aufgenommen wurde (Abb. 28). Um Fehler durch den unregelmäßigen Ablauf der Feder zu vermeiden, wurde das Filmgerät mit einem Synchronmotor gekuppelt. Die Bildzahl wurde mit 1 Bild in 1,5 Sek. sehr klein gewählt, da es sich zeigte, daß zur Festlegung der Weg-Zeitkurve der Wirbelringe diese Anzahl der Meßpunkte völlig genügte. Schwieriger sind die Aufnahmen in der Bewegungsrichtung der Wirbelringe.

Sie wurden so ausgeführt, daß jeweils nach der Erzeugung eines Ringes ein Spiegel unter  $45^\circ$  in die Trogflüssigkeit gesenkt wurde. Dadurch konnte ebenfalls von der Seite aus aufgenommen werden. Die Schienenbahn mit dem Aufnahmegerät lief dann seitlich auf den Trog zu. Vor der Aufnahme muß jedoch beachtet werden, daß ein Teil des Lichtweges, der sich bei Bewegung

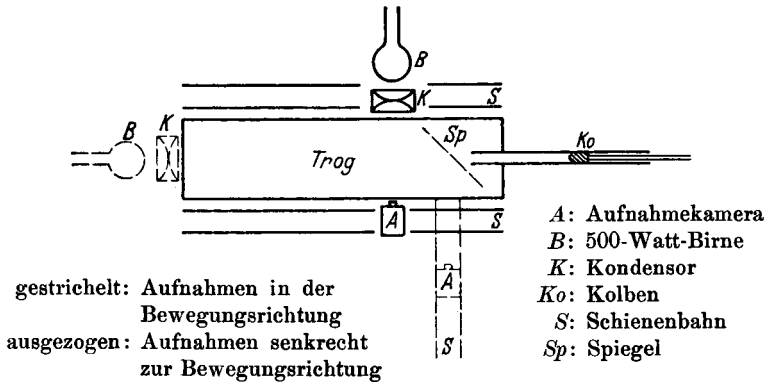


Abb. 3. Die schematische Anordnung für photographische und Filmaufnahmen

des Ringes vergrößert, im Wasser verläuft. Der Aufnahmeapparat wurde also mit  $\frac{3}{4}$  der Ringgeschwindigkeit verschoben. Die Beleuchtung erfolgte von der Stirnseite des Troges in Verlängerung der Achse der Bewegungsrichtung her.

#### Die spezielle Methode der Färbung

Um den Wirbelring sichtbar zu machen, muß ein Farbstoff verwendet werden, der entweder den gesamten Ring oder nur einzelne Schichten des Ringes gegenüber der durchsichtigen Umgebung hervorhebt. Es ist allgemein üblich gewesen, den Ring im ganzen ohne Schichtbildung zu färben. Es wurde also die gesamte im Rohr oder im Rauchkasten enthaltene Materie gefärbt. Der so erzeugte Ring zeigt dann über den ganzen Ringumfang eine kontinuierliche Farbverteilung. Vorgänge im Innern des Ringes sind bei derartigen Färbemethoden nicht beobachtbar.

Um Einzelheiten im Wirbelring festzustellen, wurde die im folgenden angegebene Methode verwendet, die tatsächlich ganz neuartige Einblicke in den Bewegungsverlauf ermöglicht.

Es erwies sich am besten, wenn man eine konzentrierte Farbstoffalkohollösung auf den Rohrrand am Rohrausfluß aufstrich und trocknen ließ. Beim Stoß mit dem Kolben wird ein Teil des Farbstoffes gelöst und die Wirbelachse oder Wirbelseele besonders stark gefärbt, da sich die Trennungsschicht, die zur Erzeugung des Wirbelringes führt, an dem scharfrandigen Rohrausfluß bildet.

Die Außenschichten weisen eine schwächere Färbung auf. Zu erwähnen ist dabei, daß die Farbe nicht kontinuierlich über die

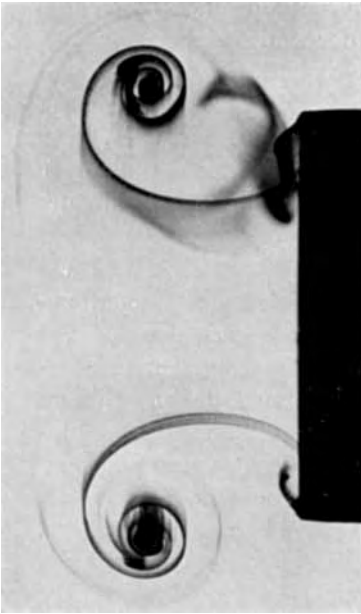


Abb. 4. Die Entstehung eines Wirbelrings im Schnitt



Abb. 5. Die Entstehung eines Wirbelrings im Schnitt, etwas später aufgenommen

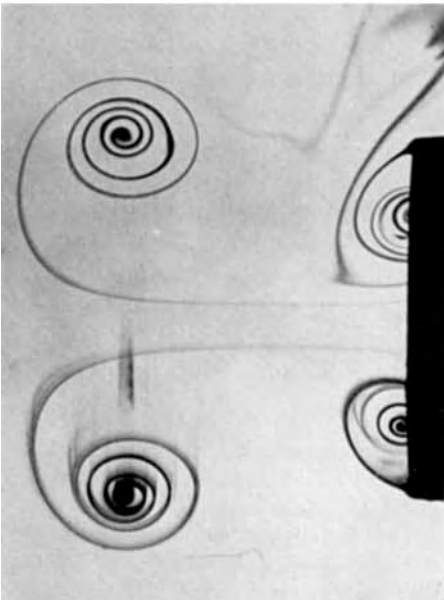


Abb. 6. Die Entstehung eines Wirbelrings im Schnitt mit gut ausgebildetem Sekundärwirbelring

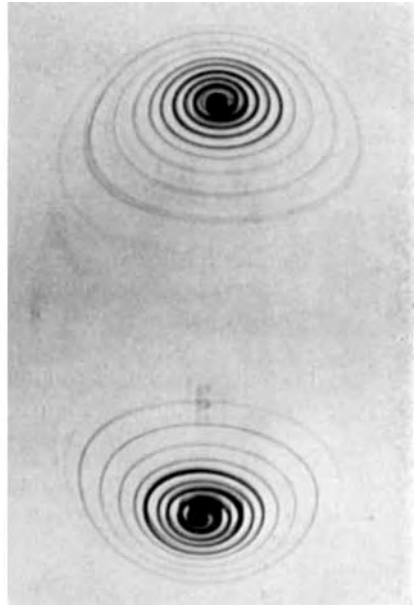


Abb. 7. Ein normaler ungestörter Wirbelring im Schnitt

gesamte Außenschicht verteilt ist, sondern daß ebenfalls Schichten zu erkennen sind. Man kann die Bildung der schichtweisen Färbung sehr gut feststellen, wenn man ein Schnittbild des Wirbelringes herstellt. Die Färbung des Ringes nur in der Schnittebene ist dabei ebenso einfach wie die Färbung des gesamten Ringes. Bei Erzeugung eines gefärbten Schnittes wird der Rohrrand nur oben und unten mit Farbstoff bestrichen, so daß der Ring außerhalb der Schnittebene unsichtbar bleibt. Wie die Abb. 4 zeigt, entsteht dabei eine Farbspirale, deren Mittelpunkt stärker gefärbt ist. Diese

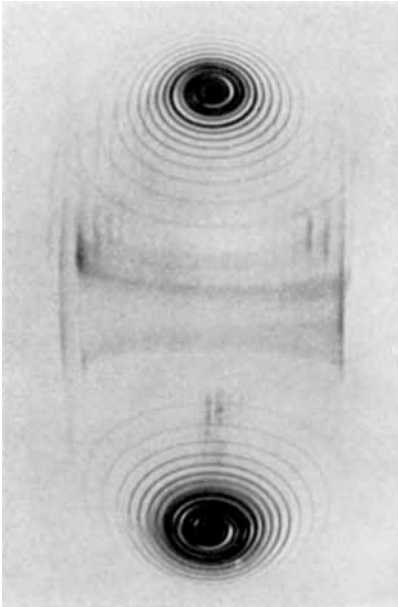


Abb. 8. Ein normaler ungestörter Wirbelring im Schnitt, etwas später aufgenommen

Spirale zieht sich enger zusammen wie aus den Abb. 5 und 6 zu ersehen ist. Außerdem ist auf diesen Bildern noch die Bildung des sekundären Wirbelringes zu beobachten, der gerade im Begriffe ist, in das Rohr hineinzuwandern. Die Bildung des sekundären Wirbelringes ist dabei nicht zwangsläufig, sondern seine Entstehung ist abhängig von der Art des Stoßes. Durch die Ausbildung der paraboloidförmigen Geschwindigkeitsverteilung im Rohr tritt bei starker Verzögerung der Kolbenbewegung eine Rückströmung von Flüssigkeit an der Rohrwandung auf. Die Aufnahmen 7 und 8 zeigen nun Ringe, die sich bereits vom Rohr gelöst haben und deren Spiralen schon viel enger zusammengezogen sind, da die

jeweils weiter innen liegenden Schichten bis zum Wirbelkern eine größere Geschwindigkeit aufweisen.

Zur Färbung wurden je nach dem Verwendungszweck verschiedene Farbstoffe benutzt. Für die Beobachtung erwies sich Natriumfluoreszein als sehr geeignet. Man arbeitet dabei im indirekten Licht, so daß die Blende wegfällt. Als Farbstoff für die photographischen Aufnahmen im direkten Licht kam nur ein Material in Betracht, das möglichst alle Farben absorbiert oder nur die Farben durchläßt, für die der verwendete Film ein Empfindlichkeitsminimum besitzt. Bei Verwendung von orthochromatischem Filmmaterial bewährte sich als Farbstoff die rot durchlässige Fuchsinlösung sehr gut, bei Ver-

wendung von panchromatischem Aufnahmematerial erwies sich Malachitgrünlösung als günstig. Die Stärke der Färbung läßt sich durch Änderung der Konzentration der Lösung leicht variieren.

#### Die Beobachtungen

Beobachtet man nun einen derartig gefärbten Ring auf seiner translatorischen Bahn, so bemerkt man, daß die Wirbelringseele am Anfang der Bewegung beim ungestörten Ring einen Kreis bildet. Die Bahnen der um diese Seele als Mittelpunkt umlaufenden Teilchen sind ebenfalls Kreise. Nach kurzer Laufzeit ist zu beobachten, daß die Bahnen der umlaufenden Teilchen in den Außenschichten deformiert werden. Die Bahnen sind keine Kreise mehr, sondern in der Mitte des Rings flachgedrückte ellipsenähnliche Gebilde, wie die Abb. 7 und 8 zeigen. Die Wirbelringseele erfährt aber noch keinerlei Veränderungen.

Erst nach einiger Laufzeit erfährt auch die Wirbelringseele Änderung ihrer Kreisgestalt. Die Wirbelringseele biegt an mehreren Stellen des Kreises nach der Mitte des Ringes ein und die außen verbleibenden Teile der Seele bleiben etwas in der translatorischen Bewegung zurück. Dieser Vorgang geht verhältnismäßig langsam vor sich, so daß man ihn bei langsamen Ringen gut beobachten kann. Die Seele bildet also keinen

Kreis mehr, sondern sie zieht sich wie ein Wellenzug um den Ring herum. Diese Einbuchtungen, die im folgenden kurz als Kröpfungen bezeichnet werden sollen, sind ganzzahlig auf den gesamten Umfang

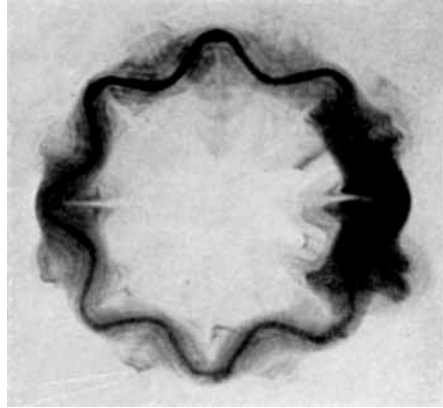


Abb. 9. Ein 8fach regelmäßig gekröpfter Wirbelring

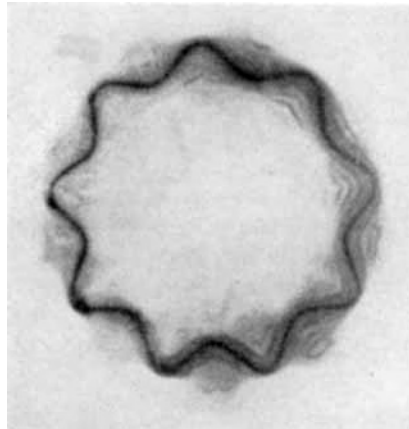


Abb. 10. Ein 9fach regelmäßig gekröpfter Wirbelring

verteilt, dabei ist es möglich, daß gerade und auch ungeradzahlige Kröpfungen entstehen. Die Abb. 9 und 10 zeigen solche gekröpften Ringe von der Verlängerung der translatorischen Bewegungssachse aus gesehen. Die Abb. 11 gibt einen gekröpften Ring wieder, der von der Seite aus aufgenommen wurde.

Die Größe der Kröpfungszahl ist abhängig von der Größe und der Geschwindigkeit des Ringes. Es konnten Kröpfungszahlen von

3 bis 15 beobachtet werden. Bei Anwendung größerer Geschwindigkeiten sind aber noch weit höhere Kröpfungs- zahlen zu erwarten. Abb. 12 zeigt einen Ring der eine höhere Kröpfungs- zahl besitzt. Man erkennt an diesem Ring, daß die Größe der Kröpfung mit der Kröpfungs- zahl sinkt. Trotz dieser Kröpfung bleibt aber die Seele der Mittel- punkt der Rotation.

Für die Entstehung dieser Kröpfungen sind zwei Bedingungen notwendig, die ebenfalls aus den Beobach- tungen entnommen wurden.

1. Der Wirbelring muß ungestört sein, d. h. die Wir- belringseele muß zu Beginn der Eigenbewegung einen Kreis bilden, der ohne Ver- änderung, also ohne Schwin-

gungen auszuführen, die umgebende Flüssigkeit durchwandert.

2. Die Rotationsenergie des Ringes muß so groß sein, daß die Schichten eine noch gut beobachtbare Rotation aufweisen.

Also nur stark gestörte oder sehr langsame Wirbelringe zeigen dieses Verhalten nicht.

Beobachtet man den Wirbelring auf seiner translatorischen Bahn weiter, so zeigt sich, daß die Kröpfungsgröße wächst, während dem sich die erst nur wenig gestörten weiter außen liegenden Schichten umlagern. Abb. 13 und 14 zeigen gekröpfte Wirbelringe, bei denen die Umlagerung der Außenschichten schon weit fort- geschritten ist. Die Folge dieser Umlagerung der Außenschichten

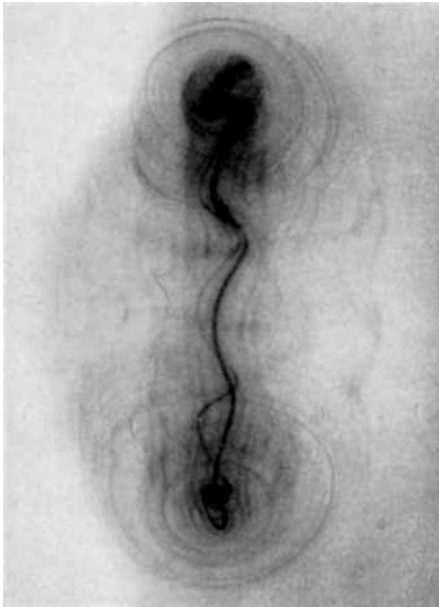


Abb. 11. Ein gekröpfter Wirbelring von der Seite aus aufgenommen. Laufrichtung von rechts nach links



ist das Einsetzen einer vollkommen unregelmäßigen Wirbelung an einer Stelle des Ringes. Diese unregelmäßige Wirbelung dehnt sich sehr schnell über den gesamten Umfang des Ringes aus. Die Seele ist nicht mehr Achse der Rotation. Diese Instabilität dauert einige Zeit an, bis der Ring sich wieder beruhigt hat. Danach ist der Farbstoff nicht mehr schichtweise, sondern fast kontinuierlich über den ganzen Ring verteilt. Während der Instabilität ist der Ringdurchmesser größer geworden, wobei auch oft Material vom Ring abgestoßen wird und zurückbleibt. Wirbelringe großer Energie werden dabei weniger stark von der Instabilität betroffen als energieschwache. Bei energieschwachen Ringen kann die Instabilität zur völligen Auflösung des Ringes führen. Für den Eintritt der Instabilität sind zwei Bedingungen erforderlich.

1. Die Wirbelringseele muß die Kröpfung gezeigt haben.

2. Der Wirbelring muß so energiereich sein, daß keine Rückbildung der Kröpfung eintritt.

Die Grenze zwischen Kröpfungsbereich und Instabilität ist scharf, nur bei Ringen mit geringer Rotation der Schichten ist diese Grenze etwas verwischt.

Eine zweite Kröpfung und eine zweite Instabilität ist nur sehr selten zu beobachten, da die erste Bedingung für die Kröpfung, die ungestörte Bewegung des Ringes, zum zweitenmal meist nicht erfüllt

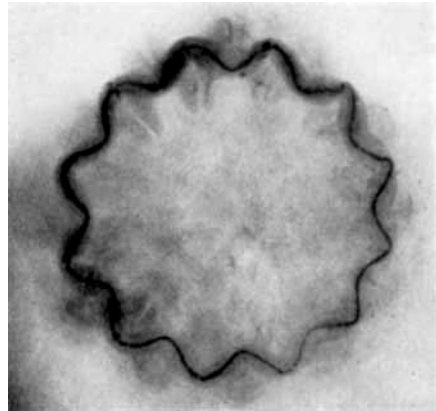


Abb. 12. Ein 12fach regelmäßig gekröpfter Wirbelring

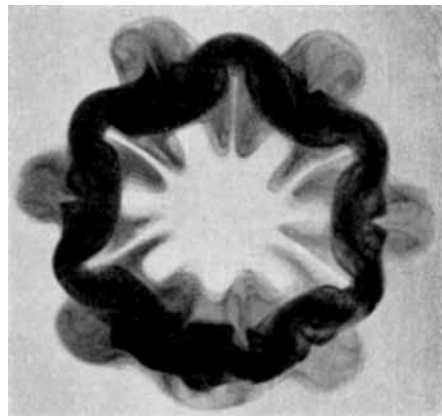


Abb. 13. Ein gekröpfter Wirbelring mit Umlagerung der Außenschichten

ist wegen der vorangegangenen ersten Instabilität, die große Unregelmäßigkeiten zur Folge hat. Außerdem ist die Beobachtung noch dadurch außerordentlich erschwert, daß der Farbstoff bei der zweiten



Abb. 14. Ein gekröpfter Wirbelring mit Umlagerung der Außenschichten

Kröpfung nicht mehr die günstige schichtweise Verteilung wie bei der ersten Kröpfung besitzt.

#### Die Ursachen dieser Vorgänge

Zur Deutung dieser Vorgänge ist eine Tatsache von besonderer Wichtigkeit: Der Wirbelring nimmt bei seiner translatorischen Bewegung Teile des umgebenden Mediums mit.

Entgegengesetzt den Anschauungen über Wirbelringe in einer idealen Flüssigkeit und auch den manchmal vertretenen Anschauungen über Wirbelringe in einer wirklichen also zähen Flüssigkeit, daß der Wirbelring immer aus denselben Teilchen besteht, und daß die außerhalb des Ringes befindlichen Teilchen nur Ausweichbewegungen ausführen, rollt der Wirbelring Flüssigkeit aus der Umgebung ein. Die Masse des Wirbelrings nimmt also dauernd zu. Der Hauptteil der Geschwindigkeitsverzögerung der translatorischen Bewegung ist also nicht die innere Reibung allein, sondern die Erteilung von Rotationsenergie an vorher unbewegte Massen.

Da diese Einrollung von Fremdmaterial in den Wirbelring von grundlegender Bedeutung für das Verständnis der oben beschriebenen Vorgänge im Ring ist, wurde folgender beweisender Versuch ausgeführt. Dazu mußte eine Färbung der neuengerollten Flüssigkeit erzielt werden. Die Färbung der gesamten Außenflüssigkeit ist dabei leider nicht anwendbar, da dann keine Farbunterschiede am Ring erkennbar sind. Es mußte also eine Färbung der Außenflüssigkeit erzeugt

werden, die nur in einer Ebene durch die translatorische Bewegungsachse geht und außerdem noch Unterbrechungen aufweist. Es ergab sich, daß diese Bedingungen am besten erfüllt waren, wenn man Farbfäden in kurzen Abständen von oben nach unten laufen ließ. Es wurden zu diesem Zweck an der Flüssigkeitsoberfläche Kaliumpermanganatkrystalle befestigt. Dabei löst sich das Kaliumpermanganat und die Lösung sinkt in gefärbten Streifen zu Boden, da die Kaliumpermanganatlösung spezifisch schwerer als Wasser ist. Der Versuch muß bei vollkommen ruhigem Wasser ausgeführt werden. Läßt man nun durch diese Farbstreifen einen ungefärbten oder schwachfarbigen Wirbelring laufen, so werden Teile dieser Farbstreifen in den Ring eingerollt.

*Unterschriften zu Abb.15 u. 16:*

Abb. 15. Die Einrollung von Außenflüssigkeit in den Wirbelring. Laufrichtung von rechts nach links. Der Wirbelring läuft durch das Gebiet der Farbstreifen

Abb. 16. Die Einrollung von Außenflüssigkeit in den Wirbelring. Laufrichtung von rechts nach links

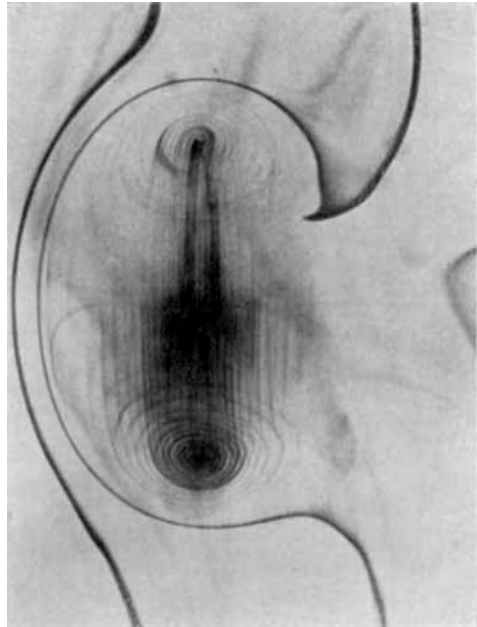


Abb. 15

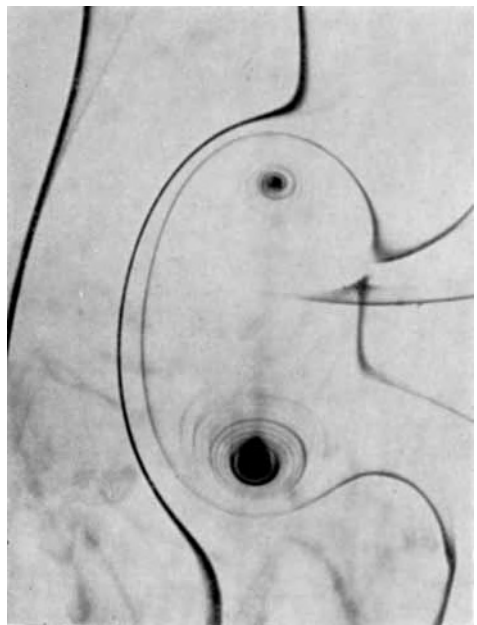


Abb. 16

Die Farbstreifen weichen erst aus, legen sich dann an und werden von hinten in den Ring hineingezogen. Der Ring läuft dann mit gefärbter Außenschicht weiter. Die Abb. 15 und 16 zeigen derartig aufgenommene Wirbelringe.

Die Einrollung von Fremdmaterial in den Ring wirft sofort die Frage auf, welchen Einfluß hat diese Tatsache auf die Geschwindigkeitsverteilung der einzelnen Schichten und Teilchen? Nimmt man an, daß die Axialgeschwindigkeiten für verschiedene Entfernungen vom Mittelpunkt des Wirbelrings am Anfang der Bewegung die folgende Verteilung zeigen, so wird die Geschwindigkeitsverteilung durch die Einrollung von Außenmaterial folgendermaßen geändert (Abb. 17). Würde diese Mitnahme von Masse symmetrisch gleichmäßig auf

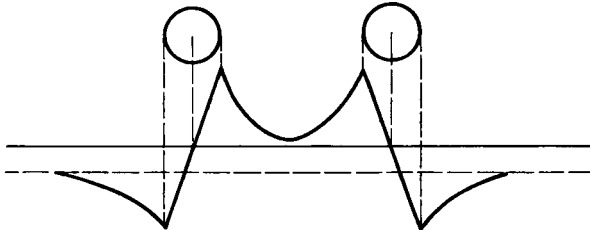


Abb. 17. Angenommene Axialgeschwindigkeitsverteilung des Wirbelrings

den Wirbelumfang verteilt sein und nimmt man an, daß der Wirbelkern nur in seiner Gesamtheit von der Mitnahme beeinflusst wird, d. h. daß der Wirbelkern weiterhin wie ein fester Körper nur mit kleinerer Winkelgeschwindigkeit rotiert, so ergibt sich nach einiger Laufzeit das folgende Bild (Abb. 18). Da

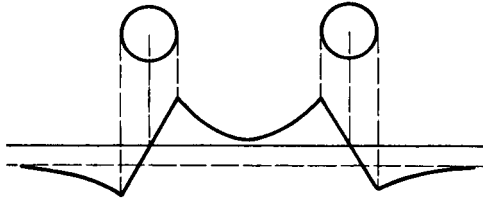


Abb. 18. Axialgeschwindigkeit nach einiger Laufzeit bei symmetrischer Beeinflussung

aber in der Mitte des Wirbelrings bewegte Teilchen aufeinandertreffen, so kann an dieser Stelle keine Mitnahme von Trogmateriale stattfinden. Die Teilchen werden also nur eine teilweise Bremsung erfahren, da die Mitnahme von Außenflüssigkeit nur an den Außenseiten des Wirbels stattfindet. Die einzelnen Teilchen auf einer Bahnlinie des Wirbels werden deshalb eine ungleichmäßige Bewegung ausführen. Die Geschwindigkeitsverteilung würde dann ungefähr folgendes Bild annehmen:

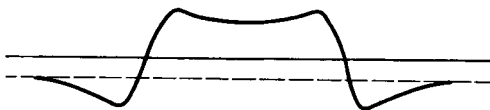


Abb. 19. Axialgeschwindigkeiten bei unsymmetrischer Beeinflussung

Diese Annahme über die Geschwindigkeitsverteilung konnte durch die folgende Messung bestätigt werden.

Die Trogflüssigkeit wurde mit Aluminiumfitter durchsetzt und von der Frontseite durch eine starke Bogenlampe beleuchtet. In dem Strahlengang befand sich ein Spalt. Der längs der translatorischen Bewegungsachse verlaufende Lichtspalt schneidet den Wirbelring in einer Ebene. Nimmt man nun von der Seite aus mittels Zeitbelichtung die reflektierenden Teilchen photographisch auf, so erhält man Striche auf der Platte, die direkt die Geschwindigkeit an der betreffenden Stelle wiedergeben. Bei diesen Aufnahmen wurde der Koordinatenmittelpunkt in den Wirbelring gelegt, indem der Aufnahmeapparat parallel zur

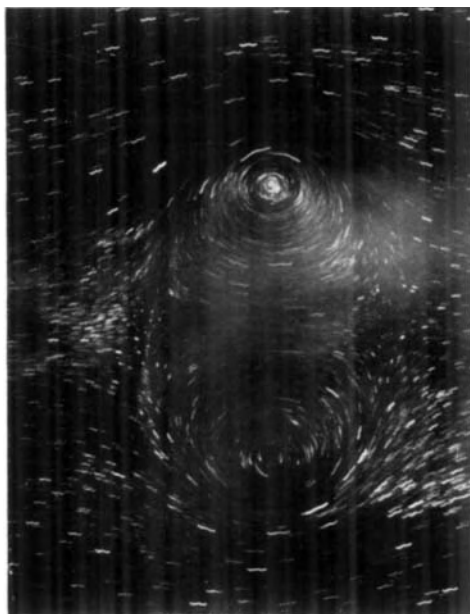


Abb. 20

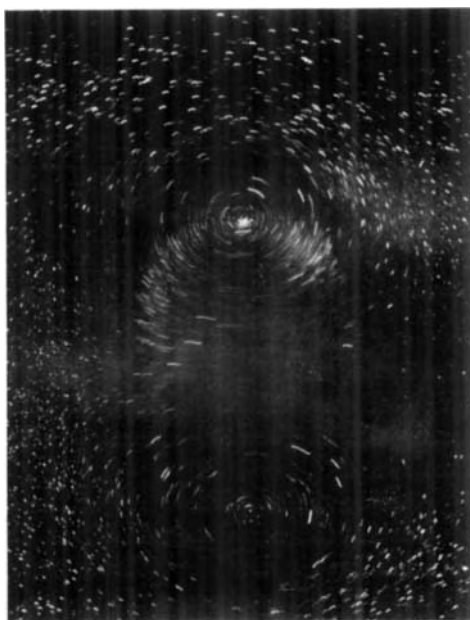


Abb. 21

*Unterschriften zu Abb. 20 u. 21:*

Abb. 20. Die Aufnahme von Aluminiumteilchen im Wirbelring zur Feststellung der Geschwindigkeitsverteilung.

Laufrichtung von rechts  
nach links

Abb. 21. Die Aufnahme von Aluminiumteilchen im Wirbelring. Die Aufnahme geschah später als bei Abb. 20

translatorischen Achse mit der Geschwindigkeit des Ringes mitbewegt wurde. Die Abb. 20 zeigt eine derartige Aufnahme, die kurz nach der Entstehung des Ringes festgehalten wurde. Die Abb. 21 zeigt einen Wirbelring, der erst nach einer längeren Laufzeit aufgenommen wurde. Die Kröpfung war dabei jedoch noch nicht eingetreten.

Für einen Schnitt senkrecht zu der Rotationsebene durch die Rotationsmittelpunkte ergeben sich dann von Abb. 20 die folgenden Axialgeschwindigkeiten für verschiedene Entfernungen vom Rotations-

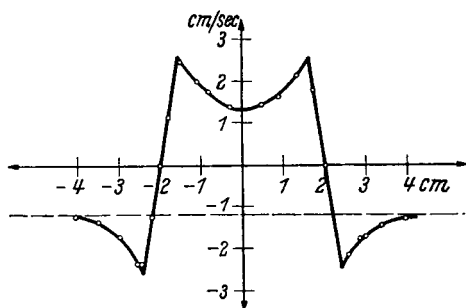


Abb. 22. Axialgeschwindigkeiten für verschiedene Entfernungen vom Mittelpunkt nach kurzer Laufzeit

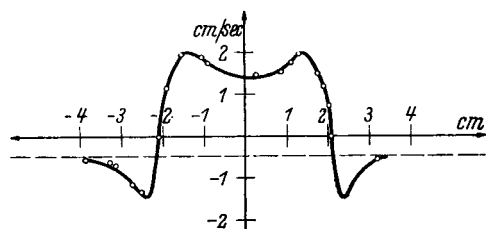


Abb. 23. Axialgeschwindigkeiten für verschiedene Entfernungen vom Mittelpunkt nach längerer Laufzeit

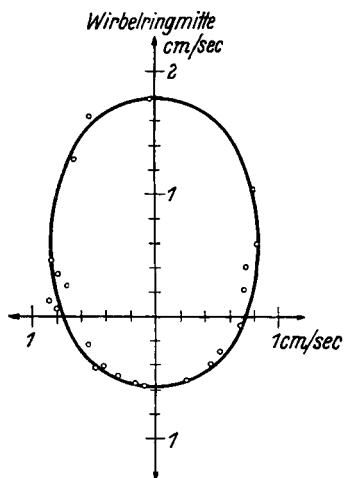


Abb. 24. Vektordiagramm der Geschwindigkeiten auf einer Bahnlinie, bezogen auf die Wirbelringseele als Koordinatenmittelpunkt

mittelpunkt (Abb. 22). Aus der Abb. 21 ergibt sich die in Abb. 23 dargestellte geänderte Geschwindigkeitsverteilung, die gut mit der vorher dargestellten angenommenen Geschwindigkeitsverteilung übereinstimmt.

Betrachtet man diese Änderung der Geschwindigkeitsverteilung von einem mitrotierenden Teilchen aus, so erkennt man, daß das Teilchen zu Beginn der Wirbelringbewegung nahezu mit gleicher Geschwindigkeit auf einer Kreisbahn um den Rotationsmittelpunkt läuft. Nach einiger Laufzeit wird aber die gleichförmige Bewegung allmählich in eine ungleichförmige übergehen. Das Teilchen wird

auf seiner nicht mehr kreisförmigen Bahn in der Mitte des Ringes beschleunigt und besitzt dann eine bedeutend höhere Geschwindigkeit. Außen um den Wirbel herum tritt wieder eine Verzögerung ein. Der Abb. 21 wurde für eine Bahnlinie die Geschwindigkeiten entnommen und vektoriell aufgetragen (Abb. 24). An diesem Vektordiagramm erkennt man leicht die Unsymmetrie der Geschwindigkeiten für eine Bahnlinie. Das Teilchen verhält sich also so wie aus der Mitnahme von Flüssigkeit gefolgert worden war.

Die Folge dieser anwachsenden unsymmetrischen Geschwindigkeitsverteilung muß eine anwachsende unsymmetrische Druckverteilung sein. Es wirkt ein dauernd sich verstärkender Druck von außen auf die wenig bewegten Teilchen in der Nähe der Wirbelringseele, der den Ring zu verkleinern sucht. Dieser Überdruck auf die Wirbelringseele und deren benachbarte Schichten ist symmetrisch zum gesamten Wirbelring und ist gegeneinander gerichtet. Bei Voraussetzung der Kontinuität wird dieser Überdruck ohne Wirkung bleiben, es sei denn, es würde ein Massenverlust auftreten. Die seelennahen Schichten erfahren also einen im Verlauf der translatorischen Bewegung dauernd steigenden durch die gleichbleibende Bremsung außen und durch die Beschleunigung im Inneren verstärkten Druck nach der Ringmitte. Eine Folge dieser Druckverteilung im Ring ist die Verzerrung der kreisförmigen Bahnlinien der verschiedenen Schichten, wie man aus den Schnittaufnahmen Abb. 7 und 8 erkennen kann.

In diesem Zeitpunkt befindet sich die Wirbelringseele in einem labilen Gleichgewicht, das durch die Symmetrie und durch die Trägheit der rotierenden Massen aufrechterhalten wird. Erfolgt an irgendeiner Stelle des Wirbelringumfangs eine Störung, so wird die Symmetrie der angreifenden Kräfte gestört. Eine derartige Störung würde dann eine kleine Einbuchtung der Wirbelringseele hervorrufen. Deren Folge ist nun sehr mannigfaltig. Man muß bedenken, daß der Wirbelring als eine Reihe durch Kohäsion verbundener flüssiger Kreisel mit derselben aber gekrümmten Achse aufgefaßt werden muß. Greift an dieser Achse eine Kraft an, so entsteht ein Kreiselmoment, das um so größer ist je größer das Trägheitsmoment und die Drehgeschwindigkeit ist. Die eine kleine Kröpfung der Wirbelringseele erzeugt nun ein Kreiselmoment. Da an der Störstelle der Überdruck von außen nach innen auf die Seele noch weiter steigt, wächst die Kröpfung und auch das Kreiselmoment. Das Kreiselmoment wirkt sich so aus, daß das Maximum der Einbuchtung in Richtung der translatorischen Bewegung vorgebogen und die beiden oberen Ecken der Einbuchtung gegen die Richtung der translatorischen Bewegung

umgebogen werden. Diese drehende Bewegung setzt sich nicht weiter fort, da die Kröpfung infolge der Trägheit der weiter außen rotierenden Massen nur eine geringe Beweglichkeit hat und die Maximalstelle der Einbuchtung dauernd stärker nach innen gezogen wird. Die Beweglichkeit der Seele und deren benachbarte Schichten ist um so geringer je stärker die Rotationsenergie des Wirbels ist. Das Umbiegen der Wirbelringseele nach vorn und hinten ruft wiederum ein Kreiselmoment links und rechts von der Störstelle hervor, wodurch sich auf beiden Seiten der ersten Einbuchtung zwei neue Kröpfungen ausbilden, die allerdings bedeutend schwächer sein müßten, wenn nicht der von außen wirkende Überdruck die beiden neuen Störstellen verstärken würde, so daß der gleiche Zustand wie bei der ersten Kröpfung erreicht wird. Dabei ist es nicht notwendig, daß die Kröpfungen sich ganzzahlig auf den Umfang verteilen. Es können leicht unvollständige Kröpfungen entstehen, die aber aus folgendem Grunde nur von kurzer Dauer sein werden. An den Maximalstellen der Einbuchtung ist der Druck von außen nach innen noch verstärkt, da dabei die schnelleren Schichten in der Nähe der Seele noch näher nach der Mitte des Ringes gelangen. Also ein Teilchen, das in der Schicht um die Maximalstelle der Einbuchtung rotiert, wird in der Mitte des Ringes noch mehr beschleunigt und außenherum noch mehr verzögert. Der Druck wird also dort größer sein als in den anderen Schichten. Das Umgekehrte tritt ein an den Stellen größter Ausbuchtung. Dort wird der Druck geringer als in den anderen Schichten. Bei diesen Druckverhältnissen ist es leicht verständlich, daß unvollkommene Kröpfungen von den beiden benachbarten Einbuchtungen verdrängt werden. Aus diesem Grunde werden sich also immer ganzzahlige Kröpfungen einstellen.

Die Größe der Kröpfungszahl wächst mit der Geschwindigkeit und der Größe des Ringes. Diese Beobachtung ist an Hand dieser aufgestellten Hypothese leicht zu erklären. Bei großer Rotationsenergie der seelennahen Schichten genügt schon eine kleine Einbuchtung um ein Kreiselmoment zu erzeugen, das die benachbarten Kröpfungen hervorruft. Dadurch wird aber eine große Kröpfungszahl auf den Umfang des Ringes erzeugt.

Ebenso ist die Größe der Kröpfung, die mit der Geschwindigkeit und der Größe des Ringes sinkt, abhängig von der Rotationsenergie des Rings. Bei großer Rotationsenergie sind die Außenschichten so stabil, daß die Seele und deren benachbarte Schichten nur eine geringe Beweglichkeit besitzen. Umgekehrt wird bei energiewachen Ringen die Kröpfung und auch die Kröpfungszahl sich entgegengesetzt verhalten müssen, d. h. große Kröpfungen aber kleine



Kröpfungszahlen. Das steht auch im Einklang mit den später angeführten Messungen.

Ebenfalls zu erklären ist die Eigenschaft der Wirbelringe auf ihrer translatorischen Bahn Kröpfungen abzugeben. Der Wirbelring verkleinert also während seiner Bewegung die Kröpfungszahl. Die Ursache liegt in der vorher angeführten Druckverteilung. Eine etwas kleinere Kröpfung wird auf Kosten der benachbarten Kröpfungen, die sich noch vergrößern, plötzlich verdrängt.

Der Eintritt der Instabilität bestimmt das anwachsende Kreiselmoment. Durch das Wachsen der Kröpfung und das Umlagern der nicht nur seelennahen Schichten wird das Kreiselmoment so groß, daß es die Gegenkräfte, die vom Druck herrühren, überwindet. In dem Moment des Eintritts der Instabilität rotiert der gekröpfte Rotationsmittelpunkt also die Seele des Rings, selbst um eine neue Achse. Diese doppelte Rotation führt dann zu einer vollkommen unregelmäßigen Wirbelung, bei der keine Gesetzmäßigkeit mehr zu erkennen ist.

Bei den bisherigen Betrachtungen war der Ursprung der Störung, die zu der ersten Kröpfung führt, noch nicht behandelt worden. Da der Wirbelring bei Beginn seiner Eigenbewegung Außenflüssigkeit in sich einrollt, wie oben beschrieben wurde, so müssen Schwierigkeiten entstehen, wenn der Wirbelring aus Raummangel kein Material

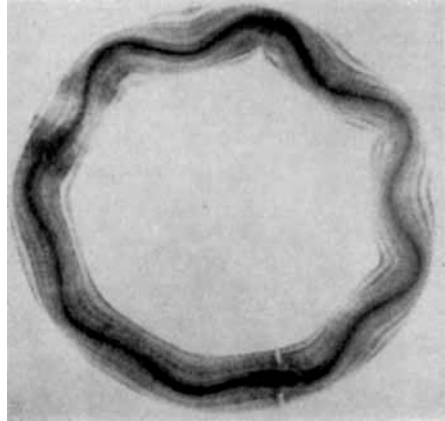


Abb. 25. Ein gekröpfter Wirbelring mit teilweise ungestörter Außenschicht

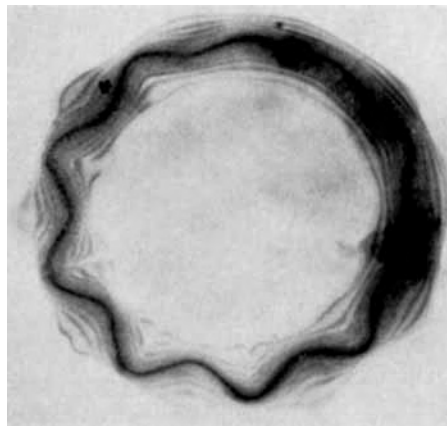


Abb. 26. Ein gekröpfter Wirbelring mit teilweise ungestörter Außenschicht

mehr mitnehmen kann, ohne seinen Radius zu vergrößern. Da eine Erweiterung des Radius infolge der besonderen Druckverteilung nicht eintritt, wird hinter dem Ring ein Totraum entstehen, von dem aus dann Material abgestoßen wird. Dieses Abstoßen von Materie genügt, um das labile Gleichgewicht des Rings zu stören, wodurch eine kleine Einbuchtung erzeugt wird. Dies ist beim anfänglich ungestörten Wirbelring der Fall. Weist der Wirbelring bereits eine Anfangsstörung auf, so genügt diese um die Kröpfung schon eher hervorzurufen. Diese Anfangsstörung darf dabei ein bestimmtes

Maß nicht überschreiten, da sonst keine Kröpfung entstehen kann, weil sich die für die Kröpfung notwendige Geschwindigkeitsverteilung und damit auch die Druckverteilung nur beim ungestörten oder wenig gestörten Ring ausbilden kann.

Die im Vorstehenden wiedergegebenen Überlegungen wurden durch folgende Versuche veranlaßt. Zuerst wurden eine Reihe Aufnahmen von Wirbelringen hergestellt, die zeigen, daß der primäre Vorgang bei der Entstehung der Kröpfung eine Bewegung der Seele des Wirbelrings ist, denn der vorhandene Druck von außen nach innen muß anfangs nur auf die Seele und deren unmittelbar benachbarte



Abb. 27. Teil eines Wirbelrings, dessen Kröpfungen nicht aufgehen

Schichten wirken. Die Abb. 25 zeigt einen solchen Wirbelring, der auf der einen Seite schon vollkommen ausgebildete Kröpfung zeigt, während die andere Seite nur eine Kröpfung der Seele erkennen läßt. Die Außenschichten sind an dieser Stelle noch vollkommen ungestört. Man kann sogar erkennen, wie die einzelnen Schichten sich, je weiter außen sie liegen, weniger an der Kröpfung beteiligen. Auf der anderen Seite ist zu erkennen, wie dann bei stärker ausgebildeter Kröpfung eine Umlagerung der Außenschichten eintritt. Die Abb. 26 zeigt ebenfalls einen Ring mit fast ungestörten Außenschichten. An dieser Abbildung ist aber noch weiterhin zu erkennen, daß die Kröpfungen

an der wenig gekröpften Stelle nicht aufgehen. Noch besser ist das an der Abb. 27 zu erkennen.

Es folgen jetzt eine Reihe von Messungen, die zeigen, daß der Eintritt der Kröpfung in weiten Grenzen schwankt. Ebenso schwankt der Eintritt der Instabilität. Diese Schwankung ist auch zu erwarten, da der Eintritt der Kröpfung und der Instabilität von einer Störung abhängt, die in einer gewissen Grenze von Zufälligkeiten beeinflusst wird.

Tabelle 1  
Messungsreihe 1  
Rohrdurchmesser 7,6 cm

Nr.	Kolbenstoßlänge in cm	Kolbengeschw. in cm/sec	Reyn. Zahl	Zeit bis Kröpf. in Sek.	Zeit bis Inst. in Sek.	cm bis Kröpf.	cm bis Inst.	Kröpfungs- zahl	Durchmesser des Ringes in cm
1	2,13	11,0	3810	12,2	38,2	30,8	75,0	7	5,6
2	3,30	11,4	3880	12,5	31,0	33,5	72,2	8	6,8
3	5,05	10,8	4110	18,5	41,5	50,7	100,2	6	8,2
4	5,70	11,0	3800	14,0	24,0	44,0	93,5	7	8,2
5	8,97	10,9	3770	12,0	18,0	45,0	76,3	9	9,4
6	3,20	13,5	5110	3,0	20,0	7,5	70,0	8	8,8
7	9,33	13,9	5270	9,0	17,0	36,5	73,7	10	9,4
8	4,10	18,9	7180	4,5	15,5	30,0	70,5	10	7,6
9	6,25	18,4	7000	4,0	14,0	30,0	73,0	10	8,8
10	8,08	19,2	7300	5,0	13,0	32,2	80,5	12	9,2
11	2,30	19,1	7250	3,5	13,5	15,0	57,5	8	5,6
Rohrdurchmesser 3,0 cm									
12	2,20	10,2	1530	24,0	—	40,5	—	3	3,1
13	5,93	9,7	1460	5,5	13,0	19,0	40,0	6	3,8
14	7,50	9,8	1473	5,0	9,5	18,5	33,6	6	4,0
15	2,95	13,7	2050	11,5	22,0	36,0	57,5	6	3,5
16	7,55	13,8	2075	3,0	6,0	15,3	31,2	6	4,2
17	8,95	13,7	2050	3,0	4,5	17,0	25,0	7	4,3
18	2,15	16,7	2505	7,0	17,0	24,3	48,3	6	4,0
19	4,35	16,5	2470	3,0	6,0	16,0	29,5	8	3,8
20	7,88	16,4	2462	2,0	3,5	12,0	22,0	—	4,6
21	2,74	21,2	3170	3,0	7,5	14,5	35,5	8	3,5
22	5,40	21,8	3650	1,5	3,0	11,1	22,0	8	4,0
23	7,65	21,2	3170	1,5	4,5	7,3	30,5	8	3,5

Schon diese Werte zeigen, daß die Schwankungen des Eintritts der Kröpfung und Instabilität stark von Störungen abhängen müssen. Z. B. bei Nr. 6 Tab. 1 erkennt man, daß der Wirbelring sicher eine Anfangsstörung eventuell durch eine Luftblase im Rohr erlitten haben muß. Noch deutlicher werden die Schwankungen, wenn man Wirbelringe unter denselben Entstehungsbedingungen herstellt. Es wurde dabei jeweils bei einer Messungsreihe die Kolbenstoßlänge und die Kolbengeschwindigkeit konstant gehalten.

Tabelle 2

## Messungsreihe 2

Rohrdurchmesser 7,6 cm, Kolbengeschwindigkeit 14,7 cm/sec  
 Kolbenstoßlänge 5,2 cm

Nr.	Zeit bis Kröpfung in Sek.	Zeit bis Instabil. in Sek.	Länge bis Kröpfung in cm	Länge bis Instabil. in cm	Kröpfungs- zahl vor Instabil.
1	14,3	26,0	54,0	92,0	10
2	17,2	29,2	63,5	100,5	10
3	14,2	25,0	54,5	94,5	10
4	14,9	25,8	60,5	97,5	10
5	19,8	29,2	71,5	102,0	10
6	12,0	21,2	49,0	83,0	10
7	11,2	22,0	49,5	86,5	10
8	9,9	22,3	44,0	87,0	10
9	14,4	27,2	61,0	102,5	10
10	11,3	20,0	50,0	81,5	10
		Mittel	55,75	92,7	

## Messungsreihe 3

Rohrdurchmesser 7,6 cm, Kolbengeschwindigkeit 11,4 cm/sec  
 Kolbenstoßlänge 2,03 cm

1	18,2	46,4	44,5	89	7-6
2	14,3	34,5	41,0	76	7-6
3	16,8	41,3	45,0	84	7-6
4	18,8	40,3	47,0	81	6
5	13,8	37,0	38,5	80,5	8-6
6	20,5	46,4	50,0	87,5	6
7	10,9	32,5	34,0	75,5	8-6
8	25,4	61,3	53	96,6	6-5
9	18,2	41,6	46,5	84,2	7-6
10	12,4	32,4	35	74	7-6

## Messungsreihe 4

Rohrdurchmesser 7,6 cm, Kolbengeschwindigkeit 9,52 cm/sec  
 Kolbenstoßlänge 3,9 cm

1	24,2	53,6	56,5	101	7
2	26,0	47,4	65,6	103	8-7
3	12,0	37,6	35,0	87	8
4	24,3	49,6	62	104	8-7
5	18,7	45,7	48,5	98	8-7
6	12,2	35,0	35,5	81	9-8
7	25,9	47,1	64,0	99	8-7
8	17,5	48,4	46	103,5	8-7
9	20,4	38,9	47,5	83,5	8-7
10	22,2	51,0	55	104,5	8-6

Bei den Messungsreihen 3 und 4 ist noch besonderes Augenmerk auf die Kröpfungszahlen gerichtet worden, die sich, wie bereits beschrieben wurde, verringern.

Zur weiteren Prüfung der obigen Hypothese wurden Versuche ausgeführt, die das Verhalten der Wirbelringe bei Aufprägung besonderer Störungen zeigt. Dabei wurde von folgenden Gedanken ausgegangen: Der Überdruck auf die Seele wird hervorgerufen durch die von der Bremsung der Teilchen außenherum verursachte Geschwindigkeitsdifferenz. Verstärkt man diese Bremsung, so müßte die Kröpfung im Mittel schon eher erfolgen als ohne Bremsung. Die stärkere Bremsung der Teilchen außen um den Ring herum wurde dadurch erreicht, daß der noch ungestörte Ring durch ein Glasrohr laufen mußte, das einen etwas größeren Durchmesser besaß als der Ring. Bei der Messung wurde 5mal mit dieser Störung und 5mal ohne Störung der Eintritt der Kröpfung und der Instabilität aufgenommen, wobei die Geschwindigkeit des Kolbens und der Hub konstant gehalten wurde.

Tabelle 3

Messungsreihe 5

Rohrdurchmesser 7,6 cm, Kolbengeschwindigkeit 15,5 cm/sec

Kolbenstoßlänge 3,5 cm

mit Störung

Nr.	Zeit bis Kröpfung in Sek.	Zeit bis Instabilität in Sek.	Länge bis Kröpfung in cm	Länge bis Instabilität in cm
1	8,0	14,2	31,0	57,5
2	7,5	13,8	31,5	57,0
3	7,0	14,4	25,5	53,0
4	8,0	14,4	28,0	54,5
5	7,3	13,4	30,5	56,5
		Mittel	29,3	55,7

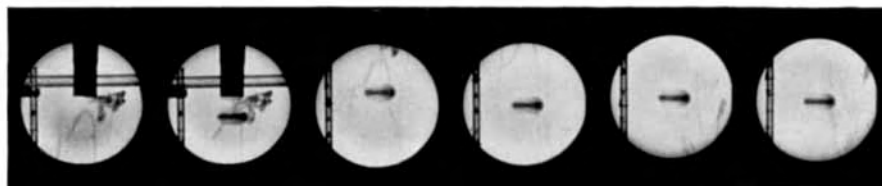
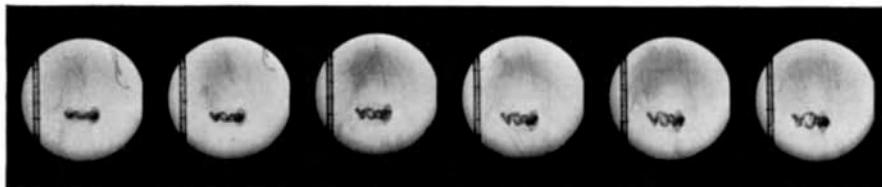
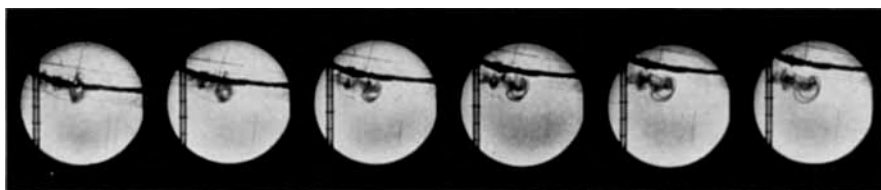
Messungsreihe 6

Die gleichen Größen wie bei Messungsreihe 5

ohne Störung

1	14,9	24,1	56,0	82,0
2	10,4	17,3	45,0	67,5
3	14,2	24,2	55,0	84,0
4	11,0	22,0	43,5	74,0
5	18,8	28,4	68,0	92,5
		Mittel	53,5	80,0

Der Unterschied zwischen den Messungen mit und ohne Störung ist unverkennbar. Das Rohrstück, durch das der Wirbelring laufen mußte, hatte nur eine Länge von 6,5 cm und war etwa 10 cm von der Rohröffnung entfernt angebracht. Der Eintritt der Kröpfung



Zeit

erfolgte eine verhältnismäßig lange Strecke nach dem Durchlaufen des Rohrstückes, wie aus der Messung zu ersehen ist.

Es ist auch möglich den Eintritt der Kröpfung durch eine un-symmetrische Störung zeitiger hervorzurufen. Berührt man den Ring in der translatorischen Bewegungsachse mit einer Sonde, so entsteht an dieser Stelle, wenn der erforderliche Druck schon groß genug

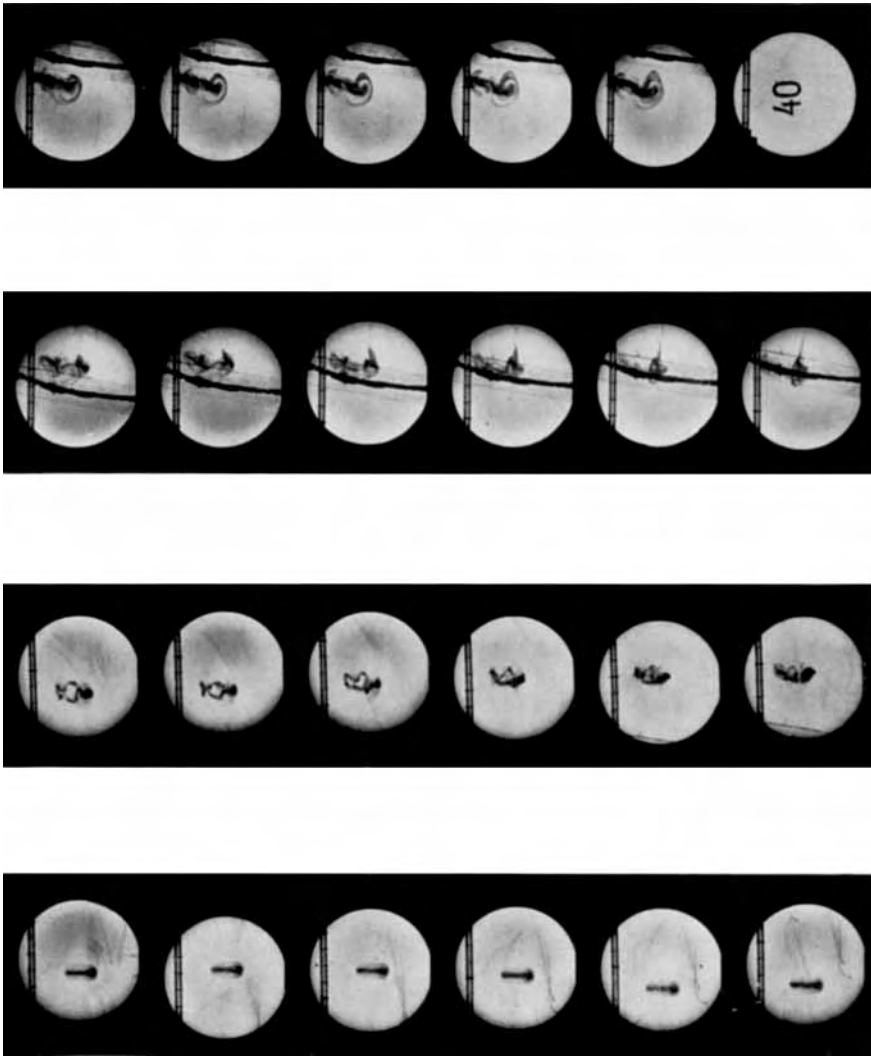


Abb. 28. Filmstreifen zur Messung der translatorischen Geschwindigkeitsverteilung.  
Messungsreihe 1, Tab. 1, Ring Nr. 15  
(Der schwarze Strich ist ein verkiteter Sprung in der hinteren Glaswand)

ist, eine Kröpfung, die sich dann langsam um den ganzen Ringumfang vervielfacht.

#### Die translatorische Geschwindigkeitsverteilung

Es wurden zur Messung der translatorischen Geschwindigkeit Filmaufnahmen hergestellt, wie das näher am Anfang der Arbeit aus-

geführt worden ist. Den alle 1,5 Sek. erfolgten Filmaufnahmen wurden dann die gelaufenen Strecken und der Eintritt der Kröpfung und der Instabilität entnommen (Abb. 28). Es zeigte sich bei der Auftragung der Weg-Zeit-Kurve der translatorischen Bewegung des Wirbelrings, daß diese translatorische Geschwindigkeit einer  $e$ -Funktion genügt, wenn der Ring keine Störung aufweist. Trägt man nun logarithmisch

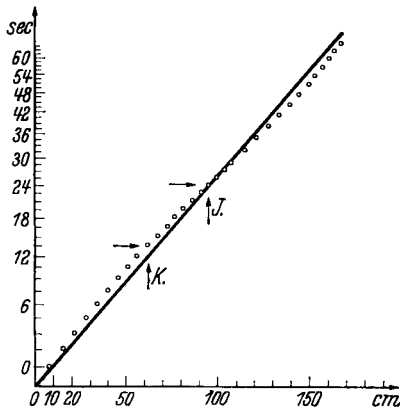


Abb. 29. Die Weg-log Zeit-Kurve für die translatorische Bewegung des Wirbelrings (Ring Nr. 4, Tab. 1)

Vergleicht man diese Kurven, so ist zu erkennen, daß sich kleine Wirbelringe ganz anders verhalten als große Ringe. Bei großen Wirbelringen ist nur ein Schwanken um die Gerade zu erkennen, während bei kleinen Ringen ein verhältnismäßig starker Knick in der Kurve festzustellen ist. Diese Erscheinung weist darauf hin, daß sicher zwei Größen maßgebend sind für die Abweichung von der  $e$ -Kurve. Erstens ist die Massenmitnahme bei der translatorischen Bewegung des Ringes sicher im Kröpfung- und im Instabilitätsgebiet verschieden. Zweitens ist die Abstoßung von Material aus dem Ring im Instabilitätsbereich nach der Beobachtung bei kleinen Ringen infolge der geringeren Stabilität viel stärker als bei großen Ringen. Dieser Einfluß dürfte den Knick in der Kurve bei kleinen Ringen hervorrufen.

#### Einfluß der Zähigkeit

Da diese bisher besprochenen Versuche nur in Wasser ausgeführt wurden, ist es nun von besonderem Interesse, Versuche in zäheren und weniger zähen Medien auszuführen.

auf, so erhält man die Abweichungen, die durch die Kröpfung und die Instabilität hervorgerufen werden. Es folgen jetzt einige derartige aufgenommene Kurven.

Die in Klammern stehenden Bezeichnungen sollen auf die Tab. 1 hinweisen, wo man für die hier wiedergegebene Geschwindigkeitsverteilung auch die anderen gemessenen Werte desselben Wirbelrings nachschlagen kann.

Abb. 29 und 30 gibt die Weg-log Zeit-Kurve von großen Ringen wieder, Abb. 31, 32 und 33 von kleinen Ringen.



Die Versuche mit einer Mischung von Glyzerin und Wasser mit einer etwa 17fachen kinematischen Zähigkeit im Vergleich zu Wasser von Zimmertemperatur zeigten, daß erst bei höheren Ge-

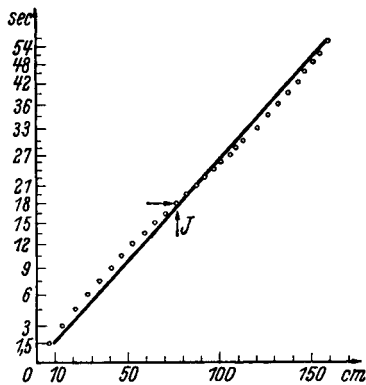


Abb. 30. Die Weg-log Zeit-Kurve für die translatorische Bewegung des Wirbelrings (Ring Nr. 5, Tab. 1)

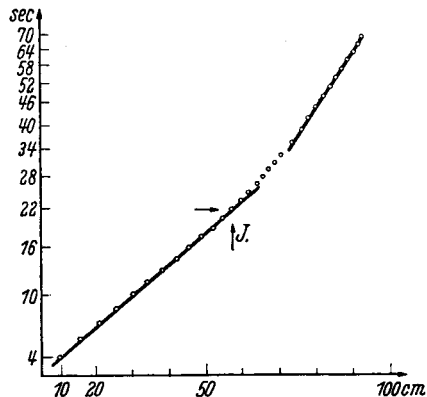


Abb. 31. Die Weg-log Zeit-Kurve für die translatorische Bewegung des Wirbelrings (Ring Nr. 15, Tab. 1. Vgl. auch Abb. 28)

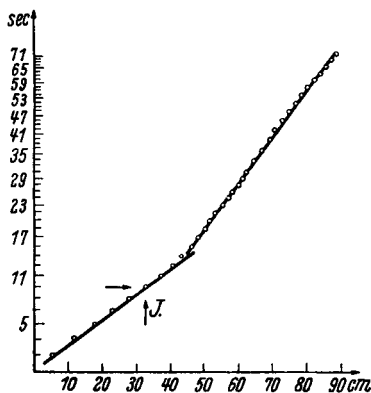


Abb. 32. Die Weg-log Zeit-Kurve für die translatorische Bewegung des Wirbelrings (Ring Nr. 14, Tab. 1)

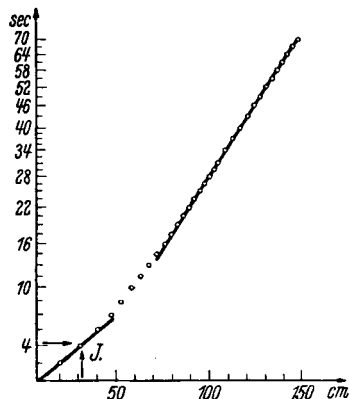


Abb. 33. Die Weg-log Zeit-Kurve für die translatorische Bewegung des Wirbelrings (Ring Nr. 23, Tab. 1)

schwindigkeiten Kröpfungen auftraten. Bei normalen Geschwindigkeiten, wie sie bei den Versuchen in Wasser angewendet wurden, tritt eine Erweiterung des Durchmessers des Ringes ein, ohne daß

irgendwelche Störungen zu erkennen wären. Erzeugt man Wirbelringe in Luft, deren kinematische Zähigkeit etwa 14,5 mal so groß ist wie in Wasser, so ergeben sich, abgesehen von der schnelleren Abnahme der translatorischen Geschwindigkeit, keine wesentlich anderen Beobachtungen als in Wasser. Es ist also nicht möglich die Reynold'sche Zahl für ähnliche Strömungsvorgänge anzuwenden, indem man die translatorische Geschwindigkeit in die Reynold'sche Zahl einsetzt. Trotzdem ist auch hier das Verhältnis von Trägheits- zu Zähigkeitskräften nach den obigen Erkenntnissen maßgebend. Man müßte also nicht die translatorische Geschwindigkeit, sondern die rotatorische Geschwindigkeit einsetzen. Dazu ist aber die Kenntnis der Geschwindigkeitsverteilung im Wirbelring notwendig. Diese Verhältnisse sollen in einer späteren Arbeit behandelt werden.

#### Zusammenfassung

Es werden eine Reihe von neuen Beobachtungen an Wirbelringen bei Anwendung einer besonderen Färbung beschrieben, deren Ursache zunächst unbekannt war. Nach längeren Untersuchungen wurde eine Arbeitshypothese aufgestellt, die diese Erscheinungen zurückführte auf die Einrollung von Außenmaterial in den Wirbelring und eine dadurch bedingte Labilität, so daß durch das Wirken der

1. Reibungskräfte,
2. Druckkräfte,
3. Kreiselkräfte

die regelmäßigen Kröpfungsgebilde im Wirbelring und die darauf folgende Instabilität entstehen. Die aus dieser Hypothese gezogenen Folgerungen stehen vollkommen im Einklang mit allen bisher ausgeführten Untersuchungen und Beobachtungen. Durch eine Reihe verschiedener Versuche und Messungen ist es gelungen, die Richtigkeit der aufgestellten Erklärung zum großen Teil zu erhärten.

#### Schlußwort

Da es sich bei dieser Arbeit um Erforschung von Neuland handelte, konnte auf manche der berührten Fragen nur kurz eingegangen werden. Die Arbeit bestand hauptsächlich darin, das Gesamtproblem anzufassen und zu einer gewissen Klärung zu bringen. Die weitere Durchforschung und Detailbearbeitung, vor allem auch die theoretische Begründung, erfordert jedoch so viel Zeit, daß es zweckmäßig erscheint, bereits jetzt diese Arbeit zu veröffentlichen.

Als Fortsetzung der Arbeit ist die Aufnahme der Geschwindigkeitsverteilung im Wirbelring bis zur Instabilität geplant. Da schon

bei der Kröpfung die Geschwindigkeiten der einzelnen Teilchen nicht mehr einer Schnittebene des Rings entnommen werden können, ist die Anwendung der Stereophotogrammetrie vorgesehen.

Am Schluß dieser Arbeit möchte ich nicht versäumen, Herrn Prof. R. Tomaschek für das durch dauernden Gedankenaustausch entgegengebrachte Interesse und für die wertvollen Anregungen und Unterstützungen in jeder Weise meinen herzlichsten Dank auszusprechen.

Ebenso bin ich auch Herrn Prof. M. Toepler und Herrn Doz. Dr. H. Teichmann für die in Diskussionen über dieses Thema hervorgetretenen Ratschläge zu großem Dank verpflichtet.

Dresden, Physikalisches Institut der Technischen Hochschule,  
März 1939.

(Eingegangen 25. März 1939)