

Über Condensationsschwingungen

J. Wanka,

Supplément an der k. u. k. Marine-Akademie in Fiume.

(Mit 9 Textfiguren.)

Aus dem physikalischen Institute der k. k. Universität in Prag.

Beim Aufblasen von Kugeln an innen befeuchteten Glasröhren kommt es vor, dass nach dem Absetzen der Röhre vom Munde ein gewöhnlich tiefer Ton zu hören ist, welcher so lange andauert, als die Kugel entsprechend heiss ist. Diese Erscheinung beschreibt schon A. Pinaud¹ und erkennt auch richtig, dass dieselbe von den Wasserdämpfen herrührt, welche in der heissen Kugel aus dem eingeführten Wasser entstehen, und dass eine periodische Condensation und nachherige Verdampfung die Druckschwankungen setzt, welche die Luft in der Glasröhre zum Tönen bringen, ohne indessen diesen Punkt deutlich hervorzuheben und näher darauf einzugehen, was bei dem damaligen Stand der Wärmetheorie auch verständlich ist.

Dass Condensationen des Dampfes das Massgebende sind, geht schon daraus hervor, dass mit trockenen Röhren der Ton nicht hervorgerufen werden kann. Mit der Erklärung genannter Thatsache steht übrigens keineswegs in Widerspruch die zuerst von Biot² aufgestellte, von späteren³ festgehaltene Behauptung, dass bei der Schallfortpflanzung in Dämpfen

¹ A. Pinaud, Über eine neue Art der Tonerzeugung, Pogg. Ann. 42, S. 610 (1837).

² Biot, *Traité de physique* II, S. 22 (1816).

³ Jüngst von F. Beyme, Über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in gesättigten Dämpfen (1884), (auch *Beibl.* 9 [1885] S. 503) und G. Jäger: Über die Schallgeschwindigkeit in Dämpfen und Bestimmung der Dampfdichte. *Wied. Ann.* 36.

Condensationen nicht auftreten können, denn bei dem obigen Experiment ist der Wasserdampf weder der schallfortpflanzende Körper, noch geräth er selbst in Schwingungen; ihm kommt vielmehr die Aufgabe zu, durch seine Zustandsänderungen die akustischen Schwingungen zu erhalten. Ferner hat man es hier mit verhältnissmässig langsamen Schwingungen zu thun, bei welchen trotz theilweisen Condensationen Druckfortpflanzungen möglich wären.

Der Ton kann übrigens bequem und verlässlich in folgender Weise erzeugt werden: man setzt an ein kugel- oder cylinderförmiges Glasgefäss von etwa $10-50\text{ cm}^3$ Capacität eine rechtwinklig gebogene Glasröhre an, füllt das Gefäss bis zu etwa einem Drittel mit Wasser und taucht es in ein Ölbad. Bei einer Temperatur nahe an 100° C . tritt der Ton auf und erhält sich zwischen gewissen Temperaturgrenzen beliebig lange, ohne dass das Wasser siedet. Je nach den Dimensionen der Röhre und des Gefässes ist der Ton höher oder tiefer, klingt in der Regel wie ein dumpfes Brummen. Die Luftbewegung in der Röhre kann so kräftig werden, dass man sie mit der Hand spürt.

Im Folgenden beabsichtige ich eine Modification dieses Versuches zu beschreiben, die zu bemerkenswerthen Beobachtungen geführt hat. Ich ersetze die Luft in der Ansatzröhre durch einen anderen schwingungsfähigen Körper, auf welchen dann der Dampf zu wirken hat, nämlich durch die Flüssigkeits-säure in einer *U*-Röhre, welche den Dampfraum absperrt.

Zuvor erwähne ich noch eine Übergangsanordnung; an das mit der Flüssigkeit, meistens mit Wasser gefüllte Gefäss ist eine höchstens 2.5 mm im Lichten weite Glasröhre angesetzt. Das erstere wird so in das Bad gesteckt, dass die enge Glasröhre horizontal bleibt. Die entwickelten Wasserdämpfe condensiren sich an den kälteren Stellen in der Röhre und laufen zu einem oder mehreren Tropfen zusammen, welche alsbald ohne weiteres Zuthun in heftige horizontale Schwingungen gerathen, deren doppelte Amplitude $3-4\text{ cm}$ beträgt und deren Schwingungszahl per Minute auf ungefähr 300 geschätzt werden kann. Die Schwingungen halten aber nicht regelmässig an, da die Tropfen wegen der Adhäsion an der

Glaswand zerfließen, worauf sich dann an einer anderen Stelle ein neuer Tropfen bildet, um ebenso in Schwingungen zu gerathen. Der Tropfen ist hier nicht der schwingungsfähige Körper, sondern zeigt als Index nur die Schwingungen der abgesperrten Luft an, welche er gleichzeitig verlangsamt.

Beschreibung des Apparates. Um die Sperrflüssigkeit in der *U*-Röhre in dauernde Schwingungen zu versetzen, bediente ich mich des folgenden Apparates. Derselbe besteht aus drei Theilen: einem Siedegefäß *a* (Fig. 1), das kugelförmig oder cylindrisch gestaltet, zur Aufnahme der Flüssigkeit, deren Dämpfe benützt werden, dient und in das Bad (am besten Paraffinbad) gebracht wird; der *U*-Röhre *b*

und einem Verbindungsrohr *c*. Letzteres ist mit *a* gewöhnlich in einem Stück gefertigt und besteht aus einem verticalen Theil, in den durch einen Kork ein Thermometer mit cylindrischem Quecksilbergefäß verschiebbar eingeführt werden kann, und einem daran gesetzten horizontal verlaufenden Rohr, das passend in einen Träger eingespannt wird. Beide sind etwa 4—13 *mm* weit. Der eine Schenkel der *U*-Röhre ist am Ende knieförmig gebogen und trägt hier ein kurzes Glasröhrchen *d* angesetzt, über welches ein Stück Kautschukschlauch mit Quetschhahn als Ventil geschoben wird. Ein weiteres Ventilloch befindet sich bei *e*, etwas über die Mitte desselben Schenkels und wird durch ein kurzes, über die Röhre gestreiftes Schlauchstück geschlossen. Mit Hilfe dieser Ventile kann man bequem den Innenraum des Siedegefäßes mit der äusseren Luft in Communication setzen und so, besonders mit dem Ventil bei *e*, den ganzen, durch die Sperrflüssigkeit abgegrenzten Raum mit Dampf füllen. In das Ölbad ist ausser einem Thermometer noch ein Reichel'scher Thermoregulator und zur Beleuchtung des Inneren des eingetauchten Siedegefäßes — das Paraffin war in einem Eisentopf — ein Glühlämpchen mit Zuleitungsdrähten eingeführt.

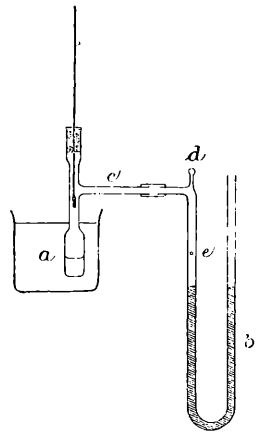


Fig. 1. $\frac{1}{10}$ n. G.

Die Capacität der verwendeten Siedegefässe betrug 8—72 cm^3 , jene der Verbindungsstücke 6—24 cm^3 , die *U*-Röhren hatten 3—15 *mm* Durchmesser und eine Länge zwischen 37 und 72 *cm*. Das Siedegefäss wird etwa bis zu einem Drittel mit Wasser oder einer anderen Flüssigkeit gefüllt; als Sperrflüssigkeit dient Wasser und Quecksilber.

Verlauf des Versuches. Man hält die Temperatur des Bades auf 110—115°; sie beträgt dann im Siedegefäss noch nicht 100° und das Sieden des Wassers wird vortheilhaft vermieden. Hat sich der Dampfraum mit Dampf gefüllt, so schliesst man zunächst den Quetschhahn, dann das Ventiloch *e*, worauf die Schwingungen eingeleitet werden können. Ist in der *U*-Röhre Wasser, so beginnt es bei der geringsten Erschütterung seine Schwingungen mit anfangs kleiner Amplitude, die aber rasch wächst und sich schliesslich auf einem maximalen Werth erhält. Bei Quecksilber als Sperrflüssigkeit muss das Gleichgewicht meist absichtlich gestört werden; es genügen jedoch anfängliche Schwankungen von höchstens 1 *cm* Länge; die Amplitude nimmt zwar langsamer zu als bei Wasser, erreicht aber *ceteris paribus* einen grösseren maximalen Werth. Die totale Schwankung wird mitunter 18—20 *cm* lang, dort erreicht sie selten mehr wie 12 *cm*. Während der Schwingungen bleibt, wie man sich mit der erwähnten Glühlampe überzeugen kann, die Flüssigkeit im Siedegefäss vollkommen ruhig, wohl aber bemerkt man, wie hauptsächlich an den Wänden des Verbindungsrohres periodisch, im Tempo der Schwingungen der Sperrflüssigkeit condensirter Wasserdampf sich niederschlägt und wieder verdampft. Wegen der Wichtigkeit dieser Condensationen nenne ich mangels einer anderen, vielleicht besseren Bezeichnung diese Schwingungen Condensationsschwingungen. Die Schwingungszahl per Minute — Hin- und Hergang zusammen als eine Schwingung gerechnet — beträgt je nach Umständen bei Wasser 120—250, bei Quecksilber 60—130; sie ist in jedem Fall unter sonst gleichen Umständen grösser als jene der freien Schwingung der Sperrflüssigkeit, wenn auf dieser in beiden Schenkeln ein constanter Luftdruck lastet; bei Wasser ist der Unterschied der Schwingungszahlen viel grösser als bei Quecksilber. Hält man mittels

des Thermoregulators die Temperatur constant, so erfolgen die Schwingungen beliebig lange mit präcis constanter Amplitude und Schwingungsdauer; letztere nimmt übrigens mit sinkender Temperatur innerhalb viel engerer Grenzen zu als die Amplitude, welche von der Temperatur sehr merklich beeinflusst wird, mit sinkender Temperatur ziemlich rasch abnimmt.

Besonderes Interesse bietet das Verhalten des im Dampfraum befindlichen Thermometers. War vor Beginn der Schwingungen die Temperatur im Siedegefäß und noch wenigstens in dem verticalen Theil des Verbindungsrohres überall gleich, so sinkt unmittelbar nach Einleitung der Schwingungen die Temperatur im Verbindungsrohr um mehrere Grade und wird an verschiedenen Stellen eine verschiedene, umso niedriger, je weiter vom Siedegefäß entfernt. Die Schwingungen erhalten sich mit abnehmender Temperatur bis zu 75° im Verbindungsrohr, wo dann im Bad circa 85° sind. Ausserdem bemerkt man bei dem Thermometer im Dampfraum ein Auf- und Abschwanken des Quecksilbers in der gleichen Periode, mit der die Schwingungen stattfinden, und zwar hauptsächlich dann, wenn gleichzeitig am Quecksilbergefäß des Thermometers Nebel sich periodisch niederschlagen und verschwinden. Diese Schwankungen des Quecksilbers im Thermometerrohr, welche auch den raschen Schwingungen des Wassers zu folgen vermögen, sowie auch die Condensationen des Dampfes im Verbindungsrohr beobachtet man bequemer bei den langsamen Schwingungen von Quecksilber in der *U*-Röhre; man kann sich dann überzeugen, dass die Condensationen während der Dilatation auftreten, während der Compression die Nebel wieder verschwinden sowie, dass das Quecksilber im Thermometerrohr während der Dilatation fällt. Bei der Verwendung von Quecksilber als Sperrflüssigkeit kommt es mitunter vor, dass die Condensationen nicht in dem einfachen Tempo der Schwingungen erfolgen, sondern auf eine erste Condensation während der Dilatation noch ruckartig eine geringere Nachcondensation folgt. Etwas analoges findet auch beim Thermometer statt. Auf die nähere Besprechung der Schwankungen im Thermometer komme ich noch zurück.

Bei Quecksilber und mitunter auch bei Wasser als Sperrflüssigkeit erhalten sich die Schwingungen selbst dann noch, wenn die Flüssigkeit im Siedegefäß bereits siedet, verlaufen aber naturgemäss nicht mehr regelmässig; bei der Dilatation, also Druckabnahme, findet ein Aufwallen der Flüssigkeit oder Aufsteigen zahlreicher Dampfblasen statt. Bei Wasser in der *U*-Röhre sind bei höheren Temperaturen die Schwingungen dann so stürmisch, dass die Flüssigkeit infolge der Druckabnahme aus der *U*-Röhre in das Siedegefäß zu stürzen droht, was insofern von unangenehmen Folgen begleitet sein kann, als das Gefäß springt und seinen Inhalt in das heisse Öl ergiesst. Diese stürmischen Schwingungen sind auch in der Hinsicht unregelmässig, als die Amplituden periodisch ab- und zunehmen, was ganz den Eindruck von Schwebungen macht.

Versucht man, bevor noch der Dampfraum mit Dämpfen gefüllt ist oder die Temperatur genug hoch ist, die Schwingungen einzuleiten, so hören dieselben, mehr oder weniger gedämpft, bald auf; es darf ferner der eingetauchte Theil des Siedegefäßes nicht ganz mit Flüssigkeit gefüllt sein, etwa nur bis zu einem Drittel oder zur Hälfte. Auch wenn alles Wasser oder der sonst verwendete Hilfskörper ganz verdampft ist, hören die Schwingungen auf.

Sie erfolgen meistens um ein in den beiden Schenkeln verschieden hohes Niveau als Gleichgewichtslage, je nach dem mittleren Druck im Dampfraum; dieser ist nach Beginn der Schwingungen gewöhnlich kleiner als der äussere Luftdruck. Die an den Wänden des Dampfraumes condensirte Flüssigkeit rinnt zum Theil in das Siedegefäß, zum Theil in das *U*-Rohr. Verwendet man als Sperrflüssigkeit Quecksilber, so bemerkt man diese Ansammlung des Condensationswassers sehr gut; die Flüssigkeit destillirt gleichsam aus dem Siedegefäß über in die *U*-Röhre. Abgesehen von dieser Condensationsflüssigkeit, welche nicht mehr zum Verdampfen gelangt, durchläuft der Hilfskörper einen vollständigen Kreisprocess und es geht nichts davon verloren.

Zur Theorie der Condensationsschwingungen. Die freien Schwingungen der Sperrflüssigkeit finden in einem *U*-Rohre von durchwegs gleichem Durchmesser, wie schon

Newton bekannt war, abgesehen von der Reibung genau sinförmig statt, auch bei endlichen Elongation, und zwar mit der Periode $2\pi\sqrt{\frac{l}{2g}}$, wo l die ganze Länge der Flüssigkeitssäule ist, sonach ganz unabhängig von ihrer materiellen Beschaffenheit. Die eben beschriebenen Condensationsschwingungen verlaufen stets rascher als die freien unter sonst gleichen Umständen und werden durch die Reibung der Flüssigkeit an der Glaswand nicht zum Erlöschen gebracht, sondern können beliebig lange erhalten werden; sie sind also nach den von Raleigh¹ gegebenen Kennzeichen erzwungene Schwingungen, bei welchen besonders deutlich die l. c. skizzirten Verhältnisse zu beobachten sind. Die Sperrflüssigkeit ist ein schwingungsfähiges System, welches durch seine Bewegung den Dampf im Dampfraum beeinflusst und umgekehrt wieder von diesem beeinflusst wird. Diese gegenseitige Einwirkung gibt sich am deutlichsten darin kund, dass man verschiedene Schwingungsdauern und Amplituden erhält, wenn bei demselben Apparat gleich lange Flüssigkeitssäulen von Wasser und Quecksilber schwingen.

Die Zustandsänderungen, welche das Wasser-Dampfgemisch durchläuft, erfolgen bei einem endlichen Temperaturgefäll gegen die Wärmequelle und mit endlicher Geschwindigkeit; namentlich aus dem letzteren Grund geht es daher nicht an, die Gleichungen der mechanischen Wärmetheorie in Anwendung zu bringen. Die Zustandsänderung ist weder eine adiabatische, noch eine isothermische, auch hat der Dampf nicht durchgehends eine gleiche Temperatur. Die Energie, welche zur fortwährenden Überwindung der Reibung der Flüssigkeit an den Wänden der *U*-Röhre, sowie zur Vergrößerung der Amplitude zu Beginn der Schwingungen verbraucht wird, stammt von den bei der Condensation abgegebenen Wärmemengen her, welche bei der darauf stattfindenden Verdämpfung von der Wärmequelle, dem Ölbad, ersetzt werden. Man hat es hier sonach mit einer Dampfmaschine besonderer

J. W. Strutt, Baron Rayleigh, *The Theory of Sound* (1877), deutsch von Fr. Neesen, §. 48 und 51.

Art zu thun, deren Wirksamkeit nicht zunächst in der Expansion des Dampfes, sondern in den im geeigneten Moment eintretenden Condensationen und Rückverdampfungen gelegen ist, welche ihrerseits die von der schwingenden Flüssigkeit an sich gesetzten Druckschwankungen vergrössern. Die beim Herausschwingen auftretende Condensation schafft eine Druckabnahme, welche mit der ohnehin entstehenden das Gewicht der im äusseren Schenkel überragenden Flüssigkeit in der Beschleunigung der ganzen Masse gegen die Gleichgewichtslage unterstützt; ebenso vergrössert die Druckzunahme, welche infolge der Verdampfung des condensirten Wassers zu der beim Hineinschwingen auftretenden hinzutritt, die Beschleunigung gegen die Gleichgewichtslage. Die Theorie verlangt, dass der Überschuss des inneren, variabeln Druckes über den äusseren, constanten Luftdruck von der Stellung der Flüssigkeitssäule allein nicht abhängt, vielmehr in der nämlichen Lage beim Hineinschwingen ein anderer ist als beim Herausschwingen, da sonst zur Überwindung der Reibung kein Plus der bei einer ganzen Schwingung gewonnenen Arbeit über die geleistete übrig bliebe.¹

Registrierung der Schwingungen. Um dies zu constatiren und überhaupt die Schwingungen ihrer qualitativen Natur nach genauer zu studiren, habe ich die Volums- und Druckänderungen des abgesperrten Dampfes registriert. Hiezu wurde einerseits ein Schwimmer mit einem Schreibstift aus Aluminium, anderseits ein Marey'scher Tambour, dessen Kautschukmembran gleichfalls einen Al-Schreiber trug, benützt. Der Schwimmer war je nach der verwendeten Sperrflüssigkeit aus Eisen oder aus Kork und hatte einen solchen Querschnitt, dass er eben noch bequem sich in dem freien Schenkel der *U*-Rohre bewegen konnte. Neben dieser rohen Führung erhielt der Schreiber noch eine doppelte Geradführung; der auf dem Schwimmer *a* (Fig. 2) befestigte Al-Draht *b* geht durch die feine Öffnung einer an das Ende des *U*-Rohres mit drei Schrauben befestigten Platte *c*, und die oberhalb des horizontalen Armes, der bei *e* die Schreibspitze trägt, angekittete dünn ausgezogene

Glasröhre ($\frac{3}{4}$ mm im Durchmesser) wird im Lumen einer vertical fixirten Barometerröhre gerade geführt. Hiedurch wurde auch bei den raschen Wasserschwingungen ein vollkommen gerader Gang der Schreibspitze erzielt, indem die transversalen Bewegungen des Al-Drahtes aufgehoben waren. Zur Registrirung des Druckes im Inneren wurde an die U-Röhre bei *d* (Fig. 1) ein Marey'scher Tambour angesetzt, auf dessen dünne Kautschukmembran ein Messingplättchen aufgeklebt war, das

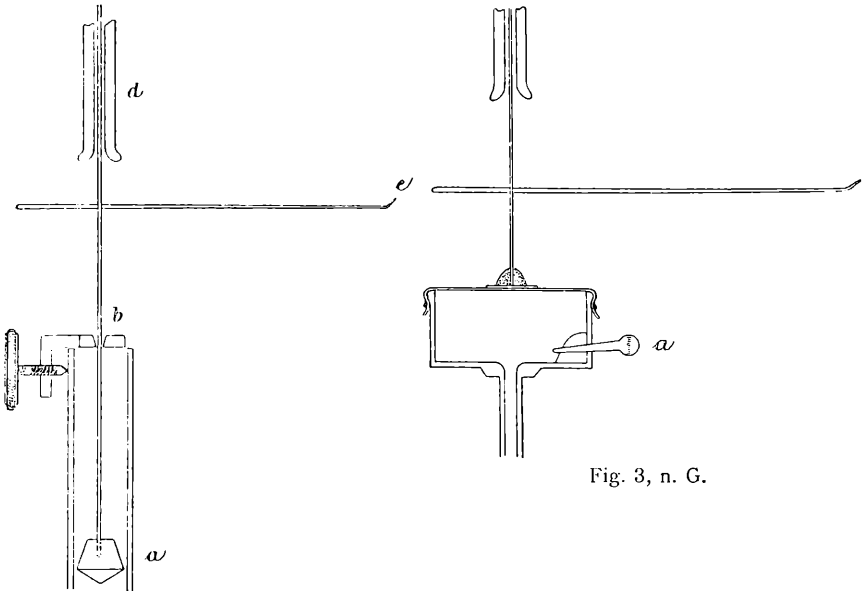


Fig. 3, n. G.

Fig. 2, n. G.

einen kurzen Al-Draht (Fig. 3) mit ebensolchem Querarm trug. Zur Sicherung des geraden Ganges der Schreibspitze genügt die Führung des Glasröhrchens wie früher. Die 1 cm tiefe Luftkapsel darf keinen zu grossen Querschnitt erhalten, da sonst durch das Nachgeben der Membran die Dämpfung so bedeutend werden kann, dass die Schwingungen überhaupt nicht auftreten; die von mir verwendeten hatten einen Durchmesser von 2 oder 3 cm für zwei verschieden starke Membranen; auch da werden die Schwingungen augenscheinlich verlangsamt. Eine 5 cm breite Kapsel ist nicht mehr zu verwenden. Bei *a* ist ein Ventilstift.

Diese directe Registrirung, welche freilich besondere Vorkehrungen zur Gradführung nöthig macht, ist jedenfalls der mittelst Hebelübertragung vorzuziehen, da die Curven ohne Verzerrung erhalten werden und die Masse und Reibung des Hebels vermieden wird, die Schwankungen auch gross genug sind. Beide Schreiber zeichnen gleichzeitig auf einer durch Uhrwerk in Rotation versetzten Trommel mit verticaler Axe Russcurven.

Um die Verlässlichkeit der erhaltenen Curven zu prüfen, habe ich noch zu einer zweiten Methode gegriffen, zur photographischen Registrirung. Die gewählte Anordnung, welche sich auch zur objectiven Darstellung sehr gut eignet, war die folgende: das Licht einer Magnesiumlampe fällt durch einen nicht zu engen, verticalen Spalt auf die Sammellinse I (Fig. 4),

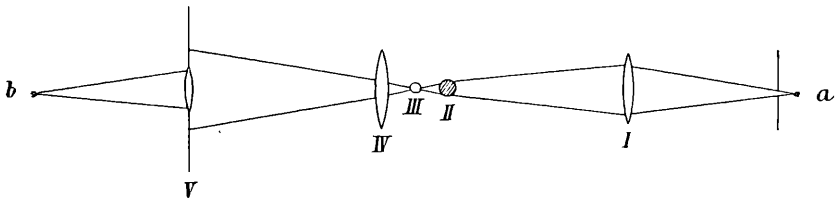


Fig. 4.

welche auf der mit Wasser gefüllten, cylindrischen Glasröhre II von 3·5 *cm* Durchmesser und 30 *cm* Länge ein unscharfes Bild des Spaltes entwirft. Die verticale Glasröhre erzeugt als Cylinderlinse in der Axe des freien Schenkels der U-Röhre III eine scharfe Lichtlinie, deren, wegen der kurzen Brennweite von II stark divergente Strahlen von IV etwas zusammengehalten werden, während die achromatische Linse V ein umgekehrtes; scharfes Bild derselben bei *b* auf der Trommel entwirft; letztere ist mit lichtempfindlichem Emulsionspapier¹ überzogen. Das in der U-Röhre schwingende Quecksilber schneidet mehr oder weniger von der Luftlinie ab, so dass auf der rotirenden Trommel das Papier unterhalb einer Wellenlinie belichtet wird.

Trotzdem die Umfangsgeschwindigkeit der Trommel rund $8 \frac{cm}{sec}$ war, erhielt man deutlich abgegrenzte Curven. Um auch Druck-

¹ Aus Dr. E. A. Just's Fabrik photographischer Papiere.

curven aufzunehmen, wurde bei der Schreibvorrichtung mit dem Marey'schen Tambour der horizontale Querarm durch ein rechteckiges Stück leichten Cartonpapiers ersetzt; dieses hat bei *a* (Fig. 5) eine kleine Öffnung und wird mittels eines angepickten verticalen Glasröhrchens in einer Barometerröhre geradeführt. Eine Magnesiumlampe wirft durch eine in doppelter Brennweite aufgestellte Linse auf den Carton einen Lichtkegel so, dass der Vereinigungspunkt der Strahlen etwas hinter das Papier fällt, damit während der Schwingungen durch das Loch bei *a* immerfort Licht hindurchgeht. Der so hergestellte auf- und abschwingende Lichtpunkt wird durch eine achromatische Linse auf der Trommel abgebildet; man erhält sonach eine einfache Wellencurve. Gegen die letztere Methode lassen sich wohl gar keine Bedenken aussprechen, da ja die Massen und die Reibung auf das Geringste reducirt sind; bei der Volumcurve wirkt die in den Umkehrpunkten sich ändernde Convexität des Quecksilbermeniscus, welcher ja die Lichtlinie abzuschneiden hat, störend.

Bei den photographischen Aufnahmen unterstützte mich in der freundlichsten Weise Herr C. Krupka, Assistent am physikalischen Institut, dem ich hiemit meinen verbindlichsten Dank ausspreche.

Diese unter ganz anderen Verhältnissen vorgenommene Registrirung ergab, dass die Russcurven genügend zuverlässig und wegen der viel einfacheren Procedur daher vorzuziehen sind.

Die erhaltenen Curven können als genau sin-förmig angesehen werden; sie haben natürlich die gleiche Periode. Während jedoch die Volumcurve sich sehr einfach auf absolutes Mass zurückführen lässt, indem man einfach die Ordinaten mit dem Querschnitt der verwendeten *U*-Röhre multiplicirt, gestattet die Druckcurve keine derartig einfache Reducirung, indem die Deformation der bewegten Membran nicht demselben Druck

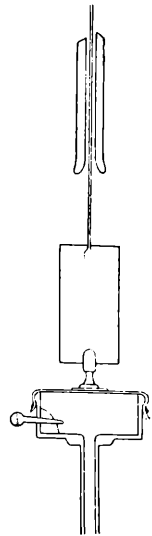


Fig 5, $\frac{2}{3}$ n. G.

entspricht wie eine gleich grosse der dauernd deformirten, gleichwohl lässt sich aus dem sin-förmigen Verlauf der erhaltenen Druckcurve auf eine ebenfalls sin-artige Änderung des Druckes mit der Zeit schliessen. Besonderes Interesse bietet die Phasenverschiebung der beiden Curven, welche unzweifelhaft vorhanden, aber so klein oder richtiger so nahe an 180° ist, dass eine verlässliche Bestimmung nicht ausführbar war; die Registrirung hätte viel sorgfältiger geschehen müssen. Doch wäre es des Versuches werth, absichtlich die Reibung zu

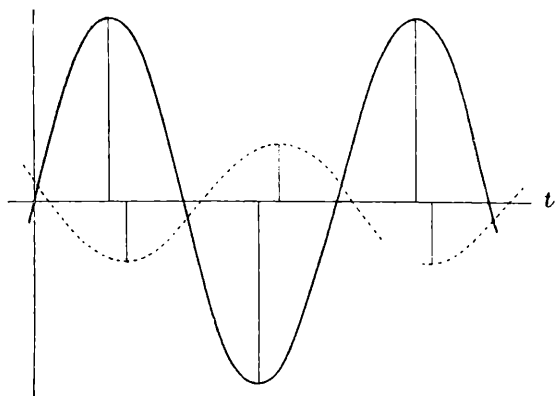


Fig. 6.

vergrössern oder die Maschine irgendwie zu belasten, um eine grössere Phasenverschiebung zu erhalten. Die beiden Curven verlaufen ungefähr in der durch Fig. 6 angedeuteten Weise, abgesehen von der verticalen Verschiebung, welche wegen der Verschiedenheit der Mittelwerthe von Druck und Volumen noch anzubringen wäre. Die ausgezogene Curve stellt den zeitlichen Verlauf des Volumens, die gestrichelte jene des Druckes dar, so wie sie direct erhalten werden. Die Druckcurve hat gegen die Volumcurve eine Phasenverschiebung von $180 + \theta$, wo θ eine kleine Grösse ist (in der Zeichnung der Deutlichkeit wegen grösser).

Die Gleichungen. Sind V und P das Volumen und der Druck des abgesperren Dampfes zur Zeit t , V_0 und P_0 die Mittelwerthe, v und p die Amplituden dieser Grössen und

$\alpha = \frac{2\pi}{T_1}$, wo T_1 die Periode der erzwungenen Schwingung ist, dann kann man nach dem Vorhergehenden schreiben

$$V = V_0 + v \sin \alpha t,$$

$$P = P_0 + p \sin (\alpha t - 180 - \theta) = P_0 - p \sin (\alpha t - \theta).$$

Durch Elimination der Zeit t aus beiden Gleichungen erhält man die Beziehung zwischen V und P , welche in der VP -Ebene die Curve der Zustandsänderung darstellt und im vorliegenden Falle bekanntlich eine Ellipse gibt; diese Relation lautet

$$\left(\frac{V-V_0}{v}\right)^2 + \left(\frac{P-P_0}{p}\right)^2 + 2\frac{V-V_0}{v} \cdot \frac{P-P_0}{p} \cos \theta = \sin^2 \theta$$

Die Neigung φ der grossen Axe gegen die V -Axe ist gegeben durch

$$\tan 2\varphi = -\cos \theta \cdot \frac{2\frac{p}{v}}{1 - \left(\frac{p}{v}\right)^2} = -\cos \theta \tan 2\psi,$$

wenn man $\frac{p}{v} = \tan \psi$ setzt.

In unserem Falle, wo θ sehr klein ist, wird die Ellipse sehr schmal, ihre endliche Hauptaxe ist gegen die V -Axe unter dem Winkel $-\psi$ geneigt; ihre ins Quadrat erhobenen Halbaxen

$$\frac{p^2 v^2}{p^2 + v^2} \sin^2 \theta \text{ und } \frac{1}{\frac{\cos^2 \varphi}{v^2} + \frac{\sin^2 \varphi}{p^2} + \frac{\sin 2\varphi}{pv} \cos \theta} \sin^2 \theta$$

werden zu $\frac{p^2 v^2}{p^2 + v^2} \theta^2$ und $p^2 + v^2$, welcher letzterer Ausdruck der wahre Werth des zweiten der vorangehenden Brüche ist, welcher für $\theta = 0$ den Werth $\frac{0}{0}$ annimmt. Durch Differentiation von Zähler und Nenner, wobei die Beziehung zwischen φ und θ zu berücksichtigen ist, erhält man in bekannter Weise

den angegebenen Ausdruck. Der Flächeninhalt der Ellipse, welcher der zur Überwindung der Reibung gewonnenen Arbeit proportional ist, beträgt

$$\frac{pv}{\sqrt{p^2+v^2}} \sqrt{p^2+v^2} \cdot \theta \cdot \pi = pv\theta\pi,$$

ist somit den Volums- und Druckamplituden, sowie der Phasenverzögerung proportional. Der in Fig. 7 durch den Pfeil ange deutete Umlaufssinn ist derart, dass bei dem Kreisprocess thatsächlich Arbeit gewonnen wird.

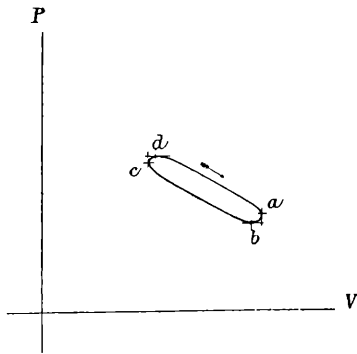


Fig.

Die für V und P aufgestellten Ausdrücke genügen auch vollkommen der Differentialgleichung für die erzwungene Schwingung der Sperrflüssigkeit. Lassen wir x die lineare Elongation des Flüssigkeitsniveaus von der Gleichgewichtslage, f den constanten Querschnitt und r den Radius der U -Röhre, l die Länge der Flüssigkeitssäule und s das spezifische Gewicht der Sperrflüssigkeit bedeuten, so lautet die Differentialgleichung mit

Rücksicht auf die Reibung¹

$$\frac{fsl}{g} \frac{d^2x}{dt^2} + 2r\pi lw \frac{dx}{dt} + 2fsx = F,$$

wo F die hinzutretende äussere Kraft, hier der Überschuss des Druckes P über den äusseren Luftdruck P_0 , also $P - P_0$ und w die Reibung pro Flächeneinheit bei der Geschwindigkeitseinheit ist. Da ferner

$$V = V_0 + fx = V_0 + v \sin \omega t, \text{ also } x = \frac{v}{f} \sin \omega t$$

¹ Vergl. J. Stefan, Über die Bewegung flüssiger Körper. III., Diese Berichte 46, S. 511 (1862).

ist, erhält man, wenn noch $\beta^2 = \frac{2g}{l} = \frac{4\pi^2}{T^2}$ gesetzt wird, wo T die Periode der freien Schwingung ist,

$$F = -\frac{v}{f} \left[\frac{f l s}{g} (\alpha^2 - \beta^2) \sin \alpha t - 2 r \pi l w \alpha \cos \alpha t \right];$$

hier ist $\frac{f l s}{g}$ die Masse m der Sperrflüssigkeit und $r \pi l w = h$ die Dämpfungskonstante. Die für F und $P - P_0$ gefundenen Ausdrücke sind conform; die Gleichsetzung der Coëfficienten ergibt

$$m (\alpha^2 - \beta^2) = a \cos \theta \quad \text{und} \quad 2 \alpha h = a \sin \theta$$

und es wird

$$F = P - P_0 = -\frac{v}{f} a \sin (\alpha t - \theta).$$

Bei sehr kleinem θ ist

$$a = m (\alpha^2 - \beta^2) \quad \text{und} \quad \theta = \frac{2 \alpha h}{a} = \frac{2 \alpha h}{m (\alpha^2 - \beta^2)}.$$

Der Ausdruck für F besteht aus zwei Theilen; von dem ersten $-\frac{v}{f} m (\alpha^2 - \beta^2) \sin \alpha t$, welcher der Elongation x proportional ist, rührt die Verkleinerung der Periode her, der zweite Theil hebt die Wirkung der Reibung auf.

Verhalten des Thermometers im Siedegefäß. Wie schon hervorgehoben wurde, zeigt ein in das Verbindungsrohr eingeführtes Thermometer periodische Schwankungen, und zwar sinkt das Quecksilber, wie man bei Schwingungen von Quecksilber als Sperrflüssigkeit deutlich sehen kann, bei der Dilatation, und steigt bei der Compression. Daraus würde man zunächst auf die Druckschwankungen als den Grund derselben schliessen. Thatsächlich geben auch die Quecksilbergefäße der von mir verwendeten Thermometer dem wechselnden Druck nach, wie ich mich überzeugte, indem ich das in ein abgeschlossenes, mit Luft gefülltes Gefäß gesteckte Thermometer Druckschwankungen aussetzte; da waren jedoch die Schwankungen des Quecksilbers eben noch merkbar, bedeutend

kleiner als die in Rede stehenden, welche $\frac{1}{2}$ —1 *mm* gross werden. Die auf der Elasticität der Glaswand des Quecksilbergefässes beruhende Empfindlichkeit gegen Druck ist bei der cylindrischen Gestalt nicht gross; sie ist bei einem abgeplatteten Quecksilbergefäss schon so beträchtlich, dass man bei Druckänderungen in trockener Luft allein bis 3 *mm* grosse Schwankungen erhält.

Dem variablen Druck darf man sonach die eigenthümlichen Schwankungen im Thermometer nicht allein zuschreiben; sie haben vielmehr hauptsächlich einen thermischen Grund und kommen von den bei der Condensation frei werdenden und bei der Verdampfung gebundenen Wärmemengen her, welche der Glaswand mitgetheilt, beziehungsweise entzogen werden, wie dies besonders daraus hervorgeht, dass die Schwankungen am stärksten dann auftreten, wenn sich der Dampf direct auf der Glashülle des Quecksilbergefässes condensirt, und beim Verschieben des Thermometers fast verschwinden, wenn das Quecksilbergefäss an Stellen ist, wo keine Condensationen sichtbar sind. Wie innig diese Schwankungen mit den Condensationen zusammenhängen, sieht man auch daran, dass bei den schon erwähnten doppelten Condensationen, welche mitunter bei langsamen Schwingungen zu beobachten sind, auch das Quecksilber in der Thermometerröhre eine zweifache Schwankung macht, wenn das Quecksilbergefäss am passenden Ort ist.

Ob die Glashülle allein diese Temperaturschwankungen mitmacht oder theilweise auch das Quecksilber, konnte ich bisher nicht feststellen, doch ist so viel sicher, dass hauptsächlich die Glaswand sich periodisch ausdehnt und zusammenzieht, da ja schon der Sinn der Schwankungen im Thermometerrohr jener ist, wie er einer blossen Veränderlichkeit der Capacität entspricht und gerade entgegengesetzt ist demjenigen, welcher Temperaturschwankungen des Quecksilbers allein zukäme.

Einwurfsfrei wären die Anzeigen eines in den Dampfraum eingeführten Metallthermometers, das bei entsprechend kleinen Dimensionen genug empfindlich sein müsste und dem man solche Abmessungen geben könnte, dass seine elastischen

Schwingungen mit den Condensationsschwingungen gleiche Periode hätten.

Im Folgenden will ich noch eine Reihe von Versuchen anführen, die angestellt wurden, theils weil sie an sich interessant sind, theils auch, um die günstigen Versuchsbedingungen aufzufinden.

Besondere *U*-Röhren. Wird die *U*-Röhre mit geradlinigen Schenkeln aus der verticalen Lage herausgebracht, so nimmt die Periode der freien Schwingung zu, sie wird $2\pi\sqrt{\frac{l}{2g\sin\alpha}}$, wenn α der Neigungswinkel gegen die Horizontale ist; auch die Periode der erzwungenen Schwingung wächst, anfangs, so lange die Neigung keine beträchtliche ist, langsam, dann rascher und endlich hören die Schwingungen ganz auf, wenn die Neigung etwa 10° geworden ist.

Über manche Fragen könnte der Versuch mit kreisförmig oder cylindrisch gekrümmten Röhren Aufschluss geben. Bei der ersten Art erfolgen die Schwingungen nicht genau sin-förmig, sondern wie bei einem Pendel von der Länge $\frac{l}{2\sin\frac{\omega}{2}}$, wo l die Länge der Flüssigkeitssäule und ω der Centri-

winkel des ausgefüllten Kreisbogens ist, vorausgesetzt, dass die Kreisebene vertical und der Querschnitt der Röhre gegen den Radius klein ist. In einer Röhre, die in einer verticalen Ebene cycloidisch gekrümmt und derart orientirt ist, dass die Spitzen in einer Horizontalen liegen, erfolgen die Schwingungen sin-förmig, die Excursionen längs des Bogens gemessen, und

zwar mit der Periode $2\pi\sqrt{\frac{4r}{g}}$, wenn r den Radius des erzeugenden Kreises bedeutet, also unabhängig von der Länge der Flüssigkeitssäule; wird auf den nach unten convexen Cycloidenbogen ein congruenter, nach oben convexer gesetzt und so viel Flüssigkeit verwendet, dass die beiden Niveaus während der Schwingungen im oberen Bogen bleiben, so ist die Periode der sin-förmigen Schwingung $2\pi\sqrt{\frac{4rl}{g(16r-l)}}$, wenn l die Länge der Flüssigkeitssäule ist.

Lange Flüssigkeitssäulen. Während die Neigung der *U*-Röhre die Periode der erzwungenen Schwingung bedeutend vergrößern kann, vermag eine über die gewöhnlichen Verhältnisse (18—50 *cm*) hinausgehende Länge der Flüssigkeitssäule die Schwingungszahl nicht so sehr zu vermindern; Flüssigkeitssäulen von 18—50 *cm* entsprechen ungefähr 100—60 freie und je nach Umständen 260—72 erzwungene Schwingungen per Minute. Um mit besonders langen *U*-Röhren zu operiren, wurden zwei 6 *mm* im Lichten weite Glasröhren durch einen 151 *cm* langen Kautschukschlauch verbunden; als Sperrflüssigkeit wurde Wasser verwendet. Es ergaben sich bei einer totalen Schwankung von 22 *cm* Länge 92 Schwingungen und bei einer 255 *cm* langen Wassersäule 66 Schwingungen mit 14 *cm* doppelter Amplitude. Den freien Schwingungen hätten die Schwingungszahlen 2·79 und 1·65 entsprochen, also bedeutend weniger. Sehr gut konnten hier auch die doppelten Condensationen beobachtet werden.

U-Röhre mit verschieden weiten Schenkeln. Es wird bei derselben Füllung entweder der engere Schenkel oder der weitere an das Siedegefäß angeschlossen; in der Schwingungszahl ergibt sich ein merklicher Unterschied.

1. Der engere Schenkel hat einen lichten Durchmesser von 4·5 *mm*, der weitere von 10 *mm*; bei Wasserschwingungen hat man in besonderem Fall 160 und 146 Schwingungen, je nachdem der engere oder weitere Schenkel mit dem Dampfraum communicirt; weniger auffallend ist der Unterschied bei Quecksilber als Sperrflüssigkeit.

2. Statt der 10 *mm* weiten Röhre wurde eine 17·5 *mm* weite genommen; dann traten, wenn der engere Schenkel angeschlossen war, bei Wasser und Quecksilber Schwingungen (136, beziehungsweise 72 per Minute) auf, im anderen Falle überhaupt keine.

Der Unterschied, welcher durch das Vertauschen der Schenkel geschaffen wird, besteht darin, dass die Geschwindigkeiten, mit welcher sich die Sperrflüssigkeit in den beiden Schenkeln und auch der vor ihr befindliche Dampf bewegen, sich verkehrt wie die Querschnitte verhalten, also den Quadraten der Radien verkehrt proportional sind. Je rascher aber

der Dampf im Verbindungsrohr hin- und hergeht, desto günstiger scheint dies für das Eintreten der Condensationen zu sein, wie auch aus später anzugebenden Beobachtungen hervorgeht. Daher finden bei Wasser die Schwingungen eine doppelte Begünstigung; die zu bewegende Masse ist *cet. par.* kleiner, daher die Schwingungen an sich rascher und dies begünstigt dann wieder die Condensationen, wodurch eine weitere Beschleunigung der Schwingungen bedingt ist.

Ein zweiter Punkt, welcher zu berücksichtigen kommt, ist der, dass die in den beiden Schenkeln beim Schwingen freigelegten Oberflächen der Röhrenwand sich ebenfalls verkehrt wie die Radien verhalten; da die Volumschwankung beiderseits dieselbe ist, hat man $r^2 \pi h = r_1^2 \pi h_1$, wenn h und h_1 die linearen Excursionen in den beiden Schenkeln sind; es verhalten sich dann die freigelegten Oberflächen

$$2r\pi h \quad 2r_1\pi h_1 = r_1 \quad r$$

In der engeren Röhre ist die der freigelegten Oberfläche proportionale Abkühlung der vorbeistreichenden Dämpfe eine grössere.

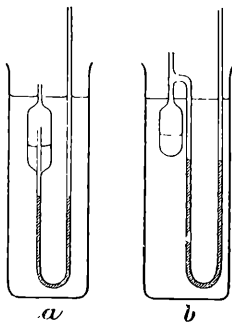


Fig. 8, $\frac{1}{10}$ n. G.

Verschiedene Anordnung des U -Rohres. Wenn das Siedegefäss aus dem Bade herausgehoben wird, so werden die Schwingungen träger, in dem Masse, als es bereits herausragt; sie erlöschen ganz, wenn nur noch der mit Wasser gefüllte Theil des Siedegefässes im Bade steckt. Andererseits darf das U -Rohr nicht in das Bad kommen; man kann die Anordnung so treffen, dass an den kürzeren Schenkel desselben das Siedegefäss direct, wie in Fig. 8 *a* angesetzt ist, wo dann bis auf ein mit Quetschhahn verschliessbares Ansatzröhrchen und den längeren Schenkel der U -Röhre kein Theil aus dem Bade ragt. Oder man lässt wenigstens die Verbindungsröhre ausserhalb des Bades wie in Fig. 8 *b*. In keinem dieser Fälle werden aber dauernde Schwingungen erhalten; es muss also eine untere Wärmequelle vorhanden sein. Die U -Röhre und das Verbindungsrohr übernehmen die Rolle einer solchen durch die Wärmeabgabe an die Umgebung.

Zwei Siedegefässe und ein *U*-Rohr. Die beiden Schenkel einer *U*-Röhre werden mit je einem Siedegefäss verbunden; die beiden Verbindungsröhren stehen auch unter einander in Communication, die durch einen Quetschhahn unterbrochen werden kann. So hat man auf beiden Seiten der Sperrflüssigkeit einen Dampfraum, also gewissermassen eine doppelt wirkende Dampfmaschine. Sperrt man mit dem Quetschhahn die Verbindung ab, so folgen die Schwingungen bedeutend rascher als bei einfacher Wirksamkeit und auch mit grösserer Amplitude. Selbst dann, wenn eines der verwendeten Siedegefässe seiner Dimensionen wegen allein die Sperrflüssigkeit nicht in Schwingungen erhalten kann, das andere ja, vermögen beide zusammen doch eine bedeutende Beschleunigung des Tempos der Schwingungen hervorzurufen gegen jene Schwingungen, welche das zweite für sich unterhält.

Ein Siedegefäss und zwei *U*-Röhren. Man kann zwei *U*-Röhren in zweifacher Weise mit einem Siedegefäss verbinden: entweder steht jede der beiden Röhren direct mit dem Siedegefäss in Verbindung, die Verbindungsröhre ist dann gabelförmig verzweigt, oder es wird bloss eine *U*-Röhre zunächst mit dem Siedegefäss verbunden, die zweite an den freien Schenkel der ersten angeschlossen; sie können also neben- oder hintereinander geschaltet werden.

Füllt man im ersten Fall die zwei Röhren mit verschiedenen Flüssigkeiten unter sonst gleichen Umständen, so dass einzeln die erzwungenen Schwingungen in denselben verschiedene Perioden hätten, so ergibt sich bei gleichzeitiger Anregung der beiden Sperrflüssigkeiten eine mittlere Periode; man sieht, die Sperrflüssigkeit in einer *U*-Röhre passt sich innerhalb weiter Grenzen verschiedenen Perioden an.

Auch die Hintereinanderschaltung ist in mechanischer Beziehung interessant. Bei dem angestellten Versuche waren die zwei *U*-Röhren verschieden weit; die eine 5·5 *mm*, die andere 9 *mm* im lichten Durchmesser. Indem abwechselnd die eine mit Wasser, die andere mit Quecksilber gefüllt wurden, konnten folgende vier Combinationen ausgeführt werden: die engere Röhre ist vorgeschaltet und entweder mit Wasser oder

Quecksilber gefüllt, oder es ist bei wechselnder Füllung die weitere vorgeschaltet. Das Verbindungsrohr der zwei *U*-Röhren konnte durch ein Quetschhahnventil mit der äusseren Luft in Communication gesetzt werden, damit man auch die Sperrflüssigkeit der vorgeschalteten Röhre allein schwingen lassen konnte. Wenn die Flüssigkeit in der zweiten Röhre mitschwang, ergab sich, wie zu erwarten, eine Vergrösserung der Periode. Nur in dem Falle, wo die weitere Röhre, mit Wasser gefüllt, vorgeschaltet war, konnten die Schwingungen nicht in beiden Röhren erhalten werden, wiewohl das Wasser allein schwingen konnte; es vermag also offenbar nicht genug Energie aufzunehmen, um auch das Quecksilber der zweiten Röhre zu Schwingungen anzuregen.

Besondere Verbindungsrohre. Um die Bedingungen, welche für das Auftreten der Condensationen günstig sind, festzustellen, insoweit sie von den Dimensionen des Verbindungsrohres abhängen, wurden Röhren wie in Fig. 9, *abc* verwendet.

Die Condensationen finden hauptsächlich oder nur an Stellen mit engerem Querschnitt statt; dort ist auch die Geschwindigkeit der hin- und hergehenden Bewegung *et. par.* eine grössere. Bei der Form *c* bleibt es sich gleich, ob I oder II mit dem Siedegefäss verbunden sind. Bei δ betrug der Querschnitt des inneren Rohres $9 \pi \text{ mm}^2$, der ringförmige $40 \cdot 25 \pi \text{ mm}^2$; bei einer zweiten Röhre von der Form *c* war der Unterschied nicht mehr so gross, die Querschnitte waren 4π und $10 \cdot 25 \pi \text{ mm}^2$; hier fanden denn auch die Condensationen an *a* und δ statt.

Ferner wurde ein Verbindungsrohr von der Form eines Hohlcyinders benützt, indem in eine weitere Glasröhre ein Messingrohr geschoben war, so dass der Querschnitt zwischen beiden Röhren im Lichten $17 \cdot 25 \pi \text{ mm}^2$ betrug. In $5 \cdot 5$ und 9 mm weiten *U*-Röhren erhielten sich mit Wasser Schwingungen, mit Quecksilber nicht. Besonders bemerkenswerth ist, dass bei dieser Verbindungsröhre das eingangs erwähnte Tönen sehr leicht auftritt.

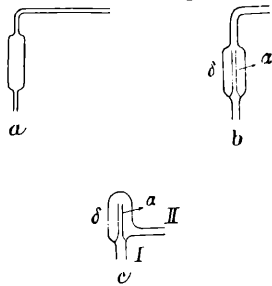


Fig. 9.

Siedegefässe und *U*-Röhren von verschiedenen Dimensionen. Werden bei demselben Siedegefäss der Reihe nach verschieden weite *U*-Röhren verwendet, so kann man nur innerhalb bestimmter Grenzen in denselben Schwingungen erhalten. Diese Grenzen sind je nach der Sperrflüssigkeit verschieden, und zwar beginnen die Schwingungen von Wasser bei engeren Röhren als jene von Quecksilber möglich zu werden, hören aber auch schon bei Röhrendurchmessern auf, bei denen sich noch Quecksilberschwingungen erhalten. Verwendet man die nämliche *U*-Röhre und der Reihe nach verschiedene Siedegefässe, so treten bei kleineren Siedegefässen die Schwingungen leichter auf; es ist auch die Schwingungszahl *et. par.* eine grössere. Geht das Siedegefäss über eine gewisse Grösse hinaus, werden die Schwingungen immer träger, um schliesslich aufzuhören.

Bei einer Röhrenweite von 3 *mm* konnten mit keinem der Siedegefässe, welche mit der Verbindungsrohre 14—78 *cm*³ fassen, Schwingungen erhalten werden, weder wenn Wasser, noch wenn Quecksilber Sperrflüssigkeit war. Mit dem kleinsten Siedegefäss beginnen Wasserschwingungen bei einer Röhrenweite von 4 *mm*, treten nicht mehr auf bei einem 9 *mm* weiten Rohr; mit einem Siedegefäss von 74 *cm*³ Capacität (die des Verbindungsrohres miteinbegriffen) treten sie erst bei 5·5 *mm* weiten Röhren und nicht mehr bei 15·3 *mm* weiten auf. Quecksilber beginnt bei dem kleinsten Siedegefäss erst in einer 5·5 *mm* weiten Röhre zu schwingen, bei dem 74 *cm*³ fassenden erst in einer 9 *mm* weiten Röhre und schwingt auch in der weitesten der verwendeten Röhren von 15·3 *mm*.

Je länger die Flüssigkeitssäule, desto grösser im allgemeinen auch die Schwingungsdauer; ich greife einige Zahlen heraus, die dies illustriren: Siedegefäss von 58·5 *cm*³ Capacität, Röhrenweite 5·5 *mm*.

	Wasser		Quecksilber		
Länge der Flüssigkeitssäule in <i>cm</i> ..	23	38	19	32	47
Schwingungszahl per Minute.....	212 (88)	184 (68)	120 (97)	80 (74)	68 (62)
Amplitude in <i>cm</i>	12	15	7	6	6

Die in Klammern beigesetzten Zahlen sind die entsprechenden Schwingungszahlen der freien Schwingungen.

Verschiedene Hilfskörper. Als Hilfskörper, der zur Verdampfung gelangt, wurde in der Regel Wasser verwendet, doch kamen auch andere Flüssigkeiten zur Untersuchung, die ich nach ihren Siedepunkten geordnet folgen lasse:

Äthyläther	$2(C_2H_5)O$	35°
Ameisensäureäthyläther	$\left. \begin{array}{l} CHO \\ C_2H_5 \end{array} \right\} O$	54°
Methylalkohol	$(CH_3)HO$	$60 \cdot 5^\circ$
Chloroform	$CHCl_3$	61°
Essigsäureäthyläther.	$\left. \begin{array}{l} C_2H_3O \\ C_2H_5 \end{array} \right\} O$	74°
Äthylalkohol	$(C_2H_5)HO$	78°
Benzol.	C_6H_6	80°
Ameisensäureamyläther	$\left. \begin{array}{l} CHO \\ C_5H_{11} \end{array} \right\} O$	116°
Essigsäure	$C_2H_3O \cdot HO$	118°
Buttersäureäthyläther	$\left. \begin{array}{l} C_4H_7O \\ C_2H_5 \end{array} \right\} O$	119°
Propionsäure . .	$C_3H_5O \cdot HO$	140°

Bei den zwei ersten Flüssigkeiten konnten weder mit Wasser noch mit Quecksilber als Sperrflüssigkeit Schwingungen erhalten werden, obgleich bei Wasser im Siedegefäß cet. par. die Schwingungen andauern. Die Temperatur im Inneren des Siedegefäßes stieg bis 55° , bei Ameisensäureäthyläther bis 85° nach jedesmaligem Lüften des Quetschhahnventils steigt der Druck rasch an, ohne dass die Sperrflüssigkeit zum Schwingen zu bringen ist. Bei den anderen Substanzen konnten Schwingungen erzielt werden. Bei Methylalkohol stieg die Temperatur bis 67° erst bei 48° hörten mit sinkender Temperatur die Schwingungen auf. Es ist also nicht der niedrige Siedepunkt der ersten zwei Äther der Grund für das Nichtgelingen des Versuches, weil etwa das Temperaturgefälle der beiden Wärmequellen zu gering gewesen wäre. Bei Chloroform begannen die Schwingungen bei 50° , bei 55° war die doppelte Amplitude schon $4-5\text{ cm}$; bei 60° trat dann so

unbedingtes Sieden ein, dass die Schwingungen sofort aufhörten. Mit Essigäther wurde bis zu Temperaturen von 77° im Inneren gegangen. Bei Benzol erloschen mit abnehmender Temperatur die Schwingungen bei 54° Essigsäuredämpfe vermögen die Schwingungen besonders kräftig anzuregen; bei Quecksilber als Sperrflüssigkeit beträgt die doppelte Amplitude bis zu 18 cm bei 100 Schwingungen pro Minute; die Schwingungen erhalten sich bis zu 75° herunter. Bei der höher siedenden Propionsäure beginnen die Schwingungen erst mit 100° sie sind bei höherer Temperatur (120°) ebenfalls sehr energisch.

Der Grund, warum mit Äthyläther und Ameisensäureäthyläther sich keine Condensationsschwingungen erhalten, scheint mir ein wesentlicher zu sein und darin zu liegen, dass bei den gesättigten Dämpfen genannter Flüssigkeiten die spezifische Wärme positiv ist. Von Äthyläther ist es bekannt, dass innerhalb des in Betracht kommenden Temperaturintervalles sein gesättigter Dampf sich bei adiabatischer Compression condensirt, bei adiabatischer Expansion aber überhitzt wird; ebenso ist von den meisten anderen angeführten Flüssigkeiten, mit welchen Schwingungen möglich waren, das entgegengesetzte Verhalten bei der Compression und Dilatation nachgewiesen oder nachgerechnet. Ich vermüthe, dass Ameisensäureäthyläther, für welchen ich Bestimmungen der specifischen Wärme seines gesättigten Dampfes nirgends gefunden habe, wie Äthyläther in der Nähe seines Siedepunktes eine positive specifische Wärme hat oder wenigstens eine sehr kleine, sei es positive oder negative. Es entspricht ganz der Theorie, dass bloss Dämpfe mit negativer specifischer Wärme die Condensationsschwingungen unterstützen können, indem bei der Expansion (auf dem Wege c über d nach a in Fig. 7) Wärme abgegeben werden muss, wie dies bei der Condensation geschieht, während der Compression (auf dem Wege a über b nach c) aber Wärme aufgenommen wird, was durch die Verdampfung möglich ist. Bei Dämpfen mit positiver specifischer Wärme würden die Condensationen zur un rechten Zeit eintreten.

Um dies auch experimentell zu erhärten, wäre folgende Versuchsanordnung zu treffen. Chloroform zeigt unter 120°

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse](#)

Jahr/Year: 1893

Band/Volume: [102_2a](#)

Autor(en)/Author(s): Wanka J.

Artikel/Article: [Über Condensationsschwingungen. 1105-1129](#)