

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 67/68 (1916)
Heft: 3

Artikel: Die Fliess-Wirbel
Autor: Rümelin, Th.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-33035>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 21.12.2024

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

INHALT: Die Fliess-Wirbel. — Das neue Krematorium in Zürich. — Elektromotor-Triebwagen mit eigener Kraftquelle. — Miscellanea: Grossschiffahrtsweg vom nord-amerikanischen Seengebiet zum Golf von Mexiko. Deutscher Verband Technisch-Wissenschaftlicher Vereine. Ueber den Nährwert des Holzes. Stelit. Simplon-Tunnel II. Gepäckkarren mit elektrischem Antrieb. Aschenförderung mittels Saugluft. Nordostschweizerischer Schiffahrtsverband. Eidg. Fabriksinspektorat. — Konkurrenzen: Erweiterung des Technikums in Biel. Behauungsplan Vevey. — Literatur: Dritter Bericht der Kommission für Hochspannungsapparate und Brandschutz des S. E. V. und des V. S. E. — † Rudolf Alioth-von Speyr. — Vereinsnachrichten: Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein: Aenderungen im Stand der Mitglieder. Gesellschaft ehemaliger Studierender: Stellenvermittlung.

Tafeln 6 und 7: Das neue Krematorium in Zürich.

Band 68.

Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet.

Nr. 3.

Die Fliess-Wirbel

von Dr. Ing. Th. Rümelin, Regierungsbaumeister.

Die „Schweizerische Bauzeitung“ hat vor kurzem zwei Aufsätze über Naturbeobachtungen an Flüssen gebracht, die auf den Wirbelzustand mehr oder weniger gleichförmig strömenden Wassers Schlüsse zulassen.¹⁾ Ich sehe in diesen Aufsätzen eine Bestätigung der Theorie, die ich in meiner Veröffentlichung „Wie bewegt sich fliessendes Wasser“, gegeben habe²⁾ und möchte zu diesen Ausführungen Stellung nehmen, um zu zeigen, inwieweit die von den Herren Ing. Roth und Ing. H. E. Gruner gemachten Beobachtungen eine Bestätigung meiner Theorie geben, da es mir zur Zeit infolge militärischer Inanspruchnahme nicht möglich ist, die aufgestellte Theorie durch Laboratoriums-Versuche näher zu untersuchen und zu beweisen.

I.

Die von Ing. Hans Roth in Zürich mitgeteilten Bilder des Sihlwehres gewähren in den typischen Bewegungszustand fliessenden Wassers einen Einblick, der nicht sehr häufig sich darbietet, da das bewegte Wasser und alle offen strömenden Flüssigkeiten, gleichfalls wie eine ruhende Flüssigkeit, das Bestreben zeigen, Niveauflächen zu bilden. Diese mehr oder weniger ebenen Flächen stehen überall zu den resultierenden äussern Kräften senkrecht und bilden so eine die innern Vorgänge verhüllende Decke.

Bezeichnet man das Volumen zweier in geringem, etwa molekulgrossem Abstand voneinander befindlichen Niveauflächen mit dem Namen Niveauschicht, so vermute ich, dass nur die obersten Niveauschichten der fliessenden Wassermasse parallel zum Wasserspiegel verlaufen; weiter nach innen zu aber wird der Zustand ein ganz anderer sein. Es ist erwünscht, diese Vorgänge im Laboratorium zu untersuchen. Da es aber nicht so leicht angeht, innere Bewegungen strömender Flüssigkeiten sichtbar zu machen — eingebrachte feste Körper von dem spezifischen Gewicht des Wassers oder Strömungsfähnchen sind untauglich, wenn sie, grösser als die eigentlichen Wasserfäden, nicht deren Bewegung folgen, und wer kann sagen, von welcher Grösse ab dieses Folgen stattfindet —, so muss man dankbar sein, wenn die Natur durch einzelne Erscheinungen selbst der Beobachtung zu Hülfe kommt.

Bei hinreichend starker Strömung, z. B. bei Hochwasser in den meisten Flüssen und Bächen, verliert sich die Glätte des fliessenden Spiegels, um eigentümlichen Wellungen und Furchungen Platz zu machen, deren Regelmässigkeit überrascht. Da man im Laboratorium sich überzeugen kann, dass diese Erscheinung auch bei ganz regelmässigem Gerinne und vollkommen ebenflächiger Sohle stattfindet, so können diese eigentümlichen Spiegel-Schwingungen nicht von irgendwelchen Unregelmässigkeiten des Bettes hervorgerufen werden. Meine Theorie behauptet, sie rühren her von Wirbeln, die im Innern der bewegten Flüssigkeit vorhanden sind. Solche Laboratoriums-Versuche sind natürlich in grösserem Masstabe, etwa in einem Wasserquerschnitt von mindestens einigen Dezimetern zu untersuchen, sonst wird die Spiegelfurchung dem Kapillarwellengitter zum Verwechseln ähnlich.³⁾

¹⁾ In Band LXVI auf Seite 13 (10. Juli 1915) von H. Roth: »Wie bewegt sich fliessendes Wasser«; ferner auf Seite 73 (14. August 1915) von H. E. Gruner: »Einiges über Bau und Berechnung von Stauwehnanlagen.«

²⁾ Besprochen durch H. E. Gruner in Band LXIII, Seite 355 (13. Juni 1914).

³⁾ Siehe Hopf, Dissertation der Technischen Hochschule München 1909, Seite 29.

Bestärkt wird die Vermutung, dass unter den obersten Niveauflächen das Wasser sich in Wirbeln bewegt, wenn an gewissen Störungsstellen vollkommen ausgeprägte Wirbel aus dem Innern der strömenden Wassermasse an die Oberfläche gelangen.

Die Bemerkung von Ing. Roth, dass auf diese merkwürdigen Erscheinungen, von denen er eine schöne Schilderung gibt, noch nirgends hingewiesen wurde, ist indessen nicht richtig, da auf Seite 75 meiner mehrfach erwähnten Veröffentlichung auf das Auftreten solcher Wirbelgebilde beim Scherflerhaus im Werkkanal Trostberg hingewiesen wurde. Ich habe damals die Behauptung aufgestellt, dass überall, wo kinetische in potentielle Energie zurückverwandelt wird, die Wirbelgebilde in Erscheinung treten. Die Lage der Wirbel und die durch die Wirbel verursachten merkwürdigen Höhen-Verhältnisse im Trostberger-Werkkanal sollen im nachstehenden und durch die Abbildungen 1 bis 4 etwas näher geschildert werden. Es sei nur ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die Angaben über die Spiegel- und Sohlenhöhen in dem Kanal nicht nur von mir auf Grund sorgfältiger Nivellements-Aufnahmen gemacht wurden, sondern auch von anderer Seite, so vom bayerischen bezirksamtlichen Sachverständigen, Herrn Regierungsbaumeister a. D. R. Krattinger, und vom bayerischen Revisions-Verein, eingehend kontrolliert worden sind.

Die Kanalverhältnisse an der Trostberger Wasserkraft-Anlage sind etwas eigenartig und erfordern deshalb eine nähere Schilderung. Das Wasser wird ungefähr 1 km oberhalb des Ortes Trostberg der Alz am linken Ufer entnommen. Ein festes Wehr aus Beton senkrecht zur Flussrichtung dient der Fassung. Unterhalb der Staustufe I wechselt nun das Kanalprofil mehrfach. Der obere Teil der Trostberger Wasserkraftanlage ist ein weiterer Ausbau der sog. Riegerschen Wasserkraftanlage auf rund 2500 PS und benützt wie diese Wasserkraftanlage als untersten Teil des Unterwasserkanals den Möglinger Altwasserarm der Alz (Abb. 1, S. 23). Dieser ursprüngliche Unterwasserkanal ist nun an Trostberg vorbei um etwa 6 km verlängert, um so die Gesamtleistung auf rund 12000 PS zu erhöhen. Während er oberhalb der Ortschaft unter Ausnützung des Altwasserarms der Alz eine erhebliche Breite hat, muss er sich zwischen dem Ort Trostberg und dem Fluss durchzwängen; er wurde hier, um möglichst an Platz zu sparen, in eine Betonschale mit senkrechten Seitenmauern gelegt, deren Querschnitt auf Abbildung 2 gegeben ist. Unterhalb des Ortes, beim Scherflerhaus, wo mehr Platz zur Verfügung steht, erhielt dann der Kanal einen trapezförmigen Querschnitt mit Beton-Verkleidung auf seinem ganzen benetzten Umfang (Abbildung 3). Durch die verschiedenen Querschnitte sind auch verschiedene Kanaltiefen entstanden und zwar wird der Kanal bei jeder Veränderung des Querschnittes tiefer; es entsteht also bei dem Eintritt des Altwasserarmes in die Betonschale und bei dem Uebergang der Betonschale in den mit Betonplatten gepflasterten trapezförmigen Querschnitt, je eine lebhaft Gefällsänderung (Abb. 4 unten, S. 22). Die Niveau-Verhältnisse, die als Folge dieser beiden Profilwechsel beobachtet werden konnten, sind für verschiedene Wassermengen von 18 m³/sek bis 60 m³/sek in Abbildung 4 dargestellt. Der untere Gefällwechsel kann auch als ein, allerdings langsam sich vollziehender Wassersprung bezeichnet werden.

Es zeigt sich, dass unterhalb des Wassersprunges jeweils ein mehr oder weniger ausgeprägtes Wellental entsteht, das sich erst sehr langsam verliert. Die nachstehende Tabelle, die für die normale Wassermenge im Werkkanal

von 50 m³/sek aufgestellt ist, gibt über die Verhältnisse noch näheren Aufschluss.

Messpunkt	6 bis 7	7 bis 8	8 bis 10	10 bis 11	11 bis Ende
Länge m	291	180	460	100	5400
Wasserquerschnitt m ²	58 bis 72	—	20,1 bis 18,0	—	37,8
Profilgestalt	Erdprofil	Uebergangsprofil und Abschluss-Betonprofil	fast rechteckiges Betonprofil	Uebergangs-Betonprofil	Trapezförm. Betonprofil
Spiegelgefälle	0,48 ‰	34 cm Gefällverlust	0,84 bis 1,1 ‰	26 cm Gefällgewinn	0,2 ‰
Art d. Wasserbewegung	gleichförmig	beschleunigt	beschleunigt	Wassersprungstelle	gleichförmig

Unterhalb des auf Abbildung 1 angegebenen Scherflerhauses, d. i. ungefähr im letzten Viertel der etwa 100 m langen Wassersprungstelle treten nun fortwährend Wirbel auf. Sie kommen mit eigentümlichem Geräusch aus der Tiefe des Kanalinnern in die Höhe und zeigen deutliche Riffelungen in der Richtung der Wirbelfäden. Die Wirbelungs- oder Kreiselaxe, die anfänglich alle möglichen Richtungen hat, stellt sich nach dem Lauf von wenigen Metern lotrecht, wobei sich die Translations- und Rotationsgeschwindigkeit der Gebilde verlangsamen und die Wirbel sich in die wagrechte Wasserführung des Spiegels auflösen. Noch eine Zeit lang bemerkt man kanalabwärts stärkere Wellen, aber bald sind auch diese geglättet.

Wie man aus den Roth'schen und meinen Beobachtungen, sowie aus den vorstehenden Darlegungen ersieht, ist es möglich, die von ihm sogenannten „plastischen Figuren“ bei Eintritt günstiger Umstände sowohl an natürlichen Flüssen als auch an Kanälen zu studieren. Um diese Wirbel in die Erscheinung treten zu lassen, ist es erstens notwendig, dass oberhalb der Erscheinungsstelle ein richtiges turbulentes Fließfeld, d. h. ein Feld mit rotierenden Wirbelgebilden oder Wälzkörpern vorhanden ist, zweitens, dass dieses plötzlich entsprechend gestört wird. Diese Erscheinung tritt öfter auf, als auf den ersten Blick angenommen werden dürfte. Sie ist nicht bloss im vollständig gleichförmig durchströmten Bett, dessen Spiegel, parallel zur Sohle liegt, zu finden, sondern auch in Stau- oder Senkungsstrecken, wie dies in den Zuflusskanälen von Turbinenanlagen der Fall ist.¹⁾

Die Wirbel zeigen umso mehr das Bestreben, ihre Form zu bewahren, je grösser die Rotationsenergie, d. h. die mittlere Geschwindigkeit ist. Die Zurückverwandlung in potentielle Energie, also die Auslösung des Wirbelauf-tauchens kann auf verschiedene Weise geschehen. Am häufigsten dadurch, dass das Profil sich plötzlich erweitert, insbesondere vertieft, daher werden bei Einmündung von Kanälen in Seen oder Wasserschlösser, von schmalen in breitere Kanäle, dann überall, wo ein plötzliches Hindernis dem lebhaft strömenden Wasser Stau bietet, wie hinter Wehren, Schusstennen, Flussverzweigungen usw. die auftauchenden Wirbel zu beobachten sein, wenn die Wassergeschwindigkeit nicht zu gross ist, dass das Wirbelbild in dem zerrissenen Fließfeld verloren geht.

Es wäre sehr erwünscht, wenn Ing. Roth die Bilderserie, die er am Sihlwehr begonnen hat, noch erweitern könnte, und zu den Bildern auch jeweils die Angaben

¹⁾ Anmerkung der Redaktion. Wir werden von anderer Seite darauf aufmerksam gemacht, dass die von Herrn Rümelin angegebenen Wirbel-Erscheinungen z. B. bei gewissen Wasserständen in dem Stau des Rheines oberhalb Augst-Wyhlen zu beobachten sind, und zwar von solcher Grösse, dass sie bei sorgfältiger Beobachtung selbst von der Bahn aus gesehen werden können. — In einer Senkungsstrecke mit unregelmässiger Flusssohle sind sie z. B. am Ausfluss des Bodensees (Untersee) oberhalb Stein a. Rh. gut zu sehen, vom Bug des Dampfers aus, in der Nähe der badisch-schweizerischen Grenze bei Stiegen. — Ein weiteres wichtiges Beobachtungs-Objekt, als Gegenbeispiel zum Trostberger Kanal, dürfte der Zulaufkanal der noch im Bau begriffenen Wasserkraftanlage Olten-Gösgen werden, wo das völlig ausbetonierte Gerinne aus flachem Trapezprofil von rund 300 m² Profil-Fläche durch kurzen Uebergang sich zum steilwandigen Felsprofil von nur noch 150 m² Fläche verengt. Das parallel zum Spiegelgefälle angenommene Sohlengefälle wird dabei von 0,13 auf 0,23 ‰, die Wassergeschwindigkeit (bei Q = 350 m³/sek) etwa von 1 auf 2 m/sek erhöht.

machen würde, welche Wassermenge über das Wehr floss, und wenn er zu der betreffenden Bilderserie einen Querschnitt des Wehres geben könnte. Die Bemerkung von Herrn Roth, dass Fremdkörper an den betreffenden Stellen herausgeschleudert werden, gibt einen deutlichen Beweis für die Rotation der Wälzkörper.

Zu dem Wunsch von Herrn Ing. Roth, es möchten die zu solchen Beobachtungen notwendigen, besonders empfindlichen Messinstrumente erfunden werden, kann ich berichten, dass mir ein solches Messinstrument 1914 patentiert worden ist. Die Herstellung desselben ist jedoch infolge Kriegslieferungen der betreffenden Firma ins Stocken geraten.

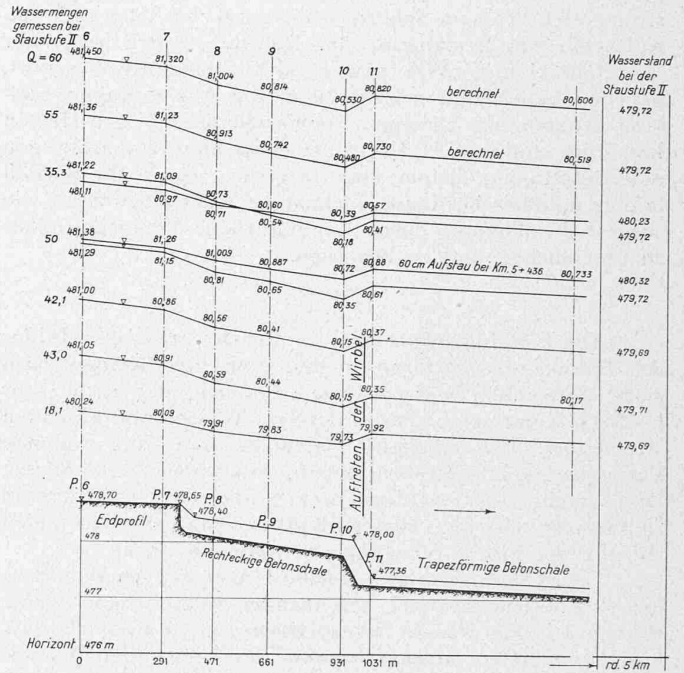


Abb. 4. Längensprofil des Trostberger Werkkanals mit Verlauf der Wasserspiegelgefälle für Q = 18 bis 60 m³/sek. Die kotierte Linie im untersten Profil bezeichnet die Kanalsohle.

II.

Der zweite Aufsatz, der einen sehr wertvollen Beitrag zu dieser Theorie der Fließwirbel liefert, stammt von H. E. Gruner in Basel. In diesem Aufsatz wird von sogenannten quellenden Wirbeln gesprochen und solche auch in Abbildungen gezeigt. Die Erscheinung ist nichts anderes, als das Auftauchen von aus der Tiefe freiwerdenden Fließwirbeln, wie sie schon oben besprochen worden sind. Die in dem gleichen Aufsatz genannten Rehbock'schen „Walzen“ dagegen sind eine von den Fließwirbeln in dem angegebenen Sinne *durchaus getrennt zu haltende Erscheinung*. Vergleicht man die von Gruner mitgeteilte Messung vom 28. V. 1910 am Ende der Rhein-Schnelle bei Laufenburg mit meinem Pulsationsgesetz $p \cdot v = H$, Pulsationszeit mal Geschwindigkeit ungefähr gleich Wassertiefe, so trifft man hier mit einer für natürliche Flüsse erstaunlichen Genauigkeit eine Bestätigung des Gesetzes, wie man sich durch Nachrechnen überzeugen kann. Die hierher gehörigen Daten sollen noch einmal kurz zusammengestellt werden. Bei der Profilstörung unterhalb jener Schnelle zeigte der Wasserspiegel des Rheins in ganz regelmässiger Periode folgende Erhöhung über den damaligen Normalstand von 2,42 m am Pegel in Basel:

sek	00	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
cm	0	30	0	10	0	12	0	11	0	12	0	10	0	35	0

Die mittlere Wassertiefe des wirksamen Profiltails betrug 29,7 oder rund 30 m. Aus dem von Herrn Gruner mir überlassenen Querprofil der Wirbelstelle (Abb. 5) wurden

die Abszissen und Wassertiefen abgegriffen und berechnet, wobei die Profilfläche $E = 478 \text{ m}^2$ ergab. Bei $1500 \text{ m}^3/\text{sek}$ betrug sonach die gemittelte mittlere Geschwindigkeit

$$v = \frac{1500}{478} = 3,13 \text{ m/sek.}$$

Wird nun ein rechtwinkliges Koordinatensystem mit der x -Axe in der Flussrichtung, der y -Axe der Wassertiefe eingeführt, so können die Geschwindigkeiten in der Richtung der Axen mit v_x, v_y, v_z bezeichnet sein. Die Aenderungen von v_x sind unter dem Namen Pulsationen bekannt. Auf sie bezieht sich der Buchstabe p in der oben mitgeteilten Formel. Die Aenderungen von v_z treten in den Ueberhöhungen zu Tage, welche die Gruner'sche Tabelle

Dass die Aufklärung des Wirbelungs- oder Turbulenz-zustandes beim fließenden Wasser auf die praktische wie theoretische Hydrodynamik von grossem Einfluss sein wird, steht wohl ausser Frage. Die ganze Sache hat aber noch eine tiefere Bedeutung für die Physik überhaupt. Von ihr ist nämlich das Problem, wie zusammenhängend den Raum erfüllende (oder nahezu zusammenhängende) in sich bewegliche Medien, sog. reibende Kontinuen, sich bewegen, bis zum heutigen Tage noch nicht gelöst. Am leichtesten zu beobachten und deshalb am wichtigsten dürfte sein, die Untersuchung reiner, gleichförmiger Fließbewegung des Wassers ohne Potential; sie muss zielbewusst und unter Ausschluss aller Nebenumstände untersucht werden, wie

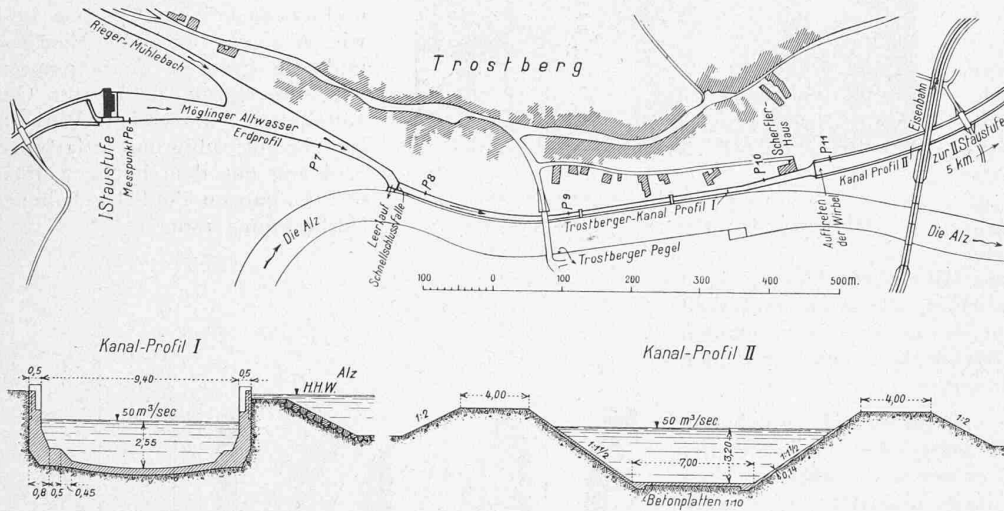


Abb. 2 und 3. Profile des Trostberger Weirkanals. — Masstab 1 : 400.

Abb. 1 (links nebenan). Lageplan des Trostberger Weirkanals. — 1 : 10000.

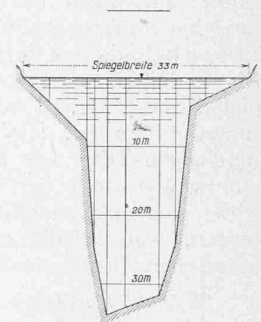


Abb. 5. Querprofil des Rheins unterhalb Laufenburg. — 1 : 1000.

wiedergibt. Ueber v_y erfahren wir aus den mitgeteilten Zahlen nichts. Wie aber durch einen einfachen Versuch, z. B. durch Beobachtungen von kleinen Fähnchen aus dünnem Seidenfaden an gespannten Drähten in irgend einem regelmässigen Laboratoriumsgerinne nachweisbar ist, können die v_y gegenüber den beiden anderen Geschwindigkeitskomponenten in verhältnismässig engen Betten vernachlässigt werden, da sie gegen diese vollkommen zurücktreten. Die Bedingung, dass das strömende Wasser inkompressibel ist, ergibt allgemein die Formel

$$\frac{dv_x}{dx} + \frac{dv_y}{dy} + \frac{dv_z}{dz} = 0$$

(Siehe Enz. d. math. Wiss. IV 15, S. 60, 1901). Diese Formel geht im vorliegenden Falle, da v_y vernachlässigt werden darf, mit praktisch genügender Genauigkeit über in die kürzere Gleichung

$$\frac{dv_x}{dx} = - \frac{dv_z}{dz}$$

woraus schon zur Genüge hervorgeht, dass jeder x -Bewegung auch eine z -Bewegung entspricht und die Pulsationen sind ebenso gut wie nach x auch in ihrer Gegenphase, der z -Richtung, zu bemerken. Wir haben somit ein Recht, in jenen periodischen Ueberhöhungen, wie sie die Tabelle gibt, direkt die Pulsationszeiten zu erblicken. Nach dieser ist zu setzen

$$p = 10 \text{ Sekunden.}$$

Woher die höhere, dem p übergelagerte Pulsationszeit

$$P = 130'' - 10'' = 120 \text{ Sekunden}$$

rührt, ob sie z. B. als ein sogenannter „Schwall“ anzusehen ist, kann zu unserm Zweck unerörtert bleiben. Mit den gefundenen Werten ergibt sich nun ohne weiteres: $10 \cdot 3,13 = 31,3$, also = der oben mitgeteilten Wassertiefe von rund 30 m , wie das vorerwähnte Pulsationsgesetz dies will. Es wäre interessant, dieses Laufenburgs Phänomen durch Modellversuch zu rekonstruieren, denn dadurch würde erst die volle Beweiskraft des Beispiels geliefert.

dies schon vor drei Jahren von mir gefordert wurde. Bis jetzt ist es noch nicht gelungen, für einen turbulenten gleichförmigen Fließzustand die Euler-Stokes'schen Gleichungen¹⁾ zu integrieren. Für ein verwandtes Problem allerdings, nämlich den bekannten Strömungszustand hinter bewegten festen Körpern in Flüssigkeiten, hat, wie ich einer sehr schätzenswerten Mitteilung von dem Leiter der Berliner Physikalischen Zeitschrift, Herrn Universitätsprofessor Born, entnehme, im September 1911 Th. v. Kármán der Kgl. Gesellschaft der Wissenschaften in Göttingen eine interessante Abhandlung vorgelegt, die auf streng theoretischem Wege aus den hydrodynamischen Grundgleichungen einen periodisch wechselnden und anisotropen²⁾ Zustand jenes Feldes errechnet hat. Damit wäre wenigstens für diesen Fall erwiesen, dass in den Euler-Stokes'schen Grundgleichungen die Berücksichtigung der Ditropie eingeschlossen ist, ein Ergebnis von, wie ich glaube, äusserster Wichtigkeit. Nur diese Ditropie vermag, wie ich a. a. O. S. 56/64 kurz skizziert habe, es verständlich zu machen, wie in einer volumbeständigen oder inkompressiblen und kontinuierlichen oder reibenden Flüssigkeit die gewissermassen elastische Wirkung der Pulsationen als notwendiges Kennzeichen der stationären Fließbewegung entsteht. Diese Erscheinungen, deren Aehnlichkeit mit den Grundgebilden der Atomistik, der kinetischen Gastheorie mit ihren elastischen Bällen, der G. Jaeger'schen Molekularbewegung, der elektromagnetischen Weltbeschreibung mit ihren positiven und negativen Elektronen, auf der Hand liegt, sollten gerade beim fließenden Wasser weiter verfolgt werden, weil sie nirgends wie hier gleichsam makroskopisch zu studieren sind. Dabei werden natürlich die Ergebnisse der sonstigen, nach dieser Richtung geschehenen Untersuchungen von Bjerkner, Thomson und Anderen, mitzuverwerten sein.

¹⁾ Vergl. Prandtl, Abriss der Lehre von der Flüssigkeits- und Gasbewegung (Jena 1913), S. 15.

²⁾ Und zwar ist der Zustand ditrop, die Wirbeldrehung ist gegenläufig, wie z. B. aus den Ahlborn'schen Photographien dieser Erscheinungen im Jahrb. der Deutschen Schiffbautechn. Ges. 1910 hervorgeht.