

## 25 Jahre fluidische Steuerelemente in der Wassertechnik

### Kurzfassung

FLUIDICS sind reine strömungsmechanische Elemente, die Fluidströme nur mit Hilfe verschiedener Strömungseffekte steuern und keine beweglichen Teile haben. Seit etwa 25 Jahren werden sie in der Wassertechnik eingesetzt. Sechs Wirbelkammergeräte werden vorgestellt. Weltweit arbeiten mehrere tausend dieser Anlagen in Abwasserkanalisationen und an Rückhaltebecken aller Art.

### Abstract

FLUIDICS are purely fluidic devices which control flow of fluids by various flow effects, without using any moving parts. These devices have been used in water technology for the past 25 years. Six types of vortex chamber controllers are presented. Thousands of these controllers are in service worldwide, in sewer systems and at all types of retention reservoirs.

### 1 Frühe Versuche

Angesichts des 100-jährigen Bestehens des Hubert-Engels-Laboratoriums hat ein Bericht über „nur“ 25 Jahre Entwicklung einer hydromechanischen Spezialität eine schlechte Ausgangsposition. Aber fast nie fällt eine technische Neuerung vom Himmel, auch wenn das mancher Erfinder und sogar das Patentamt glaubt. So ist das auch bei den fluidischen Steuerelementen, über die im folgenden gesprochen werden soll. Fluidische Steuerelemente sind Vorrichtungen, die ohne bewegliche Teile allein unter Ausnutzung strömungsmechanischer Effekte einen Fluidstrom, also Gas oder Flüssigkeit, steuern können. Mehr dazu später.

Heute ist ziemlich sicher, daß das erste fluidische Steuerelement im Jahr 1928 von Herrn Prof. Thoma vom Hydraulischen Institut der Technischen Hochschule München zum Patent angemeldet wurde [1]. Das ist immerhin 70 Jahre her und war kurz nachdem Herr Prof. Hubert Engels in Dresden im Jahr 1924 emeritierte, aber weiterhin aktiv blieb. Wahrscheinlich haben sich die beiden Hydraulik-Kollegen sogar gekannt. Bild 1 zeigt das Original der sogenannten „Thomaschen Rückstromdrossel“ aus Messingguß und mit abgenommenem Deckel. In der damaligen Beschreibung heißt es: „Die Vorrichtung, die keine beweglichen Teile besitzt und in beiden

Durchflußrichtungen einen sehr verschiedenen Fließwiderstand aufweist, würde in gewissen Fällen, obgleich sie das Rückströmen nicht vollständig verhindern kann, große Vorteile bieten". Man hat damals wohl vorrangig an Sicherheitsventile für Dampfmaschinen gedacht. Strömt Dampf oder Wasser durch die mittige Düse in die kreisrunde Wirbelkammer, verteilt sich das Fluid wie bei einem Plattendiffusor etwa gleichförmig radial in der Kammer und fließt dann nach links im Bild 1 aus der tangentialen Düse aus der Kammer heraus. Der Druckverlust ist gering, die Bremse ist offen. Wechselt aber die Fließrichtung, so daß das Fluid von links kommend tangential in die Wirbelkammer strömt und diese nun mittig verlassen muß, so baut sich eine linksdrehende Wirbelströmung mit großem Druckabfall auf, der Rückwärtsstrom wird stark gebremst. Das Verhältnis der Durchflüsse vorwärts zu rückwärts betrug etwa 4:1. Mit dem Sieg der Verbrennungsmotoren kam die Idee in Vergessenheit.

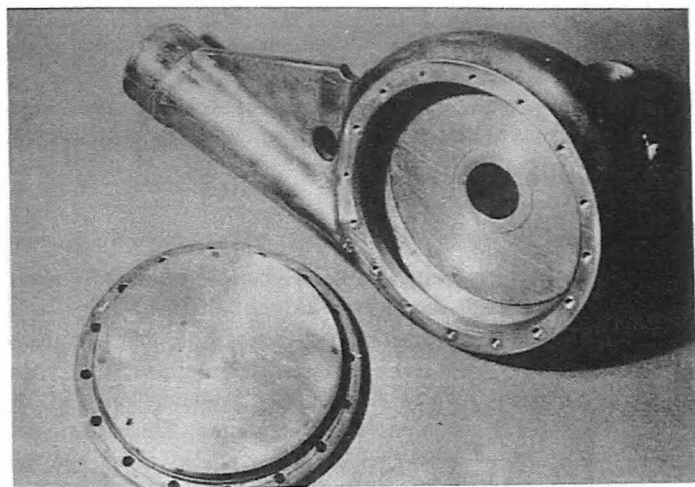


Bild 1: Thomasche Rückstromdrossel aus Messing von 1928, Foto Dr. Tippetts, Sheffield

Wie Seeber berichtet [2], kam dann etwa 40 Jahre später doch noch eine Wasser-Rückstrombremse zum Einsatz. Im Wasserschloß des Kaunertalkraftwerkes in Österreich arbeitet zur Dämpfung der Druckschwankungen eine Rückstromdrossel mit 6,40 m Durchmesser und einer Spitzenleistung von 15.000 PS!

## 2 FLUIDIC, Euphorie, unerfüllte Hoffnungen und Erfolg mit Wasser

Etwa ab 1960 tauchten in Forschungslabors der amerikanischen Armee sogenannte "FLUIDICS" auf [3]. FLUIDIC steht für FLUID LOGIC. FLUIDICS

nutzen, ähnlich wie Transistoren und andere Halbleiterelemente in der Elektronik, nicht alternde physikalische Effekte und haben keine verschleißenden, mechanisch bewegten Teile. Das Militär hoffte, mit FLUIDICS sehr zuverlässige und kompakte Steuerungen für Geschosse und Raketen bauen zu können, die sogar elektromagnetischen Schocks widerstehen würden. In England setzte die Atomindustrie große Hoffnungen in die FLUIDICS. Sie sollten als Sicherheitsventile in Notkühlkreisläufen u.ä. eingesetzt werden [4].

Man erwartete eine ähnlich stürmische Entwicklung wie in der Elektronik. In der Maschinenbaubranche kam Euphorie über eine mit Hydrauliköl, Abgas oder Preßluft arbeitende Alternativtechnik auf.

Bild 2 zeigt eine Zusammenstellung der bekanntesten FLUIDIC-Elemente aus damaliger Zeit. Man muß noch heute den Mut meiner damaligen Lehrer, Herrn Prof. A. Röhnisch, Herrn Prof. Marotz und Herrn Prof. Giesecke von der Universität Stuttgart, bewundern, angesichts dieser merkwürdigen Apparate das Thema an einem Institut für Wasserbau überhaupt zur Promotion zuzulassen, Dissertation 1972 [5]. Die einzige Bedingung, die man mir damals stellte, war, ich möge doch bitte an einem Wasserbauinstitut Wasser als Fluid benutzen.

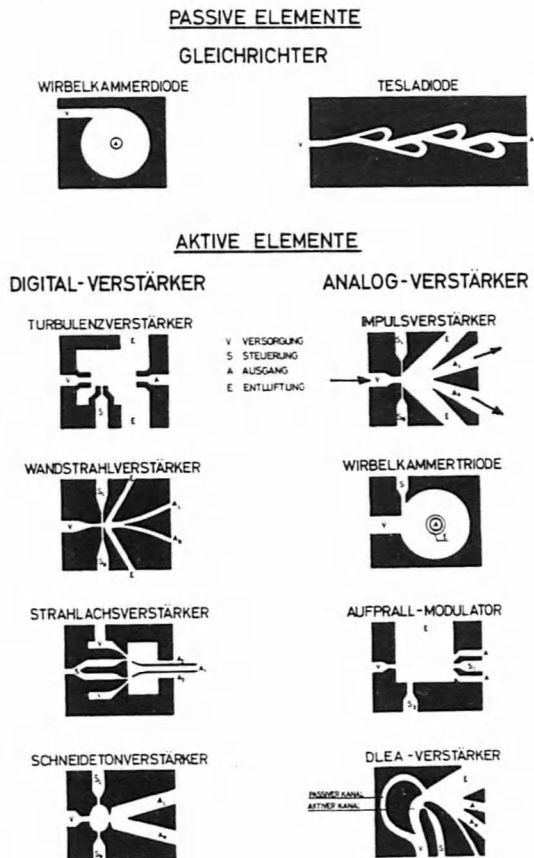


Bild 2: Die bekanntesten FLUIDIC-Elemente um 1970 aus [5]

Aus Platzgründen soll nur ein einziges FLUIDIC beschrieben werden, um die damalige Faszination zu verstehen: der Impulsverstärker von Bild 2. Von einer Versorgungsdüse V wird ein Freistrahlmittig auf einen Keil geschickt. Das Fluid wird in zwei gleiche Teilströme gespalten und verläßt das Element am linken und rechten Ausgang  $A_L$  und  $A_R$ . Damit bei „Rückstau“ an einem der Ausgänge das Fluid nicht einfach den Weg zum anderen Ausgang nimmt, gibt es links und rechts Entlüftungen E, Entschuldigung, Entwässerungen. Schickt man nun in eine der beiden Steuerdüsen S links und rechts an der Wurzel des Freistrahls einen zusätzlichen Wasserstrom, wird der Hauptstrahl seitlich abgelenkt, so daß nun die Ausgänge ungleich beschickt werden. Mit einem relativ kleinen Steuerimpuls können so relativ große Volumen- bzw. Massenströme auf verschiedene Ausgänge gelenkt werden. Man sprach von Verstärkungsverhältnissen von mehr als 1:100. So könnte man z.B. den Kurs einer Rakete korrigieren, indem man den Triebstrahl mit Hilfe kleiner seitlicher Impulse schwenkt. Die elektro-mechanische Lösung der gleichen Aufgabe ist keine einfache Sache. Versteht man nun die damalige Aufregung um eine neue Technologie?

Dem geübten Hydromechaniker wären natürlich schon damals Zweifel gekommen. Zerfällt der Freistrahlmittig wegen Turbulenz, leidet darunter die Trennschärfe, sind die Druckverluste in der Praxis hinnehmbar? Diese Gegenargumente, die gelegentlich hochkamen, wurden damals mit der Begründung abgewiesen, das wäre ein neues Feld und die Forschung würde das Problem schon lösen. Und überhaupt läge die Zukunft der FLUIDIC in der Miniaturisierung. Man wollte genau so wie in der Halbleitertechnologie alles ganz klein machen. Und je kleiner etwas wird, um so kleiner werden die Verluste, und es stellt sich sowieso laminares Strömen ein, Punkt.

Ich war damals noch ein ziemlich ungeübter Hydrauliker. Aber die Vorgabe, doch bitte Wasser als Fluid zu benutzen, erwies sich als sehr erzieherisch. Es mußte nämlich dringend überlegt werden, zu welchem Zweck diese neuartigen FLUIDICs denn im Wasserbau zu gebrauchen wären? So kam ich schnell dahinter, daß nicht die Signalverarbeitung mittels Wasser ein dringendes Bedürfnis, sondern daß die Steuerung des Durchflusses ein viel weiteres Feld ist.

Oben links auf Bild 2 sieht man die Thomasche Rückstrombremse. Sie zählt 1970 in Anlehnung an die Elektronik zu den Gleichrichtern oder Dioden. Bei den Analogverstärkern findet man ein äußerlich ähnliches, aber damals gänzlich neues Element, die Wirbelkammertriode. Die beiden genannten Elemente sind ab dem Jahr 1973, also vor 25 Jahren, die Stammeltern einer ganzen Familie von Wirbelkammergeräten geworden, die heute in der Wasserwirtschaft arbeiten.

Die anderen FLUIDICs sind heute bis auf wenige exotische Ausnahmen, z.B. beim Militär und in der Atomindustrie, untergegangen. In Maschinenbauerkreisen wird vom "Flop des Jahrhunderts" gesprochen. Der Grund für das Scheitern war die Ignoranz gegenüber den strömungsmechanischen Gesetzmäßigkeiten und das Unterschätzen der Probleme bei der Miniaturisierung. Die Strömungseffekte werden schwächer, je kleiner der Maßstab wird! Durch die Forderung, Wasser als Fluid zu benutzen, wurde dieser Schritt in die falsche Richtung vermieden.

### 3 Wirbeldrosseln

Das Phänomen der Wirbelströmung wird in allen noch zu zeigenden Geräten zu Steuerungszwecken genutzt. Das strömungsmechanische Prinzip läßt sich sehr schön an der sogenannten Wirbeldrossel erklären, siehe Bild 3. Die Wirbeldrossel ist ähnlich der alten Thomaschen Rückstrombremse, aber sie wird nur in Bremsrichtung betrieben. Das Wasser fließt tangential in eine horizontale rotationsymmetrische Kammer hinein, die unten eine kreisförmige, zentrische Ausgangsöffnung hat. Wegen des Satzes der Erhaltung des Impuls-momentes beschleunigt die Strömung auf der Bahn einer logarithmischen Spirale von außen nach innen. Die Beschleunigung ist verlustarm, weil sich eine fast ideale Wirbelsenke einstellt. In der Mitte werden die Fliehkräfte so groß, daß sich ein luftgefüllter Wirbelkern bildet. Der Ausfluß ist ein Hohlstrahl, der nur einen kleinen Teil des freien Ausgangsquerschnitts benutzt.

Die Abflußformel für die Wirbeldrossel, die in [6] für den vereinfachten Fall einer zweidimensionalen, reibungsfreien Flüssigkeit beim Ausfluß ins Freie abgeleitet wird, lautet, wobei  $h_e$  die Druckhöhe am Zulauf ist:

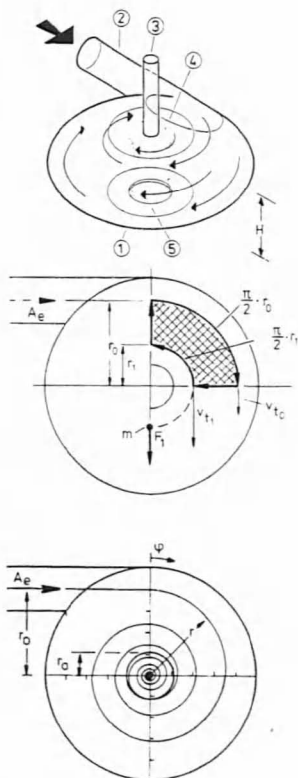


Bild 3: Wirbeldrossel und Strömungsvorgänge  
 1 Wirbelkammer,  
 2 Zulauf,  
 3 Wirbelkernbelüftung,  
 4 luftgefüllter Wirbelkern,  
 5 austauschbare Ausgangsblende

$$Q = A_e \frac{r_a}{r_0} \sqrt{2gh_e}; \quad \mu \cong \frac{r_a}{r_0} = \text{const}; \quad Q = A_e \mu \sqrt{2gh_e}$$

Man erkennt leicht die Torricellische Abflußformel. Der Fließbeiwert  $\mu$  ist abhängig vom Verhältnis der Wirbelkammerradien. Der Abfluß würde theoretisch Null werden, wenn die Wirbelkammer unendlich groß wird. Das ist natürlich falsch, weil die Formel stark vereinfacht ist. Aber der Durchfluß wird tatsächlich sehr klein.  $\mu$ -Werte bis hinunter zu 0,15 lassen sich erreichen, selbst wenn der Ausgangsquerschnitt nicht kleiner als der Zulaufquerschnitt ist. Verglichen mit dem Ausfluß aus einer scharfkantigen Öffnung gleicher Querschnittsfläche  $A_e$  ist das nur etwa ein Viertel des Durchflusses!

Mit diesem Strömungstrick eroberte sich die Wirbeldrossel ab 1976 ein weites Einsatzfeld in der Abwassertechnik und in der Verfahrenstechnik, wo es schwierig zu handhabende Flüssigkeitsströme zu drosseln gab. Die dort bislang üblichen Drosselblenden verstopften oder verzopften bei kleinen Abflüssen. Drosselrohre sind ungenau, verstopfen noch leichter und sind im Abfluß nicht verstellbar. Heute sind weltweit einige tausend Wirbeldrosseln, vor allem in der Abwasserkanalisation an Regenüberläufen und Regenbecken, mit großem Erfolg in Betrieb. Bild 4 zeigt eine Wirbeldrossel DN 200 mm für einen Abfluß von 25 l/s bei 2,5 m Druckhöhe. Die Drossel aus Edelstahl kann mühelos eine Lebensdauer von 50 Jahren erreichen.



Bild 4: Wirbeldrossel aus Edelstahl als Abflußsteuerung an einem Regenüberlaufbecken

## 4 Wirbelkammertrioden

Die Wirbelkammertriode sieht auf den ersten Blick wie eine Wirbeldrossel aus, hat aber neben der Ausgangsdüse A und der Steurdüse S eine dritte, radial ausgerichtete Versorgungsdüse V, deshalb der Name „Triode“, siehe Bild 2 und 5. Fließt das Wasser nur durch die Versorgungsdüse zu, gibt es in der Wirbelkammer zwei schwache, spiegelsymmetrische Strömungswalzen. Das Wasser fließt als Vollstrahl nach unten ab. Der Druckverlust ist relativ klein, der Durchfluß groß.

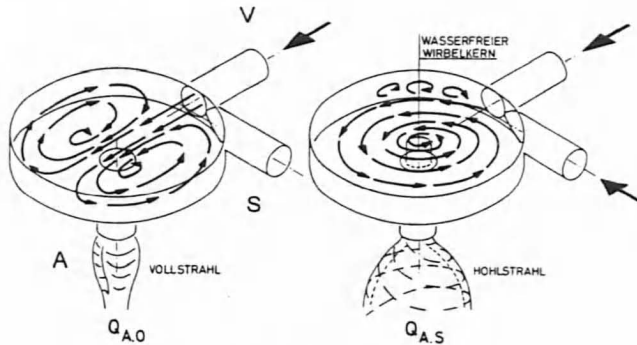


Bild 5: Wirbelkammertriode, Strömungsbilder nach [8]

Schickt man nun zusätzlich einen zweiten Wasserstrom durch die tangentielle Steurdüse, tauschen beide Strahlen den Impuls aus und es kommt zu einem ganz anderen Strömungsbild mit einem starken Einzelwirbel und einem Hohlstrahl am Ausgang. Das Resultat ist paradox: obwohl ein zusätzlicher Wasserstrom in die Wirbelkammer geschickt wird, ist der Abfluß aus der Kammer kleiner als zuvor. Das Element ist aktiv und kann deshalb das Torricellische Gesetz überlisten, obwohl die Gehäusegeometrie unverändert bleibt und es keine mechanisch bewegten Teile gibt. Neumayer [7] hat den Wirkungsgrad von Trioden bis auf über 60 % steigern können, d.h. der Abfluß am Ausgang geht auf 40 % des Ausgangswertes zurück, wenn ein Steuerstrom mit derselben Druckhöhe wie der Versorgungsstrom angelegt wird.

Zugegeben, auch für den geübten Hydrauliker ist dieser Effekt aufregend. Doch was ist der praktische Nutzen? Ich mußte mir auf den FLUIDIK-Konferenzen in den 70-er Jahren den Kommentar "Solution looking for a problem" anhören. Bild 7 zeigt einen idealisierten Vorschlag für praktische Nutzenanwendung in der Wasserwirtschaft, der ohne den nachhaltigen Einsatz von Herrn Prof. Giesecke [8] wohl nie seinen Weg in die Praxis gefunden hätte. Eine Wirbelkammertriode, zum besseren Verständnis senkrecht stehend gezeichnet,

steuert den Abfluß aus einem Rückhaltebecken. Solange der Zufluß klein ist, ist der Speicher leer, weil das Wasser ungebremst durch die Triode abläuft. Steigt der Zufluß bei Regen an, füllt sich der Speicher allmählich, wobei die Triode mit den beiden symmetrischen Doppelwalzen arbeitet und einen kleinen Fließwiderstand entwickelt. Ist der Speicher etwa zur halben Höhe gefüllt, überschreitet der Abfluß das vorgegebene Limit. Nun wird eine Überfallschwelle geflutet, das Wasser fließt hinab in die Steurdüse, stößt den Wirbel an und reduziert den Abfluß. Wenn die Hochwasserentlastung anspricht, also der Speicher voll ist, wird wieder der Sollabfluß erreicht. Obwohl es nur zu etwa einem halben Dutzend praktischer Anwendungsfälle bei Hochwasserrückhaltebecken kam, ist die Wirbelkammertriode ein wichtiges Bindeglied auf dem Weg zum Verständnis und Erfolg der fluidischen Steuerelemente.

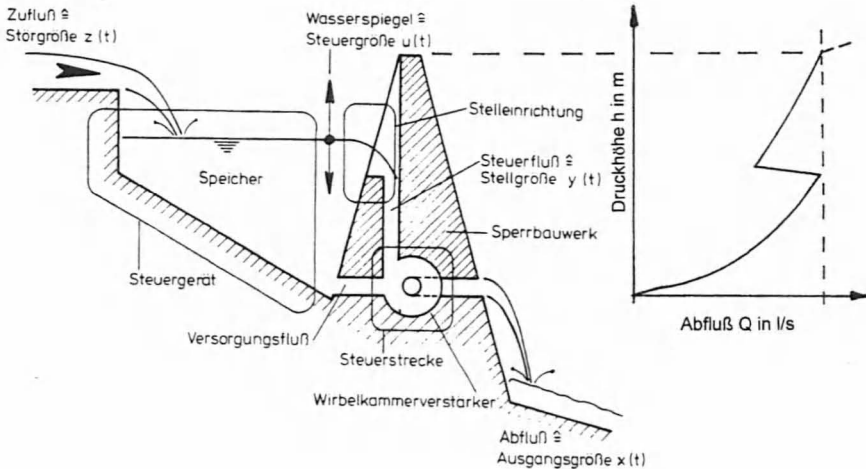


Bild 6: Abflußsteuerung für ein Hochwasserrückhaltebecken mit einer Wirbelkammertriode

## 5 Gesteuerte Wirbelventile

Die Beschäftigung mit Problemen der Abflußsteuerung zeigte bald, daß die Wirbelkammer einige Bauhöhe verbraucht, weil das Wasser nach unten herausfließt. Diese Höhe fehlt in der Praxis oft. Das gesteuerte Wirbelventil, siehe Bild 7, löst dieses Problem. Das Ventil hat eine gerade und horizontale Durchflußachse. Die Wirbelkammer sitzt "huckepack" darüber. Es gibt zwei Steurdüsen.



Die erste setzt den Wirbel in Gang, wenn der Sollabfluß überschritten ist, die zweite stoppt den Wirbel wieder, wenn das Rückhaltebecken voll ist und erlaubt so eine Vorentlastung. Das erste Hochwasserrückhaltebecken mit einer vollfluidischen Abflußsteuerung aus zwei parallelen Wirbelventilen, siehe Bild 8, arbeitet seit 1981 [9]. Der Sollabfluß der Anlage beträgt  $8 \text{ m}^3/\text{s}$ , der Hochwasserabfluß  $36 \text{ m}^3/\text{s}$ . Die Ventillinnenweite ist  $900 \text{ mm}$ . Heute gibt es etwa zwei Dutzend ähnlicher Anlagen.

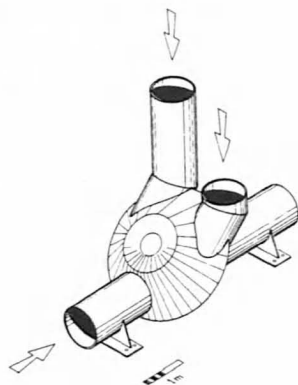


Bild 7: Doppelt gesteuertes Wirbelventil

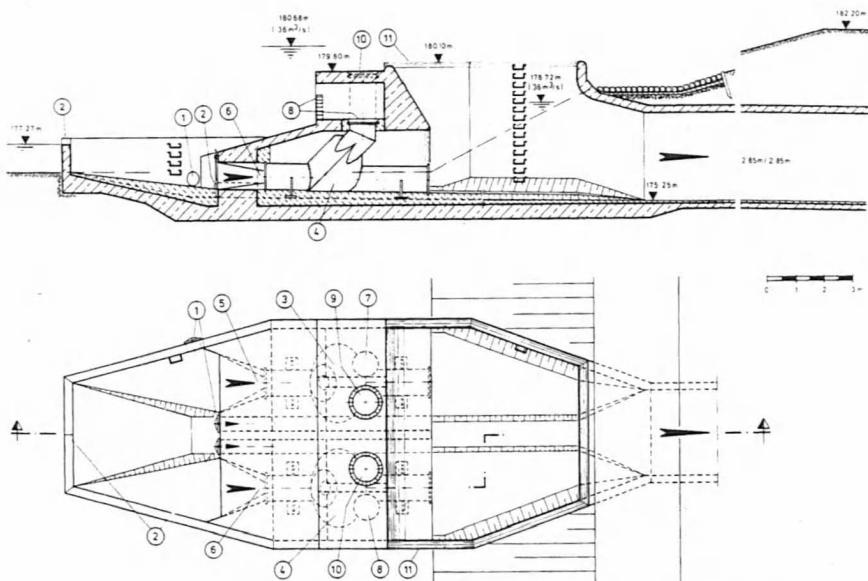


Bild 8: Vollfluidische Steuerung des Hochwasserrückhaltebeckens Alzey, Sollabfluß  $8 \text{ m}^3/\text{s}$ .  
 1 Grundablässe, 2 Dauerstauschwelle, 3,4 linkes und rechtes Ventil, 5,6 Versorgungsdüsen, 7,8 erste Steuerung, 9,10 zweite Steuerung, Vorentlastung, 11 Hochwasserentlastung

## 6 Konische Wirbelventile

Einen weiteren Schritt zur Vereinfachung stellt das sogenannte "konische Wirbelventil" dar, siehe Bild 9. Es gibt nur noch eine einzige Einlaßdüse, die konische Wirbelkammer ist schräg aufgerichtet, so daß das Wasser fast ohne Höhenversatz durch das Ventil fließen kann. Ist der Vordruck gering, stellt sich Freispiegelabfluß ein, Offenstellung. Steigt der Vordruck, entweicht die Luft und die Wirbelkammer füllt sich mehr und mehr mit Wasser. Ist die Kammer scheidetvoll und damit der Wasserkörper perfekt rotationssymmetrisch, springt der Wirbel an. Das Ventil arbeitet nun wie eine Wirbeldrossel mit dem fast gleich großen Fließwiderstand. Das Ventil schaltet also ohne jede Hilfsenergie und ohne bewegliche Teile zwischen kleinem und großem Fließwiderstand hin und her, siehe Abflußkurven auf Bild 10. Die Form der Abflußkurve kann durch Verändern des Aufstellwinkels der Wirbelkammer angepaßt werden.

Die starke Abflußdrosselung bei großem freien Durchgangsquerschnitt und die sichere Funktion dank nicht alternder Strömungseffekte haben das konische Wirbelventil zum erfolgreichsten Vertreter der Familie der fluidischen Elemente gemacht. Weltweit arbeiten mehrere tausend Geräte, vornehmlich in der Abwasserkanalisation. Bild 12 zeigt zwei typische Abwasserventile.

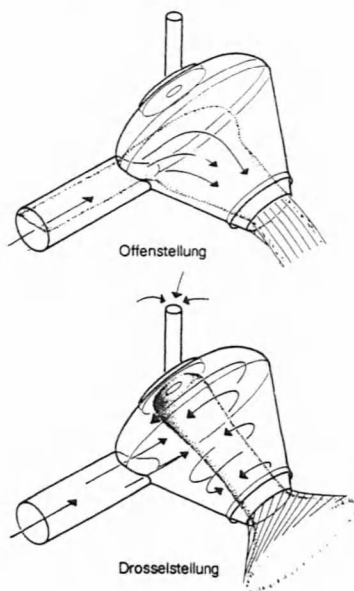


Bild 9: Funktion des konischen Wirbelventils

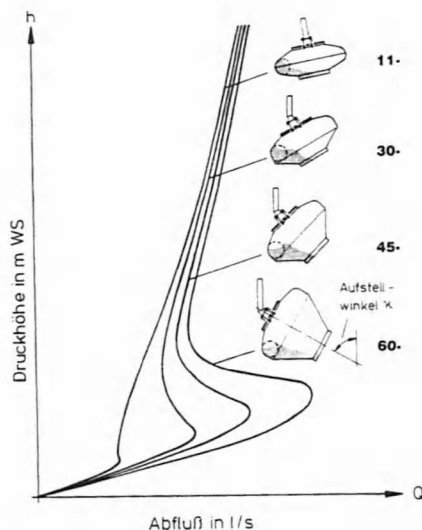


Bild 10: Typische Abflußkurven

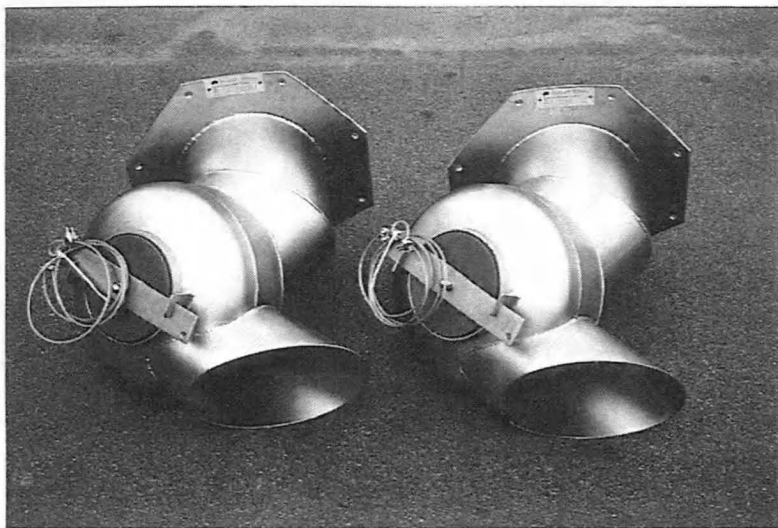


Bild 11: Abwasserventile aus Edelstahl aus der Serienproduktion für die Abflußsteuerung an Regenüberläufen in Mischwasserkanalisationen, nasse Aufstellung

## 7 Vertikale Wirbelventile

Nachdem man erkannt hatte, daß der Wirbel auch gut arbeitet, wenn er schräg gestellt wird, war es nur konsequent zu versuchen, was passiert, wenn man die Wirbelkammer senkrecht aufstellt und das Wasser von schräg unten zufließen läßt. Das Ventil wird dabei im Oberwasser eingebaut (nasse Aufstellung), steckt damit teilweise selbst im Wasser oder taucht sogar unter, siehe Bild 12.

Bei teilweisem Eintauchen wirkt die Ausgangsöffnung als hydraulischer Kontrollquerschnitt. Der Fließwiderstand ist klein. Steigt der Außenwasserspiegel an, wird der Wasserkörper in der Wirbelkammer mehr und mehr rotationssymmetrisch. Die Luft entweicht oben aus einer kleinen Öffnung. Ist die Wirbelkammer völlig untergetaucht, setzt die Wirbelströmung ein und bremst den Abfluß. Die Gehäuseform wurde so optimiert, daß das vertikale Wirbelventil den besten Fließwiderstand in der ganzen Gerätefamilie erreicht. Um den gleichen Durchfluß bei gleichem Druck herzustellen, müßte eine scharfkantige Drosselblende einen 6-mal kleineren Fließquerschnitt haben. Vertikale Wirbelventile sind zu Tausenden in der ganzen Welt im Einsatz, insbesondere bei der Abdrosselung des Regenwasserabflusses von Straßen, Autobahnen und Flugplätzen und in der allgemeinen Verfahrenstechnik.

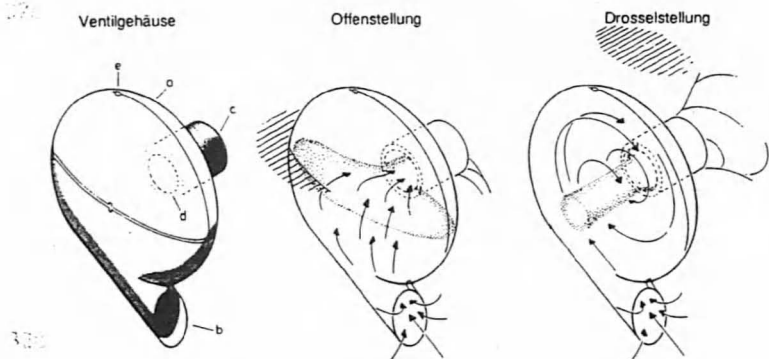


Bild 12: Strömungsvorgänge im vertikalen Wirbelventil. a Wirbelkammer, b Zulauf, c Ablauf, d austauschbare Ausgangsblende, e Entlüftung

## 8 Literaturverzeichnis

- [1] Thoma, D.: Vorrichtung zur Behinderung des Rückströmens. Deutsche Patentschrift 507 713, Juni 1928
- [2] Seeber, G.: Das Wasserschloß des Kaunertalkraftwerkes der TIWAG. Ein neuer Typ eines rückstromgedrosselten Kammerwasserschlosses. Schweizerische Bauzeitung, 1970, Heft 1, S. 1-7
- [3] Proceedings of the Fluid Amplification Symposium, Harry Diamond Laboratories, Washington, D.C. USA, 1965
- [4] Syred, Royle, Tippetts: Optimization of high Gain Vortex Devices. Third Cranfield Fluidics Conference, 1968, Turin, Paper J3, BHRA
- [5] Brombach, H.: Untersuchung strömungsmechanischer Elemente (Fluidik) und die Möglichkeit der Anwendung von Wirbelkammer-elementen im Wasserbau, (Diss.). Mitteilungen des Instituts für Wasserbau der Universität Stuttgart, Heft 25, 1972
- [6] Brombach, Horlacher und Förster: Energieabbau mit Wirbeldrosseln in einer Wasserleitung eines Kalksteinbruches. 3R international, Heft 5, S. 330-336, 1989
- [7] Neumayer, H.: Untersuchungen der Strömungsvorgänge in radialen Wirbelkammer-verstärkern. Mitteilungen des Instituts für Wasserbau der Universität Stuttgart, Heft 46, 1979
- [8] Giesecke, J.: Die Wirbelkammertriode als neuartiges Steuerorgan im Wasserbau. Mitteilungen des Instituts für Wasserbau der Universität Stuttgart, Heft 32, 1974
- [9] Brombach, H.: Flood Protection by Vortex Valves. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, ASME, Vol. 103, pp. 338-341, Dec. 1981

Apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Hansjörg Brombach  
 UFT Umwelt- und Fluid-Technik Dr. H. Brombach GmbH  
 D-97980 Bad Mergentheim, Steinstr. 7, e-mail: uft@uft.mayn.de  
 Zur Zeit am National Water Research Institute NWRI, Burlington, Ontario, Canada