

Der hydraulische Widder

Am Ende des 18. Jahrhunderts wurde eine bemerkenswerte Erfindung gemacht. Mit ihr ist es möglich, ohne äussere Energiezufuhr Wasser höher als die Quelle anzuheben, aus der es stammt. Im französischen Sprachraum hat sich dafür der Ausdruck «bélière hydraulique», im Englischen «hydraulic ram», bei uns «hydraulischer Widder» oder auch «Stossheber» eingebürgert.

Wie funktioniert ein solcher hydraulischer Widder? Bild 1 zeigt schematisch den Aufbau. Zunächst nehmen wir an, dass sich das Stossventil SV gerade geöffnet hat. Wasser, das aus der Quelle Q stammt, beginnt sich nun unter der Wirkung der Schwerkraft im Rohr R_1 zu beschleunigen, bis die Kraft des Strömungswiderstandes am Stossventil SV dieses plötzlich schliesst (Phase 1). Damit wird die Wassersäule im Rohr R_1 in sehr kurzer Zeit abgebremst und erzeugt einen starken Druckstoss, der das Druckventil DV öffnet und eine bestimmte Wassermenge Q_0 in den Windkessel W eintreten lässt (Phase 2). Dadurch vermindert sich das Luftvolumen im Windkessel, der Druck steigt leicht an und bewirkt, dass die gleiche Menge Wasser Q_0 während der Phasen 1 und 2 durch die Steigleitung R_2 auf die Höhe h_2 gefördert wird. Wenn der Druckstoss der Phase 2 abgeklungen ist, schliesst sich das Druckventil DV, das Stossventil SV öffnet sich wieder, und ein neuer Zyklus beginnt. Die Wiederholzeit beträgt typischerweise etwa 2 s. Soweit die qualitative Beschreibung.

«Sanfte» Technologie

Der Stossheber ist in seinem Aufbau einfach und der Technik der damaligen Zeit angepasst. Die einzigen beweglichen Teile sind Stoss- und Druckventil; rotierende Teile fallen gegenüber einer Lösung mit Turbine und Pumpe weg. Er ist in seiner Anschaffung und in seinem Unterhalt billig und versieht seinen Dienst ununterbrochen oft Monate und Jahre. Eine zusätzliche Energiequelle (z. B. Elektrizität) ist nicht notwendig. In der heutigen Terminologie würde er sicher als ein Vertreter der sanften Technologie bezeichnet. Besonders in den Voralpen- und Alpengebieten war er im 19. und anfangs des 20. Jahrhunderts, als elektrische Energie noch fehlte, für Höfe mit tiefergelegenen Quellen und Bächen eine segensreiche Einrichtung. In seiner Aufgabe und Ein-

fachheit ist er am ehesten einer Noria (Wasserschöpfrad) vergleichbar.

Der hydraulische Widder wurde von Joseph Michael Montgolfier (1740–1810) am 3. 11. 1797 und dann zusammen mit Ami Argand am 26. 5. 1798 patentiert. J. M. Montgolfier war der ältere der beiden Brüder, die im Jahre 1783 den ersten Heissluftballon realisierten; allerdings soll er nie selbst als Passagier an einer Ballonfahrt teilgenommen haben. In der Literatur findet man immer wieder Stimmen, die England als Ursprungsland der Idee des Stosshebers nennen. Tatsächlich erhielt Matthew Boulton (1728–1809), der Ingenieur, Unternehmer und Geschäftspartner des bekannten Dampfmaschinenpioniers James Watt, wenige Tage nach Montgolfier am 13. 12. 1797 unter dem Titel «Hydraulic Engines» das englische Patent Nr. 2207.

Der hydraulische Widder wurde schon früh qualitativ richtig beschrieben. Hingegen dauerte es über 100 Jahre, bis eine einigermaßen umfassende vereinfachte theoretische Beschreibung veröffentlicht wurde [1].

Der Drossel-Aufwärtswandler

In der Elektronik sieht man sich oft vor ein ähnliches Problem gestellt: Eine elektrische Energiequelle liefert eine elektrische Gleichspannung U_1 , der Verbraucher benötigt jedoch die höhere Spannung U_2 . Eine Lösung dafür ist der bekannte Drosselwandler [2, 3], der in Bild 2 dargestellt ist. Er funktioniert (qualitativ) folgendermassen: Der Schalter S wird geschlossen, und damit beginnt der Strom i in der Induktivität L linear anzusteigen; gleichzeitig baut sich in der Spule ein Magnetfluss auf (Phase 1). Nach einer gewissen Zeit wird S geöffnet, und es beginnt die Phase 2. Der jetzt abnehmende Strom i fliesst über die Diode (sie verhindert die Entladung von C nach links in Phase 1) in den Kondensator, dessen Spannung U_2 sich leicht erhöht. Gleichzeitig wird der

Der Autor

Markus Meier

Durch «Watt Ihr Volt»

Anregung zu diesem Artikel gab die Rubrik «Watt Ihr Volt» im «Elektroniker», insbesondere in den Nummern 4/89 und 10/89: Dort wurde der Drosselwandler behandelt. Auf seinen technisch-geschichtlichen Streifzügen ist Dr. Meier auf eine hydraulische Maschine gestossen, die eine sehr starke Analogie zum Drosselwandler aufweist. Lassen Sie sich, geehrte(r) Leser(in), von dieser Analogie überraschen...

Magnetfluss in L abgebaut. Die dabei induzierte Spannung addiert sich zu U_1 ; dies ermöglicht es, dass U_2 grösser als U_1 sein kann. Vom Kondensator fliesst ein nahezu konstanter Strom über die Diode D_1 in die Spannungsquelle U_2 . Der Grund für die Wahl dieser Lastschaltung wird im nächsten Abschnitt klar. Eine quantitative Analyse unter der Annahme idealer Elemente findet man in [2, 3].

Analogie: «le bélier électronique»

Wenn man nun in Analogie die elektrische Spannung dem Wasserdruck, die

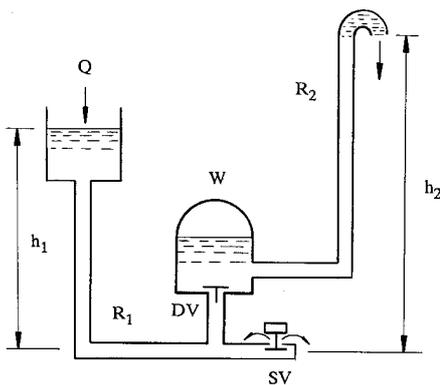


Bild 1 Schema des hydraulischen Widder.

Wasserströmung dem elektrischen Strom, die Masse der Wassersäule der Induktivität, das Stossventil dem Schalter, das Druckventil der Diode und den Windkessel und die Steigleitung der Kapazität zugeordnet, dann stellt man fest, dass die beiden Vorrichtungen einander entsprechen. Das mechanische Analogon zum Drosselwandler wurde also schon vor etwa 200 Jahren erfunden. Die elektrischen Grundlagen (Induktionsgesetz und Gleichrichter) wurden aber erst einige Zeit später entdeckt [6].

Die Wahl der Lastschaltung in Bild 2 ist durch den Wunsch nach möglichst grosser Analogie zwischen Elektronik und Hydraulik bestimmt: Nach dem Ausfluss auf der Höhe h_2 ist das Wasser dem hydraulischen Widder entzogen und kann in keiner Art und Weise auf ihn zurückwirken. Bei der Hebung dieses Wassers wird aber Energie investiert, die nach dem Ausfluss als potentielle Energie vorliegt. In der elektronischen Schaltung wird diese Energie in die Spannungsquelle U_2 investiert, die Diode D_1 verhindert den Rückfluss von Ladung aus der Spannungsquelle U_2 in den Drosselwandler. Als Beispiele für eine solche Lastschaltung kann man sich einen idealen Akkumulator mit Gleichrichter oder auch eine elektrochemische Zelle vorstellen.

Unterschiede

Neben den Analogien gibt es aber auch kleine interessante Unterschiede zwischen den beiden Einrichtungen. Im Gegensatz zum Drosselwandler ist der hydraulische Widder bei richtiger Dimensionierung selbstpulsierend, d.h. er braucht keine Vorrichtung, um das Stossventil zu öffnen und zu schliessen. Man kann sich für den Drosselwandler aber leicht eine Zusatzschaltung ausdenken, welche die gleiche Wirkung hat. Ein wei-

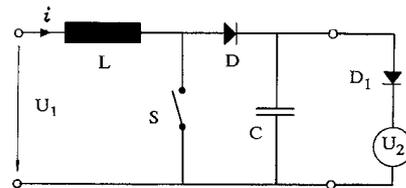


Bild 2 Schema des Drosselwandlers.

terer Unterschied besteht im Wirkungsgrad. Während der Drosselwandler mit verlustfreien Komponenten einen Wirkungsgrad von 1 erreichen kann [2,3], hat der hydraulische Widder systembedingte Verluste, durch die der Wirkungsgrad < 1 ist. Denn während der Phase 1, in der das Wasser in der Triebleitung beschleunigt wird, tritt beim Stossventil SV Wasser mit einer von Null verschiedenen Geschwindigkeit aus und trägt somit kinetische Energie mit sich; diese Energie ist aber für die Hebung von Wasser nicht mehr verfügbar. Das strömende Wasser veranlasst durch den Strömungswiderstand am Stossventil, dass sich dieses im richtigen Moment schliesst, dies stellt auch einen Verlustterm dar. Weiter geht beim Stoss der bewegten Wassersäule mit dem ruhenden Wasser und dem Druckventil DV Energie verloren (Impuls und Energiesatz können nicht gleichzeitig erfüllt werden! [4,5]), und beim Einschliessen des Wassers in den Windkessel tritt wiederum der Verlust von kinetischer Energie auf. Der Wirkungsgrad wird endlich auch durch die Strömungswiderstände des fließenden Wassers reduziert, beim realen Widder stellt dieser Anteil in der Triebwasserleitung den dominierenden Anteil dar (turbulente Strömung); dieser Verlust ist aber nicht prinzipieller Art.

Mit Stosshebern werden in der Praxis Wirkungsgrade von ca. 50–75% erreicht. Ein Wirkungsgrad von 100% ist dann erreicht, wenn die auf die Höhe h_2 geförderte Menge Q_2 durch die Beziehung der Energieerhaltung $Q_2 \cdot h_2 = Q_1 \cdot h_1$ gegeben ist. Q_1 ist die von der Quelle gelieferte Wassermenge pro Zyklus (Phasen 1 und 2), h_1 die Höhendifferenz von der Quelle zum Widder. Wenn zum Beispiel die Quelle 50 l/min liefert, $h_1 = 10$ m und $h_2 = 50$ m ist, dann kann bei 100% Wirkungsgrad 10 l/min, bei 70% jedoch nur noch 7 l/min gefördert werden.

Elektronischer «Widder» überlegen

Der Vergleich der Wirkungsgrade von hydraulischem Widder und Drosselwandler regnet noch zu ein paar Gedanken an.

Warum kann der Drosselwandler mit idealen Elementen (das heisst keine ohmschen Widerstände und keine Durchlassspannungen der Diode) den Wirkungsgrad 1 erreichen? Beim hydraulischen Widder ist die Energie am Ende der Phase 1 in der kinetischen Energie des fließenden Wassers gespeichert. Wir haben aber gesehen, dass das beim Stossventil SV ausfliessende Wasser kinetische Energie we trägt, die im hydraulischen Widder nie mehr genutzt werden kann, daraus resultiert die prinzipielle Reduzierung des Wirkungsgrades. Beim Drosselwandler jedoch ist die Energie nach der Phase 1 zu einem sehr grossen Teil im magnetischen Feld der Induktivität L gespeichert und kann dann während der Phase 2 vollständig an den Kondensator abgegeben werden; durch die Möglichkeit des verstärkten Feldaufbaus in der Induktivität kann dieser Anteil gross gemacht werden, die Elektronen tragen dann nur noch einen kleinen Teil an kinetischer Energie weg. Wer einmal einen Widder in Aktion erlebt hat, vergisst dessen rhythmisches Klopfen nicht so schnell. Im Gegensatz dazu ist der Drosselwandler eine wenig beeindruckende Einrichtung, ähnlich wie der Elektromotor im Vergleich zur Dampfmaschine.

Literatur

- [1] H. Lorenz, Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 54, 88–90 (1910), und dazu zwei zeitgenössische Kommentare: Z. des V. deutscher Ing. 54, 291 (1919) und 54, 490 (1910). In der Arbeit von Lorenz ist der Wirkungsgrad allerdings falsch definiert.
- [2] «Watt Ihr Volt», Elektroniker Nr. 4/1989, p 15–17, und «Watt Ihr Volt», Elektroniker Nr. 10/1989, p 9–11.
- [3] U. Tietze und Ch. Schenk, «Halbleiter-Schaltungstechnik», 9. überarbeitete Auflage (Springer-Verlag, Berlin, 1989).
- [4] Ein ähnliches Problem tritt auch beim Drossel-Aufwärts wandler auf, wenn man in der Zuleitung zum Kondensator eine parasitäre Induktivität einführt.
- [5] Beim Druckstoss geht ein Teil der Energie in die Kompression des Wassers und die Dehnung der Röhren; dies führt dann zu Oszillationen des Wassers in der Triebleitung, bei der durch die Strömungsreibung ein Teil der Energie in Wärme umgewandelt wird.
- [6] Das Selbstinduktionsgesetz wurde vom Amerikaner Joseph Henry etwa 1830 entdeckt und 1832 publiziert. – Der Engländer Sir John Ambrose Fleming entwickelte 1904 auf der Grundlage des «Edison-Effektes», den Edison bei Experimenten an seiner Glühlampe gefunden hatte, den ersten Gleichrichter (Vakuumdiode). Allerdings ist ein Gleichrichter auch mit rein elektromechanischen Elementen denkbar, die Thermoemission oder Halbleitereffekte sind dazu nicht notwendig.