

D. Plappert

Die Strukturgleichheit verschiedener physikalischer Gebiete gezeigt am Beispiel Hydraulik-Elektrizitätslehre

Erschienen in *Konzepte eines zeitgemäßen Physikunterrichts*, Heft 3, Schroedel Verlag 1979

1. Einleitung

Den mengenartigen Größen beim Aufbau der Physik eine fundamentale Rolle zuzuschreiben, rechtfertigt sich aus zwei Gründen: *Einfachheit* und physikalische *Tragfähigkeit* dieser Größen als fundamentale Begriffe. Die Einfachheit wurde in dem im dritten Aufsatz vorgestellten Physikkurs für Anfänger deutlich. Das Ziel der letzten Aufsätze dieses Heftes ist es vor allem, die Tragfähigkeit zu demonstrieren. Die die Rolle von Energieträgern spielenden mengenartigen Größen behalten nicht nur für Fortgeschrittene ihre Bedeutung, sondern sind auch in weiterführenden Physikkursen von didaktischem Vorteil.

Die nächsten vier Aufsätze beschränken sich darauf zu zeigen, dass und wie sich einige Gebiete der Physik in den dynamischen Aufbau einfügen, nämlich die Hydraulik, die Mechanik rotierender starrer Körper, die Wärmelehre und die *Newtonschen* Axiome mit ihren Folgerungen. Von besonderem didaktischen Gewicht ist dabei, dass die dynamische Beschreibung von Vorgängen in allen Gebieten dieselbe ist, da die Grundregeln unabhängig sind von der Art der betrachteten Vorgänge.

Die Elektrizitätslehre spielt in den Aufsätzen eine bevorzugte Rolle. Das liegt daran, dass sie traditionell das einzige Gebiet der Physik ist, in dem von Anfang an eine mengenartige Größe und ihr Strom im Vordergrund stehen. Ihre gewohnte Darstellung unterscheidet sich daher kaum von der hier vorgeschlagenen dynamischen Aufbauweise. Außerdem ist die elektrische Ladung ein Beispiel dafür, dass eine abstrakte Größe für den Schüler sehr schnell eine klare Anschaulichkeit gewinnen kann.

Als erstes Beispiel betrachten wir die Analogie zwischen Elektrizitätslehre und Hydraulik. Die von Energietransporten mit Hilfe inkompressibler Flüssigkeiten handelnde Hydraulik hat in den letzten Jahrzehnten erheblich an technischer Bedeutung gewonnen. Baumaschinen, landwirtschaftliche Maschinen, Lokomotiven, hydraulische Kupplungen und Getriebe machen von hydraulischen Vorgängen Gebrauch. Die Hydraulik sollte deshalb in einem modernen Physikkurs nicht fehlen. Normalerweise werden zwar Wasserströme

behandelt, aber nur, um die Begriffe elektrische Stromstärke und elektrische Spannung zu veranschaulichen. Wenn der Wasserstromkreis dabei als ein vereinfachtes Modell des elektrischen Stromkreises erscheint, wird dem Schüler meist nicht klar, ob es sich um eine ernstzunehmende Analogie zwischen elektrischem Strom und Wasserstrom handelt oder um eine Zufälligkeit. Wohl in den seltensten Fällen wird er gewahrt, dass es dabei um eine weitreichende physikalische Gemeinsamkeit aller Ströme geht.

2. Analogien zwischen physikalischen Systemen

Von einer Analogie zwischen physikalischen Systemen spricht man dann, wenn sich die physikalischen Größen eines Systems auf die eines anderen Systems so abbilden lassen, dass charakteristische Beziehungen der Größen erhalten bleiben. Der einfachste Fall einer solchen Analogie ist der zwischen Systemen, die die gleiche Anzahl unabhängiger Energieträger haben, sich aber in einer einzigen Träger-Größe unterscheiden. Das erste System habe die Größe X_1 das zweite die davon verschiedene Größe X_1' , während X_2, X_3, \dots in beiden Systemen dieselben Größen seien. Die beiden Systeme heißen dann analog, wenn bei der Ersetzung von X_1 durch X_1' , jede Beziehung zwischen X_1 und den dynamischen Größen des ersten Systems in eine richtige Beziehung des zweiten Systems übergeht. Es ist klar, dass und wie dieser Typ von Analogie auf Systeme fortgesetzt werden kann, die sich in mehr als einem Energieträger unterscheiden. Darauf näher einzugehen, erübrigt sich.

3. Die Analogie zwischen elektrischer Ladung Q und Menge n

Die Analogie zwischen Elektrizitätslehre und Hydraulik beruht darauf, dass die elektrische Ladung Q auf die Menge n abgebildet wird. Im Anfängerun-

terricht haben wir die Flüssigkeit selbst als Energieträger bezeichnet, nicht eine mengenartige physikalische Größe. Das war jedoch nur ein Zugeständnis an den Anfänger. Flüssigkeiten sind wie alle Stoffe *Systeme*, das heißt ganze Bündel mengen-artiger Größen. Strömendes Wasser stellt einen Impulsstrom, einen Massestrom, einen Mengenstrom, einen Entropiestrom dar. Jeder dieser Ströme trägt Energie nach Maßgabe seines Beladungsfaktors. Der gesamte vom Wasser getragene Energiestrom ist also die Summe der durch die einzelnen Träger getragenen Energieströme. Im allgemeinen wird es nun so sein, dass unter den Energieströmen einer oder zwei dominieren. Im Fall der Hydraulik ist der dominierende Energiestrom derjenige, der vom *Mengenstrom* getragen wird, also der Energiestrom U .

Um zu zeigen, dass die Menge n der dominierende Energieträger für die Hydraulik ist, betrachten wir eine typische Energiequelle der Hydraulik, nämlich die Wasserpumpe. Der für den Energietransport entscheidende Energieträger ist derjenige, dessen Beladungsfaktor beim Durchgang durch die Pumpe die größte Änderung erfährt. Die Temperatur T des Wassers, der Beladungsfaktor des Entropiestroms, ändert sich beim Durchströmen der Pumpe nicht. Dasselbe gilt für die Geschwindigkeit v des Wassers, den Beladungsfaktor des Impulses. Entropie und Impuls kommen daher als Energieträger nicht in Betracht. Auch die Masse m des Wassers scheidet als Energieträger aus, da Pumpen auch horizontal betrieben werden können, so dass der Beladungsfaktor der Masse, das Gravitationspotential an Aus- und Eingang der Pumpe denselben Wert hat. Übrig bleibt der Beladungsfaktor des Mengenstroms, das chemische Potenzial μ des Wassers. Tatsächlich ändert sich der Wert des chemischen Potenzials beim Durchgang durch die Pumpe. Das ist an der Änderung des Drucks erkennbar. Chemisches Potenzial und Druck hängen bei konstanter Temperatur für inkompressible Flüssigkeiten nämlich folgendermaßen zusammen

$$\Delta\mu = \frac{1}{\hat{n}} \Delta p. \quad (1)$$

Ändert sich bei einer inkompressiblen Flüssigkeit der Druck um Δp , während die Temperatur T konstant bleibt, so ändert sich das chemische

Potenzial um $\frac{1}{\hat{n}} \Delta p$, wobei $\hat{n} = \frac{n}{V}$ die Mengendichte ist. Für den Leser, dem diese Beziehung nicht vertraut ist, sei hingewiesen auf die Artikel von *W. Stöbel* und *F. Herrmann* in Heft 2 der Reihe *Konzepte eines zeitgemäßen Physikanterrichts*.

Die Abbildung der elektrischen Ladung Q auf die Menge n hat die Abbildung des elektrischen Potenzials φ auf das chemische Potenzial μ zur Folge, so dass für die Analogie zwischen Elektrizitätslehre und Hydraulik gilt:

$$Q \quad \blacklozenge \quad n, \quad \varphi \quad \blacklozenge \quad \mu.$$

Im Gegensatz zur elektrischen Ladung Q gilt zwar für die Menge n kein allgemeiner Erhaltungssatz, bei den in der Hydraulik betrachteten Mengenströmen ist die Menge n jedoch eine Erhaltungsgröße. In der Hydraulik gilt also eine Kontinuitätsgleichung und infolgedessen wie in der Elektrizitätslehre der *1. Kirchhoffsche Satz*: Die Summe der Ströme, die in einem Knoten eines elektrischen bzw. hydraulischen Netzes zusammenfließen, hat den Wert Null.

Da sich elektrisches und chemisches Potenzial entsprechen, gilt auch der *2. Kirchhoffsche Satz*: Die Summe der elektrischen Spannungen bzw. der Differenzen des chemischen Potenzials jeder Masche eines elektrischen bzw. hydraulischen Netzes, hat den Wert Null.

In der Pumpe wird also der die Pumpe durchfließende Mengenstrom I_n mit Energie beladen, gemäß $I_E = \Delta\mu I_n$. Dabei ist $\Delta\mu$ die Differenz des chemischen Potenzials des Wassers zwischen Ein- und Ausgang der Pumpe. Diese Gleichung ist analog der Beziehung für den elektrischen Energiestrom $I_E = \Delta\varphi I_O = U I_O$. Sie gibt an, wie viel Energie auf den elektrischen Strom I_O geladen wird, der eine elektrische Energiequelle durchfließt, oder wie viel Energie der Strom ablädt, wenn er einen Energieempfänger durchfließt. Die Differenz des elektrischen Potenzials $\Delta\varphi$ ist die Differenz der Beladungsfaktors des elektrischen Stroms von Ein- und Ausgang. Für Elektrizitätslehre und Hydraulik gelten also die analogen Beziehungen

$$I_E = \Delta\varphi I_O \quad \blacklozenge \quad I_E = \Delta\mu I_n \quad (2)$$

Wie Gl. (1) zeigt, bedeuten Druckänderungen Änderungen des chemischen Potenzials. Setzt man Gl. (1) in Gl. (2) ein, so läßt sich der vom Strom einer inkompressiblen Flüssigkeit getragene Energiestrom schreiben

$$I_E = \Delta p \frac{1}{\hat{n}} I_n \quad (3)$$

Da $\frac{I_n}{\hat{n}}$ die Dimension der Größe „Volumen

pro Zeit" hat, spricht man herkömmlich vielfach gern von „Volumenstrom". Diese Sprechweise ist jedoch mehr verwirrend als hilfreich, da es zum Volumen keinen Strom gibt (vgl. den Aufsatz von *G. Falk*).

4. Stromschemata

Mit den im physikalischen Anfängerunterricht eingeführten Schemata für Energieumlader und Energiespeicher wollen wir im folgenden in knapper Form einige typische analoge Systeme darstellen.

Energieumlader

Abb. 1 zeigt die Schemata der Energieumlader Dynamo und Pumpe. Beide laden Energie ab vom Drehimpuls. Ein weiteres Beispiel für analoge Energieumlader sind Elektromotor und Turbine. Beide laden Energie auf den Drehimpuls.

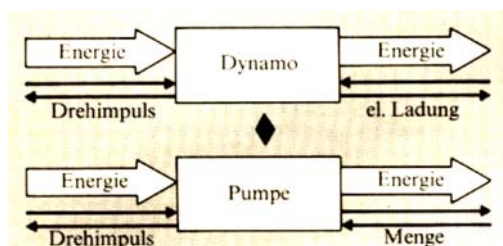


Abb. 1 Schemata der Energieumlader Dynamo und Pumpe. Beide laden Energie ab vom Drehimpuls.

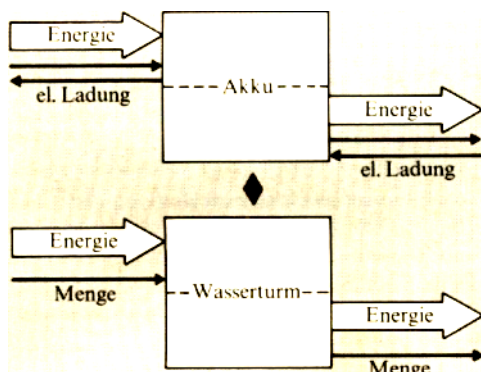


Abb. 2 Schemata der Energiespeicher Akkumulator und Wasserturm

Energiespeicher

Abb. 2 zeigt die Schemata der Energiespeicher Akkumulator und Wasserturm. Es sei darauf hingewiesen, dass nicht wie in vielen Schulbüchern dargestellt, der Akku das Analogon der Wasserpumpe ist, sondern dass auf der einen Seite die Energieumlader Dynamo und Pumpe, auf der anderen die Energiespeicher Akku und Wasserturm einander entsprechen. In Abschnitt 8 wird ein „Wasserakku“ vorgestellt, der dem elektrischen Akku bis in viele Details ähnelt

5. Widerstand

In der Elektrizitätslehre ist der Widerstand R_O eines Systems definiert durch $R_O = U/I_O$. Dabei ist I_O die Stärke des Stroms, der durch das System fließt, und $U = \Delta\varphi$ die Differenz des elektrischen Potentials zwischen Ein- und Ausgang des Systems. Entsprechend wird der Widerstand R_n in der Hydraulik definiert durch $R_n = \Delta\mu/I_n$, wobei I_n der durch das System fließende Mengenstrom und $\Delta\mu$ die Differenz des chemischen Potentials zwischen dem in das System hineinfließenden und aus dem System herausfließenden Mengenstrom ist. Es besteht also die Analogie

$$R_O = \frac{U}{I_O} \quad \blacklozenge \quad R_n = \frac{\Delta\mu}{I_n} \quad (4)$$

Setzt man Gl. (4) in Gl. (2) ein, so erhält man

$$I_E = R_O I^2_O \quad \blacklozenge \quad I_E = R_n I^2_n \quad (5)$$

Ist der Widerstand eines Systems unabhängig von der Stromstärke, also U proportional zu I_O bzw. $\Delta\mu$ proportional zu I_n , so spricht man von einem Ohmschen Widerstand. Beispiele für Systeme mit Ohmschem Widerstand sind in der Elektrizitätslehre Metalldrähte, in der Hydraulik Rohre, in denen die Flüssigkeit laminar strömt. Für sie gilt das Hagen-Poiseuillesche Gesetz:

$$\Delta\mu = \frac{8\pi\eta}{\hat{n}^2} \frac{l}{A^2} I_n = \rho_n \frac{l}{A^2} \quad (6)$$

Dabei sind η die Zähigkeit, \hat{n} die Mengendichte der Flüssigkeit, l die Länge und A der Querschnitt des Rohres.

Für den Widerstand von Metalldrähten bzw. Rohren gilt

$$R_O = \rho_O \frac{l}{A} \quad \blacklozenge \quad R_n = \rho_n \frac{l}{A^2} \quad (7)$$

Diese Ausdrücke haben eine ähnliche Gestalt. Beide Widerstände sind proportional der Länge l . Die verschiedene Abhängigkeit von der Querschnittsfläche A kann folgendermaßen verstanden werden: Der entropieerzeugende Effekt beim Fließen des elektrischen Stromes durch den Metalldraht ist über den ganzen Querschnitt des Drahtes gleichmäßig verteilt. Die Wasserströmung hingegen erfährt Reibung hauptsächlich in der Umgebung der Rohrwandung. Würde das Wasserrohr mit Sand gefüllt, so würde der Reibungseffekt gleichmäßig auf die ganze Querschnittsfläche

des Rohres verteilt, der Widerstand des Rohres wäre dann, wie im elektrischen Fall, umgekehrt proportional der Querschnittsfläche A .

Die spezifischen Widerstände ρ_0 und ρ_n ändern sich mit der Temperatur. Der spezifische Widerstand ρ_0 wächst mit steigender Temperatur, der spezifische Widerstand ρ_n nimmt dagegen ab, da die Zähigkeit der meisten Flüssigkeiten bei steigender Temperatur sinkt.

Der Widerstand der meisten Systeme ist nicht unabhängig von der Stromstärke. Für solche Systeme kann der Zusammenhang zwischen Differenz des Beladungsfaktors und Stromstärke nicht durch eine einzige Zahl beschrieben werden. Er wird üblicherweise durch $U-I_0$ - bzw. $\Delta\mu-I_n$ -Kennlinien dargestellt. Abb. 3 zeigt stellvertretend je ein Beispiel einer solchen Kennlinie.

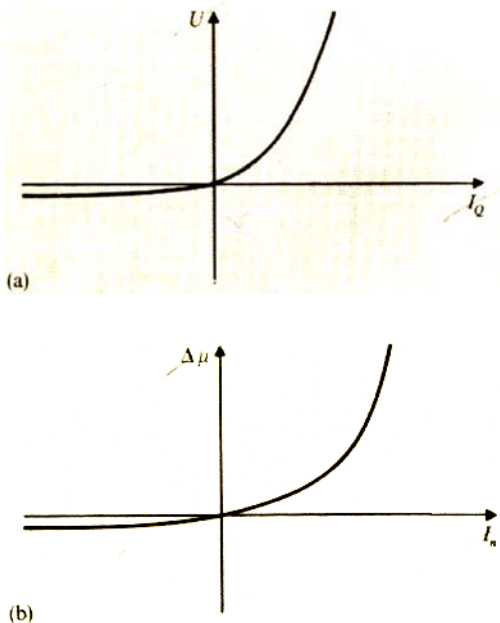


Abb.: 1 Kennlinie einer Diode (a) und eines hydraulischen Sperrventils (b)

6. Induktion

Das Phänomen der Induktion eines Stromkreises gibt es sowohl in der Elektrizitätslehre als auch in der Hydraulik: Wasserstrom und elektrischer Strom besitzen eine gewisse Trägheit gegenüber Änderungen ihrer Stromstärke. Die sich als Trägheit äußernde elektrische Induktion beruht nicht auf der mechanischen Trägheit der Ladungsträger,

sondern auf dem mit dem elektrischen Strom verknüpften Magnetfeld, in dem Energie gespeichert ist. Wird die Stärke des elektrischen Stroms vergrößert, muss sein Magnetfeld und damit dessen Energie vergrößert werden. Diese Energie liefert der elektrische Strom. Während er zunimmt, spürt er deshalb einen zusätzlichen Widerstand. Umgekehrt spürt der Strom beim Verringern der Stromstärke einen zusätzlichen Antrieb.

Analoges gilt für Stoffströme: Ein Flüssigkeitsstrom besteht aus einem Mengenstrom und einem Impulsstrom, der gleich (Impuls pro Menge) x Mengenstrom ist. Wird die Stärke des Mengenstroms, der durch ein Rohr fließt, dadurch vergrößert, dass die Geschwindigkeit der Flüssigkeit vergrößert wird, so ändert sich die kinetische Energie der Flüssigkeit. Der Mengenstrom spürt deshalb beim Vergrößern seiner Stromstärke einen zusätzlichen Widerstand. Umgekehrt muss beim Verkleinern der Stärke des Mengenstroms die in der Flüssigkeit gespeicherte Energie verkleinert werden, der Mengenstrom spürt deshalb einen zusätzlichen Antrieb. Die magnetische Energie einer elektrischen Leitung ist also analog der kinetischen Energie der Flüssigkeit in einer hydraulischen Leitung.

Formelmäßig lässt sich die Trägheit beider Ströme durch folgende Gleichungen ausdrücken:

$$U = -L I_0' \quad \blacklozenge \quad \Delta\mu = -L I_n' \quad (8)$$

Wird an einer elektrischen Leitung die elektrische Spannung U bzw. an einer hydraulischen Leitung die chemische Potenzialdifferenz $\Delta\mu$ angelegt, so wächst der durch die Leitung fließende Strom um so schneller an, je kleiner die Induktivität L der Leitung ist. Der in (8) behauptete Zusammenhang zwischen $\Delta\mu$ und I_n lässt sich, wie wir hier nicht ausführen wollen, aus der *Eulerschen* Gleichung für inkompressible Flüssigkeiten herleiten.

Beim Unterbrechen des Stromkreises verhalten sich elektrischer Strom und Wasserstrom analog. Wird der Stromkreis unterbrochen, so treibt die im elektromagnetischen Feld, bzw. die in der Flüssigkeit gespeicherte Energie den Strom an. An der Unterbrechungsstelle können dadurch so hohe Werte der elektrischen Spannung bzw. des chemischen Potentials und damit des Drucks entstehen, dass Funken überspringen bzw. die Rohre platzen. Um beim Abschalten großer Ströme zu große Werte der elektrischen Spannung bzw. zu große Werte des Drucks zu vermeiden, werden in beiden Fällen den Schaltern Kondensatoren parallel geschaltet. Abb. 4 zeigt ein Beispiel aus der Hydraulik.

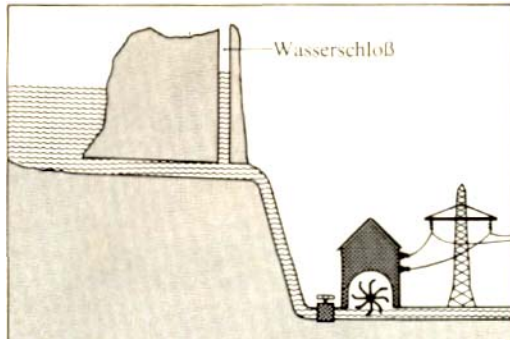


Abb. 4 Um beim Abschalten eines Wasserkraftwerks mit langer Zuleitung zu große Druckstöße zu vermeiden, wird vor der Fallstrecke ein hydraulischer Kondensator, das sogenannte Wasserschloss eingebaut. Das ist das hydraulische Analogon der Entstörung elektrischer Unterbrecherkontakte mit Hilfe von Kondensatoren

7. Kondensator und Spule

Kondensator und Spule bilden innerhalb der Elektrizitätslehre analoge Systeme. Das sieht man am einfachsten ein, wenn man Spannung und Strom aufeinander abbildet. Die in einem Kondensator und in einer Spule gespeicherte Energie hängt nämlich mit der elektrischen Spannung U bzw. der elektrischen Stromstärke I_0 zusammen gemäß

$$E_{\text{Speicher}} = \frac{1}{2} C_0 U^2 \quad \blacklozenge \quad E_{\text{Speicher}} = \frac{1}{2} L_0 I_0^2 \quad (9)$$

Dabei sind C_0 die Kapazität und U die Spannung des Kondensators, L_0 die Induktivität und I_0 die Stärke des elektrischen Stroms durch die Spule. Die Gln. (9) gelten nur für Systeme, deren Kapazität C_0 nicht von der Spannung U bzw. deren Induktivität L_0 nicht von der Stromstärke I_0 abhängen. Vertauscht man Spannung U und elektrische Stromstärke I_0 sowie Kapazität und Induktivität, wird aus dem Kondensator eine Spule, aus der Spule ein Kondensator. Ein aus Kondensator und Spule bestehender Schwingkreis geht bei der Analogie somit in sich über.

Da Kondensator und Spule Analoga in der Hydraulik haben, besteht die Korrespondenz (9) auch zwischen den hydraulischen Analoga von Kondensator und Spule:

$$E_{\text{Speicher}} = \frac{1}{2} C_n \Delta\mu^2 \quad \blacklozenge \quad E_{\text{Speicher}} = \frac{1}{2} L_n I_n^2 \quad (10)$$

Dabei bedeuten C_n , die Kapazität eines hydraulischen Kondensators, $\Delta\mu$ die chemische Potenzialdifferenz zwischen seinen „Platten“. Entsprechend ist L_n die Induktivität einer „hydraulischen Spule“

und I_n der Mengenstrom, der sie durchfließt. Die Gln. (10) gelten wie (9) für alle Systeme, deren Kapazität C_n nicht von der chemischen Potenzialdifferenz und deren Induktivität L_n nicht von der Stärke des Mengenstroms I_n abhängen.

Ein vertrautes Beispiel eines hydraulischen Kondensators ist das Pumpenspeicherwerk. Seine beiden „Platten“ werden vom oberen und unteren Wasserreservoir gebildet.

Eine „hydraulische Spule“ ist jeder Wasserschlauch. Seine Induktivität L_n erhält man gemäß Gl. (10) aus der kinetischen Energie der Flüssigkeit, die sich im Schlauch befindet:

$$L_n = \frac{\hat{m}l}{\hat{n}A_0} \quad (11)$$

Dabei sind \hat{m}, \hat{n} Massendichte und Mengendichte der Flüssigkeit, l die Länge und A_0 die Querschnittsfläche des Schlauchs. Wie Gl. (11) zeigt, hängt die Induktivität eines hydraulischen Leiters, im Gegensatz, zur Induktivität eines elektrischen Leiters, nicht davon ab, ob der Leiter räumlich gestreckt oder zu einer Spule gewickelt ist. Der Grund hierfür ist, dass die Energie beim elektrischen Leiter im magnetischen Feld gespeichert ist, beim hydraulischen Leiter dagegen in der Flüssigkeit.

Hydraulischer Kondensator und hydraulische Spule können, wie im elektrischen Fall, einen Schwingkreis bilden. Ein Beispiel ist ein mit Wasser gefülltes U -Rohr: Die beiden wassergefüllten Schenkel stellen einen hydraulischen Kondensator dar, gleichzeitig aber auch eine hydraulische Spule, da das wassergefüllte Rohr, wie jeder hydraulische Leiter, eine Induktivität hat.

Für das Parallel- und Hintereinanderschalten von Kondensatoren gelten in der Elektrizitätslehre wie in der Hydraulik dieselben Regeln:

Hintereinanderschalten:

$$\frac{1}{C_{\text{gesamt}}} = \sum_i \frac{1}{C_i}, \quad L_{\text{gesamt}} = \sum_i L_i \quad (12)$$

Parallelschalten:

$$C_{\text{gesamt}} = \sum_i C_i, \quad \frac{1}{L_{\text{gesamt}}} = \sum_i \frac{1}{L_i},$$

(13)

Die Kondensatoren der Elektrizitätslehre wie der Hydraulik haben einen unendlich großen Widerstand für Gleichstrom. Ihr Wechselstromwiderstand dagegen beträgt für einen Wechselstrom der Frequenz ω :

$$R_Q = \frac{1}{\omega C_Q} \quad \blacklozenge \quad R_n = \frac{1}{\omega C_n}$$

Auch die Wechselstromwiderstände für elektrische und hydraulische Spulen sind analog:

$$R_O = \omega L_O \quad \blacklozenge \quad R_n = \omega L_n \quad (15)$$

Elektrische und hydraulische Kondensatoren wie Spulen verhalten sich analog, wenn sie über einen Ohmschen Widerstand entladen werden. Spannung wie Stromstärke nehmen dabei exponentiell ab. Die charakteristischen Abklingzeiten betragen:

Für Kondensatoren

$$\tau = R_O C_O \quad \blacklozenge \quad \tau = R_n C_n \quad (16)$$

für Spulen

$$\tau = \frac{L_O}{R_O} \quad \blacklozenge \quad \tau = \frac{L_n}{R_n} \quad (17)$$

Hydraulische Leitungen haben wie elektrische Leitungen eine gewisse Kapazität und Induktivität. Die Kapazität einer hydraulischen Leitung wird bestimmt durch die Elastizität des Rohres und der Kompressibilität der Flüssigkeit, ihre Induktivität durch die molare Masse der Flüssigkeit, dem Querschnitt und der Länge des Rohres.

8. Akkumulator

Für viele Anwendungen ist es wünschenswert. Energiespeicher zu haben, deren Beladungsfaktoren unabhängig sind von der im Speicher enthaltenen Energie.

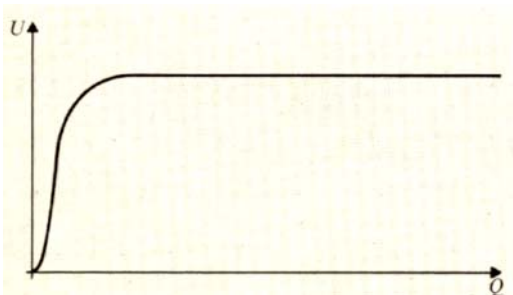


Abb. 5 Der Zusammenhang zwischen der Leerlaufspannung U und der elektrischen Ladungsmenge Q , von der Energie in einem Akkumulator abgeladen wurde

Wie Abb. 5 zeigt, ist der Akkumulator ein Energiespeicher, dessen Leerlaufspannung weitgehend unabhängig ist von der in ihm gespeicherten Energie. Die Konstanz der Leerlaufspannung beruht auf einem chemischen Gleichgewicht im Akku. Zumindest in Gedanken läßt sich ein „Wasserakku“ konstruieren, dessen chemisches Potenzial ebenfalls

durch ein chemisches Gleichgewicht konstant gehalten wird. Abb. 6 zeigt den schematischen Aufbau eines solchen Akkus.

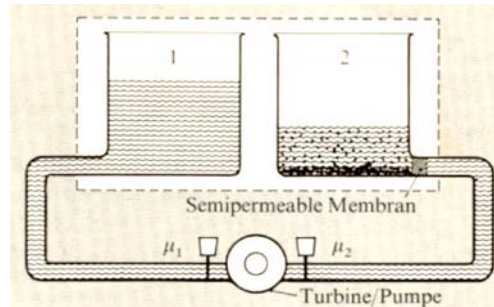


Abb. 6 „Wasserakku“: Es besteht eine chemische Potenzialdifferenz des Wassers zwischen dem Gefäß, in dem sich reines Wasser befindet, und dem Gefäß, in dem Zucker im Wasser gelöst ist. Mit dieser chemischen Potenzialdifferenz läßt sich eine Turbine betreiben.

Der Wasserakku ähnelt einer *Pfefferschen* Osmosezelle. In Gefäß 1 befindet sich reines Wasser, in 2 eine gesättigte Zuckerlösung mit festem Zucker als Bodenkörper. Gefäß 2 wird durch eine semipermeable Membran von Gefäß 1 getrennt, die nur Wasser, nicht aber Zucker passieren läßt. Das chemische Potenzial des reinen Wassers ist größer als das des Wassers, in dem Zucker gelöst ist. Infolgedessen besteht zwischen den Gefäßen 1 und 2 ein Unterschied des chemischen Potenzials des Wassers. Diese Differenz der chemischen Potenziale führt zu einem Wasserstrom von 1 nach 2, wenn die beiden Gefäße durch ein Rohr verbunden werden. Um die Zuckerkonzentration in 2 auch bei zuströmendem Wasser konstant zu halten, befindet sich in 2 als Bodenkörper fester Zucker. Verringert sich nämlich die Zuckerkonzentration der Zuckerlösung, so geht so lange Zucker in Lösung, bis die Sättigungskonzentration des Zuckers wiederhergestellt ist. Das Gleichgewicht zwischen festem und gelöstem Zucker sorgt also dafür, dass die Differenz $\Delta\mu$ des chemischen Potenzials des Wassers zwischen 1 und 2 konstant gehalten wird. Ist der gesamte Bodensatz gelöst, „bricht“ die Potenzialdifferenz $\Delta\mu$ des Wassers zusammen, der Akku ist leer.

Mit diesem Wasserakku könnte eine Turbine betrieben werden. Ist er leer, könnte er dadurch geladen werden, dass die Turbine als Pumpe betrieben wird, die Wasser von 2 nach 1 pumpt. Dann strömt reines Wasser von 2 nach 1, während der Zucker von der Membran zurückgehalten wird. Die Zuckerkonzentration in 2 bleibt dabei konstant, es fällt Zucker in fester Form aus. Dieser Wasserakku ist nur ein Gedankenmodell, denn die

in ihm eine wichtige Rolle spielenden Diffusionsvorgänge laufen für reale Experimente viel zu langsam ab.

9. Transformatoren

Für elektrischen Strom und Wasserstrom gibt es Systeme, die Beladungsfaktor und Energieträgerstromstärke so ändern, dass ihr Produkt konstant, der Energiestrom also unverändert bleibt. In der Elektrizitätslehre heißen solche Systeme Transformatoren oder Umformer, in der Hydraulik Getriebe. Abb. 7 zeigt verschiedene Transformatoren der Elektrizitätslehre. Abb. 8 solche der Hydraulik.

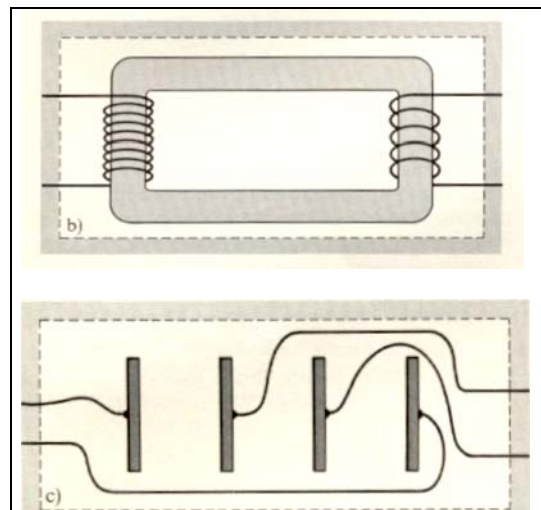
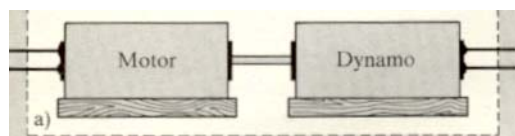


Abb. 7 Elektrische Transformatoren: (a) zeigt einen Transformator für Gleichstrom, einen sogenannten Umformer, der aus einem Motor und einem Dynamo besteht, (b) zeigt einen magnetischen Transformator und (c) einen Transformator, der aus vier Kondensatorplatten besteht. Die Kondensatorplatten des Sekundärkreises befinden sich zwischen denen des Primärkreises.

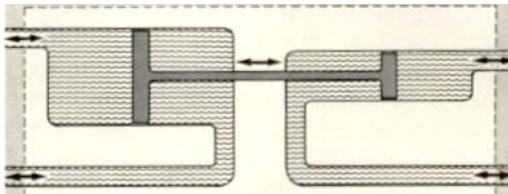
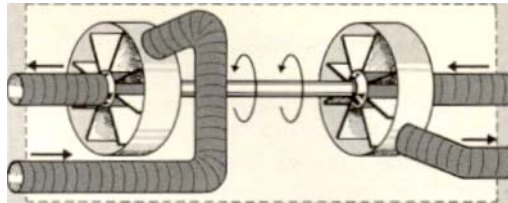


Abb.8 Hydraulische Transformatoren. Oben: Mit Turbine des Primärkreises wird die Kreiselpumpe des Sekundärkreises angetrieben. Unten: Zwei Kolben mit verschiedenen Querschnittsflächen in Primär- und Sekundärkreislauf sind starr miteinander verbunden.

Hier mag noch ein Beispiel zeigen, dass die Analogie zwischen Elektrizitätslehre und Hydraulik auch zum Verständnis praktischer Fragen nützlich ist.

Wir betrachten dazu das Problem, elektrische wie auch hydraulische Übertragungen von Energie im Hinblick auf Verluste zu optimieren. Um die „Strömungsverluste“ möglichst gering zu halten, liegt es gemäß Gl. (5) nahe, den Trägerstrom möglichst klein zu machen, demgemäß die Spannung bzw. die chemische Potenzialdifferenz und damit den Druck möglichst hoch. Damit tritt jedoch bei zunehmender Spannung bzw. zunehmendem Druck in der „Undichtigkeit“ der Übertragungsleitung eine andere Verlustquelle in Konkurrenz mit den Strömungsverlusten. Im elektrischen Fall äußert sie sich als Sprühentladung bzw. Überschlag, in der Hydraulik dagegen wörtlich als Undichtigkeit oder Anfälligkeit der Leitung gegen Brüche. Man wird also die Spannung bzw. den Druck gerade so wählen, dass die Summe der beiden Verlustquellen möglichst klein ist.