… mögliche Arbeitsaufträge „rund um Kraftwerke"

- In einem Schulbuch steht folgender Satz:

  „Die Energie steck zunächst als Lageenergie im Wasser des Stausees. Im Fallrohr fällt das Wasser frei nach unten und die Energie, die zunächst als Lageenergie im Wasser steckte, tritt nun als kinetische Energie des Wassers auf – wie beim „Freien Fall". Das Wasser trifft mit dieser kinetischen Energie auf die Turbinenschaufel; die kinetische Energie des Wassers wird dabei in Rotationsenergie der Turbinenschaufeln umgewandelt …"

  Diskutiere diese Aussagen mit deinem Team! Diskutiere vor allem den physikalischen Hintergrund bei einem „Fallrohr" in einem Wasserkraftwerk!
- Wie sieht das Energieflussbild bei einem Wasser- bzw. einem Gasturbinen-Kraftwerk aus?
- Welche Energieformen findet man in einer Wasserströmung … welche in einem Gasstrom?
- Warum gibt es so viele unterschiedliche Kraftwerks-Typen: Wasserkraftwerk, Pumpspeicherkraftwerk, Laufwasserkraftwerke, Gasturbinen-Kraftwerk usw.
- Diskutiere die Entropie- und Energie-Bilanz bei verschiedenen Typen von Kraftwerk!
- Welche Rolle spielen „Kühlanlagen" bei den Kraftwerken … welche „Kühlmethoden" gibt es?
- Welche Energie „steckt" beim Bavon-Kraftwerk als „Kompressions-Energie" „IN" 1m³ Wasser am unteren Ende des Fallrohres. Welche Energie würde „IN" einer Gasmenge von 1m³ bei einem vergleichbaren Druck „stecken".
- Welche Energie steht mit der Wasserströmung am unteren Ende des Fallrohres beim Bavon-Kraftwerk zur Verfügung?
- Wie groß ist der Wirkungsgrad beim Bavona-Kraftwerk?
- Warum ist die Strömungsgeschwindigkeit bei einer Gasturbine im Vergleich zu einer Wasserturbine so viel größer?
- Diskutiere mit deinem Team eine Fermi-Abschätzung der Zentrifugalbeschleunigung bei Gasturbinen!

Informationskasten:

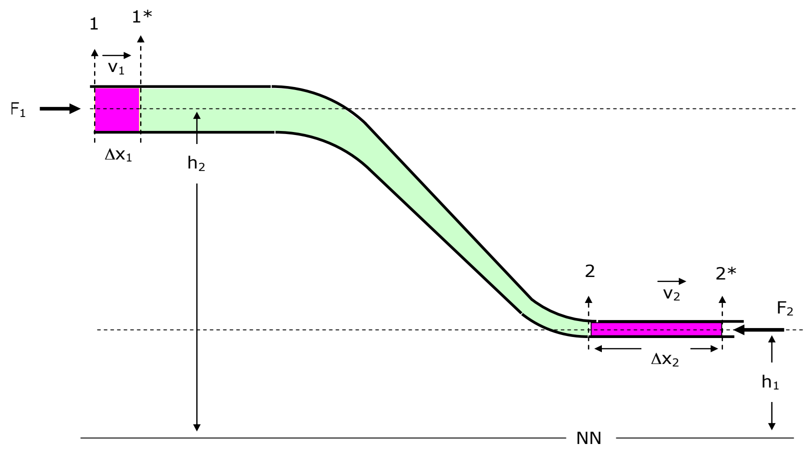
Bavona-Wasserkraftwerk
- Standort Schweiz
- Fallrohrlänge 890 m
- Wasserstromstärke von 18 000 l/s – also 18 m³ pro Sekunde
- Energiestromstärke (Leistung) von 137 MW
- Kompressibilität bei Wasser $k \approx 5 \cdot 10^{-10}$ m²/N

Moderne Gasturbinen …. Entwicklung an der Universität Bayreuth
- Schaufellänge 40 cm
- Betriebstemperatur 1000 °C
- 10 000 Umdrehungen pro Minute
- Gasgeschwindigkeit beim Auftreffen auf die Turbinenschaufel: Mach 1
- Energiestromstärke pro Schaufel 1 MW

…. eine anspruchsvolle Fragestellung

Wir betrachten eine Flüssigkeit, die in einem Fallrohr eines Wasserkraftwerks laminar fließt (Strömungswiderstände sollen nicht betrachtet werden). Dabei soll sich nicht nur der Querschnitt der Röhre, sondern auch ihre Höhe über dem Erdboden verändern … siehe Abbildung.

Wende den Energieerhaltungssatz auf diesen Fall an, wobei p der statische Druck im Wasserrohr, ρ die Dicht der Flüssigkeit, g der Ortsfaktor, y die Höhe über dem Nullniveau der Lageenergie (NN) und v die Strömungsgeschwindigkeit im Rohr ist. Zeige, dass hierbei folgende Gleichung gilt:



$$p + \rho \cdot g \cdot y + \tfrac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 = \text{konstant}$$

Nachdenklich …

Ein eher stiefmütterlich behandeltes Thema der Schulphysik sind Gas- und Wasserströmungen. Wasserstromkreise werden in fast allen Schulbüchern als Modelle für den elektrischen Stromkreis behandelt … es stellt sich nur die Frage, ob das Wissen über Wasserstromkreise so hinreichend gefestigt ist, dass es als hilfreiche Analogie bei elektrischen Stromkreisen eine sinnvolle Funktion ausüben kann.

Wo liegen eventuelle **Defizite**?

- … Die Analogie zwischen elektrischen Stromkreisen und Wasserstromkreisen läuft im Regelfall (… entsprechend dem Strom-Antriebs-Widerstandskonzept) folgendermaßen:
  - Der Antrieb für den elektrischen Strom ist die **Potenzialdifferenz** (Spannung) ←…→ während der Antrieb für den Wasserstrom die **Druckdifferenz** ist.
  - Der elektrische Strom in einem elektrischen Kabel wird als Quotient aus der **Ladungsmenge definiert, die pro Zeiteinheit** durch eine Querschnittsfläche geht ←…→ während der Wasserstrom in analoger Weise als **Wassermenge definiert wird, die pro Zeiteinheit** durch einen Querschnitt der Wasserleitung fließt..
- … in vielen Büchern wird die elektrische Spannung (Antrieb für den elektrischen Strom) als Energie pro Ladungseinheit definiert … U = E/q ←…→ erstaunlicher Weise vermeidet man aber die Definition des Drucks (als Antrieb für den Wasserstrom) über die Formulierung: „Druck ist die Energie pro Volumeneinheit"
- … als wesentliches Argument, das gegen diese Definition (Druck = Energie pro Volumen) spricht, wird häufig angegeben: „Wasser ist inkompressibel – also kann im Volumen V keine Energie E stecken, die dann als Quotient E/V als Druckdefinition angesehen werden kann.
- … nun stellt sich die Frage, warum leitet man aus der Formulierung p = E/V ab, dass die Energie E „IM" Volumen V steckt … während doch kein Mensch aus der Definition U = E/Q (alte Formulierung: U = W/Q) ableitet, dass die Energie E „IN" der Ladung Q steckt oder „AUF" der Ladung Q sitzt. ([1])
- … könnte es sein, dass wir in der E-Lehre die „Kindergartenerklärung", dass die Energie in Rucksäcken von der elektrischen Ladung Q durch die elektrischen Kabeln getragen wird, schon längst überwunden haben … dass wir uns aber von der „mechanistischen Vorstellung", dass das Wasser die Energie gewissermaßen „verinnerlicht" im Volumen V transportiert, nicht lösen können …
- … könnte es sein, dass die „Vorstellung" über den Energietransport von der Thermodynamik der Gase wesentlich geprägt wird und „Gas-Eigenschaften" unbewusst auf Wasserströme übertragen werden. Bei Gasen, die man wesentlich komprimieren kann, ist ein Transport der Energie „IM" Gas wohl möglich …

Eine eventuell sehr naive Vorstellung führt zu folgendem Textbeispiel:

> „Die Energie steck zunächst als Lageenergie im Wasser des Stausees. Im Fallrohr fällt das Wasser frei nach unten und die Energie, die zunächst als Lageenergie im Wasser steckte, tritt nun als kinetische Energie des Wassers auf (Vergleiche Freier Fall). Das Wasser trifft mit dieser kinetischen Energie auf die Turbinenschaufel; die kinetische Energie des Wassers wird dabei in Rotationsenergie der Turbinenschaufeln umgewandelt …"

bei dem folgende Fragen auf der Hand liegen …

- … steckt die Lageenergie wirklich „im Wasser" … steckt die Energie nicht vielmehr im System „Gravitationsfeld | Stausee" …
- … kann es sein, dass die Wassergeschwindigkeit am Ende des Fallrohres ebenso groß ist, wie die Geschwindigkeit beim freien Fall … Ist es nicht vielmehr so, dass sich die Strömungsgeschwindigkeit im Fallrohr entsprechend der „Kontinuitätsgleichung" einstellt … d.h. bei gleichem Querschnitt ist $v_{Wasserstrom}$ überall gleich groß?
  … sonst müsste das Wasser im Fallrohr doch ebenso „auseinander reißen" wie der Wasserstrahl, der aus einem Wasserhahn kommt?

---

[1] … es hat sich wohl herumgesprochen, dass die elektrische Energie bei einem elektrischen Stromkreis nicht „IM" Kabel fließt und schon deshalb nicht „IN" oder „AUF" der Ladung sitzen kann … elektrische Energie fließt „IM" elektromagnetischen Feld … UND wenn man diesen Energietransport „veranschaulichen" will, dann über die „Rechte-Hand-Regel" des Energietransports: Zeigt der Daumen in Richtung des E-Feldes, der Zeigefinger in Richtung des Magnetfeldes, dann zeigt der Mittelfinger in Richtung des Energieflusses (… diese Veranschaulichung ist eine sinnvolle didaktische Reduktion des Poynting-Vektors - Kreuzdreibein – aus den Maxwellgleichungen) … und liefert die Botschaft: Elektrische Energie wird bei niederen Frequenzen durch das elektrische Kabel „geführt" … UND bei höheren Frequenzen sind elektrische Leitungen nicht mehr nötig, das elektrische und magnetische Feld lösen sich von der „Antenne" und laufen ohne elektrische Führung durch den Raum.

Wesentlich für eine „**reflektierte Auseinandersetzung**" mit dieser Problematik wäre die Diskussion der Energie … hierbei könnte man auf die Idee kommen, folgende Terme zu diskutieren:

1. „Kompressions-Energie"

Mit Hilfe eines Kolbenprobers kann man leicht demonstrieren, dass man unter Energieaufwand (Kraft mal Weg) eine im Zylinder eingeschlossene Luftmenge komprimieren kann.

Pumpt man den Reifen eines Fahrrades auf, geht man selbstverständlich davon aus, dass die aufgewendete mechanische Energie anschließend in der komprimierten Luftmenge steckt. Man erwartet also, dass die innere Energie der Luftmenge ansteigt und sich demzufolge eine höhere Temperatur einstellt. Interessant ist in diesem Zusammenhang, die Diskussion der relevanten physikalischen Größen bei einer Pressluftflasche. ([2])

Füllt man den Kolbenprober mit Wasser, kann man leicht feststellen, wie wenig man das eingeschlossene Wasser im Vergleich zur Luft zusammen drücken kann. Bei Wasser findet man eine Kompressibilität von $k = 5\cdot10^{-10}$ m²/N (… die Kompressibilität gibt an, wie groß die Volumenänderung pro Volumeneinheit und pro Druckdifferenzeinheit ist). Mit diesem Zahlwert wird deutlich, wie inkompressibel Wasser ist. Und gleichzeitig wird deutlich, dass man „IM" Wasser durch Kompression keine große Energiemenge speichern kann.

Beim Bavona-Wasserkraftwerk, dessen Fallrohre eine Höhendifferenz von 890 m aufweisen, arbeitet man also mit einem hydrostatischen Druck von p_H = 87 bar = $87\cdot10^5$ N/m². Bei der Kompressibilität von $k = 5\cdot10^{-10}$m²/N erhalten wir bei einem Ausgangsvolumen von V = 1m³ eine Volumenänderung von $|\Delta V| = k\cdot V\cdot\Delta p = 4\cdot10^{-3}$ m³ also ΔV = 4 l. [3] und eine Energie von „NUR" 19 kJ, die tatsächlich „IN" diesem Wasservolumen steckt. ([4])

2. „Energie pro Volumen"

Analog zur Definition der elektrischen Spannung U als Quotient aus der Energie E und zugehöriger Ladungsmenge Q, kann man den Druck p als Quotient aus der Energie E und dem zugehörigen Wasservolumen V deuten. Das bedeutet aber nicht, dass die Energie E „IM" Wasservolumen V steckt …

Diese Energie E steht mit dem Volumen V NUR dann zur Verfügung, wenn z.B. durch Fallrohre, Pumpen usw. der Druck p erzeugt wird … diese Energie E kommt also nicht „AUS" dem komprimierten Wasservolumen V, sondern sie kommt aus dem Gravitationsfeld … oder wird durch die Pumpe (als Energiewandler) aufgebracht.

Beim Bavona-Wasserkraftwerk, dessen Fallrohre eine Höhendifferenz von 890 m aufweisen, arbeitet man also mit einem hydrostatischen Druck von p_H = 87 bar = $87\cdot10^5$ N/m². Das heißt, mit jedem Kubikmeter Wasser, das am unteren Ende des Fallrohres austritt, steht (im Idealfall) die Energie von 8,7·MJ zur Verfügung. ([5])

In der Sprechweise der KPK spricht man beim Druck von einem so genannten „Beladungsmaß" … im Sinne der obigen Erklärung gibt das Beladungsmaß an, wie viel Energie E pro Volumen V mit dem „Energieträger" transportiert wird.

3. „Energie im Wasserstrom"

Betrachtet man einen Wasserstrom, dann spielt die kinetische Energie des bewegten Wassers eine nicht zu vernachlässigende Rolle. Der Term $1/2\cdot\rho\cdot v^2$ beschreibt diesen Energieanteil pro Volumenein-

---

[2] Direkt nach dem Befüllen steckt die aufgewendete mechanische Energie bei der Kompression des Gases als innere Energie im Gas. Die Temperaturdifferenz (höhere Temperatur im Innenraum – tiefere Temperatur in der Umgebung) führt zu einem Entropie- und Energiestrom in die Umgebung. Nach einer gewissen Zeit stellt sich ein thermodynamisches Gleichgewicht ein – d.h. die Temperatur des komprimierten eingeschlossenen Gases und die Temperatur in der Flaschenumgebung sind gleich groß. Die Gasmenge in der Flasche hat nach dieser Abkühlung genau die gleiche innere Energie, wie die zuvor unkomprimierte Gasmenge außerhalb der Flasche vor der Komprimierung. Die Gasmenge in der Pressluftflasche hat im Vergleich zu der vorher unkomprimierten Gasmenge eine höhere Dichte, sie steht unter einem größeren Druck – UND die eingeschlossene Gasmenge hat durch die Abkühlung nach der Komprimierung thermische Energie und Entropie an die Umgebung abgegeben.

[3] Aus $E = -\int p\cdot dV = k\cdot V\cdot\int p\,dp = \frac{1}{2}\cdot \mathbf{k\cdot V(p_2^2 - p_1^2)}$ berechnet sie die mechanische Energie, die in diesem Wasservolumen steckt zu $1{,}9\cdot10^4$ J **= 19 kJ**.

[4] In einer gleich großen Gasmenge steckt beim gleichen Druck eine Energiemenge von **600MJ!**

[5] Diese Energie kann zwar am unteren Ende des Fallrohres „abgerufen" werden, steckt aber vor dem „Abruf" im Gravitationsfeld der Erde. Würde man 1m³ der Wassersäule im horizontalen Rohrstück am Ende des Fallrohres durch zwei Hähne „einsperren", dann wäre in diesem „Wasservolumen" nur die oben diskutierte geringe Energiemenge von wenigen kJ gespeichert.

heit. Selbstverständlich gehört zu dieser kinetischen Energie ein zugehöriger Impuls … im Sinne „Energie fließt nie alleine!“ ([6])

4. „Schallwellen“

Sowohl in Gasen als auch in Flüssigkeiten und in Festkörpern kann man Energie auch in Form von Schallwellen übertragen.

5. „hydrostatische Anteile“

Nicht vergessen darf man selbstverständlich die „hydrostatischen Anteile“ (Lage-Energie pro Volumeneinheit = $\rho \cdot g \cdot h$), wenn die Wasserströmung in verschiedenen Höhen über dem NN der Lageenergie strömt … so z.B. bei einem Wasserkraftwerk!

Fazit

Welche der hier diskutierten Energieformen jeweils eine „wesentliche Rolle“ spielt, hängt ganz entscheidend von den konkret vorliegenden Randbedingungen ab.

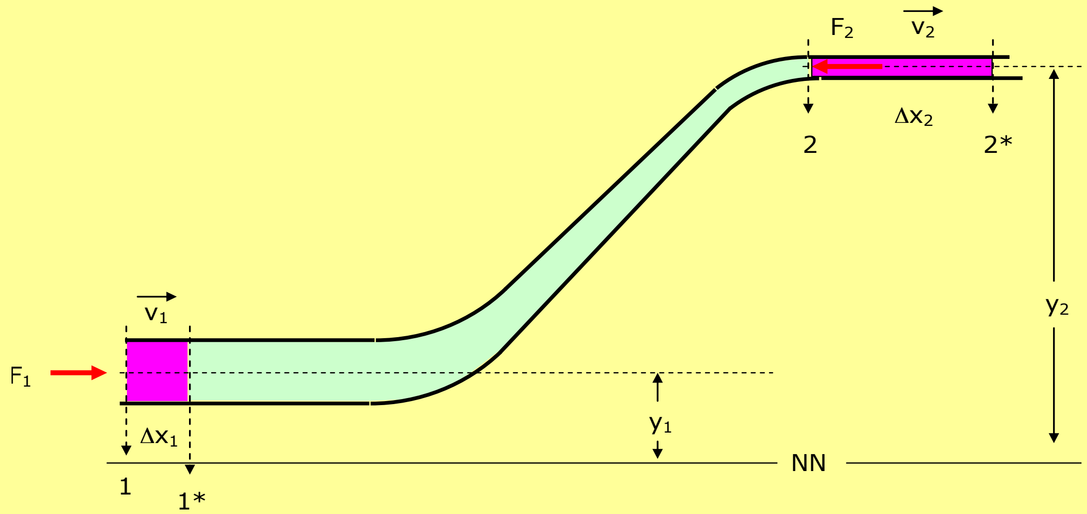
Betrachtet man z.B. die laminare Strömung in einem Rohr, das eine Verengung aufweist, stellt man fest, dass die Strömungsgeschwindigkeit (und damit die kinetische Energie der Strömung – Term: $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$) in der Verengung größer ist als vor und nach der Verengung – dass aber gleichzeitig der Druck (und damit der Term: E/V) in der Verengung abnimmt – ganz in Übereinstimmung mit dem Energieerhaltungssatz!

Betrachtet man eine Düse, dann liegt schon vor der Düsenöffnung ein Teil der Energie als kinetische Energie des Wasserstromes vor – ein anderer Teil steht als Druck zur Verfügung und führt zu einer Beschleunigung des Wassers beim Austritt aus der Düse … d.h. der Druck sinkt und gleichzeitig steigt der Anteil an kinetischer Energie.

[6] Stoppt man einen hinreichend starken Wasserstrom durch plötzliches Schließen eines Hahns, „hört“ und „spürt“ man den Impulsübertrag aus dem Wasserstrom in das Leitungssystem.

Paul Tipler **ISBN Nr. 3-86025-122-8 Seite 358ff**

Wir betrachten eine Flüssigkeit, die in einer Röhre fließt; dabei soll sich nicht nur der Querschnitt der Röhre, sondern auch ihre Höhe über dem Erdboden verändern … siehe Abbildung:



Wir wenden den Energieerhaltungssatz auf die Flüssigkeitsmenge an, die sich zwischen den Flächen 1 und 2 in der Abbildung befindet. Nach einer gewissen Zeit Δt hat sich die Flüssigkeitsmenge in der Röhre bewegt und befindet sich nun zwischen den Flächen 1* und 2* (siehe Abbildung 02). Die einzige Veränderung, die sich zwischen den beiden Abbildungen 01 und 02 ergeben hat, betrifft die dunkel markierten Bereiche. Sei $\Delta m=\rho\cdot\Delta V$ die Masse der Flüssigkeitsmenge. Im Resultat wird während dem Zeitintervall Δt die Masse Δm von y_1 nach y_2 angehoben, und die Geschwindigkeit steigt von v_1 nach v_2. Dabei ändert sich die potenzielle Energie dieser Flüssigkeitsmenge um

$$\Delta E_{pot}=\Delta m\cdot g\cdot y_2 - \Delta m\cdot g\cdot y_1 = \rho\cdot\Delta V\cdot g\cdot(y_2 - y_1)$$

und die Änderung der kinetischen Energie beträgt:

$$\Delta E_{kin}= ½ \cdot (\Delta m)\cdot v_2^2 - ½ \cdot (\Delta m)\cdot v_1^2$$

Weitere Flüssigkeit, die der betrachteten Flüssigkeitsmenge mit der Masse Δm in der Röhre nachfolgt, bewirkt eine Kraft nach rechts mit dem Betrag $F_1=p_1\cdot A_1$, wobei p_1 der Druck am Punkt 1 ist. Diese Kraft führt zur Energie

$$\Delta E_1 = F_1\cdot \Delta x_1 = p_1\cdot A_1\cdot\Delta x_1 = p_1\cdot\Delta V$$

Diese Energie ΔE_1 wird benötigt,

- um das Wasser anzuheben → Potenzielle Energie: $\rho\cdot\Delta V\cdot g\cdot(y_2 - y_1)$
- um das Wasser zu beschleunigen → $½ \cdot (\Delta m)\cdot v_2^2 - ½ \cdot (\Delta m)\cdot v_1^2$
- und um diejenige Flüssigkeit, die vor der Flüssigkeitsmenge mit der Masse Δm nach rechts geflossen ist, um die Strecke Δx_2 mit der Kraft $F_2=p_2\cdot A_2$ zu bewegen, wobei p_2 der Druck am Punkt 2 ist → $\Delta E_2 = F_2\cdot \Delta x_2 = p_2\cdot A_2\cdot\Delta x_2 = p_2\cdot\Delta V$

Der Erhaltungssatz liefert:

$$p_1\cdot\Delta V = \rho\cdot\Delta V\cdot g\cdot(y_2 - y_1) + ½ \cdot (\Delta m)\cdot v_2^2 - ½ \cdot (\Delta m)\cdot v_1^2 + p_2\cdot\Delta V$$

Wenn wir nun alle mit 1 indizierten Größen auf eine Seite und alle mit 2 indizierten auf die andere Seite schreiben, wird aus dieser Gleichung:

$$p_1 + \rho\cdot g\cdot y_1 + ½ \cdot \rho \cdot v_1^2 = p_2 + \rho\cdot g\cdot y_2 + ½ \cdot \rho\cdot v_2^2$$

Dieses Ergebnis kann man auch anders wiedergeben:

$$p + \rho\cdot g\cdot y + ½ \cdot \rho \cdot v^2 = \text{konstant}$$