

# Ein Modell-Wasserkraftwerk

## mit Anmerkungen zur Lageenergie

F. Kranzinger

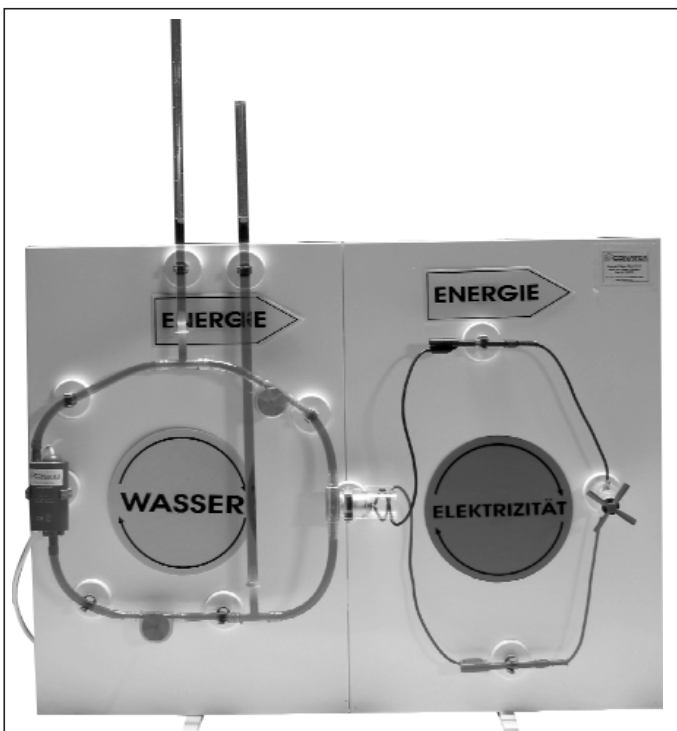
### 1 Wo steckt die Lageenergie

Wasserkraftwerke werden im Rahmen der „Energiethematik“ gerne beschrieben – es stellt sich nur die Frage, ob diese Beschreibungen noch als „korrekte didaktische Reduktionen“ bezeichnet werden können. Typisch ist z. B. folgender Schulbuchtext:

*„Im Modellkraftwerk fließt Wasser aus dem hochgestellten Vorratsgefäß auf die Turbine. Diese wird in Drehung ver-*

**Abb. 1 (oben):** Energieträgerstromkreises der Firma CONATEX, in der eine Wasserpumpe eine Druckdifferenz erzeugt, die als Antrieb für einen Wasserstrom erkannt wird.

**Abb. 2 (unten):** Wassergenerator mit Motor und Propeller



setzt ... Die Ursache für die Drehung des Wasserrades ist die Bewegungsenergie des fließenden Wassers; diese war vorher als Lageenergie im hochgehobenen Wasser des Vorratsgefäßes gespeichert. Die Lageenergie des Wassers nützt also erst etwas, wenn sie zum Wasserrad gelangt.“

Im Unterricht führt dieser Text bei den Schülerinnen und Schülern eventuell zu folgenden „Einsichten“ bzw. „Fragen“:

- Ist die Lageenergie wirklich „IM“ Wasser gespeichert? Das Wasser im Vorratsgefäß „besitzt“ eine Masse, es hat eine bestimmte Dichte, es hat eine bestimmte Temperatur – steckt die Lageenergie in diesem Sinne „IM“ Wasser? Muss man hier nicht das System „Wasser – Planet“ bzw. Gravitationsfeld betrachten?
- Wird bei einem Wasserkraftwerk die „Lageenergie“ direkt in „Bewegungsenergie“ umgewandelt? Fällt das Wasser im Fallrohr wie beim freien Fall nach unten und wandelt sich dabei „Lageenergie“ in „Bewegungsenergie“ um? Wenn das so wäre, müsste dann die Wassersäule im Fallrohr nicht ebenso „auseinander reißen“ wie der Wasserstrahl an einem Wasserhahn?

Solchen Text könnte man positiv wenden, wenn man sie als offene Problemstellung in die Klasse trägt und damit einen entdeckenden Unterricht mit einer Bandbreite an Möglichkeiten provoziert. So z. B. könnte man (a) „darüber nachdenken“ (eine Tugend, die im Zeitalter von Wikipedia und Internet eventuell zu kleingeschrieben wird), (b) in der Schülerbücherei – oder im Internet zu recherchieren oder (c) die Hypothesen, Modellvorstellungen in Vorher sagen zu gießen, die man in einem Experiment testet.

In diesem Rahmen spielen „theoriegeleitete Experimente“ eine ganz besondere Rolle – vor allem auch in offenen Problemstellungen ... und besonders motivierend, wenn diese Fragestellungen aus den Reihen der Schülerinnen und Schüler selbst kommen.

Der Ausgangspunkt dieser Fragestellungen war die Demonstration des Energieträgerstromkreises der Firma Conatex (siehe Abb. 1), in der eine Wasserpumpe eine Druckdifferenz erzeugt, die als Antrieb für einen Wasserstrom erkannt wird.

Der Wasserstrom treibt eine Wasserturbine, die über eine Magnetkupplung mit einem Generator verbunden ist, der die Energie, die mit der Wasserströmung angeliefert wird, über die Turbine aufnimmt und als elektrische Energie zur Verfügung stellt. An dem Generator ist ein Elektromotor mit aufgesetztem Propeller angeschlossen. Mit diesem Modell kann man wichtige Aspekte aus den Bildungsstandards zur Energiethematik veranschaulichen. Wesentlich ist hierbei die Erkenntnis, dass Energie nie allein fließt, dass immer eine zweite, mengenhafte physikalische Größe beteiligt ist<sup>1)</sup>.

<sup>1)</sup> In unterschiedlichen didaktischen Reduktionen nennt man diese zweite mengenhafte physikalische Größe auch Energieträger. Wenn diese Modellvorstellung reflektiert eingesetzt wird, hat sie ihren Stellenwert. Wird diese Trägervorstellung naiv verwendet (im Sinne eines Rucksackmodells), wirken solche „naive Bilder“ bei späteren Vertiefungen eventuell hinderlich.

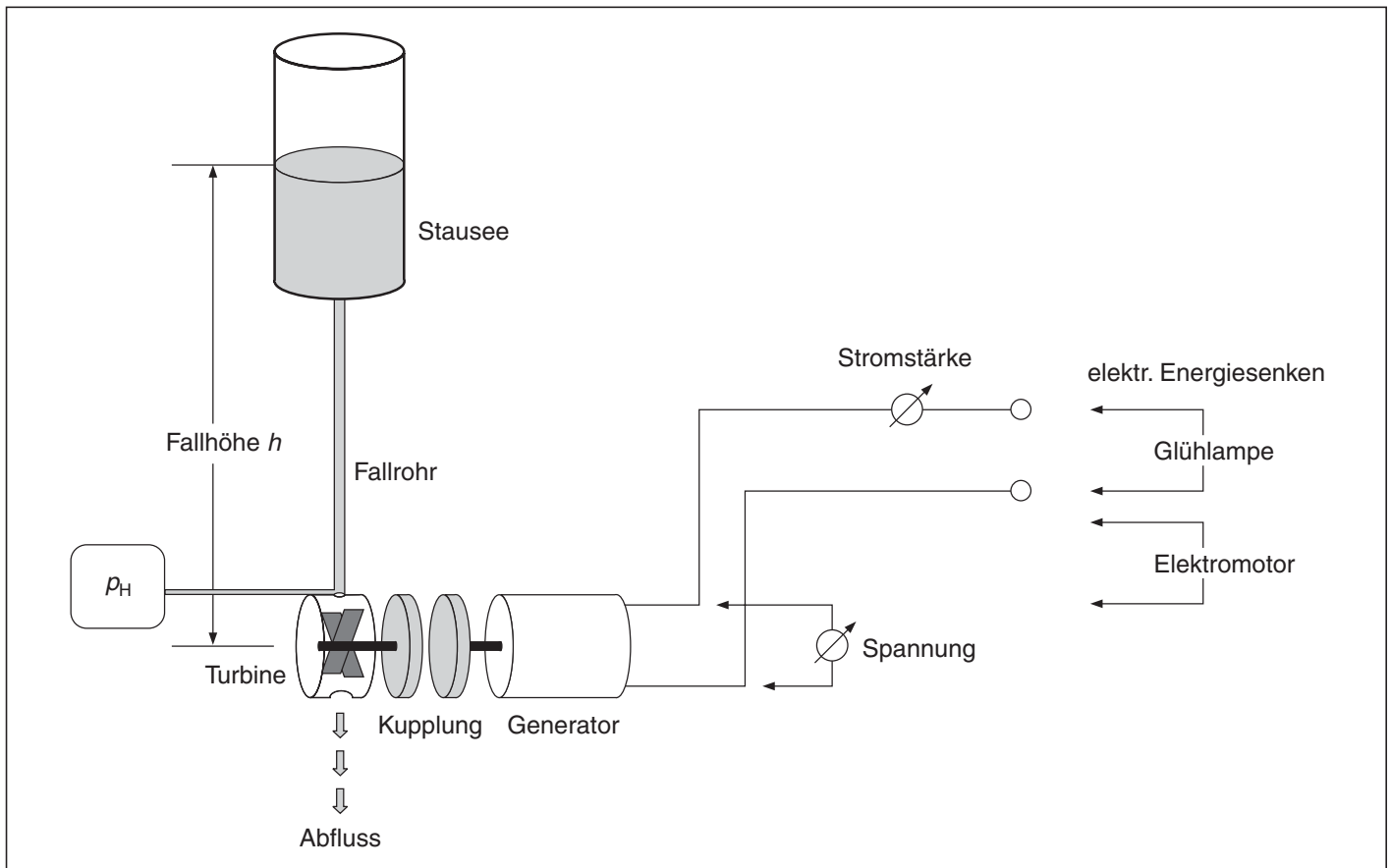


Abb. 3: Aufbau des Modell-Wasserkraftwerks

Dieser Energieträgerstromkreis provoziert eventuell zwei Fragestellungen:

- Kann man den Energiefluss, der im üblichen Modell von der Wasserpumpe (in Abb. 1 links) zum Elektromotor (rechts) geht, umdrehen? Also, was passiert, wenn man den Propeller auf dem Elektromotor von Hand dreht?
- „Können wir mit diesen Geräteteilen nicht ein Modellwasserkraftwerk aufbauen?“

Eine besondere Faszination geht von Energiewandlern aus, die in beiden Richtungen funktionieren – so z. B. das Generator/Motor-Geräte „Dynamot“ oder Elektrolysezellen, die auch als Brennstoffzellen funktionieren oder diese Turbinen-Generatorkombination – bzw. der Elektromotor der Firma CONEX –, der als Generator oder Motor betrieben werden kann.

Für die Realisierung der zweiten Frage – Bau eines Modell-Wasserkraftwerks – muss man etwas mehr Unterrichtszeit investieren, die sich aber auf jeden Fall lohnt, denn es können damit wesentliche Themen der Physikbildungspläne – wie z. B. „Energiespeicher“, „Energiestrom“ und „Energiewandlung“ – anschaulich demonstriert werden. Neben Fragen zum „hydrostatischen Druck“, „Wirkungsweise eines Fallrohres in einem Wasserkraftwerk“ und die Diskussion verschiedener „Wirkungsgrade“ kann dieses Experiment eine ganze Palette an interessanten Fragen provozieren. Der Unterschied zwischen der Energie – bzw. dem Energiestrom – und der „mitfließenden Größe“ wird vor allem an den Stellen deutlich, an denen die Energie ihren „mengenhaften Partner“ wechselt – also in den Energiewandlern „Generator“ und „Elektromotor“.

## 2 Material

- Wassergenerator mit Motor und Propeller<sup>2)</sup> (siehe Abb. 2, Bestell-Nr.: 108 0701)
- 2 m Schlauch
- Schlaucholive
- passender Gummistopfen
- Plastikflasche aus dem Getränkehandel
- Stativmaterial
- Xplorer GLX (Bestellnr. 104 1001)
- PASPORT Absolutdrucksensor (Bestellnr. 104 1027)
- PASPORT Strom-/Spannungssensor  $\pm 1$  A;  $\pm 10$  V (Bestellnr. 104 1044)
- Potenziometer (0 – 100 k $\Omega$ )

## 3 Vorbereitung

Auch wenn dieses Experiment eine Vielzahl an Möglichkeit bietet, schülerzentrierte Problemstellungen zu formulieren – bzw. auf eine Vielzahl von Fragen eine anschauliche Antwort zu liefern –, ist der Aufbau in wenigen Minuten mit wenigen Handgriffen erledigt. Neben Geräten aus der Physiksammlung benötigt man eine durchsichtige Plastikflasche (1,5 Liter Fassungsvermögen), bei der man mit einem Küchenmesser den Boden abschneiden muss. Der Generator und der Elektromotor werden mit den mitge-

<sup>2)</sup> Alternative: Wenn in der Physiksammlung der Energieträgerstromkreis (Conatex Artikel-Nr.: 1080700) zur Verfügung steht, könnte man den Generator und den angepassten Elektromotor aus dieser Zusammenstellung ausbauen und in dem Experiment „Modell-Wasserkraftwerk“ verwenden.

lieferten Magnethaltern an einem passenden Aufbau gehalten – oder mit passendem Stativmaterial in waagrechter Position passend montiert. In geeigneter Höhe wird die „bodenlose Plastikflasche“ mit Stativmaterial befestigt. Ein passender Gummistopfen mit Mittelbohrung verschließt den Hals der Plastikflasche. Mit Hilfe einer Schlaucholive wird der Gummischlauch mit dem einen Ende an der Plastikflasche befestigt; das andere Schlauchende wird auf den CONATEX-Generator/Turbinenmodell aufgesteckt.

#### 4 Funktionsweise

##### 4.1 Mit Selbstverantwortung und hinreichend viel Zeit

Selbstverantwortliche, selbstständige Teamarbeit – allerdings mit ausreichender Zeitvorgabe – kann zu folgenden gedanklichen Wegen führen:

- Im Stausee (hier: Flasche) und im Fallrohr (hier Schlauch) baut sich ein von oben nach unten wachsender hydrostatischer Druck auf. Vor der Turbine, also am unteren Ende des Fallrohres ist dieser hydrostatische Druck am größten. Vor der Turbine haben wir also den hydrostatischen Druck  $p_H$  durch die Wassersäule im Fallrohr, hinter der Turbine herrscht so gut wie kein Druck. Diese Druckdifferenz  $\Delta p = p_H$  führt zu einem Wasserstrom, der die Turbine antreibt.
- Aus dem Internet wurde folgende Deutung herunter geladen: Am unteren Ende des Fallrohres steht der hydrostatische Druck  $p = E/V$  zur Verfügung<sup>3)</sup>. Die Turbine wandelt diese mechanische Energie in Rotationsenergie um. Der Generator wandelt dann die Rotationsenergie in elektrische Energie um.
- Der dem „Modellkraftwerk“ zugeführte mechanische Energiestrom  $P_{\text{mech}}$  schätzte ein Schülerteam folgendermaßen ab:

$$P_{\text{mech}} = \frac{E}{t} \rightarrow P_{\text{mech}} = \frac{pV}{t} \rightarrow P_{\text{mech}} = \rho gh \frac{V}{t} \quad (1)$$

Wenn nur ein Teil dieser „zur Verfügung“ stehenden Energie an die Turbine weitergegeben wird, kommt noch ein Faktor „Wirkungsgrad“  $\eta$  hinzu. Also ergibt sich:  $P = \eta \rho gh V/t$ .

- Aus Wikipedia holte ein anderes Team folgende Abschätzung für die Leistung eines Wasserkraftwerks: „Die Leistung  $P$  ist abhängig vom Wasserdurchfluss  $Q$  und der Fallhöhe  $h$  sowie von den Wirkungsgraden  $\eta$  des Zulaufs, der Wasserturbine, des Getriebes und des Gene-

rators. Die näherungsweise Berechnung ( $g \rho \eta = 7 \text{ kN/m}^3$ ) liefert:

$$P [\text{kW}] = Q [\text{m}^3/\text{s}] h [\text{m}] 7 [\text{kN/m}^3]. \quad (4)$$

Es ergibt sich eine hohe Motivation, wenn die Teams aus scheinbar unterschiedlichen Ansätzen zum gleichen Ergebnis finden.

- An der Messung des mechanischen Energiestroms am Ende des Fallrohres tüftelt eine andere Gruppe:
  - (1) Man bestimmt die Höhe  $h$  der Wasseroberfläche im Stausee über der Achse der Turbine. Die Dichte des Wassers ( $\rho_{\text{Wasser}} = 1 \text{ kg/dm}^3$ ) und der Ortsfaktor (Schwerebeschleunigung  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ) sind bekannt.
  - (2) Die Wasserstromstärke (Wasservolumen pro Sekunde:  $V/t$ ) kann man bestimmen, wenn man den Querschnitt  $A$  der Flasche kennt und die Höhenänderung im „Modellstausee“ pro Sekunde bestimmt.
- Für die Bestimmung der Energiestromstärke am Ausgang des Generators findet eine Gruppe mit wenig Hilfe unterschiedliche Varianten:

**Einfach-Variante:** (a) Man schließt einen Verbraucher (elektrische Energiesenke – z. B. einen Elektromotor) an, (b) bestimmt die elektrische Potenzialdifferenz bzw. die Spannung  $U_G$  am Generatorausgang und (c) die elektrische Stromstärke  $I$  in der Zuleitung zum Motor. Die vom Generator an den Motor abgegebene elektrische Energiestromstärke (Leistung) ist  $P = U_G I$ . Ein Wirkungsgrad dieses Modell-Kraftwerks wird abgeschätzt nach

$$\eta_1 = \frac{P_{\text{Nutzleistung}}}{P_{\text{Eingangleistung}}} \rightarrow \eta_1 = \frac{U_G I}{\rho gh \frac{V}{t}}$$

**Abschätzung:** Nicht jeder Elektromotor ist so gebaut, dass er zu einer maximal möglichen Leistung (Energiestromstärke) des Generators führt. Auf folgende Weise ließe sich diese maximal mögliche Generator-Energiestromstärke (Leistungsabgabe) abschätzen: Man bestimmt die Leerlaufspannung des Generators, bestimmt die Kurzschlussstromstärke und erwartet dann die vom Generator maximal mögliche Leistungsabgabe (Energiestromstärke) zu

$$P_G = 1/4 U_{\text{max}} I_{\text{max}}$$

**Kennlinien-Variante:** Die obige Variante kann nur eine Abschätzung liefern, denn im allgemeinen Fall können wir nicht davon ausgehen, dass der Generator die „ideale Kennlinie“ einer elektrischen Energiequelle mit konstanter Quellspannung und konstantem Innenwiderstand hat ... und zudem können wir nicht davon ausgehen, dass ein zufällig ausgewählter Elektromotor gerade so dimensioniert ist, dass er bei dem vorliegenden Generator zu einer maximalen Energieabgabe führt. Will man den Arbeitspunkt dieser Gerätekombination (Generator als elektrische Energiequelle und Elektromotor als elektrische Energiesenke) genau bestimmen, müsste man die  $U$ - $I$ -Kennlinie des Generators und des Elektromotors aufnehmen und aus den beiden Kennlinien den Arbeitspunkt ermitteln. Selbstverständlich kann diese „theoretische Vorhersage“ im Experiment durch eine Strom- und

<sup>3)</sup> ...wieder einmal eine Warnung vor einem naiven Trägermodell ... man darf nicht naiv annehmen, dass die Energie „IM WASSER“ steckt. Interessant war die Reaktion des Schülerteams auf meinen Einwand, dass Wasser so gut wie nicht kompressibel ist und daher bei verschlossenem Fallrohr die Energie nicht „IM WASSER“ steckt. Den Schülerinnen und Schülern war das klar, denn wir hatten zuvor im Unterricht deutlich problematisiert, dass die Lageenergie bei einem angehobenen Körper auch nicht „IM Körper“ steckt. Die Reaktion des Teams: Sie zeigten, dass bei einem Fallrohr mit dem Querschnitt  $A$ , die „Wassersäule“ der Länge  $\Delta s$  an der Austrittsstelle die beschleunigende Kraft  $F = pA$  erfährt. Mit  $p = \rho gh$  gilt für die Bewegungsenergie des Wassers nach dem Austritt aus dem Fallrohr folgende Abschätzung:  $P = F v \rightarrow P = p A v \rightarrow P = \rho gh A v \rightarrow P = \rho gh V/t \rightarrow (2)$  ... Als Hausarbeit bekam ich auch noch folgende Abschätzung: Die Lageenergie muss im Idealfall gleich der Bewegungsenergie des Wassers nach dem Austritt am unteren Ende des Fallrohres sein. Diese Überlegung liefert:  $P = E/t$  ... mit  $E = mgh$  und  $m = V\rho$  ergibt sich:  $P = \rho gh V/t \rightarrow (3)$

Spannungsmessung leicht überprüft werden. Will man eine maximalmögliche Leistungsabgabe des Generators erreichen, kann man aus der Generator Kennlinie den idealen Arbeitspunkt bestimmen und einen dazu passenden Elektromotor finden, der bei Anschluss an den Generator genau zu diesem Arbeitspunkt führt.

- Es kommt die Frage auf, welches Diagramm ergibt sich wohl, wenn man die Höhe  $h$  der Modellstauseeoberfläche über der Leerlauf-Ausgangsspannung am Generator aufträgt?
- Die Argumentationskette (eventuell nicht unbedingt in dieser Reihenfolge „erfunden“) hatte folgende Form: (a) Die Generator-Leerlaufspannung ist von der Drehgeschwindigkeit der Turbine und damit der Generatorwelle abhängig. (b) Die Drehgeschwindigkeit der Turbine ist eine Funktion der Strömungsgeschwindigkeit des Wassers. (c) Bei den vorliegenden Randbedingungen (kleine Generatoreintrittsöffnung) liegt es nahe, die Druckdifferenz (also näherungsweise den hydrostatischen Druck am Ende des Fallrohres) als Antrieb für die Wasserströmung zu sehen. (d) Der hydrostatische Druck am Ende des Fallrohres ist eine Funktion der Höhe der Wassersäule im Fallrohr. Setzt man (a) bis (d) zusammen und nimmt man jeweils näherungsweise als grobe Abschätzung „direkte Proportionalität“ an, hätte man eine erste Vermutung, die man im Experiment überprüfen kann.
- Eine interessante Frage wurde fast nebenher diskutiert: Will man die maximal mögliche Energie aus der Wasserströmung auf den Generator übertragen, dann müsste man dafür sorgen, dass das Wasser nach dem Generator möglichst wenig Energie „mitnimmt“ ... d. h., das Wasser müsste nach dem Generator „stehen“ und nicht mehr „fließen“. Das ist aber natürlich nicht möglich, denn dann würde die Turbine ebenfalls „stehen“. Die Diskussion über den maximal möglichen Wirkungsgrad wird bei der Behandlung von „Wärmeleistungswerken“ aufgegriffen ... ein weites und komplexes Gebiet.
- Eher eine Spielerei am Rande war die Abschätzung der Ausströmungsgeschwindigkeit bei waagrecht montiertem Auslaufrohr aus der „Wurfweite“ des ausspritzenden Wassers.
- Das ständige Nachfüllen des Modellstausees könnte man auch folgendermaßen lösen: Ein Wasserschlauch mit einer passenden Wasserstromstärke füllt eben gerade soviel Wasser ständig nach, sodass das Wasserniveau im Modellstausee konstant bleibt. In diesem Zusammenhang kam die Frage auf: Wenn man die Plastikflasche mit der etwa konstanten Querschnittsfläche  $A$  bis zur Höhe  $h_0$  füllt und dann „leer laufen lässt“, welches  $h$ - $t$ -Diagramm würde sich dann ergeben. Die Fragestellung wäre also: Wir wollen die Füllhöhe  $h(t)$  in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  und anderen relevanten physikalischen Größen bestimmen. Ist eine geschlossene Lösung möglich ... brauchen wir ein Modellbildungssystem?
- Aus Ärger über eine nasse Bluse kam die Idee auf: Könnte man das Modellkraftwerk – also die Conatex-Turbinen-Generatorkombination auch mit Luft statt mit Wasser betreiben. Zur Freude der Schülerinnen und Schüler ist das tatsächlich möglich. Erstaunlich war in diesem Zusammenhang, dass bei der Verwendung einer relativ kräftigen Luftpumpe manchmal der Fall auftrat, dass sich die Turbine kräftig im Luftstrom drehte,

während der Generator stand und keine elektrische Potenzialdifferenz erzeugte. „Spielerische Experimente“ führten zu folgender Erklärung: Wenn man die Turbine zu schnell hochfährt, reißt die „magnetische Koppelung“ zwischen der Turbine und dem Generator ab und der Generator wird nicht mitgenommen. Reduziert man die Luftstromstärke durch „Abquetschen“ des Luftschlauchs und fährt die Turbine „langsam hoch“, wird der Generator mitgenommen.

#### 4.2 Geschlossene Vorgaben bei geringerem Zeiteinsatz

Will man dieses Modellwasserkraftwerk in einer Klasse einsetzen, die offene Problemstellungen nicht gewohnt ist, und steht keine hinreichende Zeit zur Verfügung, gibt es eine Alternative, indem man mit den Schülerinnen und Schülern nach dem Aufbau des Modell-Wasserkraftwerks folgende Fragen bzw. Arbeitsaufträge diskutiert:

- [A] Welche Spannung und Stromstärke kann man mit Hilfe des PASPORT Strom-Spannungssensor am Ausgang des Generators im Leerlauf und im Kurzschluss messen. Welche Leistungsabgabe kann man abschätzen?
- [B] Bestimmen Sie durch unterschiedliche Belastung des Generators die  $U$ - $I$ -Kennlinie des Generators.
- [C] Bestimmen Sie mit dem PASPORT Strom-/Spannungssensor die  $U$ - $I$ -Kennlinie des Elektromotors. Welcher Arbeitspunkt ergibt sich aus diesen beiden Kennlinien? Überprüfen Sie diese Vorhersage im Experiment!
- [D] Welchen Zusammenhang zwischen der Fallhöhe  $h$  und dem hydrostatischen Druck am Ausgang des Fallrohres erwarten Sie. Wie kann man das mit dem PASPORT Absolutdrucksensors überprüfen?
- [E] Schätzen Sie bei waagrecht montiertem Wasserausströmstutzen die „Ausströmgeschwindigkeit“ des Wassers aus der „Wurfweite“ ab. Welche Argumente sprechen dafür, dass die Strömungsgeschwindigkeit am unteren Ende des Fallrohres in etwa gleich der Strömungsgeschwindigkeit am oberen Ende ist?
- [F] Welchen Zusammenhang zwischen der Fallhöhe  $h$  und der Leerlaufspannung am Generator erwarten Sie? Wie können Sie das mit den vorhandenen PASPORT-Sensoren nachprüfen?
- [G] Was erwarten Sie, wenn Sie das Fallrohr vom Generator abziehen, das Wasser ausläuft und der Propeller auf dem Motor von Hand angedreht wird?
- [H] Wenn man das Wasserfallrohr durch einen Schlauch ersetzt, der an eine Luftpumpe angeschlossen ist, kann man dieses Wasserkraftwerk auch als Anlage zur Untersuchung von Gasströmen einsetzen. Der Luftdruck hinter der Luftpumpe kann man mit dem Gerät: PASPORT Absolutdrucksensor bestimmen. Welche Experimente bieten sich an?
- [I] Stellen Sie aufgrund Ihrer Erfahrungen mit Wasserströmen, Gasströmen und elektrischen Strömen eine Analogietabelle auf, in der sie analoge physikalische Größen einander gegenüberstellen.

---

#### Anschrift des Verfassers:

Prof. Franz Kranzinger, Staatliches Seminar für Didaktik und Lehrerbildung (Gymnasien) Stgt I, Hospitalstraße 22-24, 70174 Stuttgart

---