

## Habt ihr schon gewusst 154 ... Analogien

... die Nachhaltigkeit im Physikunterricht war immer schon eine implizite Forderung der Bildungspläne. In den Physik-Bildungsstandards wird dies u.a. durch die Auflistung der Kompetenzen in 9/10 und 11/12 deutlich ... WENN selbstverständlich im „höheren Block“ alle Kompetenzen aus den „tieferen Klassenstufen“ verlangt werden – UND aus diesem Grunde auch dort explizit aufgeführt sind. Manche Kompetenzen auf dem gleichen Niveau ... bei einigen Kompetenzen in einer vertieften Form. So z.B. steht der Impuls in „qualitativer Form“ im Block 7/8 ... und dann in „quantitativer Form“ im Block 9/10 und selbstverständlich auch im Block 11/12.

... diese Nachhaltigkeit kann man aber nur erreichen, wenn man (a) Themen aus vorausgehenden Klassenstufen „wiederholt“ in den Unterricht einbindet ... UND (b) die Schülerinnen und Schüler motiviert sind, „von sich aus“ Fachwissen und Fachmethoden „zu behalten“. Diese Motivation liegt vor, wenn die Schülerinnen und Schüler bei der Behandlung des „Themas B“ merken, dass Ihnen das Wissen und die Methoden helfen, die sie bei der Behandlung des „Themas A“ im vorangegangenen Unterricht erworben haben.

... diese Nachhaltigkeit wird besonders durch die Kompetenz „Strukturen und Analogien“ gefördert:

### 9. Strukturen und Analogien

Die Schülerinnen und Schüler können (9a) das magnetische und elektrische Feld als physikalisches System beschreiben und die Grundlagen der Maxwelltheorie verstehen, in der die Elektrodynamik auf vier Aussagen zurückgeführt wird; (9b) ihre Vorstellungen und Ausdrucksweisen über Schwingungen und Wellen in eine angemessene Fachsprache überführen; (9c) Grundkenntnisse werden bei folgenden Themen erwartet ....

### Spirometer-Analogie Frage ...

In einem der vorangegangenen Beiträge wurde beschrieben, wie man die Funktionsweise eines „Spirometers“ durch die Analogie „elektrische Ladungsmenge“ – „Luftmenge“ ohne große Probleme in der Mittelstufe erklären kann ... auf einem ganz leichten Weg, wird ein physikalischer Hintergrund anschaulich, der sonst mit Sicherheit nicht lösbar wäre ... UND das Erstaunliche daran: In diesem Fall wird die „E-Lehre“ als „leichte und bekannte Analogie“ dazu verwendet, zunächst unzugängliche „mechanische Zusammenhänge“ zu veranschaulichen. Die Ausführungen zur Spirometer-Analogie findet man unter:

- [CONATEX Strom-Antrieb-Widerstand.pdf](#)
- [G-Puzzle Strom Antrieb Widerstand.pdf](#)
- [Spirometer.pdf](#)

Je länger man sich mit diesen Analogien beschäftigt, umso deutlicher erkennt man „eingefahrene Wege“ der Wissensvermittlung, die nur für die Lehrerseite „klar“ und „verständlich“ wirken ... und aus Schülersicht als Lernhindernisse überwunden werden müssen.

### Energie-Analogie Frage ...

In der E-Lehre führt man nach der Ladung und der Potentialdifferenz die Kapazität eines Kondensators ein. UND erst nach einer Phase, in der die Schülerinnen und Schüler mit diesen Verhältnissen vertraut werden, ist einer der letzten Schritte die Herleitung der Energie in einem Plattenkondensator. Auf diesem Weg habe ich noch niemals eine „Vertauschung“, „Verwechslung“ oder ein „Irritation“ auf Schülerseite bemerkt, in der die elektrische Ladung mit der elektrischen Energie vertauscht wurde ... und es kam auch noch nie die Frage auf: Warum braucht man „beide“.

Ich kann mir kaum vorstellen, dass ein Physiklehrkraft die Behandlung des Plattenkondensators mit der elektrischen Energie beginnt und dann erst die elektrische Ladung und die Potentialdifferenz einführt. In diesem Fall könnte ich mir „Irritationen“ der oben beschriebenen Art leicht vorstellen.

In der Mechanik geht man aber noch vielfach genau diesen Weg. ... Man führt die kinetische Energie ein ... und wenn die Schülerinnen und Schüler meinen, dass die Mechanik - mit  $v$ ,  $m$ ,  $F$  und Energie - abgeschlossen ist, werden sie mit der Botschaft überrascht, dass man in gewissen Fällen (z.B. beim unelastischen Stoß), leider noch eine weitere Größe – nämlich den Impuls – braucht, der aus Schülersicht „fast genau so aussieht wie die kinetische Energie“ ... Dieses Problem ist aber massiv „hausgemacht“, wie viele Unterrichtsversuche an konventionellen Schulen! deutlich zeigen.

Die Analogie zur elektrischen Ladung ist der mechanische Impuls; die Analogie zur Potentialdifferenz (Spannung) ist die Geschwindigkeitsdifferenz (oder Geschwindigkeit im def. Bezugssystem) ... was spricht also dagegen, dass man zuerst die Geschwindigkeit und die Masse ... dann den Impuls definiert ... UND erst wenn die Schülerinnen und Schüler in der Klassenstufe 7/8 qualitativ und dann in 9/10 quantitativ mit dem Impuls vertraut sind, die kinetische Energie einführt ... GANZ ANALOG zum „elektrischen Fall“. Energie tritt niemals alleine auf ... WENN man dem Wort „Energieträger“ skeptisch gegenüber steht, kann man „Veranschaulichungen“ der Form: „Energie hat eine Partnergröße“ ... oder „Energie fließt niemals allein“ verwenden ... UND die Schülerinnen und Schüler lernen in der Analogie zwischen E-Lehre (Ladung ...), Hydrodynamik (Gas- und Wasser ...), Wärmelehre (Entropie ...) und der Mechanik (Impuls ...) anschaulich und sinnstiftend eine Struktur, die nicht nur „schön aussieht“, sondern in vielen Fällen (aus Schülersicht) geradezu notwendig ist, um überhaupt eine Lösung für das gestellte Problem zu finden.

### Mechanik-E-Lehre-Analogie Frage ...

In der Dynamik unterrichten wir  $F = dp/dt$  ... und zeigen, dass in dieser Formel zwei Spezialfälle stecken: (a)  $F = m dv/dt$ , wenn  $m$  konstant ... oder (b)  $F = v dm/dt$ , wenn  $v$  konstant ist<sup>1</sup>. Der Fall (a) wurde in Bildungsplänen schon mit vielen Titeln belegt, die mehr oder weniger fragwürdig sind ... z.B. Newtonsches Axiom oder Newtonsche Grundgleichung .... der Fall (b) ist aus der

<sup>1</sup> Im Fall (a) könnte man von einem „konduktiven Schub“ sprechen, während man den Fall (b) als „konvektiv“ bezeichnen kann.

Raketentechnik bekannt. Ganz wesentlich: Im Fall (a) hängt die Kraft nicht vom Bezugssystem ab ... im Fall (b) ist die Kraft vom Bezugssystem abhängig. Eine „nachhaltige Frage“: Wie sieht hier die Analogie zur E-Lehre aus?<sup>2</sup>

## Newton kontra Aristoteles

In so manchem „klassischen Physikunterricht“ werden die „Fehlvorstellungen“ der ‚alten Griechen‘ thematisiert ... um dann zur „korrekten Denkweise“ des ‚Newton‘ „aufzusteigen“. Das heißt konkret:

**Aristoteles:** Die Vorstellung von Aristoteles, dass die Geschwindigkeit  $v$  eines Körpers (korrekt die Geschwindigkeitsdifferenz  $\Delta v$  des Körpers relativ zum Bezugssystem Boden) von der „innewohnenden Kraft“  $F$  abhängt, wird als falsch dargestellt ... falsch ist also  $F \sim v$  (bzw.  $F \sim \Delta v$ )

**Newton:** Die **Vorstellung von Newton**, dass die Beschleunigung  $a$  (also  $dv/dt$  oder als Differenzenquotient  $\Delta v/\Delta t$ ) direkt proportional zur Kraft ist, wird in „Luftkissenfahrbahnversuchen“ oder in weniger lauten und didaktisch fragwürdigen Experimenten den Schülerinnen und Schülern „nahe gebracht“ ... **richtig** ist also  $F \sim a$  (bzw.  $F \sim dv/dt$  oder als Differenzenquotient  $F \sim \Delta v/\Delta t$ )

**Alltagserfahrung ... Lernhindernis:** Mit Überzeugung habe ich als junger Lehrer in dieser Weise gehandelt und mich regelmäßig gewundert, dass nicht unwesentlich wenige meiner Schülerinnen und Schüler mit dieser Darstellung ihre großen Probleme hatten! Gerade in der Klasse 11, in der man diese Zusammenhänge im G9 thematisiert hat, machen viele Schülerinnen und Schüler Fahrschule ... UND sie wissen: Wenn ich mehr Gas gebe, dann fährt das Auto schneller ... naiv: doppelt soviel Gas ergibt doppelt soviel Geschwindigkeit ... OK, auf direkt proportional will ich mich nicht festlegen ... ABER: mehr Gas gibt sicher mehr Geschwindigkeit ... und ich muss das „Gaspedal“ ständig „gedrückt halten“ und nicht nur während der Beschleunigungsphase ... Also spricht die „Alltagserfahrung“ für Aristoteles!

Selbstverständlich gilt  $F \sim v$  ganz korrekt im Sinne von Aristoteles (und ganz korrekt im Sinne der „Heutigen Physik“), wenn man davon ausgeht, dass die investierte Energie durch Reibungsphänomene (Stokessche Reibung) dissipiert ... d.h. wenn die Reibungskräfte durch die Motorkraft gerade ausgeglichen werden - und keine Beschleunigung auftritt -, dann gilt:  $P = F \cdot v$  ... und WENN die notwendige Leistung  $P \sim v^2$  gilt, ergibt sich  $F \sim v$  ... oder direkt aus der Stokeschen Reibung (hier die Formel für den Luftwiderstand einer Kugel):  $F = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v$ . Im Falle der Newtonschen Reibung (was bei einem Auto wohl eher der Fall ist), haben wir  $F = \frac{1}{2} \cdot c_W \cdot \rho \cdot A \cdot v^2$  ... und die Motor-Leistung ist demnach proportional  $v^3$ .

Die Alltagserfahrung lehrt  $F \sim v$  oder  $F \sim v^2 \rightarrow$  ... also muss der Unterricht bei den Präkonzepten beginnen, wenn man nicht nur „oberflächlich“ auswendig gelerntes Klassenarbeitswissen produzieren will ... und besonders destruktiv wirkt in diesem Zusammenhang ein Physikunterricht, in dem das „Unwissen der Alten Griechen“ im Gegensatz zur „heutigen Physik“ herausgestellt wird ... Denn das führt nicht selten zur Schüler-Einstellung: „Sorry, ich bin genauso dumm wie die „Alten Griechen“ und meine „Dummheit“ passt perfekt zu meinen Alltags-Erfahrungen, die mir wunderbar „durchs Leben“ helfen.

Auch hier hilft – so meine Unterrichtserfahrung – die Analogie mit der E-Lehre ... z.B. in Form einer Teamarbeit, die folgende Aufgabenstellung bekommt:

### Arbeitsauftrag

- (01) Zeigen Sie bei einem Kondensator den Zusammenhang:  $I \sim C \cdot dU/dt$
- (02) Unter welchen Umständen gilt in der E-Lehre  $I \sim U$
- (03) Finden Sie die passenden „mechanischen Analogien“ und begründen Sie die Strukturgleichheit in beiden Themenbereichen der Physik!

Die Fragestellungen wirken zunächst „schlicht“ ... stellen aber auch für Kursstufen-Teams eine Herausforderung dar! Die Zuordnungen der E-Lehre- und Mechanik-Größen zu finden, ist nicht unbedingt trivial:

- Kapazität  $\leftrightarrow$  Masse
- Geschwindigkeit  $\leftrightarrow$  Spannung (bzw. Geschwindigkeitsdifferenz|Potenzialdifferenz)
- elektrische Stromstärke  $\leftrightarrow$  Kraft und
- elektrische Ladung  $\leftrightarrow$  Impuls

Im Regelfall wird eine Analogie dazu verwendet, in einem „unbekannten Gebiet“ etwas zu veranschaulichen, indem man die Strukturen und das gesicherte Wissen in einem „bekannten Gebiet“ dazu verwendet, es auf das „unbekannte Gebiet“ zu übertragen. Diese Teamarbeit hat aber eine etwas abweichende Zielrichtung: Hier soll durch die Zuordnung der „Analogie-Begriffe“ deutlich werden, dass

- (a) in der E-Lehre die Zuordnung zwischen der Stromstärke und der Spannung davon abhängt, welche experimentelle Situation ( ... welche Randbedingungen ... welche Bauteile liegen vor ... ) betrachtet wird ... beim technischen Widerstand gilt:  $I \sim U$  (Energie dissipiert!) UND beim Kondensator gilt:  $I \sim dU/dt$  (... die E-

<sup>2</sup> Im Fall (b) – konvektiver Schub – haben wir z.B. einen Wasserstrahl oder eine aus der Düse nach hinten abgeschleuderte Gasmenge ... die Analogie dazu wäre in der E-Lehre ein Elektronenstrahl, der in einem Magnetfeld mit der Flussdichte  $B$  durch eine Lorentzkraft abgelenkt wird. .... die Analogie zum Fall (b) wäre in der E-Lehre z.B. die Ladung in einem Draht, die bei einem stromdurchflossenen Draht in einem Magnetfeld ebenfalls eine Kraft erfährt.

Energie beim Laden aufgewendete Energie liegt als elektrische Energie  $\frac{1}{2} CU^2$  im Kondensator vor) UND selbstverständlich sind beide Zuordnungen korrekt ...

- (b) in der E-Lehre der „häufigere“ (gewohnte) Fall  $I \sim U$  auftritt
- (c) eine Analogie zur Mechanik besteht ... siehe obige Größenpaare
- (d) in der Mechanik die Zuordnung zwischen der Kraft und der Geschwindigkeit ebenfalls davon abhängt, welche experimentelle Situation (... welche Randbedingungen liegen vor ...) betrachtet wird ... im Fall der Stokeschen Reibung gilt:  $F \sim v$  (Energie dissipiert) UND beim Beschleunigungsvorgang ohne Reibung gilt:  $F \sim dv/dt$  (die beim Beschleunigungsvorgang aufgewendete Energie liegt als kinetische Energie  $\frac{1}{2} mv^2$  des Körpers vor) UND selbstverständlich sind beide Zuordnungen korrekt ...
- (e) in der Mechanik im Alltag der Fall  $F \sim v$  (oder  $F \sim v^2$ ) vorkommt ... in der Schule aber der Blick fast ausschließlich auf der Situation  $F \sim dv/dt$  liegt.

### Tabelle

	<b>E-Lehre</b>	<b>Mechanik</b>
<b>[01]</b>	C ... Kapazität eines Kondensators	m ... Masse eines Körpers
<b>[02]</b>	U ... Spannung $\Delta\varphi$ ... Potenzialdifferenz	v ... Geschwindigkeit $\Delta v$ ... Geschwindigkeit rel. zu BS
<b>[03]</b>	I ... Stromstärke	F ... Kraft
<b>[04]</b>	Q ... bzw. dQ ... ... Ladung ... „Ladungsportion“	p ... bzw. dp ... Impuls ... „Impulsportion“
<b>[05]</b>	$I = dQ/dt$ ... Stromstärke = Ladungsänderung pro Zeit	$F = dp/dt$ ... Kraft = Impulsänderung pro Zeit
<b>[06]</b>	$I = C \cdot dU/dt$ ... ... speziell bei konstanter Kapazität ... Ladevorgänge	$F = m \cdot dv/dt$ ... ... speziell bei konstanter Masse ... Beschleunigungsvorgänge
<b>[07]</b>	$E = \frac{1}{2} C \cdot U^2$ ... Energie eines geladenen Kondensators ... nach dem Aufladen	$E = \frac{1}{2} m \cdot v^2$ ... Kinetische Energie eines Körpers ... nach der Beschleunigung
<b>[08]</b>	$I \sim U$ ... bei einem technischen Widerstand	$F \sim v$ ... bei Stokescher Reibung
<b>[09]</b>	$(dE/dt) \dots P = I \cdot U$ ... z.B. Energiestromstärke Heizofen	$(dE/dt) \dots P = F \cdot v$ ... z.B. Motor-Leistung
<b>[10]</b>	$I = L \cdot U \quad \{ \dots I = (1/R) \cdot U \}$ ... L Leitwert bei einem tech. Widerstand	$F = c_{\text{Stoke}} \cdot v$ mit $c_{\text{Stoke}} = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r$