

# Habt ihr schon gewusst 171 ... Fragen aus dem Ph-U-Alltag 2008

... vielleicht eine Beschäftigung, wenn man sonst Langeweile hätte ... ☺

- Warum läuft der Lichtbogen bei einem Hörnerlichtbogen überhaupt nach oben ... Wie verhält sich eine Kerze, die man unten zwischen die Hörner stellt ... Warum zündet der Lichtbogen durch eine Kerze häufiger ...
- Wo bleibt die Wärme, wenn Sie in einen Körper eindringt? Welche Rolle spielt die Wärme, wenn man zwei Hände aneinander reibt?  
Warum darf man nicht sagen, dass „Energie“ nichts anderes als „gespeicherte Arbeit ist“ ... die anderen Physiklehrer sagen das doch auch?
- Warum kann man mit einer 1,5 Volt Stab-Batterie, die 3,6 MJ an Energie enthält und in einem Kran eingebaut ist, keinen Körper (Masse 1kg) 1m hochheben ... DENN dazu braucht man doch „bloß“ 10 Joule, das ist doch NUR ein Bruchteil von 3,6 MJ?
- Warum benötigt man bei einem Auto ein Getriebe? Hatten die alten Dampfzugs auch ein Getriebe – wenn ja, wo ... wenn nein, warum brauchen sie keines? Warum unterscheiden sich alte Schnellzuglokomotiven ganz entscheidend von alten Güterzuglokomotiven? Wo steckt das Getriebe bei einer modernen Lokomotive?
- Was ist ein Differenzial? Welche Funktion spielt es beim Auto? Warum gibt es gegen Aufpreis Vorrichtungen, die das Differenzial blockieren können? Hat eine Lokomotive auch ein Differenzial – wenn ja, wo ist es eingebaut – wenn nein, warum benötigt die Lokomotive kein Differenzial?
- Welcher Vorgang ist in der Energiebilanz günstiger: (a) Kohle im Kohlkraftwerk zu Gewinnung von elektrischer Energie zu verfeuern – und damit dann einen Heizofen zu betreiben ... ODER (b) Kohle direkt im Heizofen „vor Ort“ zu verfeuern?
- Welcher Vorgang ist in der Energiebilanz günstiger: (a) Kohle im Kohlkraftwerk zu Gewinnung von elektrischer Energie zu verfeuern – und damit dann „vor Ort“ eine Wärmepumpe zu betreiben ... ODER (b) Kohle direkt im Heizofen „vor Ort“ zu verfeuern?
- Wir müssen Analogien lernen, das soll sehr wichtig sein. ABER, wir kennen nur die Elektronen-Wasseranalogie ... gibt es denn noch weitere Analogiebeispiele?
- Warum benötigt man zum Schweißen nur wenige Windungen ... Während ein Lichtbogen nur mit einer hohen Windungszahl funktioniert?
- Wann erfolgt – z.B. in einer Stereoanlage – ein maximaler Energieübertrag von der Energiequelle in die Energiesenke ... Warum benötigt man in modernen HiFi-Anlagen Niederohm-Lautsprecher, während man in früheren Jahren „Hochohm-Lautsprecher“ eingesetzt hat.
- Kann man einen Kühlschrank auch als Klimaanlage einsetzen? Genügt es nicht, wenn man im Sommer den Kühlschrank leer räumt und die Türe bei eingeschaltetem Kühlschrank offen lässt.
- Warum überträgt man die elektrische Energie über Hochspannungsnetze ... Es gilt doch  $P=U \cdot I$  ... d.h. die Verluste auf den Übertragungstrecken werden doch mit steigendem  $U$  größer und nicht kleiner. Unser Lehrer hat zwar vorgerechnet, dass man diese Formel durch Einsetzen von  $I=U/R$  in  $P = U^2/R$  umgewandelt. UND er behauptet, dass man damit verstehen kann, warum man ein großes  $U$  braucht, um eine hohe Leistung  $P$  zu übertragen. ABER, wenn ICH in die Formel  $P=U \cdot I$  die Formel  $U=R \cdot I$  einsetze, bekomme ich  $P=I^2 \cdot R$  ... also ergibt sich bei meinem Ansatz eine hohe Leistung bei hoher Stromstärke.
- Wenn man einen geladenen Kondensator mit einem gleich gebauten ungeladenen Kondensator parallel schaltet, dann fehlt in der Bilanz nach der Zusammenschaltung die Hälfte der Energie. Wo bleibt diese Energie? Es gilt doch der Energieerhaltungssatz!
- Welcher der beiden Unfälle ist für die Insassen schlimmer: (a) Zwei Autos stoßen mit 50km/h frontal zusammen – oder (b) ein Auto fährt mit 100km/h gegen eine Wand.
- Wenn ich den Frontal-Zusammenstoß zweier Autos, die jeweils 50km/h fahren aus verschiedenen Bezugssystemen heraus betrachte, bekomme ich meine Zweifel an der Gültigkeit des Energieerhaltungssatzes.  
1. Fall: Bezugssystem Straße ... beide Fahrzeuge fahren jeweils 50km/h, haben eine Masse von einer Tonne ... die Gesamtenergie kann ich nach  $\frac{1}{2}mv^2$  leicht ausrechnen.  
2. Fall: Bezugssystem sei jetzt ein Beobachtungswagen, der synchron mit dem linken Auto mit 50km/h nach rechts fährt. Das linke Auto hat in diesem Bezugssystem die Geschwindigkeit 0 – das rechte Auto hat in diesem Bezugssystem die Geschwindigkeit 100km/h – wenn ich jetzt die vorhandene Energie ausrechne, bekomme ich die im Vergleich zum 1. Fall doppelte Energie. Das heißt, bei diesem Zusammenstoß hängt die Bewegungsenergie, die bei dem Zusammenstoß „vernichtet“ wird, davon ab, welches Bezugssystem ich wähle ... das kann ja wohl nicht sein?

## Schüler-Antworten

- Warum läuft der Lichtbogen bei einem Hörerlichtbogen überhaupt nach oben ... Wie verhält sich eine Kerze, die man unten zwischen die Hörer stellt ... Warum zündet der Lichtbogen durch eine Kerze häufiger ...  
→ Der Lichtbogen ist heiß und erwärmt auch die umgebende Luft – heiße Luft hat eine kleinere Dichte als die Luft im Zimmer – die dadurch einsetzende Thermik (Auftrieb) lässt den Lichtbogen nach oben steigen.  
Die Kerzenflamme enthält bei der hohen Temperatur Ionen – diese Ionen werden von den Elektroden angezogen – die Flamme wird in die Breite gezogen.  
Die Kerzenflamme erzeugt auch Ionen direkt oberhalb der Flamme – diese Ionen führen zu einer „schnelleren Zündung“ des Lichtbogens.
- (a) Wo bleibt die Wärme, wenn Sie in einen Körper eindringt? (b) Welche Rolle spielt die Wärme, wenn man zwei Hände aneinander reibt?  
→ Es gibt in der Schuldidaktik zwei Deutungen von Wärme.  
**„Wärme“ als Schülerpräkonzept:** Das Präkonzept „Wärme“ (auf Schülerseite) kann man im „Wärmelehre-Unterricht“ aufgreifen – als Entropie deuten und damit einen „Entropie-Lehrgang“ aufbauen. Wenn der obige Satz in diesem Sinne gemeint ist, dann kann man formulieren: Wenn der Körper kälter ist als die Umgebung, dann führt die Temperaturdifferenz (Antrieb für einen Entropiestrom) zu einem Entropiestrom aus der Umgebung in den Körper – d.h. die Wärme (als Entropie gedeutet) geht in den Körper. Wenn man zwei Hände aneinander reibt, dann wird dabei mechanische Energie aufgebracht (in der „alten Sprechweise: „Es wird dabei Arbeit verrichtet“). Diese mechanische Energie erhöht die innere Energie an der Oberfläche der Hände (selbstverständlich wird dabei auch Entropie (also in dem obigen Sinne „Wärme“) erzeugt.  
**„Wärme als Prozessgröße“:** In der Fachsystematik der Hochschule gibt es zwei Prozessgrößen – die „Wärme“ und die „Arbeit“. Die Prozessgröße „Wärme“ geht, bei einer Temperaturdifferenz zwischen zwei Systemen von dem System mit der höheren Temperatur in das System mit der tieferen Temperatur. Dabei nimmt die innere Energie in einem System ab und im anderen System zu. Man darf also sagen, die Wärme dringt in den Körper ein, wenn die Umgebungstemperatur höher ist als die des Körpers – ABER man MUSS auch sagen, die Wärme ist anschließend nicht mehr vorhanden – schon gar nicht im Körper selbst ... NEIN, nur seine innere Energie ist durch das Eindringen der Wärme höher geworden. Diese kurze Darstellung macht plausibel, warum man in der Schuldidaktik auf diese Physikvokabel „Wärme“ leicht verzichten kann – sie ist kein Pflichtthema der Physik-Bildungsstandards! Man kann in Sätzen, in denen diese Vokabel „Wärme“ vorkommt, die Sätze leicht korrigieren, wenn man statt „Wärme“ einfache „Energie“ oder „thermische Energie“ sagt. Reibt man die Hände aneinander, darf man – unter der Prämisse, dass man Wärme als Prozessgröße definiert – auf keinen Fall sagen, dabei entsteht Wärme. Beim Reiben der Hände wird die Prozessgröße „Arbeit“ aufgebracht ... diese Arbeit tritt nach dem Prozessübergang an der Oberfläche der Hände als innere Energie auf. Also lautet bei dieser Interpretation der „Wärme“ die Antwort auf die obige Frage (b): Beim Aneinanderreiben der Hände spielt die „Wärme“ absolut keine Rolle.
- Warum kann man mit einer 1,5 Volt Stab-Batterie, die 3,6 MJ an Energie enthält und in einem Kran eingebaut ist, keinen Körper (Masse 1kg) 1m hochheben?  
→ Wenn eine Kraft  $F$  längs eines Weges  $s$  wirkt, ergibt das Produkt aus diesen beiden Größen die mechanische Energie, die dabei aufgebracht wird. Wird der „Kraftweg“ verdoppelt und die Kraft dabei halbiert, dann ist dazu die gleiche mechanische Energie notwendig. Mit einem Hebel, Flaschenzug oder einem Getriebe, kann man zwar an der Energiebilanz nichts ändern – aber man kann die Kräfte entsprechend der Problemstellung anpassen.  
Wenn ein Körper an dem Kranhaken des Modellkranes hängt, dann wirkt die Gewichtskraft nach unten und die Seilkraft nach oben. Will man eine Masse von 1kg nach oben ziehen, dann muss die Seilkraft größer als 10N sein. Diese 10N kann der Elektromotor, der im Modellkran eingebaut ist, nicht aufbringen. Das wäre nur durch Einsatz eines passenden Getriebes möglich. Das Getriebe „arbeitet“ auf der Motorseite mit einer kleinen Kraft, die der Elektromotor aufbringen kann, und einem großen Kraftweg (die Achse des Motors rotiert sehr schnell und dreht sich pro Minute sehr schnell). Auf der anderen Seite dreht sich die Welle ganz langsam (also kleiner Kraftweg) bei einer großen Kraft. Das Getriebe verändert also (von Reibungsverlusten abgesehen) die Energiebilanz in keiner Weise ... ABER sie verändert das Verhältnis zwischen der Kraft und dem Kraftweg so, dass im Idealfall (also ohne Reibung) das Produkt (also die mechanische Energie) konstant bleibt. Dieser Exkurs in die „Getriebe“ macht deutlich, dass die Betrachtung der Energiebilanz hier keine Antwort liefert.
- Warum benötigt man bei einem Auto ein Getriebe? Hatten die alten Dampfzugs auch ein Getriebe – wenn ja, wo ... wenn nein, warum brauchen sie keines? Warum unterscheiden sich alte Schnellzuglokomotiven ganz entscheidend von alten Güterzuglokomotiven? Wo steckt das Getriebe bei einer modernen Lokomotive?  
→ Siehe obige Erklärung zum Modellkran ... will man hohe Beschleunigung, dann benötigt man eine große Kraft bei kleinem Kraftweg ... will man schnell fahren, benötigt man eine kleinere Kraft bei größerem Kraftweg ... Diese Anpassung macht das Getriebe des Autos.  
Die alten Dampfzugs hatten kein Getriebe in diesem Sinne ... ABER Schnellzuglokomotiven hatten große Räder ... während Güterzuglokomotiven wesentlich kleinere Räder hatten. Die Schnellzuglokomotive erreichte damit eine höhere Geschwindigkeit – kleinere Kraft bei größerem Kraftweg (die zu ziehende Masse der Schnellzuglokomotive war im Vergleich zu einem Güterzug wesentlich kleiner). Die Güterzuglokomotive benötigte eine größere Zugkraft – bei kleinerem Kraftweg (und einer damit verbundenen kleineren Geschwindigkeit).  
Bei modernen Lokomotiven werden die Achsen mit Hilfe eines Elektromotors angetrieben – das gilt auch für Diesellokomotiven, bei denen der Verbrennungsmotor einen Generator antreibt. Moderne Loks haben eine feste Getriebeübersetzung und die Geschwindigkeit wird über die Steuerung der Motorstromstärke erreicht.
- Was ist ein Differenzial? Welche Funktion spielt es beim Auto? Warum gibt es gegen Aufpreis Vorrichtungen, die das Differenzial blockieren können? Hat eine Lokomotive auch ein Differenzial – wenn ja, wo ist es eingebaut – wenn nein, warum benötigt die Lokomotive kein Differenzial?  
→ Wenn ein Auto durch eine Kurve fährt, dann bewegen sich die „inneren Räder“ auf einem kleineren Radius als die „äußeren Räder“. Wären die Räder auf einer starren Achse montiert, wäre das nicht möglich – d.h. mit einer Differenzialsperre kann man nur „geradeaus“ fahren. Das Differenzial ist also eine Zahnradkombination, die dazu führt, dass auf dem Innen- und Außenrad die gleiche Kraft bei unterschiedlichen Kraftwegen auftritt. Das heißt, das Rad, das sich schneller dreht wird mit mehr „Energie“ angetrieben. Wenn man bei einem Differenzialgetriebe mit einem Rad auf Glatteis kommt, dann dreht dieses Rad schon bei einer relativ kleinen Kraft durch ... da die Kräfte auf beiden Rädern aber gleich groß sind, wirkt nur diese kleine Kraft auch auf das andere Rad ... und sie genügt nicht, das Auto zu bewegen.  
Bei Eisenbahnwagons oder Lokomotiven sind beide Räder starr mit der Achse verbunden – bei der „Eisenbahn“ gibt es kein Differenzial (kein Ausgleichsgetriebe). Die Lauffläche der Räder sind aber so geformt, dass sie am äußeren Rand einen kleineren Radius haben als am Radkranz innen – sie sind „konisch“ geformt. Wenn solch eine Radachse durch eine Kurve fahren muss, dann verschieben sich die Räder auf dem Gleis so, dass das „innere Rad“ auf dem äußeren Rand läuft, während das „äußere Rad“ auf dem inneren Rand des Rades (in der Nähe des Radkranzes) läuft ... auf diese Weise kann sich das innere Rad in einer Kurve weniger oft drehen als das äußere Rad, obwohl sie mit einer starren Achse verbunden sind.

- Welcher Vorgang ist in der Energiebilanz günstiger: (a) Kohle im Kohlkraftwerk zur Gewinnung von elektrischer Energie zu verfeuern – und damit dann einen Heizofen zu betreiben ... ODER (b) Kohle direkt im Heizofen „vor Ort“ zu verfeuern?  
 → Will man diese Prozesse bzgl. ihres Wirkungsgrades abschätzen, muss man die Entropie betrachten, die bei diesem Prozess erzeugt wird. Da die Energieumsetzung im Kraftwerk bei einer wesentlich höheren Temperatur abläuft, ist dieser Prozess wohl günstiger ... allerdings muss man beachten, welche Verluste bei der Übertragung der elektrischen Energie auf dem „Transportweg“ eintreten. Zudem muss man berücksichtigen, welcher der beiden Prozesse bzgl. den dabei entstehenden Schadstoffen günstiger ist ... auch hier schneidet das Kraftwerk wohl günstiger ab.
- Warum ist es sinnvoll mit elektrischer Energie eine Wärmepumpe und nicht einen elektrischen Heizofen zu betreiben?  
 → Eine Wärmepumpe schneidet im Vergleich zu einer Elektroheizung deutlich besser ab ... denn eine Elektroheizung muss die gesamte Entropie, die zur „Erwärmung“ der Wohnung notwendig ist, erzeugen ... während eine Wärmepumpe die Entropie aus dem Grundwasser oder aus der Luft auf dem Level der Außentemperatur „abholt“ ... also nicht die gesamte notwendige Entropie erzeugen muss.
- Analogien sind verpflichtende Vorgaben aus den Bildungsstandards ... Können Sie mir Beispiele von Analogien auflisten?  
 Spirometer-Analogie | Energieformeln bei Spule, Kondensator, Bewegung, Feder | F/v-I/U-Analogie (Aristoteles/Newton) | Differenzialgleichungen bei Schwingungen | Maxwellgleichungen ... Elektrostatik – Magnetostatik | Leistungsformeln ... Energieformeln ... extensive ... intensive Größen | Impuls-Wassereimer-Analogie | Erhaltungssätze – Symmetrie-Analogie | Strom-Antrieb-Widerstand bei Strömen aus E-Lehre ... Thermodynamik ... Hydrodynamik ... Gasdynamik ... Mechanik ...
- Warum benötigt man zum Schweißen nur wenige Windungen ...  
 → Weil man im Plasmabogen eine hohe Stromstärke bei kleiner Potenzialdifferenz benötigt. Dies erreicht man mit einem Transformator ... man könnte einen Transformator in gewissem Sinne als „Elektrisches Getriebe“ bezeichnen. Es handelt sich also um eine Widerstandsanpassung ... der Schweißbogen hat einen ganz kleinen Innenwiderstand ... der Transformator muss also auf der Sekundärseite ebenfalls einen kleinen Widerstand haben.
- Während eine Funkenentladung nur mit einer hohen Windungszahl „arbeitet“ ...  
 → Bei einem Lichtbogen haben wir vergleichsweise kleine Stromstärken – ABER zur Auslösung der Funkenentladung benötigt man eine hinreichend große Potenzialdifferenz. Auch hier handelt es sich um eine Widerstandsanpassung ... bei der Funkenentladung hat man auf der Sekundärseite einen großen Widerstand (vor dem Zünden des Bogens)
- Stereo-Anlage  
 → ... Wenn Innen und Außenwiderstand gleich groß sind, dann erfolgt maximaler Energieübertrag von der Energiequelle in die Energiesenke ... Der Transformator ist als eine Widerstandsanpassung ... Das kann man detailliert nachrechnen ... für das Physikverständnis ist aber eventuell folgende Überlegung hilfreich: Ist der Außenwiderstand sehr klein, dann ist die Stromstärke zwar hoch, aber der Spannungsabfall am extrem kleinen Außenwiderstand ist sehr klein und das Produkt – also die Energiestromstärke (Leistung) ist klein. Nimmt man einen großen Außenwiderstand, ist der Spannungsabfall zwar groß, aber die Stromstärke ist klein – also wieder ein kleines Produkt.  
 Der Innenwiderstand der heutigen HiFi-Verstärker liegt im Niederohmbereich. Will man also die Lautsprecher ohne Transformator anschließen und will man eine maximale Energieübertragung von der HiFi-Anlage zu den Lautsprechern, dann müssen die Lautsprecher ebenfalls niederohmig ausgelegt werden. Früher verwendete man Röhrenverstärker. Röhrenverstärker haben einen höheren Innenwiderstand als die Halbleiterverstärker. Also verwendet man einen passenden Lautsprecher ... ODER man verwendet einen so genannten Ausgangsübertrager – so heißen die hier notwendigen Transformatoren in der Verstärkertechnik.
- Kann man einen Kühlschrank auch als Klimaanlage einsetzen? Genügt es nicht, wenn man im Sommer den Kühlschrank leer räumt und die Türe bei eingeschaltetem Kühlschrank offen lässt.  
 Es ist richtig, dass man einen Kühlschrank als „Klimaanlage“ – also zur Kühlung des Zimmers – und als „Heizung“ – also zur Erwärmung des Zimmers – einsetzen kann. Das kann aber nicht so „naiv“ geschehen, wie das oben beschrieben wurde. Denn öffnet man nur die Türe des Kühlschranks, dann pumpt der Kühlschrank Entropie aus dem Kühlfach in den „Wärmetauscher“ auf die Rückseite. Da sowohl die „Entropiequelle“ als die „Entropiesenke“ beide sogar relativ nahe beieinander in dem besagten Zimmer liegen, hätte das wohl nur den Effekt, dass die thermische Energie in diesem Zimmer um den Betrag zunimmt, den der Elektromotor an elektrischer Energie aus der 230-Voltsteckdose aufnimmt.  
 Wenn man den Wärmetauscher auf der Rückseite so umbaut, dass er sich vor dem Fenster befindet, dann pumpt der Kühlschrank als Wärmepumpe Entropie aus dem Kühlfach (offene Türe – also aus dem Zimmer) vor das Fenster ins Freie ... d.h. die Entropie im Zimmer nimmt ab ... und damit sinkt die Temperatur in dem Zimmer.  
 Verlegt man aber das Kühlfach des Kühlschranks ins Freie vor das Fenster, dann pumpt der Kühlschrank – z.B. im Winter – Entropie aus dem Freien in den Wärmetauscher, der sich dann im Zimmer befindet, und damit erhöht sich die Temperatur im Zimmer.
- Warum überträgt man die elektrische Energie über Hochspannungsnetze ... Es gilt doch  $P=U \cdot I$  ... d.h. die Verluste auf den Übertragungsstrecken werden doch mit steigendem  $U$  größer und nicht kleiner. Unser Lehrer hat zwar vorgerechnet, dass man diese Formel durch Einsetzen von  $I=U/R$  in  $P = U^2/R$  umgewandelt. UND er behauptet, dass man damit verstehen kann, warum man ein großes  $U$  braucht, um eine hohe Leistung  $P$  zu übertragen. ABER, wenn ICH in die Formel  $P=U \cdot I$  die Formel  $U=R \cdot I$  einsetze, bekomme ich  $P=I^2 \cdot R$  ... also ergibt sich bei meinem Ansatz eine hohe Leistung bei hoher Stromstärke.  
 Diese Umformulierungen sind zwar „im Prinzip“ alle „irgendwie korrekt“ – aber die verbale Deutung dessen, was hier gemacht wird, ist falsch bzw. irreführend ... Die Formel  $P=U \cdot I$  für die Energiestromstärke ist korrekt – man muss aber zwischen der Energiestromstärke (Leistung,  $P_v$ ) am Übertragungswiderstand (Leitungswiderstand) und der Energiestromstärke (Leistung,  $P_L$ ) am Lastwiderstand (am Ende der Übertragungsstrecke) unterscheiden. Der Übertragungswiderstand und der Lastwiderstand liegen in einer Reihe. Das heißt, es gibt eine Stromstärke  $I$  bei dieser Betrachtung – und zwei Spannungsabfälle  $U_L$  am Lastwiderstand und  $U_v$  am Übertragungswiderstand. Um eine große Energiestromstärke am Ende der Übertragungsstrecke zu haben, benötigt man eine große Stromstärke oder/und eine große Spannung. Die Verlustleistung am Übertragungswiderstand ist direkt proportional zu Stromstärke und direkt proportional zum Übertragungswiderstand  $R$  – den man leider nicht weiter reduzieren kann (wenn man keine teuren und schweren Kupferleitungen oder noch größere Leitungsquerschnitte verwenden will). Man kann aber die Übertragungsstromstärke

reduzieren – das reduziert die Verlustleistung auf den Leitungen ... gleichzeitig benötigt man dann aber bei einer kleinen Stromstärke eine hohe Ausgangsspannung, damit man die gewünschte Leistung an das Ende der Übertragungsstrecke bringen kann.

- Wenn man einen geladenen Kondensator mit einem gleich gebauten ungeladenen Kondensator parallel schaltet, dann fehlt in der Bilanz nach der Zusammenschaltung die Hälfte der Energie. Wo bleibt diese Energie? Es gilt doch der Energieerhaltungssatz!

Verbindet man die beiden Kondensatoren miteinander, dann haben wir – auch wenn es unbeabsichtigt passiert – einen Schwingkreis mit einer Kapazität und einer Induktivität (die im Regelfall allerdings extrem klein ist → hohe Frequenz der EM-Schwingung). Verbinden wir die beiden Kondensatoren mit einem Kabel, dann kann man sogar einen Entladungsfunken sehen (extrem schnelle Änderung der beteiligten Felder – extrem hohe Schwingung) ... UND verbindet man die beiden Kondensatoren über einen Widerstand, so haben wir eine Dämpfung. All diese Phänomene führen zu einer Umwandlung eines Teils der elektrischen Energie, die beim Start des Experiments im elektrischen Feld des aufgeladenen Kondensators vorhanden ist.

Dass hierbei elektrische Energie verloren geht (...hierbei ist das Wort „elektrische“ ganz wesentlich, denn im Gegensatz zur obigen Schulbuchbehaftung (farblich unterlegt), verschwindet keine Energie – das wäre eine Verletzung des Energieerhaltungssatzes!) ist also sicher nicht erstaunlich ... erstaunlich ist eher, dass bei jedem der unterschiedlichen „Zusammenschaltungen“ immer genau die Hälfte der elektrischen Energie „verloren“ geht.

Vielleicht hilft eine mechanische Analogie:

Wenn man einen Wagen auf einem horizontalen Laufweg zwischen zwei Federn spannt und den Wagen so auslenkt, dass z.B. gerade die linke Feder entspannt ist und dann loslässt, kommt der Wagen nach einigen Schwingungen durch Reibungseffekte in der Mitte zur Ruhe. Es spielt dabei keine Rolle, wie man den Wagen abbremsst ... er wird immer in der Mitte zur Ruhe kommen. Die Energiebilanz zeigt, auch hier fehlt von der beim Start des Experiments vorhandene Spannenergie nach dem „Ausschwingen“ genau die Hälfte. Der „oszillatorische Anteil“ der Energie – also der Anteil der Energie, der beim Nulldurchgang als kinetische Energie auftritt, kann durch Reibungseffekte in thermische Energie umgewandelt werden ... Der Anteil an Spannenergie, der auch im Nulldurchgang vorhanden ist, kann nicht „verschwinden“. Und weil bei diesen Randbedingungen (gleiche Federn, ein Feder beim Start vollständig entspannt) genau die Hälfte der „Startenergie“ bei der Oszillation beteiligt ist, verschwindet genau diese Hälfte – und zwar völlig unabhängig davon, wie man diesen „Oszillation abbremsst“.

Die elektrische Analogie zu dieser mechanischen Schwingung liegt eventuell auf der Hand: zwei mechanisch gleiche Federn  $\leftrightarrow$  zwei elektrische gleiche Kondensatoren, eine Feder beim Start entspannt  $\leftrightarrow$  ein Kondensator beim Start ungeladen, mechanische Schwingung  $\leftrightarrow$  elektrische Schwingung.

Sowohl im mechanischen als auch im elektrischen Fall führen die Randbedingungen dazu, dass die Hälfte der Startenergie bei der Oszillation eine Rolle spielt ... und genau diese Hälfte wird bei der vorliegenden Dämpfung dem System entzogen.

- Welcher der beiden Unfälle ist für die Insassen schlimmer: (a) Zwei Autos stoßen mit 50km/h frontal zusammen – oder (b) ein Auto fährt mit 100km/h gegen eine Wand.

Gehen wir davon aus, dass die beiden Fahrzeuge völlig identisch gebaut sind und exakt zentral stoßen ... können wir uns den Vorgang symmetrisch vorstellen – wir ziehen im Gedanken am „Stoßpunkt“ der beiden Fahrzeuge eine virtuelle Wand ein. Beide Fahrzeuge berühren diese virtuelle Wand mit ihren Stoßstangen – dieser Berührungspunkt bleibt im weiteren „Knautschonen-Prozess“ räumlich konstant – nur die beiden Fahrzeuge werden links und rechts von diesem Punkt zusammengestaucht, bis sie zum Stillstand kommen (zugegeben, eine sehr idealisierte Vorstellung bei einem Unfall). Diese Idealisierung macht aber deutlich, dass kein Unterschied darin besteht, ob ein Auto mit 50km/h gegen eine Wand fährt oder zwei Autos mit jeweils 50km/h gegeneinander fahren. DENN bei einem Auto wirkt beim „Impulsabbau“ eine Knautschzone – während bei zwei Autos zwei Knautschzonen wirken.

- Wenn ich den Frontal-Zusammenstoß zweier Autos, die jeweils 50km/h fahren aus verschiedenen Bezugssystemen heraus betrachte, bekomme ich meine Zweifel an der Gültigkeit des Energieerhaltungssatzes.
  1. Fall: Bezugssystem Straße ... beide Fahrzeuge fahren jeweils 50km/h, haben eine Masse von einer Tonne ... die Gesamtenergie kann ich nach  $1/2mv^2$  leicht ausrechnen.
  2. Fall: Bezugssystem sei jetzt ein Beobachtungswagen, der synchron mit dem linken Auto mit 50km/h nach rechts fährt. Das linke Auto hat in diesem Bezugssystem die Geschwindigkeit 0 – das rechte Auto hat in diesem Bezugssystem die Geschwindigkeit 100km/h – wenn ich jetzt die vorhandene Energie ausrechne, bekomme ich die im Vergleich zum 1. Fall doppelte Energie. Das heißt, bei diesem Zusammenstoß hängt die Bewegungsenergie, die bei dem Zusammenstoß „vernichtet“ wird, davon ab, welches Bezugssystem ich wähle ... das kann ja wohl nicht sein?

Die Bewegungsenergie eines Körpers – ebenso wie die Geschwindigkeit – ist selbstverständlich vom Bezugssystem abhängig. Wenn wir in Ruhe im Bezugssystem des Physikaales sitzen, dürfen wir aber nicht vergessen, dass wir in einem anderen Bezugssystem sogar eine „kosmische Geschwindigkeit“ haben ... wir bewegen uns durch die Eigenrotation der Erde ... wir bewegen uns mit der Erde um die Sonne ... wir bewegen uns mit unserem Sonnensystem um das Zentrum der Milchstraße ... wir bewegen uns zusammen mit der Milchstraße um das Gravitationszentrum der lokalen Gruppe ... wir bewegen uns mit der lokalen Gruppe (Galaxienhaufen, zu dem auch unsere Milchstraße gehört) ... usw.

Dass also der Betrag der kinetischen Energie, den wir berechnen, vom Bezugssystem abhängt darf niemanden verwundern. Es bleibt nur die Frage, werden auch verschieden große Beträge an Bewegungsenergie bei einem Unfall „in thermische Energie“ umgewandelt ... das wäre tatsächlich erstaunlich.

Betrachten wir Fall 1: Vor dem Stoß haben wir die kinetische Energie  $2 \cdot (1/2mv^2) = mv^2$  ... diese Bewegungsenergie geht beim Zusammenstoß verloren.

Betrachten wir Fall 2 des „mitfahrenden Bezugssystems“: In diesem Bezugssystem suggeriert der Fragesteller, dass das linke Auto vor UND NACH dem Zusammenstoß die Geschwindigkeit Null hat ... Das ist aber ganz sicher nicht so ... In diesem Bezugssystem fährt ein Fahrzeug mit der Masse  $m$  und  $2v$  auf ein stehendes Fahrzeug mit der Masse  $m$  und führt einen unelastischen Stoß aus. Nach dem Stoß bewegen sich beide Fahrzeuge – also die doppelte Masse mit halber Geschwindigkeit – also  $v$  weiter. Vor dem Stoß haben wir die kinetische Energie  $1/2m(2v)^2 = 2mv^2$  - nach dem Stoß haben wir  $1/2 (2m)(v)^2 = mv^2$  ... d.h. in der Bilanz ist der Betrag  $mv^2$  an Bewegungsenergie verloren gegangen ... wo ist also das Problem?