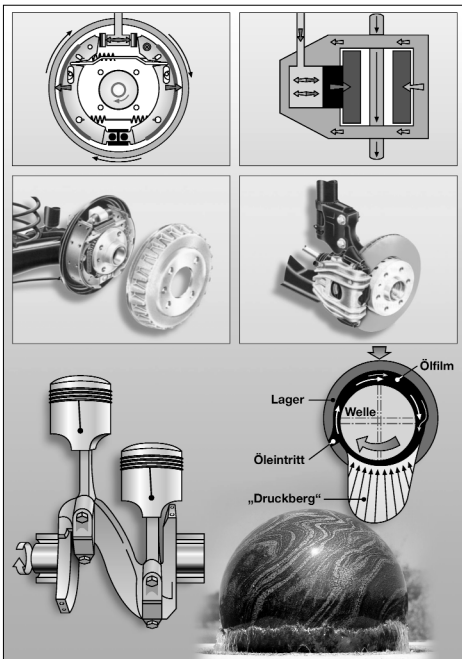


Transparent 2: Reibung und Energieumwandlung



Einsatz des Transparents

Es bietet sich an, das Thema **Reibung** im Zusammenhang mit dem zentralen Thema Kräfte zu behandeln. Das auf dieser Folie ebenfalls angesprochene Thema **Energieumwandlung** bzw. **Energieentwertung** spielt in den neuen Richtlinien für die Sekundarstufe I eine große Rolle im Rahmen der **Wärmelehre**. Als Anwendung ist auf diesem Transparent das Beispiel der Fahrzeugbremse gewählt.

Inhalt des Transparents

Beim Automobil finden sich zum Thema Reibung mehrere schöne Anwendungsbeispiele. Auf der einen Seite für die **erwünschte Reibung**, z. B. bei Bremsen, bei Kraftübertragung durch die Kupplung oder durch die Reifen auf die Straße. Auf der anderen Seite gibt es zahlreiche Anwendungen, bei denen die auftretende Reibung so klein wie möglich sein soll (**unerwünschte Reibung**), z. B. Lagerungen drehender Teile.

Als Beispiel für **erwünschte Reibung** werden auf dem Transparent die **Bremsen** vorgestellt. Zum einen ergibt sich so ein Bezug zu **Folie 4** (hydraulische Kraftübertragung zu den Bremsen). Zum anderen ist den Schülern die Funktion einer Bremse gut zu vermitteln, da eine direkte Vergleichsmöglichkeit zu den Fahrradbremsen besteht.

Qualitative und eventuell sogar quantitative Versuche zur Abhängigkeit der Bremswirkung von

- Kraft, die auf die Bremsbeläge wirkt
 - Zustand der Bremsbeläge (trocken, nass, verölt)
- erscheinen als Vertiefung im Unterricht oder als

Hausaufgabe mit Hilfe des Fahrrades möglich.

Oben und Mitte: Hier sind je eine Funktionszeichnung und ein Foto einer Trommel- und einer Scheibenbremse abgebildet.

Oben und Mitte links: Funktionszeichnung und Foto zeigen eine **Trommelbremse**: Durch den Druck, der im hydraulischen Bremssystem durch die Kraft des Bremsfußes erzeugt wird, werden die Kolben im Radbremszylinder auseinander- und die Bremsbacken von innen gegen die Bremsstrommel gedrückt. Die Bremswirkung ist von der Querschnittsfläche der Kolben im Radbremszylinder, dem Druck im System und der Art der beteiligten Oberflächen (v. a. Härte, Material und Sauberkeit der Bremsbeläge) abhängig.

Lässt die Betätigungskraft der Bremse nach, werden die Beläge durch eine Feder wieder von der Trommel zurückgezogen.

Obwohl heute viele, vor allem leistungsstärkere Fahrzeuge an allen vier Rädern mit Scheibenbremsen ausgerüstet werden, wird die Trommelbremse für die Hinterachse noch oft verwendet (besonders im Lkw-Bereich). Bei ihr ist es relativ leicht möglich, auch eine Bremswirkung durch die Handbremse bzw. Feststellbremse zu erreichen.

Die hier vorgestellte „Simplex-Bremse“ ist die einfachste Ausführung einer Trommelbremse, die in gängigen Autotypen eingesetzt wird. Der Nachteil ist, dass die beiden Bremsbacken nicht gleich stark wirken, da sich, je nach Fahrtrichtung, eine der beiden Bremsbacken im Zustand der „auflaufenden“ Bremsbacke befindet und die andere im Zustand der „ablaufenden“. Die Bremskraft der auflaufenden Bremsbacke wird durch die Reibung zwischen Belag und Bremsstrommel verstärkt. Die Bremskraft der „ablaufenden“ Bremsbacke wird durch denselben Effekt abgeschwächt. Bei Rückwärtsfahrt ist es umgekehrt. Da aber Rückwärtsfahrt in der Praxis wesentlich seltener vorkommt, verschleißt der Belag der rechts dargestellten Bremsbacke eher als der linke.

Es gibt Trommelbrems-Konstruktionen, die durch etwas Mehraufwand diesen Nachteil vermeiden („Duplex-Bremsen“, „Duo-Duplex-Bremsen“, „Servo-Bremsen“, „Duo-Servo-Bremsen“). Für zusätzliche Information hierüber sei auf die Literaturliste verwiesen.

Oben rechts: Die Funktionszeichnung zeigt das Prinzip der heute am meisten verwendeten **Scheibenbremse** mit nur einem Radbremszylinder. Dieser schafft es alleine, beide Bremsbeläge mit gleicher Kraft zugleich auf die Brems Scheibe zu drücken. Ein solches Prinzip wird bei der hier gezeigten **Schwimmsattelbremse** verwirklicht.

Der im System aufgebaute Druck wirkt, wie immer in Flüssigkeiten, gleichmäßig nach allen Seiten, also auf die Oberfläche des Kolbens genauso wie auf die gegenüberliegende Wandfläche des Radbremszylinder-

ders. Der Druck auf den Kolben drückt den linken Scheibenbremsbelag nach rechts auf die Bremscheibe (rote Pfeile). Der blau gezeichnete Rahmen des Bremssattels, der nicht fest montiert ist, sondern sich eindimensional bewegen kann (im Bild von rechts nach links und umgekehrt), wandert durch dieselbe Bremskraft nach links. Die zugehörigen Kräfte sind mit gelben Pfeilen wiedergegeben. Prinzipbedingt ergeben sich nun von beiden Seiten zwei gleich große Kraftwirkungen auf die Bremscheibe.

Mitte rechts: Das Foto zeigt eine moderne Bremskonstruktion einer Fahrzeugvorderachse. Man erkennt, dass die Bremscheibe bei dem abgebildeten Beispiel nicht massiv ausgeführt wurde, sondern zur Kühlung doppelwandig. Zwischen den äußeren Metallscheiben befinden sich ein Luftraum und metallene Stege. Das Ganze hat die Wirkung eines Radialgebläses, wie es auch z. B. bei einem Staubsauger eingesetzt wird: Luft wird im Zentrum der Scheibe angesaugt und durch die Zentrifugalwirkung nach außen geschleudert.

Ein weiterer Vorteil dieser etwas aufwändigeren Bremscheibe ist ihr geringeres Gewicht. Man findet sie daher auch bei Fahrzeugen mit besonders niedrigem Verbrauch.

Anmerkung: Das Beispiel der Scheibenbremse kann aufgrund der Kühlproblematik auch in Zusammenhang mit **Transparent 4 und 8** beim Besprechen thermischer Probleme eingesetzt werden. Mit Aufgabe 3 auf **Kopiervorlage 2** wird deutlich, dass das Bremssystem beträchtliche Mengen an Wärmeenergie erzeugt. Hierfür benötigen die Schüler keine konkrete Vorstellung zum Bremssystem. Es reicht, wenn es ihnen plausibel ist, dass sich Bremsen durch Reibung erwärmen (s. Fahrradbremse).

Unten links: Abgebildet ist eine Standardkurbelwelle eines Vierzylinder-Reihenmotors. Die **Minimierung der Reibung** steht bei allen Lagern im Vordergrund. Beim Kraftfahrzeug werden bei Lagern im Innern des Motors (Hauptlager der Kurbelwelle, Pleuellager, Lagerung des Kolbenbolzens) hauptsächlich **Gleitlager** verwendet.

Schüler vermuten dort oft eher die ihnen als hochwertig bekannten Wälzlager aus Fahrrad, Skateboard oder Inline-Skatern. Im Alltag kennen sie oft nur Gleitlager wesentlich einfacherer Ausführung, etwa bei Schrank- und Zimmertüren, einfachen Möbelrollen, etc. Solche Bauformen laufen natürlich nicht so leicht und zuverlässig wie die dauergeschmierten Versionen im Motorenbau.

Im Zusammenhang mit der Behandlung dieses Themas kann den Schülern auch als Gruppenaufgabe aufgetragen werden, eine Kfz-Werkstätte aufzusuchen und dort geeignetes Material zur Anschauung im Unterricht zu sammeln (z. B. verschiedene Wälzlagerformen). Der Werkstattbesuch muss zuvor zwischen Lehrer und Werkstatt abgestimmt sein, damit die Schüler einen entsprechenden Ansprechpartner im Betrieb haben.

Unten Mitte: Gut geschmierte **Gleitlager** sind Wälzlagern nicht nur in Aufnahmefähigkeit von Lagerkräften, Langlebigkeit und Preiswürdigkeit überlegen, sondern können auch im Leichtlauf konkurrieren. Dies verdeutlicht das Beispiel der abgebildeten Granitkugel, die in

einem Wasserbad in einem extrem genau angepassten Unterteil aufschwimmt und sich dabei mit spielerischer Leichtigkeit drehen lässt – eben „wie geschmiert“!

Man erkennt an diesem Beispiel, wie wichtig ein zusammenhängender, tragfähiger „Schmierfilm“ für die Lagerung mit Hilfe eines Gleitlagers ist. Zum besseren Verständnis der „nassen Gleitreibung“ können die Schüler überlegen, warum der Schmierfilm im Automotor selbstverständlich aus Öl besteht: Dies liegt an den im Motorinnern herrschenden Temperaturen, der schnelleren Korrosion und der mangelnden Stabilität des Wasserschmierfilms gegenüber speziell ausgewählten Schmierstoffen.

Unten rechts: Die Abbildung zeigt den Querschnitt durch ein Gleitlager. Bei laufendem Motor pumpt die **Ölpumpe** aus der Ölwanne unten im Motor Öl ab und pumpt dieses unter Druck in Ölkanäle, die zu den einzelnen Lagern und sonstigen Schmierstellen führen. In der Abbildung ist ein solcher **Ölkanal** unten links am Lager zu sehen. Durch diesen tritt das Öl in das Lager ein, so dass ein Schmierfilm entstehen und aufrecht erhalten werden kann.

Trotz des Öles würde eine stillstehende Welle unten im Lager aufliegen. Von mehreren Parametern abhängig (Lagerspiel, Lagerbelastung, Lagerdruck, Umfangsgeschwindigkeit, Eigenschaften des Schmierstoffs) bildet sich aber mit steigender Drehzahl der Welle in einem komplizierten Vorgang ein Schmierfilm zwischen drehender Welle und festen Lagerschalen. Auf diesem schwimmt nun die drehende Welle auf. Sie hat keinen direkten Kontakt mit dem sie umgebenden Material der Lagerschalen. Sie läuft daher in idealer „nasser Gleitreibung“ und dreht sich sehr leicht.

Kopiervorlage

Auf **Kopiervorlage 2** werden ergänzend **Wälzlager** behandelt. Dort wird als typische Anwendung am Kraftfahrzeug die Lagerung der nichtangetriebenen Fahrzeugräder gezeigt. An Inhalte des jeweiligen benutzten Physikbuches und an Erfahrungen der Schüler aus dem schon erwähnten Bereich von Fahrrad oder Skateboard lässt sich hier anknüpfen.

Zur Lösung der drei quantitativen Aufgaben zum Bremsvorgang erhalten die Schülerinnen und Schüler Hilfen.

Lernziele

- Die Schüler sollen den Begriff der physikalischen Leistung auch in seiner Anwendung auf den Bremsvorgang („Bremsleistung“) verstehen und Sachaufgaben dazu richtig bearbeiten können. Bei Einsatz der Kopiervorlage innerhalb einer Unterrichtsreihe zur Wärmelehre:
- Die Schüler sollen eine konkretere Vorstellung von den thermischen Wirkungen eines normalen Bremsvorganges erhalten und Sachaufgaben dazu richtig bearbeiten können (vgl. dazu auch das Schul-Experiment zum mechanischen Wärmeäquivalent).
- Die Schüler sollen die verschiedenen vorgestellten Wälzlagertypen erkennen und richtig benennen können.

- Die Schüler sollen die Vor- und Nachteile der vorgestellten Lagertypen richtig beschreiben können.
- Die Schüler sollen die vorgestellte Bauweise einer Radlagerung beschreiben und begründen können.

Lösung der Kopiervorlage

Aufgabe 1:

Die angegebene Geschwindigkeit von $v = 90 \text{ km/h}$ entspricht in der Einheit m/s einer Geschwindigkeit von $v = (90/3,6) \text{ m/s} = \underline{25 \text{ m/s}}$.

Daraus ergibt sich als Bewegungsenergie des Fahrzeugs vor dem Bremsvorgang

$$\begin{aligned} W_{\text{kin}} &= \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} \times 1200 \text{ kg} \times (25 \text{ m/s})^2 \\ &= 600 \times 625 \text{ kg (m/s)}^2 \\ &= 375.000 \text{ (kgm/s}^2) \text{ m} = 375.000 \text{ Nm} \Leftrightarrow \\ W_{\text{kin}} &= 375.000 \text{ Ws} = \underline{375 \text{ kWs}} \end{aligned}$$

Diese Energie wird beim Abbremsen bis zum Stillstand „vernichtet“ oder besser: in Wärmeenergie umgewandelt.

Gemäß der Formel $W = P \times t$ geschieht dies in der Zeit $t = W/P = 375 \text{ kWs}/125 \text{ kW} = \underline{3 \text{ s}}$. Das Fahrzeug steht also nach 3 Sekunden still.

Aufgabe 2:

Analog zu den Ausführungen zur Aufgabe 1 gilt hier: v in der Einheit m/s ist:

$$v = (60/3,6) \text{ m/s} = \underline{16,666... \text{ m/s}}$$

Aus $P \times t = \frac{1}{2} m v^2$ folgt: \Leftrightarrow

$$\begin{aligned} P &= (\frac{1}{2} m v^2) / t \\ &= \frac{1}{2} \times 38000 \text{ kg} \times (16,666... \text{ m/s})^2 / 3,5 \text{ s} \\ &= 5.277.777,8 \text{ Ws} / 3,5 \text{ s} \\ &= 1.507.936,5 \text{ W} \\ &= \underline{1508 \text{ kW}} \end{aligned}$$

Aufgabe 3:

Wir betrachten zunächst den PKW. Bei diesem wurde eine Energie von $375.000 \text{ Ws} = 375.000 \text{ J} = 375 \text{ kJ}$ in Wärmeenergie verwandelt. Unter dieser Annahme gilt:

$$\begin{aligned} W_{\vartheta} &= c \times m \times \Delta\vartheta \Leftrightarrow \\ \Delta\vartheta &= W_{\vartheta} / (c \times m) \Leftrightarrow \\ \Delta\vartheta &= 375 \text{ kJ} / (0,45 \text{ kJ/(kg } ^\circ\text{C)}) \times 18 \text{ kg} \\ &\approx \underline{46,3 \text{ } ^\circ\text{C}} \end{aligned}$$

Um so viel $^\circ\text{C}$ würden sich also die eisernen Teile der Bremsanlage des PKWs erwärmen, wenn die vereinfachende Annahme zutreffen würde. Bei dem LKW ergibt sich analog:

$$\begin{aligned} \Delta\vartheta &= 5.277,77 \text{ kJ} / (0,45 \text{ kJ/(kg } ^\circ\text{C)}) \times 80 \text{ kg} \\ &\approx \underline{146,6 \text{ } ^\circ\text{C}} \end{aligned}$$

Aufgabe 4:

Bei einem **Kugellager** werden die Kräfte zwischen festem und rotierendem Lagerteil ausschließlich über die sehr kleinen Berührungspunkte der dazwischen abrollenden Kugeln übertragen. Deshalb können bei einem solchen Lager diese Kräfte nicht so groß sein wie bei einem Rollenlager. Bei einem **Rollenlager** berühren sich Rollen und Auflagerflächen längs der gesamten Länge einer solchen Rolle. Daher können hier größere Kräfte übertragen werden. Ein Rollenlager ist also prädestiniert für die Aufnahme größerer Radialkräfte, also z. B. für die Verwendung als Radlager. Demgegenüber ist ein **Kugellager**, bei dem die Reibungskräfte wegen der extrem kleinen Berührungs-

flächen geringer sind als beim Rollenlager, ideal für leichten Lauf von Wellen bis hin in höchste Drehzahlen, wenn nur die Bedingung unbedeutender Seitenkräfte („Radialkräfte“) erfüllt ist.

Aufgabe 5:

Ein Kegelrollenlager kann zusätzlich zu den Kräften in radialer Richtung entsprechend der Schrägneigung seiner Rollen auch noch Kräfte in einer der beiden axialen Richtungen aufnehmen. Solche Axialkräfte treten bei der Kurvenfahrt eines Kraftfahrzeugs auf. Da ein Auto sowohl Rechts- wie Linkskurven durchfährt, benötigt man zwei entgegengesetzt geschrägte Kegelrollenlager, um die Axialkräfte bei der Kurvenfahrt in beiden Fällen aufnehmen zu können.