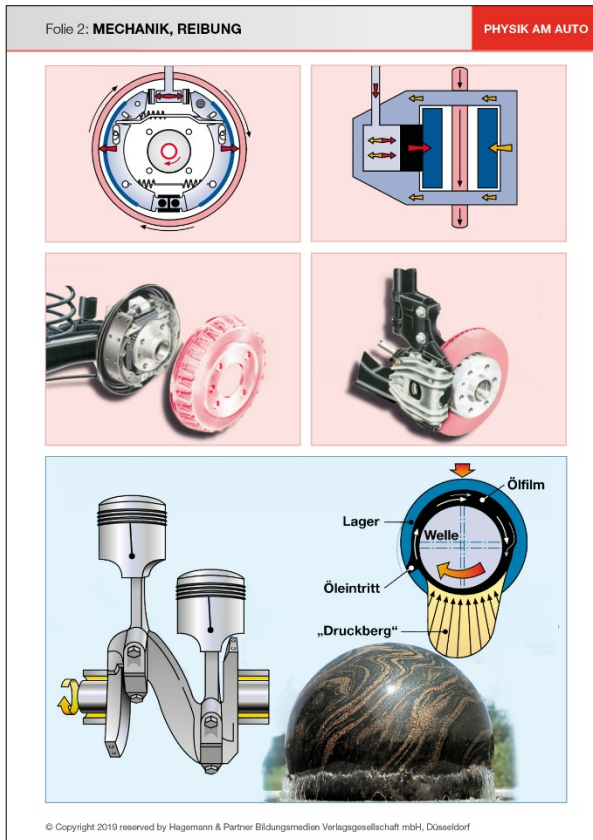


Erwünschte und unerwünschte Reibung I



Einsatz der Folie

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 der Sekundarstufe I eine große Rolle im Rahmen der **Wärmelehre**. Als Anwendung ist auf dieser Folie das Beispiel der Fahrzeugbremse gewählt.

Inhalt der Folie

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 der Folie 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 mithilfe 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 Krafteinwirkung mit dem Bremsfuß auf das Bremspedal wird im hydraulischen Bremssystem ein Druck erzeugt und die Kolben im Radbremszylinder auseinander und die Bremsbacken von innen gegen die Bremstrommel 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 viele, vor allem leistungsstärkere Fahrzeuge an allen vier Rädern mit Scheibenbremsen ausgerüstet werden, wird die Trommelbremse für die Hinterachse noch verwendet. 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 Bremstrommel 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“).

Oben rechts: Die Funktionszeichnung zeigt das Prinzip der **Scheibenbremse** mit nur einem Bremszylinder. Dieser schafft es alleine, beide Bremsbeläge mit gleicher Kraft zugleich auf die Bremsscheibe 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 Bremszylinders. Der Druck auf den Kolben drückt den linken Scheibenbremsbelag nach rechts auf die Bremsscheibe (rote Pfeile). Der blau gezeichnete Rahmen des Bremsattels, 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 Bremsscheibe.

Mitte rechts: Das Foto zeigt eine Bremskonstruktion einer Fahrzeugvorderachse. Die Bremsscheibe wurde bei dem abgebildeten Beispiel nicht massiv, sondern zur Kühlung doppelwandig ausgeführt. 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 aufwendigeren Bremsscheibe ist ihr geringeres Gewicht. Man findet sie daher auch bei Fahrzeugen mit besonders niedrigem Verbrauch.

Hinweis für Lehrer:

Das Beispiel der Scheibenbremse kann aufgrund der Kühlproblematik auch in Zusammenhang mit den Themenbereichen "Druck" und "Energie" 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 Inneren 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 Wälzlager 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 mithilfe 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 Motorinneren 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 saugt 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, sodass ein Schmierfilm entstehen und aufrechterhalten 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.

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 sollen die Schüler:

- 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 verschiedenen vorgestellten Wälzlagerarten erkennen und richtig benennen können.
- die Vor- und Nachteile der vorgestellten Lagertypen richtig beschreiben können.
- die vorgestellte Bauweise einer Radlagerung beschreiben und begründen können.

Erwünschte und unerwünschte Reibung II

Trommelbremse

Das Funktionsprinzip einer Trommelbremse wurde im vorherigen Text bereits beschrieben. Ergänzend dazu zeigt das Foto eine reale, offene Trommelbremse, sodass die Schülerinnen und Schüler Schema und Realität vergleichen können.



Innenbelüftete Scheibenbremse



Auf dem Foto ist ein komplettes Federbein eines Sportwagens mit einer leistungsfähigen Scheibenbremskonstruktion („**innenbelüftete Scheibenbremse**“) dargestellt. Die sonst massive dicke Stahlscheibe besteht bei dieser innenbelüfteten Scheibenbremse aus zwei dünnen Einzelscheiben, die über Stege miteinander verbunden sind. In der Regel verlaufen diese Stege im Inneren der doppelwandigen, hohlen Scheibe leicht gekrümmt, ähnlich einem „Radialgebläse“ eines handelsüblichen Staubsaugers. Bei diesem wird mit einer solchen doppelwandigen Hohl-scheibe die erforderliche Gebläsewirkung erzielt, um Luft von „vorne“ nach „hinten“ zu saugen. Um eine optimale Gebläsewirkung zu erreichen, sind die Stege im Inneren der beiden Scheibenteile daher je nach Drehrichtung des Staubsaugermotors leicht gekrümmt. Das Grundprinzip funktioniert allerdings auch mit geraden Stegen. In jedem Fall wird die Luft im Inneren zwischen den Stegen bei schneller Rotation der gesamten Scheibeneinheit nach außen befördert, da sie der Fliehkraft unterliegt. Durch ein Loch im Zentrum dieses sogenannten „Radialgebläses“ strömt Luft ins Scheibeninnere nach, die dann auf demselben Wege nach außen geschleudert

wird. Je nach Drehzahl der Scheibe entsteht ein mehr oder weniger kräftiger Luftstrom vom Loch im Zentrum radial nach außen.

Hinweis für Lehrer:

Es empfiehlt sich, von einem alten Staubsauger ein solches Gebläse auszubauen und zu Demonstrationszwecken in die Physiksammlung aufzunehmen.

Indem die Wandstärken der dargestellten Scheibenbremse entsprechend groß gewählt wurden, stellt sie eine Vereinigung eines oben beschriebenen Radialgebläses mit einer Brems-scheibe dar. Im Inneren der Scheibe wird durch die Drehung ein kühlender Luftstrom erzeugt, sodass die Bremsleistung dieser „**innenbelüfteten Brems-scheibe**“ höher sein kann als bei einer massiven Brems-scheibe. Ihre „Standfestigkeit“ bei thermischer Belastung ist durch die Eigenkühlung deutlich besser. Bei nasser Brems-scheibe ermöglichen die kleinen Löcher in den Brems-scheiben ein schnelleres Ansprechen der Bremse. Eventuell vorhandenes Wasser wird schnell in die Löcher geschoben und verdampft anschließend durch die Erwärmung der Scheibe. Besonders günstig ist dies bei vielen Motor-rädern, die eine gleichartige Scheibenkonstruktion haben, weil das Problem der Nässe auf den recht frei liegenden Brems-scheiben noch eher auftritt. Ein weiterer Vorteil ist das geringere Gewicht im Vergleich zu einer massiven Brems-scheibe.

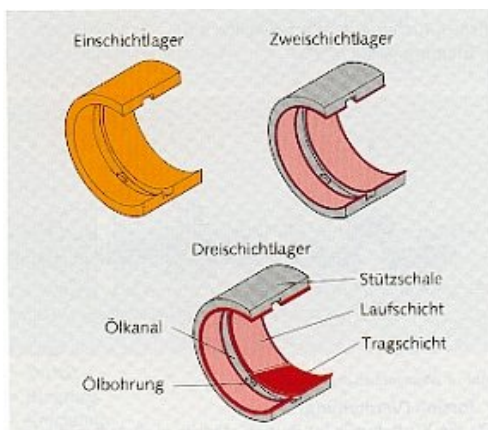
Wälzlager



Auf der Folie sind als Beispiel zur Vermeidung unerwünschter Reibung Gleitlager vorgestellt. Zur Vervollständigung zeigt das obige Foto ein Wälzlager. Dabei handelt es sich um ein fettgeschmiertes Rollenlager, dessen Flanken offen ausgeführt sind. Dies erlaubt nicht nur eine Beobachtung der Rollen, sondern ermöglicht die Nachfettung des Lagers. Radlager sind typische Vertreter dieser offenen Ausführung.

Oft sind Wälzlager allerdings geschlossen ausgeführt. Eine Nachfettung ist nicht vorgesehen. Der Hersteller füllt den verbleibenden Raum im Inneren zwischen den Kugeln oder Rollen mit einem Fettvorrat, der für die erwartete Lebensdauer des Lagers ausreichen soll. Tritt bei einem solchen Lager Verschleiß auf, ist es komplett zu ersetzen.

Aufbau von Gleitlagern



Einschichtlager sind Massivlager aus einem einzigen Material (üblicherweise aus Kupfer-Zinn-Legierungen). Ihr typischer Einsatz ist die Verwendung als Pleuelbuchsen, obwohl auch hier immer mehr, wie für die Kurbelwellenlager, Mehrschichtlager eingesetzt werden.

Mehrschichtlager (Zwei-, Drei- und Vierschichtlager) bestehen aus mehreren Schichten.

Bei dem abgebildeten Dreischichtlager erkennt man den von außen nach innen aufeinanderfolgenden Aufbau aus **Stützschaale**, Tragschicht und Laufschicht.

Dabei ist die Stützschaale aus Stahl in einer Stärke von üblicherweise 1 μm bis 3 μm . Sie sorgt für die Festigkeit der Lagerschalen.

Die **Tragschicht** ist aus Bleibronze (einer Legierung aus 75 % Kupfer, 23,5 % Blei und 1,5 % Zinn) in einer Stärke von 0,2 μm bis 0,5 μm . Sie sorgt für Notlauf Eigenschaften bei mangelnder Schmierung sowie bei Abnutzung der Laufschicht.

Die Laufschicht ist von der Tragschicht noch durch eine nicht eingezeichnete und bei der Aufzählung der Schichten nicht mitgerechnete sehr dünne **Trennschicht** getrennt, welche aus einem Nickeldamm besteht und nur 1-1,5 μm stark ist. Diese verhindert, dass der Zinnanteil aus der darunter liegenden eigentlichen Laufschicht in die Bleibronze der Tragschicht abwandert. Die **Laufschicht** schließlich wird aus dem sogenannten „Weißmetall“ hergestellt, einer Legierung aus 87 % Blei, 10 % Zinn und 3 % Kupfer; ihre Stärke ist 12-22 μm . Auf dieser läuft dann die auf Grund der Ölschmierung „nasse Gleitreibung“ zwischen der drehenden gelagerten Welle und dem festen Lager ab.

Gleitlager im Motorenbau

Dargestellt sind zwei typische Anwendungsfälle für Gleitlager im Motorenbau: Ein ausgebautes Pleuel und ein Kolben, dessen Pleuelbolzen zur besseren Erkennbarkeit halb herausgedrückt ist. Das obere, kleinere Lager des Pleuels muss man sich im Betriebszustand im Innenraum des Pleuels vorstellen, wobei der Pleuelbolzen durch das „Auge“ des Pleuels führt. An dieser Stelle wird oft ein Einschicht- oder Massivlager als „Pleuelbuchse“ verwendet (siehe auch Text weiter oben). Über das untere, größere Lager des Pleuels stellt man die Verbindung mit der Pleuelwelle her (vgl. Abbildung einer Pleuelwelle auf Folie).

Hier kommt, wie bei den Lagern der Pleuelwelle, ein Mehrschichtlager zum Einsatz.



Keramikmaterial bei Bremse und Kupplung

Als Fortentwicklung der Autoindustrie seit der Erstausgabe von „Physik am Auto“ kann auf dem hier angesprochenen Gebiet der Einsatz keramischer Werkstoffe gelten. Dies betrifft zurzeit ausschließlich den Premium- und Hochpreis-Sektor, ein Einsatz für die Großserie ist in naher Zukunft nicht zu erwarten. Zum Beispiel ist beim Porsche 911 GT2 RS eine Porsche Ceramic Composite Brake (PCCB) serienmäßig verbaut. Allerdings gibt es das Fahrzeug zu einem Preis ab 285 000,- Euro (Stand: September 2019).

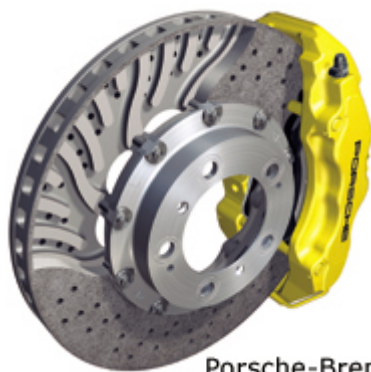


Im Folgenden werden Techniken vorgestellt, die, ursprünglich aus dem Rennsport abgeleitet, inzwischen auch für den Normalverbraucher erhältlich sind. Stellt man die Bremsscheiben statt aus Stahl aus keramischen Werkstoffen her, so ergeben sich zwei große Vorteile: Zum einen spart man über 50 % Gewicht bei den ungefederten Massen. Zum anderen zeigt das Keramikmaterial bei Formstabilität, thermischer Belastbarkeit, Reibungsdaten und Abriebverhalten in Verbindung mit neu entwickelten speziellen Bremsbelägen hervorragende Werte. Die Hersteller gehen von einer Lebenserwartung der Keramikscheiben aus, die der des Fahrzeugs entspricht. Auch die neuen Bremsbeläge sollen doppelt so lange halten wie herkömmliche.

Die keramische Oberfläche der Scheiben bietet Schutz vor Korrosion durch Streusalz und Wasser. Das Keramikmaterial ist speziell gehärtet und nimmt ebenso wie die neu entwickelten Bremsbeläge nahezu kein Wasser auf, was das Ansprechverhalten bei Nass-Bremung deutlich verbessert. Wegen der hohen Formfestigkeit tritt weder im Kalt- noch im Warmzustand ein unangenehmes "Bremsrubbeln" auf.

Die äußere Form der Brems Scheiben hat sich bei dem neuen Werkstoff nicht wesentlich geändert (siehe Bilder). Die Scheiben sind innenbelüftet und teilweise mit Löchern zur Wasserableitung versehen (vgl. hierzu die anderen Texte zum Thema Reibung und Energieumwandlung).

Das verwendete Material durchläuft einen aufwändigen Herstellungsprozess. So erklärt sich der hohe Preis. Es handelt sich bei den jetzt erhältlichen Modellen um das Verbundmaterial "carbonfaserverstärktes Siliziumkarbid" ("CMC": Ceramic Matrix Composite). Andere Verbundwerkstoffe ("MMC": Metal Matrix Composite, als Metallanteil wird partikelvertärktes Aluminium verwendet; "C/C": Carbon/Carbon, ein kohlefaserverstärkter Kohlenstoff) sind vorher ebenfalls erprobt worden. Diese hatten teilweise nicht die Standfestigkeit der zuletzt entwickelten Werkstoffe, sodass es für diese im Wesentlichen beim reinen Renneinsatz geblieben ist.



Porsche-Bremse

Nachdem also die Hersteller durch den Einsatz solcher Materialien bei Bremsen und Kupplungen beim Autorennen schon länger Erfahrungen damit sammeln konnten, bietet man jetzt auch Kupplungsscheiben aus keramischem Material an. Auch hier glänzt die Keramik mit ausgezeichneten Werten in Haltbarkeit, Temperaturverträglichkeit und Größenvergleich.