

Druck in Flüssigkeiten und Gasen

Folie 4: DRUCK IN FLÜSSIGKEITEN UND GASEN

PHYSIK AM AUTO

Pascalsches Prinzip:

$$p = \text{const.} = \frac{F_g}{A_g} = \frac{F_1}{A_1} = \dots = \frac{F_4}{A_4}$$
Kräftevergleich

Volumenvergleich zeigt:

$$A_g \cdot s_g = 2A_1 \cdot s_1 + 2A_3 \cdot s_3$$
Kolbenwegevergleich

© Copyright 2019 reserved by Hagemann & Partner Bildungsmedien Verlagsgesellschaft mbH, Düsseldorf

Einsatz der Folie

Die Folie zeigt am Beispiel des **hydraulischen Fahrzeug-Bremssystems** die Nutzung des „Pascalschen Prinzips“. Damit bezeichnet man die physikalische Erkenntnis, dass sich in geschlossenen Systemen, die ausschließlich Flüssigkeit enthalten, der Druck gleichmäßig in alle Richtungen ausbreitet.

Der Einsatz der **Folie 4** und das verwendete Anwendungsbeispiel des Auto-Bremssystems empfiehlt sich als Vertiefung und Ergänzung des Themenbereichs „Anwendung der Hydraulik“.

Inhalt der Folie

Auf der Folie werden die Zusammenhänge deutlicher dargestellt als üblicherweise in den Physikbüchern. Zusätzlich wird hier auch quantitativ auf die unterschiedliche **Kraftverteilung zwischen Vorder- und Hinterachse** ausführlich eingegangen (die Kraft ist im Gegensatz zum Druck nicht gleich!). Die quantitative Betrachtung der beim Bremsen wirkenden Kräfte wird in der zugehörigen **Kopiervorlage** vertieft.

Oben: Die Darstellung zeigt ein hydraulisches Bremssystem in vereinfachter Prinzipdarstellung. Über die üblichen Details hinaus, sind hier zusätzlich die Querschnittsflächen von Geberzylinder (= Hauptbremszylinder) und den Bremszylindern an den Scheibenbremsen der Vorderachse und den Radbremszylindern an den Trommelbremsen der Hinterachse angegeben. Da diese Querschnittsflächen an Vorder- und Hinterachse verschieden sind, wird auch die unterschiedliche Aufteilung der Bremskraft auf Vorder- und Hinterräder plausibel. In der Zeichnung wurden vereinfachte Zahlenangaben verwendet, sodass die zugehörigen Rechenschritte noch leicht nachvollziehbar sind.

Hinweis für Lehrer:

Sollte zum Zeitpunkt des Einsatzes dieser Folie das Hebelgesetz noch nicht bekannt sein, müssten zur Begründung der Kraftverstärkung durch den Hebel des Bremspedals bei den vorgegebenen einfachen Hebelarm-längen Erfahrungen der Schüler aus dem Mathematikunterricht über „Verhältnisse“ eingesetzt werden.

Mitte: Die Darstellung des Kolbenwegevergleichs zeigt, welche Wege die einzelnen beteiligten Arten von Kolben (Geberkolben, Kolben der vorderen Scheibenbremsen und Kolben der hinteren Trommelbremse) beim Bremsvorgang zurücklegen.

Hinweis: Zur Veranschaulichung des Prinzips sind die Kolbenwege größer als in Wirklichkeit dargestellt.

Unten rechts: Die Abbildung zeigt, was passiert, wenn Luft oder Gas in das Bremssystem gelangt. Dann ist die Bedingung nicht mehr erfüllt, dass das System ausschließlich mit Flüssigkeit gefüllt ist: Statt der erwünschten Kraftübertragung vom Fahrer auf die Radbremszylinder verkleinert sich durch den Druckaufbau nur das Volumen der eingeschlossenen Gasblase. Ein normaler Bremsvorgang ist nicht möglich.

Unten links: Das Foto zeigt ein Testfahrzeug mit glühenden Bremscheiben. Es soll den Schülerinnen und Schülern eine Möglichkeit für das Entstehen von Dampfblasen im System (also einer unerwünschten, teilweisen Füllung mit Gas (Kavitation)) vorstellen. Der im Unterricht zu diesem Thema als Freihandversuch ausführbare Versuch mit einem Kolbenprober wird unbedingt empfohlen: Der Kolbenprober wird erst komplett mit Wasser, dann nur zu einem Teil mit Wasser gefüllt (Rest Luft). In beiden Fällen versucht man (oder lässt versuchen), den Kolbenprober zusammenzudrücken und zeigt so die unterschiedliche Wirkung.

Lernziele: Die Schüler sollen

- ihre Kenntnisse des Pascalschen Prinzips vertiefen und es in Sachaufgaben anwenden können.
- zu den Fragestellungen angemessene und sachbezogene Überlegungen anstellen und ihre Vermutungen in fachlich korrekter Sprache äußern können.

Der Informationstext von **Kopiervorlage 4** und die Aufgabe oben auf der Kopiervorlage sollen den Schülerinnen und Schülern zeigen, dass die Darstellung auf der Folie zwar besonders übersichtlich ist, dass aber in der Praxis im Auto ein etwas komplizierteres Bremssystem (zu Gunsten größerer Sicherheit) eingebaut wird.

Bremssystem und Pascalsches Prinzip

Bremssystem in einem Kraftfahrzeug

Die Abbildung zeigt an einem Beispiel sehr übersichtlich, wo in einem Kraftfahrzeug etwa die verschiedenen Elemente der Bremsanlage liegen.



Das Pascalsche Prinzip am Beispiel des Werkstattwagenhebers

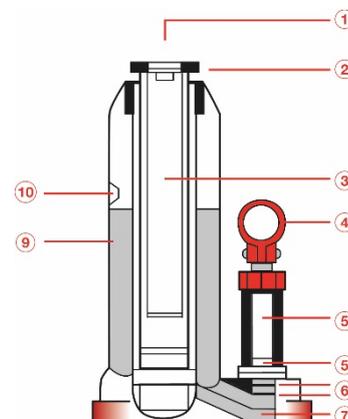
Ein weiteres anschauliches, sehr praxisnahes Anwendungsbeispiel für das Pascalsche Prinzip ist der hydraulische Werkstattwagenheber, vor allem dann, wenn die Behandlung im Unterricht von einem Betriebsbesuch begleitet wird und die Schüler ein solches Gerät selbst einmal betätigen dürfen.



Das obere Bild zeigt die äußere Form eines **Werkstattwagenhebers** und seine praktische Anwendung. Der Arbeitskolben befindet sich verdeckt unter dem Blechpressteil, das auf dem Foto schräg nach oben zeigt und die Last trägt.

Unten kann man den inneren Aufbau eines Wagenhebers in einer Schnittzeichnung sehen. Gut erkennbar ist die kompakte Anordnung aller Teile, die sich an der tatsächlichen Lage im Gerät orientiert. Dennoch lassen sich die Einzelteile aus den üblichen Darstellungen der Schulbücher gut wiedererkennen.

1. Lastaufnahme
2. Auflagedeckel
3. Arbeitskolben (2-teilig)
4. Betätigungshebel
5. Pumpkolben
6. + 7. Ventile
9. Ölvorrat
10. Nachfüllstopfen

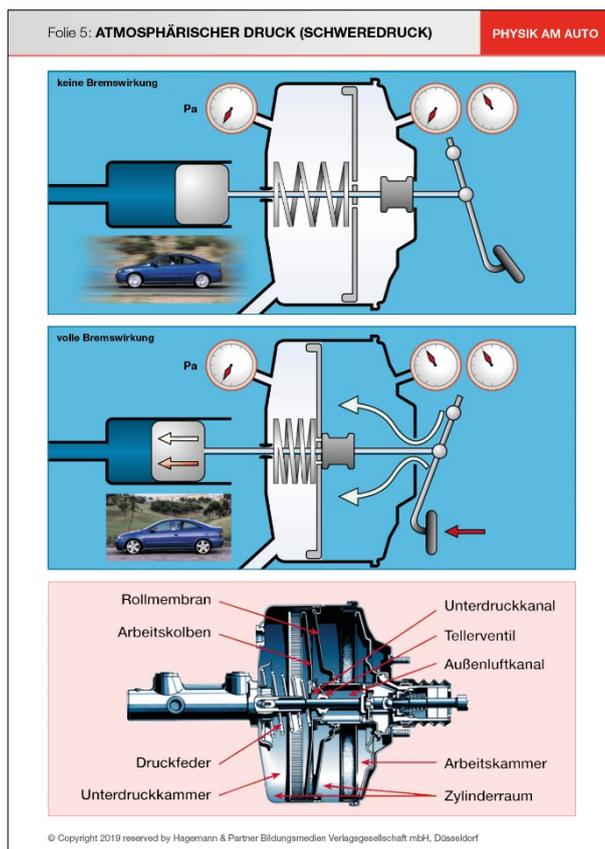


Das nächste Bild (unten) verdeutlicht, wie ein Wagenheber nach Beendigung der Arbeit wieder abgesenkt werden kann. Dazu öffnet man ein Bodenventil, über das das Öl aus dem Arbeitszylinder zurück in den Ölvorrat fließen kann. Der hierfür erforderliche Fließdruck entsteht allein durch die Last auf dem Arbeitskolben, sodass der Benutzer nicht erneut pumpen muss. Sogar die Gewichtskraft des unbelasteten Arbeitskolbens reicht aus, um den erforderlichen Fließdruck zu erzeugen.



Das Pascalsche Prinzip und die Funktion verschiedener Geräte mit einem Pumpen- und einem Arbeitskolben sind Thema in der Sachinformation der Folie und in allen physikalischen Schulwerken. Auf eine erneute Funktionsbeschreibung wird daher hier verzichtet. Zur Vertiefung des Themas steht eine Kopiervorlage zur Verfügung.

Unterdruck



Einsatz der Folie

In den üblichen Physikbüchern gibt es zum Thema „Schweredruck in Flüssigkeiten und Gasen“ kaum technische Beispiele. Mit dem auf der Folie erklärten **Bremskraftverstärker**, der ebenfalls **atmosphärischen Druck** nutzt, kann ein Beispiel aus der Technik im Unterricht behandelt werden, das die Schülerinnen und Schüler motiviert. Der Vorgang der Bremsunterstützung für den Fahrer durch die Wirkung des äußeren Luftdrucks wurde auf der Folie für das Verständnis der Schüler vereinfacht.

Oben und Mitte: Man erkennt auf den vereinfachten Darstellungen den sogenannten **Unterdruck-Bremskraftverstärker** sowie das Bremspedal und links den Hauptbremszylinder mit der Druckleitung zu den Fahrzeugbremsen. Die Rohrleitung an der linken Kammer des Bremskraftverstärkers ermöglicht den Unterdruck gegenüber der Außenluft:

- Beim **Ottomotor** verbindet sie die Kammer mit dem **Ansaugrohr** des Motors hinter dem Luftfilter. So entsteht bei laufendem Motor dort ständig ein mehr oder weniger starker Unterdruck, da der arbeitende Motor die Wirkung einer Luft absaugenden Kolbenpumpe hat.
- Beim **Dieselmotor** entsteht an derselben Stelle nicht genügend Unterdruck, da dessen Leistung nicht mit einer Drosselklappe im Ansaugkanal, sondern durch die Menge des von der Einspritzpumpe eingespritzten Kraftstoffes gesteuert wird. Deswegen wird beim Dieselmotor die linke Kammer des Bremskraftverstärkers über die erwähnte Leitung mit einer **separaten Unterdruckpumpe** verbunden, die vom Motor angetrieben wird.

Die drei dargestellten Dosenbarometer zeigen die jeweiligen Druckverhältnisse im System an. Zusätzlich ist geringerer Druck an einer helleren Farbgebung zu erkennen.

Das **obere Bild** zeigt den Zustand „**Fahrer brems nicht**“. Das Ventil auf der rechten Seite schließt die Öffnung zur Außenluft ab und gibt die Öffnung zum Unterdruckbereich frei. Infolgedessen herrscht auf beiden Seiten des Arbeitskolbens der gleiche Druck, nämlich der Unterdruck, den das System erzeugt. Es wirkt keine Kraft auf den Arbeitskolben und damit auch nicht auf den Kolben im Hauptbremszylinder.

Das **mittlere Bild** zeigt den Zustand einer **Vollbremsung**: Der Fahrer tritt das Bremspedal voll durch und erzeugt zum einen über die Druckstange Kraft auf den Kolben des Hauptbremszylinders. Zum anderen schiebt er das oben erwähnte Ventil nach links. Dadurch wird die Öffnung zwischen der rechten und linken Kammer des Bremskraftverstärkers geschlossen und die Öffnung zwischen der rechten Kammer und der Außenluft geöffnet. Die unter normalem Luftdruck stehende Außenluft dringt nun in die rechte Kammer ein. Da die linke Kammer nach wie vor unter Unterdruck verbleibt, wirkt eine zusätzliche Kraft von rechts auf den Arbeitskolben bzw. die Druckstange, und verstärkt bei entsprechend großer Fläche des Arbeitskolbens deutlich die Kraft des Fahrers. Bei einer normal starken Bremsung reagiert der echte Bremskraftverstärker mit einer angemessenen Teil-Unterstützung. Die Vorgänge sind allerdings zu kompliziert, um sie in dieser vereinfachten Version darstellen zu können.

Unten: Die technische Abbildung zeigt den Schülerinnen und Schülern wie ein Unterdruck-Bremskraftverstärker tatsächlich aussieht.



Kopiervorlage 5 enthält eine quantitative Aufgabe zu der Wirkung des oben beschriebenen Bremskraftverstärkers. Die verwendeten Daten sind reale Fahrzeugdaten. Für die Schüler verblüffend ist, welche zusätzliche Bremswirkung der nicht stark vom normalen Luftdruck abweichende Unterdruck hervorrufen kann. Im oberen Teil der **Kopiervorlage 5** werden den Schülerinnen und Schülern weitere Informationen zum Thema „Verwendung des atmosphärischen Unterdrucks im Kraftfahrzeug“ gegeben. Wenn es sich zeitlich ergibt, kann dieses Thema Inhalt eines Referats für einen interessierten Schüler werden. Im unteren Teil der Kopiervorlage folgt eine quantitative Aufgabe, die den Schülern deutlich macht, wie sehr die Wirkung des Unterdrucks den Bremsvorgang unterstützt.

Lernziele: Die Schüler sollen

- ihre Kenntnisse über den atmosphärischen Druck vertiefen und seine prinzipielle Nutzanwendung beim Kraftfahrzeug (ohne zu viel Details!) beschreiben können.
- Sachaufgaben zu diesem Thema korrekt bearbeiten und richtig lösen können.

Definition Überdruck/Unterdruck

Überdruck $p_e = p_{abs} - p_{amb}$.

- p_{abs} ist der absolute Druck. Der absolute Druck bezieht sich auf den Luftdruck des Universums.
- p_{amb} ist der atmosphärische Luftdruck. Der atmosphärische Luftdruck gibt die Gewichtskraft einer Luftsäule über einer Querschnittsfläche an und ist definiert als Quotient aus Kraft und Fläche. Der atmosphärische Luftdruck beträgt auf Meereshöhe im Mittel 1 013,25 hPa.
- p_e ist die atmosphärische Druckdifferenz (auch Überdruck). Sie ist definiert als Differenz zwischen dem absoluten Druck und dem atmosphärischen Luftdruck.

Der Überdruck ist positiv, wenn $p_{abs} > p_{amb}$ und negativ, wenn $p_{abs} < p_{amb}$ ist (Unterdruck).

Beispiel Autoreifen:

$$p_e = 2\,200 \text{ hPa}; p_{amb} = 1\,000 \text{ hPa}; p_{abs} = ?$$

$$p_{abs} = p_e + p_{amb} = 2\,200 \text{ hPa} + 1\,000 \text{ hPa} =$$

$$3\,200 \text{ hPa} = 3,2 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

Hinweis:

Dieses Beispiel ist nach dem am 20. Mai 2019 in Kraft getretenen **Internationalen Einheitensystem (SI)** formuliert. Alternativ kann das Beispiel auch noch mit der Einheit „bar“ notiert werden.

$$\text{Es gilt: } 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa.}$$

Atmosphärischer Druck

Details zur Bremskraftverstärkung durch Unterdruck

Die beiden großen Zeichnungen (siehe Folie) veranschaulichen die zwei Zustände „**Keine Bremsung**“ sowie „**Vollbremsung**“ eines Unterdruck- Bremskraftverstärkers. Damit erläutern sie zunächst die gleichen Inhalte wie die entsprechenden Darstellungen auf der zugehörigen Folie, vervollständigen jedoch die – zum leichteren Verstehen – stark vereinfachten Bilder der Folie.

Zudem erklärt die dritte, etwas kleinere Detailzeichnung den Zwischenzustand „**Normale Bremsung**“, der erfahrungsgemäß der Standardablauf eines Bremsvorganges ist. Dennoch sind zum besseren Verständnis auch diese drei Zeichnungen stark stilisiert und auf das Wesentliche reduziert. Die tatsächliche Anordnung zeigt das Foto eines solchen aufgeschnittenen Bremskraftverstärkers (unteres Bild der Folie).

Die Bezeichnung der Einzelteile ist auf die übliche Namensgebung in der Fachliteratur zurückzuführen. Zum Verständnis helfen diese Namen jedoch nicht unbedingt. So könnte man die „Kolbenstange“ (im Bild rechts gezeichnet) auch „Druckstange“ nennen, weil der Fahrer auf diese mit dem Bremsfuß drückt, oder die „Druckstange“ könnte „Kolbenstange“ heißen, weil sie

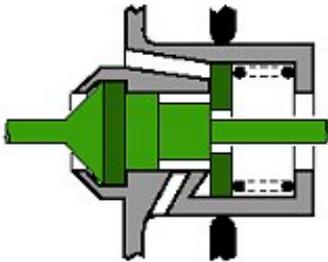
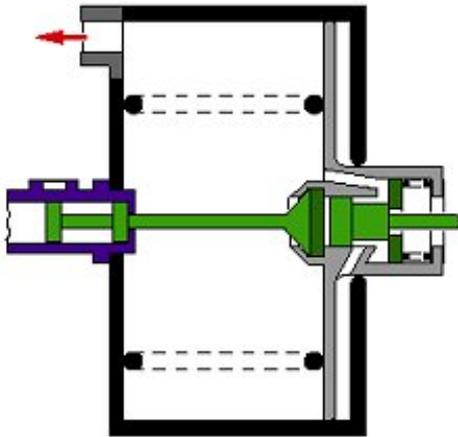
direkt auf den Bremskolben wirkt. Neutrale Begriffe wie „Primärstange“ und „Sekundärstange“ könnten für das Verständnis förderlich sein.

Zustand „Keine Bremsung“:

Die Öffnung in der Mitte des Tellerventils ist geschlossen, solange der Fahrer nicht mittels Bremspedals auf die Kolbenstange drückt (im unteren Bild von rechts). Gleichzeitig ist die Öffnung am Außenrand links vom Tellerventil offen: Das Tellerventil wird von der Druckfeder nach links gegen den Anschlag auf der Kolbenstange gedrückt. Daher herrscht nur in dem kleinen Raum rechts vom Tellerventil der äußere atmosphärische Druck. Im gesamten Bereich links vom Tellerventil herrscht Unterdruck. Dieser Unterdruck wirkt, wie die freien Kanäle in Bild 1 zeigen, von beiden Seiten des Arbeitskolbens gleich stark auf den Kolben. Insofern wird keinerlei Kraft auf den Arbeitskolben ausgeübt und er verbleibt in Ruhe.

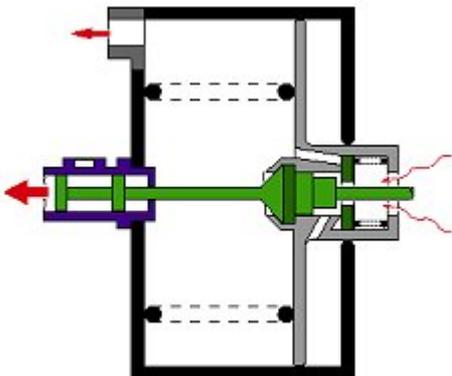
Zustand „Normale Bremsung“:

Übt der Fahrer Kraft auf das Bremspedal aus, bewegt sich die Kolbenstange nach links. Das Tellerventil wandert mit nach links, weiterhin wegen der Druckfeder auf seinem Anschlag an der Kolbenstange anliegend. Verstärkt der Fahrer die Pedalkraft, trifft die Kolbenstange auf die Druckstange, welche die Kraft des Fahrerfußes auf den eigentlichen Bremskolben (im Bild links) überträgt. Das Fahrzeug bremst. Wie in der vergrößerten Darstellung (Bild 2) gut zu erkennen ist, legt sich zugleich das Tellerventil an den anderen, äußeren Anschlag an, der Teil des gesamten Arbeitskolbens ist. Vergrößert der Fahrer weiter seine Bremskraft, hebt das Tellerventil leicht von seinem Anschlag auf der Kolbenstange ab, weil es jetzt an dem anderen Anschlag anliegt. Die Zentralöffnung des Tellerventils öffnet sich, und es kann Luft von außen in den Bereich rechts vom Arbeitskolben strömen. Da links noch immer Unterdruck herrscht, wird der Arbeitskolben mit zusätzlicher Kraft nach links gedrückt. Dies verstärkt die Kraft auf die Druckstange und damit die Bremskraft auf den Bremskolben. Behält der Fahrer seine bisherige Bremskraft unverändert bei und steigert sie nicht weiter, so „überholt“ der Arbeitskolben - bewegt durch die Druckdifferenz zwischen den Bereichen rechts und links vom Arbeitskolben - in seiner Bewegung nach links die vom Fahrer betätigten Stangen. Es stellt sich wieder der in Bild 2 gezeichnete Zustand ein, dass das Tellerventil praktisch an beiden Anschlängen liegt. Der bis dahin erreichte Druckunterschied auf beiden Seiten des Arbeitskolbens bleibt konstant, und es wirkt die zugehörigen mittlere Bremskraft, an der sowohl Fahrer als auch Unterdruckverstärkung beteiligt sind.



Zustand „Vollbremsung“:

Erst wenn der Fahrer noch stärker das Bremspedal durchtritt, öffnet sich wieder die Zentralöffnung des Tellerventils. Dann kann zusätzliche Außenluft in den Bereich rechts vom Arbeitskolben einströmen. Der Druckunterschied zwischen „rechts“ und „links“ wird noch größer und die wirksame Bremskraft steigt weiter an.



Reduziert der Fahrer schließlich wieder die Pedalkraft, tritt für das Tellerventil wieder der Zustand wie in Bild 1 ein: Es liegt am Anschlag der Kolbenstange an, die Zentralöffnung ist wieder geschlossen. Die Öffnung am Außenrand am anderen Anschlag beim Arbeitskolben ist wieder freigegeben. Dadurch besteht wieder – wie zu Beginn – eine Verbindung zwischen den Bereichen rechts und links vom Arbeitskolben. Die inzwischen zusätzlich rechts vom Arbeitskolben eingedrungene Außenluft wird zuverlässig vom System der Unterdruckerzeugung abgesaugt. Auf beiden Seiten stellt sich wieder der ursprüngliche Unterdruck ein. Es wirkt keinerlei Kraft mehr auf den Arbeitskolben. Von der großen Kolbenrückholfeder wird dieser wieder in seine ursprüngliche Position zurückgebracht.