

Eintreten von Stoßwirkungen. Jeder Stoß bedeutet nicht nur einen Arbeitsverlust, sondern auch eine Zerstörung des Werkstoffes. Eine Maschine, bei der das Getriebe sich abgenutzt hat und nicht ausgebessert wird, so daß sich zwischen den einzelnen Teilen Zwischenräume befinden und das eine Glied erst auf das andere trifft, wenn es sich schon in rascher Bewegung befindet, geht gewöhnlich sehr bald vollends zugrunde. Jede Maschine sollte möglichst ruhig und geräuschlos laufen. Hört der Maschinenwärter, daß Stöße auftreten, so muß er sofort die Ursache zu beseitigen suchen.

Angenommen, die Welle einer Dampfmaschine hätte, wie in Abb. 69 skizziert, 1 mm Spiel in ihrem Lager, und sie würde beim Hin- und Hergang durch die Schubstangenkraft von 2000 kg einmal vorwärts und einmal zurückgeschoben, wobei sie natürlich mit hartem Schlag auf die Lagerschale auftrifft, so ist die Arbeit, die dafür aufgewandt wird, $2 \times 2000 \text{ kg} \times 0,001 \text{ m} = 4 \text{ mkg}$. Macht die Maschine in der Sekunde 3 Umdrehungen, so werden $3 \times 4 = 12 \text{ mkg}$ in der Sekunde, also ungefähr $\frac{1}{6}$ Pferdestärke, rein dazu aufgewandt, die Maschine zu zerstören. Die Wirkung ist ungefähr dieselbe, wie wenn 1 bis 2 Männer mit kräftigen Hämmern auf die Maschine losschlugen.

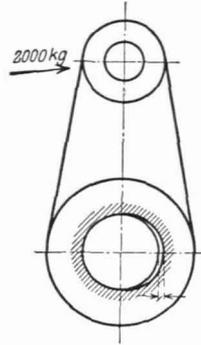


Abb. 69. Übergroßes Lagerspiel bei einer abgenutzten Maschine.

7. Reibung und die technischen Mittel, sie zu vermindern.

Während sich die Stoßverluste durch richtige Bauweise und Instandhaltung der Maschine meistens vermeiden lassen, kann man die Verluste durch Reibung nie ganz ausschalten, doch strebt man natürlich dahin, sie möglichst klein zu halten.

Legt man bei einem Versuche nach Abb. 70 ein Gewicht Q auf eine Unterlage und sucht man dann mit einer Schnur den Klotz fortzuziehen, so muß diese Schnur mit einem ganz bestimmten Gewicht P belastet werden, um das Gewicht Q in Bewegung zu setzen. Zum Beispiel finde sich, daß zur Bewegung einer Last $Q = 10 \text{ kg}$ eine Kraft $P = 2 \text{ kg}$ nötig ist, daß also Kraft und Last im Verhältnis 1:5 zueinander stehen. Dieses selbe Verhältnis, das mit dem Worte „Reibungsziffer“ bezeichnet wird, findet sich dann angenähert auch bei anderen Belastungen, so

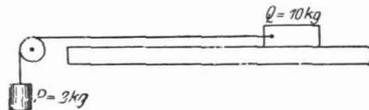


Abb. 70. Einfacher Reibungsversuch.

daß z. B. eine Last von 3 kg durch ein Gewicht von 0,6 kg in Bewegung gesetzt wird.

Maschinelle Teile läßt man nicht trocken aufeinander gleiten, sondern schmiert sie mit Öl oder Fett. Der Erfolg einer vollkommenen Schmierung ist, daß die Metallteile sich nicht mehr unmittelbar berühren. Die Reibung entsteht ja dadurch, daß die Teile sich mit ihren kleinen Unebenheiten ineinander hineindrücken und gewissermaßen aneinander festhaken. Befindet sich nun, wie in Abb. 71 übertrieben gezeichnet, zwischen den beiden Flächen Öl, so nimmt jede Fläche eine ganz dünne Ölschicht, die an ihr haftet, mit, und diese beiden Ölschichten gleiten aufeinander. Daß dabei eine viel geringere Reibung entsteht, ist ohne weiteres klar.

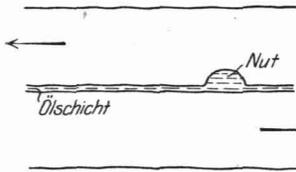


Abb. 71. Wirkung der Schmierung.

Man muß aber dafür sorgen, daß der Druck zwischen den Flächen nicht zu stark und das Öl nicht zu dünnflüssig ist, da es sonst weggepreßt wird und die Flächen sich wieder unmittelbar berühren. Häufig werden in einem der beiden Körper Vertiefungen, sogenannte Schmiernuten angebracht, in denen sich etwas Öl ansammelt, so daß es wie aus einem Vorratsbehälter immer wieder zwischen die Flächen gelangt.

Nehmen wir einmal den Fall der Dampfmaschine, wie in Abb. 72 skizziert. Hier verursacht zunächst schon der Kolben eine gewisse Reibung, da er beständig mit seinem Gewicht auf die Unter-

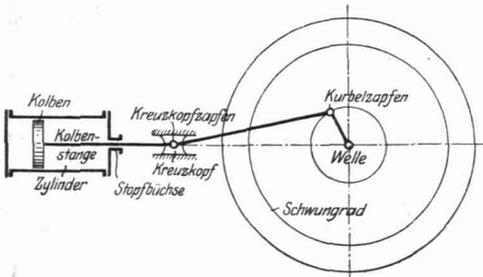


Abb. 72. Die Reibung verursachenden Teile einer Dampfmaschine.

lage, d. h. auf den unteren Teil der Zylinderwand, drückt und dabei rasch hin- und hergeht. Die Pleuelstange wird in ihrer Bewegung durch die Pleuelbüchse gebremst, durch die sie aus dem Zylinder heraus nach außen tritt. Das Gleiche wie für den Pleuelkopf gilt für den Pleuelkopf; zu dem durch das eigene Gewicht ausgeübten

Druck tritt hier aber noch die Kraft D , vergl. Abb. 59, hinzu, die infolge der schrägen Richtung der Pleuelstange auf die Führung ausgeübt wird. Sodann tritt Reibung auf im Pleuelkopfbüchse, im Pleuelzapfen und in den Lagern der Pleuelwelle, denn überall bewegen sich

hier Teile aufeinander, die durch große Kräfte gegeneinander gepreßt werden. Ziemlich viel kann für die Reibung in den Wellenlagern unter Umständen allein das Gewicht des Schwungrades ausmachen. In dem vorher untersuchten Falle war das Schwungradgewicht 400 kg; wird die Reibungsziffer bei mäßiger Schmierung zu $\frac{1}{10}$ angenommen, so ist die Reibungskraft am Umfang des Wellenzapfens $\frac{1}{10} \times 400 = 40$ kg. Wenn sich die Welle dreht, so muß sie gegen diese Reibung an arbeiten, und zwar wird, wenn der Zapfendurchmesser 12 cm ist, Abb. 73, bei jeder Umdrehung entgegen der Reibungskraft 40 kg ein Weg $3,14 \times 12 = 37,7$ cm zurückgelegt oder zur Überwindung der Reibung eine Arbeit von $40 \times 37,7 = 1510$ cmkg oder 15,1 mkg geleistet. Bei 126 Umdrehungen in der Minute oder 2,1 Umdrehungen in der Sekunde gehen also allein durch die Reibung des Schwungrades $2,1 \times 15,1 = 31,6$ mkg/s oder $\frac{31,6}{75} = 0,42$ Pferdestärken verloren, d. h. fast

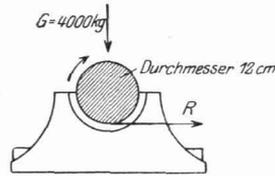


Abb. 73. Reibung am Wellenzapfen einer Dampfmaschine.

4% der an die Welle abgegebenen Leistung von 11 Pferdestärken.

Im Maschinenbau geht man nicht so verschwenderisch mit der glücklich gewonnenen Arbeit um, daß man sich mit diesem Ergebnis ohne weiteres zufriedengeben würde; man wird vielmehr versuchen, den Verlust möglichst zu verringern, und zwar kann das dadurch geschehen, daß man dem Zapfen einen möglichst kleinen Durchmesser gibt, so klein, wie es mit Rücksicht auf Bruchgefahr, Verbiegung der Welle usw. noch eben zulässig ist, weil dann der Weg, der entgegen der Reibung zurückgelegt werden muß, kleiner wird. Nötigenfalls wird ein Werkstoff von größerer Festigkeit für die Herstellung der Welle gewählt. Viel läßt sich aber vor allem durch Verbesserung der Schmierung erreichen. In wichtigen Fällen, besonders bei sehr rasch laufenden Wellen, ist man dazu übergegangen, das Öl von unten mit starkem Druck zwischen den Zapfen und das Lager zu pressen, damit ja keine metallische Berührung stattfindet, sondern nur eine Reibung im Innern der Flüssigkeit auftritt.

Noch wirksamer ist es, das Gleiten der Flächen aufeinander überhaupt zu vermeiden, wie es ja auch bei der Beförderung von Lasten geschieht. Soll z. B. ein Balken oder ein behauener Stein von sehr großem Gewicht eine kurze Strecke weit bewegt werden, so wird eine Bahn aus Brettern hergestellt und der Balken auf Walzen gelegt, Abb. 74, S. 54. Er läßt sich dann verhältnismäßig leicht befördern, vorausgesetzt, daß die Unterlage glatt und eben ist, denn es tritt

nur Rollwiderstand auf; auch die Zapfenreibung, die sich bei Eisenbahnwagen und Fuhrwerken geltend macht, fällt fort. Auf einer genau verlegten Bahn und mit glatten Walzen könnte ein Mann eine Last von 3000 kg mit einem Druck von etwa 20 kg vor sich herschieben, während 1000 kg oder 50 Männer nötig sind, um eine Last von diesem Gewicht über die hölzerne Bahn einfach wegzuschleifen.

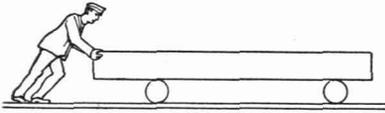


Abb. 74. Beförderung eines schweren Balkens auf Walzen.

Ganz entsprechend liegen die Verhältnisse, wenn das Abwälzen auf einer gekrümmten Bahn vor sich geht. Wir kommen damit von selbst zu dem Rollenlager, wie in Abb. 75 skizziert. Die Welle bewegt sich auf Walzen in dem ruhenden Lagerkörper. Diejenigen Rollen oder Walzen, die im Augenblick gerade die Welle tragen, und die Teile der Welle und des Lagers, die sich zur Zeit auf diesen Rollen abwälzen, sind mit starken Linien gezeichnet. Wenn die Welle sich dreht, so kommen nach und nach die anderen Rollen an die Reihe.

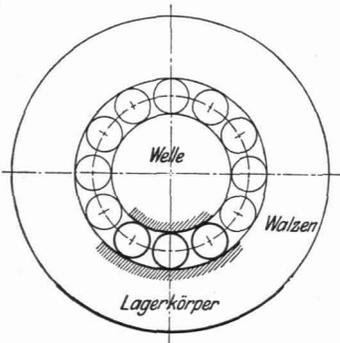


Abb. 75. Rollenlager.

Dasselbe gilt für Kugellager, die viel häufiger vorkommen als Rollenlager. Werden die Kugeln und auch die Flächen, auf denen sie laufen, sehr sorgfältig aus hartem Stahl hergestellt und blank geschliffen, so kann

der Widerstand bis auf $\frac{1}{50}$ der Reibung heruntergehen, die in einem gewöhnlichen Wellenlager auftritt. Ein Kugellager hat außerdem weniger Schmierung nötig als ein gewöhnliches „Gleitlager“, stellt sich aber teurer und ist empfindlicher gegen Stöße, da die harten Kugeln zerspringen können. Durch Kugellager kann die Reibung in einer Maschine bedeutend heruntersetzt und der Wirkungsgrad erhöht werden.

Im Förderwesen findet sich reine gleitende Reibung nur bei der Beförderung mit Schlitten, weil die Reibungsziffer von Stahl auf Schnee oder Eis nicht mehr als etwa $\frac{1}{40}$ bis $\frac{1}{50}$, also viel weniger beträgt, als die Reibungsziffer beim Gleiten leidlich gut geschmierter Metallflächen aufeinander. Sonst versieht man die Fuhrwerke stets mit Rädern, die auf der Fahrbahn abrollen. Der Rollwiderstand ist erfahrungsgemäß um so geringer, einen je größeren Durchmesser das Rad hat. Man kann sich das leicht erklären, wenn man sich vor-

stellt, daß ein Rad, auf dem die Last Q ruht, über einen Stein hinweggehen muß, Abb. 76. Das Rad ist dann als ein Hebel aufzufassen. Die Last dreht rückwärts mit dem Drehmoment $Q \cdot f$, und dieses muß von der Kraft P überwunden werden, die den Hebelarm h hat. Je größer h , um so kleiner kann die Zugkraft P sein, wenn das erforderliche Drehmoment $P \cdot h = Q \cdot f$ erzielt werden soll.

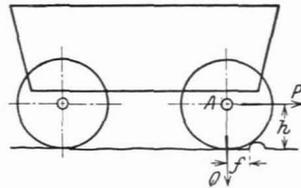


Abb. 76. Rollwiderstand beim Fuhrwerk.

Bei Fuhrwerken ist nicht die rollende Reibung allein zu überwinden. Die Räder drehen sich ja auf Zapfen, von denen z. B. jeder, wenn die Wagenlast 40 Zentner oder 2000 kg beträgt, eine Belastung von 500 kg erhält. Hierdurch wird, genau wie bei dem Zapfen der Dampfmaschinenwelle, gleitende Reibung hervorgerufen.

Für eine gute Fahrstraße darf gerechnet werden, daß die Zugkraft auf ebener Strecke durchschnittlich $\frac{1}{40}$ der Wagenlast ausmacht. Nehmen wir nun einmal an, daß ein Pferd, das 400 kg wiegt, einen Wagen von 2000 kg Gesamtgewicht eine Stunde lang auf einer Straße hinaufgezogen hat, die eine gleichmäßige Steigung von 1:100 besitzt, d. h. auf 100 m Länge immer 1 m steigt, und daß das Pferd im langsamen Schritt, mit einer Geschwindigkeit von ungefähr 0,8 m in der Sekunde, geht. Der zurückgelegte Weg ist dann, da die Stunde 3600 Sekunden hat, $3600 \times 0,8 = 2880$ m oder 2,88 km, und der Höhenunterschied $\frac{1}{100} \times 2880 = 28,8$ m. Welche Arbeit hat das Pferd auf diesem Wege geleistet?

Zunächst ist auf dem Wege von 2880 m zur Überwindung der Reibung eine Zugkraft von $\frac{1}{40}$ der Wagenlast, also $\frac{2000}{40} = 50$ kg ausgeübt worden, und die hierbei geleistete Arbeit beträgt $50 \times 2880 = 144000$ mkg. Sodann hat das Pferd sowohl den Wagen (2000 kg) wie auch sein eigenes Gewicht (400 kg) um 28,8 m gehoben und damit eine Arbeit geleistet von $2400 \times 28,8 = 69000$ mkg. Die Gesamtarbeit in einer Stunde beträgt also $144000 + 69000 = 213000$ mkg, oder $\frac{213000}{3600} = 59$ mkg in einer Sekunde. Das ist

beinahe soviel, wie ein Pferd im besten Falle auf die Dauer leisten kann. In der Technik bezeichnen wir allerdings eine Leistung von 75 mkg/s als eine „Pferdekraft“; in Wahrheit ist dies aber mehr als die Durchschnittsleistung eines Pferdes.

Eine Lokomotive, Abb. 77, bewegt sich dadurch, daß eine Dampfmaschine, die so ausgeführt ist, wie die in Abb. 63 auf S. 42 skizzierte Maschine, also mit einem Zylinder auf jeder Seite der

von 420000 kg Gesamtgewicht, mit einer Geschwindigkeit von 25 km in der Stunde über eine Steigung von 1:200 ($\frac{1}{2}\%$) schleppt. Die Lokomotive selbst wiege 45000 kg, der Tender mit Kohle und Wasserinhalt 30000 kg. Insgesamt ist also zu befördern ein Gewicht von $420000 + 45000 + 30000 = 495000$ kg oder 495 t (Tonnen). Die Gesamtreibung einschließlich des Luftwiderstandes kann bei der Fahrgeschwindigkeit von 25 km erfahrungsgemäß auf etwa 6 kg für 1 t Zuggewicht geschätzt werden, so daß die Zugkraft, die zur Bewegung des Zuges auf der wagerechten Strecke nötig ist, $495 \times 6 = 2970$ kg beträgt. Beim Fahren auf der Steigung 1:200 bewegt sich die Lokomotive 200 m weit, wenn der Zug um 1 m gehoben wird; aus der Gleichheit der aufgewendeten und der gewonnenen Arbeit folgt daher, daß die zur Überwindung der Steigung nötige Zugkraft $\frac{1}{200}$ des Zuggewichtes, also $\frac{495000}{200} = 2475$ kg sein muß. Die Gesamtzugkraft ist also $2970 + 2475 = 5445$ kg. Nun fehlt zur Berechnung der Leistung nur noch die Geschwindigkeit. 25 km in der Stunde ist soviel wie $\frac{25000}{3600} = 7$ m in der Sekunde. Die Maschine muß also bei voller Fahrt eine Leistung von $5445 \times 7 = 38000$ mkg/s oder von $\frac{38000}{75} =$ ungefähr 500 PS (Pferdestärken) abgeben.

Die Arbeit, die der Dampf im Zylinder leistet, muß natürlich noch größer sein, da durch die Reibung im Triebwerk der Maschine etwa 15 bis 20% verloren gehen; die Arbeit des Dampfes darf also zu 600 PS angenommen werden.

Im Grunde ähnlich liegen die Verhältnisse bei Kraftwagen, die bekanntlich meistens durch Benzinmotoren angetrieben werden. Die Übertragung der Kraft auf die Räder wird allerdings konstruktiv ganz anders durchgeführt.

In allen diesen Erörterungen über die Arbeit, die aufzuwenden ist, um die Reibungswiderstände bei Fahrzeugen zu überwinden, und über die Arbeits- oder Energieverluste infolge der Reibung in den Triebwerken von Maschinen klafft doch eigentlich noch eine recht bedenkliche Lücke! Man kann den Einwand erheben, daß hier beständig von Arbeitsverlusten gesprochen wird, während früher behauptet war, daß Arbeit überhaupt nicht verloren gehen könnte! Was wird also aus dieser Reibungsarbeit? Sie verschwindet einfach aus unserer Rechnung, und wir sehen und hören nichts mehr von ihr. Bei der Dampfmaschine betrug sie ungefähr 30% der insgesamt in den Zylindern erzeugten Energie, d. h. nahezu 5 Pferdestärken — von 15,7 erzeugten Pferdestärken blieben nur 11 übrig —,

bei der Lokomotive wurden sogar 100 Pferdestärken vernichtet! Was wird aus diesen uns entgangenen Energiemengen?

Wer sich darauf selbst eine Antwort geben will, fasse einmal das Wellenlager einer Dampfmaschine an. Er wird finden, daß es ziemlich warm ist, bedeutend wärmer, als die anderen Teile des Gestelles, soweit sie nicht durch den Dampf erhitzt werden. Das kommt daher, daß die „verloren gegangene“ Arbeit aufgewendet worden ist, um die Lager und die anderen aufeinander gleitenden Triebwerkteile zu erwärmen; die Arbeit hat sich infolge der Reibung unmittelbar in Wärme umgesetzt.

Dasselbe gilt übrigens auch für die Stoßverluste bei Maschinen. Ein einfaches Verfahren, um angenähert zu ermitteln, in welchem Verhältnis mechanische Arbeit und erzeugte Wärme zueinander stehen, ist die, daß man Schrotkörner in eine starke, etwa 0,8 m lange Papp-

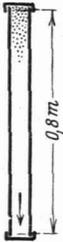


Abb. 79. Einfaches Verfahren zur Bestimmung der bei der Vernichtung von Energie erzeugten Wärme.

hülse, Abb. 79, legt und nun die Papphülse rasch auf den Kopf stellt, so daß die Körner mit nach oben genommen werden und dann um die Strecke 0,8 m herunterfallen. Sie schlagen dabei auf den Boden der Hülse und aufeinander auf und erwärmen sich nach und nach, wenn dieses Umdrehen häufig wiederholt wird. Am Beginn und am Schluß des Versuches wird die Temperatur der Bleikörner gemessen. Befindet sich 1 kg Blei in der Hülse, und hat man die Hülse 200mal umgedreht, so ist die zur Erhitzung verwandte mechanische Arbeit $200 \times 1 \text{ kg} \times 0,8 \text{ m} = 160 \text{ mkg}$. Findet sich nun z. B., daß die Temperatur des Bleies um 11° gestiegen ist, so könnte daraus für andere Fälle ent-

nommen werden, daß jedesmal, wenn 1 kg Blei sich durch Stoß, Reibung oder dergleichen um 1° erhitzt, $\frac{160}{11} = 14,5 \text{ mkg}$ darauf ver-

wandt sind. Da Wasser erfahrungsgemäß eine 33mal so große Wärmemenge wie Blei verschlingt, um sich um 1° zu erwärmen, so wäre hiernach die Arbeitsmenge, die zur Erwärmung von 1 kg Wasser um 1° erforderlich ist, 480 mkg. Genauere Messungen ergeben, daß dieser Wert, den man als das „mechanische Wärmeäquivalent“ bezeichnet, die Größe von 427 mkg hat.

Daß der Versuch mit der Papphülse nur einen Annäherungswert geliefert hat, liegt daran, daß auch Wärme verbraucht wird, um die Temperatur der Hülse selbst zu erhöhen, und daß diese wieder während des Versuches eine gewisse Wärmemenge an die umgebende Luft ausstrahlt oder weiterleitet. Auch bei dem Lager der

Dampfmaschine ist dies der Fall. Das Lager kühlt sich infolge der Berührung mit der umgebenden Luft ab, auch nimmt das hindurchtretende Schmieröl Wärme mit; sonst würde seine Temperatur, da fortdauernd Wärme zugeführt wird, beständig zunehmen. Große, schwerbelastete Lager müssen häufig durch Wasser gekühlt werden, das beständig durch den Lagerkörper hindurchgepumpt wird und die erzeugte Wärme mit sich fortnimmt.

Wird das Lager zu heiß, so wird das Öl so dünn, daß es zwischen Zapfen und Lagerschale weggepreßt wird und die Teile einander rein metallisch berühren. Die Reibung wird dadurch viel größer, und das Lagermetall erhitzt sich jetzt rasch weiter, bis die aufeinander reibenden Flächen ihre Widerstandsfähigkeit verlieren und anfangen zu „fressen“, d. h. sich gegenseitig rasch abzunutzen und zu zerstören. Äußerlich macht sich die Erscheinung dadurch bemerkbar, daß das Lager anfängt zu rauchen; in der Nähe befindliche Holzteile können in Brand geraten, ein Fall, der bei den Achslagern von Eisenbahnwagen zuweilen eintritt. Leicht schmelzende Lagermetalle (Weißmetalle) werden flüssig und laufen aus dem Lagerkörper aus.

Daß mechanische Energie sich überhaupt in Wärme „verwandeln“ kann, ist zunächst sehr überraschend. Verständlicher wird diese Erscheinung, wenn man die Erklärung der Physiker für Wärme kennt. Danach befinden sich bei einem Körper die kleinsten Teilchen, die Moleküle, in beständigen Schwingungen, d. h. sie bewegen sich sehr rasch hin und her, ohne im übrigen ihren Ort zu verlassen, und zwar sind diese Schwingungsbewegungen um so rascher und häufiger, je höher die Temperatur des Körpers steigt. Wärme ist also nichts anderes, als eine andere Form von Bewegungsenergie, von lebendiger Kraft oder „Wucht“. Die lebendige Kraft, die die Bleikörner haben, wenn sie auf den Boden der Pappröhre aufschlagen, verwandelt sich unmittelbar in lebendige Kraft ihrer Moleküle. Die Schwingungen sind bei niedrigen Temperaturen so klein, daß sie z. B. bei den meisten Metallen den Zusammenhang des Werkstoffes, seine Festigkeit, nicht beeinflussen. Erst bei stärkerer Erhitzung wird das Material weniger widerstandsfähig und beginnt endlich zu glühen oder zu schmelzen.

8. Grundlagen für die technische Verwertung des im Wasser enthaltenen Arbeitsvermögens.

Was über Arbeit, lebendige Kraft, Erhitzung durch Reibung oder Stoß usw. gesagt wurde, gilt alles nicht nur für feste Körper, sondern auch für Flüssigkeiten. Daher kann das bequeme Verfahren,