



UNIVERSITÄTS-
BIBLIOTHEK
PADERBORN

Handbuch der Physik zur Selbstbelehrung für jedermann

Spiller, Philipp

Berlin, 1865

Zweiter Abschnitt. Von der Reibung.

[urn:nbn:de:hbz:466:1-75469](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:hbz:466:1-75469)

horizontal geht; er bildet Wellen, stößt meist schräge von oben nach unten und kann daher auch in dem Wasser Wellen erzeugen, welche um so höher werden, je tiefer das Meer oder Gewässer ist. Es ist vorzüglich der dauernde Einfluß des Sturmes, welcher die Wellen immer höher und höher thürmt; aber es ist auch im höchsten Grade auffallend, wie ein horizontal und stark wehender Wind das Wasser in kurzer Zeit wieder zu glätten vermag. Sind Wellen durch den Wind erzeugt worden, so stoßen dieselben auch gegen einander und werden dadurch selbst im offenen Meere auch oft zu bedeutenden Höhen aufgestaut. Ebenso findet es aber auch an den Küsten statt, daß den nach dem Lande kommenden Wellen die von diesem zurückgeworfenen entgegenkommen, wodurch sie schäumend, d. h. mit Luft sich mischend, einander zu bedeutenden Höhen aufthürmen. Wenn sie einander auf eine längere Strecke recht pavellel entgegen kommen, so überstürzt die stärker ankommende die andere in einem Bogen ankommende so, daß sie dabei eine Menge Luft einhüllt, welche sie zusammendrückt und mit einem lauten Klatsch durch sich läßt. Hübsche Figuren entstehen, wenn man einen Wasserstrahl entweder auf recht glatte, verschieden geformte Metallflächen oder wenn man zwei Wasserstrahlen gegen einander stoßen läßt, so daß die Geschwindigkeit ganz oder theilweise aufgehoben wird. Die beiden Strahlen können eine verschiedene Stärke und Geschwindigkeit haben, der Stoß kann ein zentraler oder exzentrischer, ein grader oder schiefer sein, und dabei können auch die Ausflußöffnungen verschieden geformt sein.

Zweiter Abschnitt.

Von der Reibung.

Wenn ein Körper mit Berührung an einem anderen sich bewegt, gleichgiltig, welchem Aggregatzustande die Körper angehören, so erfährt die bewegende Kraft eine Verminderung oder sie erleidet einen Widerstand, welchen man Reibung nennt. Dieser Widerstand wirkt schon, ehe noch die Bewegung begonnen hat und dauert während derselben fort. Die Reibung zweier Körper kann ohne oder mit Anwendung einer besonderen drückenden Kraft stattfinden; im zweiten Falle reiben wir einen Körper am anderen, wie z. B. wenn man ein Stück Zucker an einem anderen durch Anwendung eines Druckes hin und her bewegt. Dieses aktive Reiben wird angewendet, wenn man aus einem Körper, dessen Theile einen nur schwachen Zusammenhang haben, ein Pulver machen, oder ihn pulverisiren will; wir zerreiben den Körper. Wir betrachten

hier aber nicht diesen Erfolg, sondern nur den Widerstand gegen diese Bewegung, abgesehen von dem Beharrungsvermögen der Körper.

Die Ursache aller Reibung ist die Rauheit der Oberflächen aller Körper, indem sie bei keinem, so glatt sie auch erscheinen mögen, ohne Hervorragungen und Vertiefungen sind, wozu bei den festen Körpern noch häufig der nicht sehr bedeutende Grad der Härte tritt. Wären alle Körper absolut glatt und hart, so würde es freilich zwar keine Reibung geben, aber die Adhäsion würde als Zeichen der allgemeinen Massenanziehung der Bewegung auch ein Hinderniß entgegenstellen, welches wir aber mit unter dem Begriffe der Reibung behandeln, weil sich wohl kaum ermitteln läßt, wie viel von dem Hindernisse der Bewegung auf die Rauigkeit und wie viel auf die Glätte der Oberfläche zu rechnen ist.

Die Reibung fester Körper.

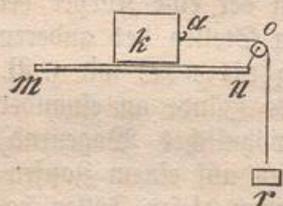
Während ein fester Körper auf einem anderen liegt, gehen die kleinen Erhabenheiten des einen in die Vertiefungen des anderen oder liegen theilweise auf einander oder schweben auch über Vertiefungen des anderen. Findet nun die Bewegung statt, so müssen die in den Vertiefungen liegenden Theile des einen über die Erhabenheiten des anderen gehoben werden, wobei gleichzeitig eine um so größere Menge von exzentrischen, der Bewegung einen Widerstand entgegensetzenden Stößen stattfinden, je rauher die Körper bei derselben Ausdehnung der Berührungsflächen sind. Bei diesen Stößen werden nach und nach Erhabenheiten abgerissen, die Flächen reiben einander ab und werden glatter.

Die Reibung derselben zwei Körper ist nach der Art ihrer Bewegung und nach ihrer Gestalt verschieden. Wenn der eine Körper bei seiner Bewegung stets mit denselben Stellen den anderen ruhenden in neuen Stellen trifft oder wenn jeder von zwei bewegten Körpern den anderen in immer neuen Stellen trifft oder wenn der eine Körper bei seiner Ruhe an denselben Stellen von immer neuen Stellen des anderen bewegten getroffen wird, so ist die Reibung eine gleitende, wie z. B. wenn ein Schlitten gezogen wird, wenn man beide Hände an einander bewegt, wenn ein Rad um seine feste Ase (gewöhnliches Wagenrad) oder eine Ase auf einer festen Unterlage (ein Zapfen auf einem Zapfenlager wie bei den Wasserrädern) sich dreht. In allen diesen Fällen bewegen sich die berührenden Theile der Oberfläche des einen Körpers parallel mit den Theilen der anderen Oberfläche, mögen es ebene oder gekrümmte Flächen sein. Die Zapfenreibung ist also eine besondere Art der gleitenden Reibung, indem die Berührungspunkte stets nur an dem einen Körper wechseln, mag sich die Nabe auf einer festen Unterlage oder die Nabe (Radfutter) um die feste Ase drehen. — Treten aber immer neue Punkte beider Körper mit einander in Berührung, während die früher in Berührung gewesen sind sich von einander entfernen, wie es

z. B. der Fall ist an dem Umfange des Rades eines Wagens, welcher über eine Fläche dahin fährt, so ist die Reibung eine wälzende.

Bei der gleitenden Bewegung muß jedes Theilchen des bewegten Körpers von der Berührungsstelle sich losreißen von dem es zurückhaltenden Theilchen des unbewegten Körpers, bei der wälzenden aber wird immer ein neues Theilchen des bewegten Körpers zur Berührung gebracht und das durch die Rauheit der Unterlage festgehaltene Theilchen mehr gehoben, als fortgeschleift, ohne daß hier so leicht Abreißung erfolgt, als dort. Es ist also unter übrigens gleichen Umständen die wälzende Reibung kleiner, als die gleitende, zumal bei jener der Schwerpunkt des bewegten Körpers, weil die Unebenheiten nicht fortgerissen werden, weniger gehoben zu werden braucht, und die Berührung der Körper auf kleinere Flächen beschränkt wird.

Aus dem Begriffe der Reibung ist klar, daß man, wenn ein Körper an einem anderen bewegt werden soll, eine Kraft anwenden muß, welche nicht bloß der Last das Gleichgewicht hält oder vielmehr sie um etwas Weniges übertrifft, sondern daß man diese Kraft um den Reibungswiderstand vermehren muß. Für bestimmte Körper und für eine bestimmte Beschaffenheit und Größe der einander reibenden Flächen ist der Widerstand stets ein bestimmter Bruchtheil von der Last und heißt Reibungskoeffizient. Wäre die Reibung z. B. $\frac{1}{4}$, oder 25 Prozent der Last, d. h. müßte man bei 100 Zentnern Last 25 Zentner Kraft bloß zur Ueberwindung der Reibung anwenden, so wäre der Reibungskoeffizient 0,25. Es ist praktisch von großer Wichtigkeit, die Reibungskoeffizienten für verschiedene Stoffe zu bestimmen, da es ja bei Maschinen vorzüglich darauf ankommt, alle Einrichtungen so zu treffen, daß von der Arbeitskraft so wenig als möglich verloren gehe. Die Vorrichtungen zur Bestimmung der Reibung hat man Tribometer oder Reibungsmesser genannt. Die Methoden zur Messung der Reibung sind folgende:

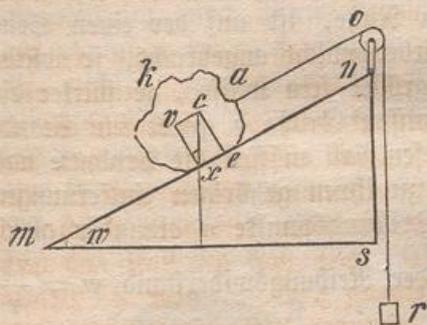


(Fig. 199.)

1) Auf einer genau horizontalen ebenen Platte $m n$ (Fig. 199) befindet sich der Körper k von dem Gewichte s , welcher die Platte mit einer bestimmten Fläche berührt, an dem einen Ende der Platte ist eine kleine äußerst leicht drehbare Rolle so befestigt, daß ein über sie gelegter und an k gebundener Faden, in dessen Richtung der Schwerpunkt des Körpers liegt, mit dem Theile $a o$ der Platte parallel ist. Ist an dem anderen Ende des Fadens ein Uebergewicht r angehängt, welches grade nur im Stande ist, das k in Bewegung zu setzen; so ist der Bruch r/s der Reibungskoeffizient. Wiegt k z. B. 10 Pfunde, ist r gleich 1 Pfund, so ist der Koeffizient 0,1. Um die Rücksicht auf die Reibung der Rolle zu beseitigen, kann man zwischen a und o eine genau berichtigte Federwage einspannen, deren Skale die Spannung des Seils angibt.

Wird auf einer horizontalen Ebene ein Körper so gezogen, daß die Bewegung gleichmäßig bleibt, so ist die ziehende Kraft der Reibung gleich und die Beobachtung der durchlaufenen Wege, aus denen sich die Gleichförmigkeit der Bewegung ergibt, läßt beurtheilen, ob auch die ziehende Kraft stets der Reibung gleich ist.

2) Wäre Reibung nicht vorhanden, so würde jeder Körper auf einer gegen den Horizont auch außerordentlich wenig geneigten Ebene herabgleiten. Je größer man den Neigungswinkel gegen den Horizont machen muß, ehe der Körper herabgleitet, desto größer ist seine Reibung. Es steht also die Größe dieses Neigungswinkels mit der Größe der Reibung in einer gewissen Beziehung, welche durch das Verhältniß der



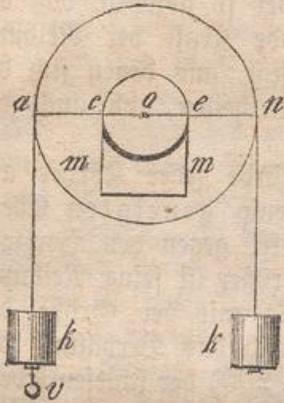
(Fig. 200.)

Stellt die Linie cx das Gewicht des Körpers dar und zugleich die Richtung, in welcher es wirkt, so muß diese auf mn schief wirkende Kraft zerlegt werden in die darauf lothrecht wirkende ce , womit der Körper die schiefe Ebene drückt, und in die mit ihr parallele cv , womit sie darauf herabgleiten würde, wenn keine Reibung stattfände. Das Verhältniß von jener Kraft zu dieser ist gleich dem Verhältnisse der Höhe ns der schiefen Ebene zu ihrer Basis ms ; beide sind nur Antheile von cx .

Wenn man an den Körper k eine Schnur bindet und über eine sehr leicht bewegliche Rolle o leitet, daß das Schnurenstück ao mit der schiefen Ebene parallel geht und der Schwerpunkt von k in ihrer Richtung liegt, so wird ein an dem anderen Ende der Schnur angebrachtes Gewicht die gleitende Kraft grade im Gleichgewichte halten können und die durch die drückende Kraft hervorgebrachte Reibung wird ein Mehrgewicht verlangen, wenn k aufwärts bewegt werden soll, und ein Mindergewicht, wenn das Herabgleiten eben beginnen soll. Der Reibungskoeffizient ist für den Winkel, bei welchem soeben das Herabgleiten des freiliegenden Körpers beginnt, der Bruch, dessen Zähler die Höhe und dessen Nenner die Basis der schiefen Ebene ist.

3) Für das Maschinenwesen ist besonders wichtig die Reibung, welche die Zapfen von Wellen in ihren Lagern erleiden. Es

Höhe ns (Fig. 200) der schiefen Ebene zu ihrer Basis ms angegeben wird. Ist nämlich w derjenige Winkel, bei welchem der Körper k auf der schiefen Ebene mn grade herabzugleiten beginnt, so läßt sich aus der Kraft, mit welcher k wegen seines Gewichtes lothrecht auf den Horizont wirkt, und aus diesem Winkel sowohl die Kraft finden, mit welcher k auf die schiefe Ebene lothrecht drückt, als auch die Kraft, mit welcher k auf ihr ohne Reibung herabgleiten würde.



(Fig. 201.)

dies bei vorhandener Reibung um so größer sein müssen, je stärker die Reibung ist, und würde bei einer gewissen Größe v grade im Stande sein, die Reibung aufzuheben. Für diesen Fall müssen die Produkte aus den beiden Kräften w und v mit den zu ihnen gehörigen Entfernungen r und R von dem gemeinschaftlichen Drehungspunkte o einander gleich sein oder $w \cdot r = v \cdot R$; folglich ist der Reibungswiderstand $w = \frac{vR}{r}$ und der Reibungskoeffizient, wenn man die ganze Belastung der Welle, (also ihr eigenes Gewicht mit den angehängten) mit u bezeichnet, ist $= \frac{v}{u} \cdot \frac{R}{r}$. Wäre z. B. der Radius der Welle 6 Zoll, der des Zapfens 2 Zoll, die Belastung der Welle 300 Pfunde und brächten 10 Pfund einseitig angehängt soeben die Drehung hervor, so wäre der Reibungswiderstand 60 Pfunde $\left(\frac{10 \cdot 12}{2}\right)$ und der Reibungskoeffizient $\frac{1}{3} = 0,2$ (nämlich $\frac{10 \cdot 12}{300 \cdot 2}$).

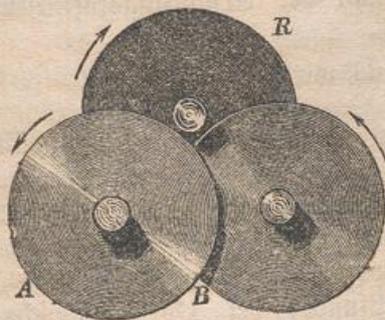
4) Auf ähnliche Weise kann man die Größe der Reibung bei allen Maschinen bestimmen, indem man der Maschine, während sie keinen fremden Widerstand zu überwinden hat, so viele Gewichte anhängt, daß sie eben in Bewegung geräth. Um dieses Gewicht muß die Last vergrößert werden, wenn man die Kraft für das Gleichgewicht bestimmen will. Die Reibung ist bei einer bestimmten Maschine erzeugt durch die Summe der Last und der bewegenden Kraft.

Wenn der Durchmesser eines Rades 8 Fuß, seiner Welle 1 Fuß und des Zapfens 2 Zoll oder $\frac{1}{6}$ Fuß ist, wenn ferner der Wellbaum 80 Pfunde, die angehängte Last 320 Pfund und die angewendete Kraft 40 Pfund beträgt, so ist der Gesamtdruck auf die Zapfenlager $80 + 320 + 40 = 440$ Pfunde. Wäre nun der Reibungskoeffizient

sei ao (Fig. 201) der Radius R einer Welle, co der Radius r ihres Zapfens, mit welchem sie sich auf dem Widerlager mm drehen kann; so ist der Reibungswiderstand w um den Radius r des Zapfens und die an dem Umfange der Welle irgendwie, z. B. durch ein ungelegtes Tau mit Gewichten angebrachte Last um den Radius R der Welle von dem Drehungspunkte o entfernt. Sind die Enden des übergelegten Taus mit gleichen Gewichten kk versehen, so bleibt die Welle selbst ohne Reibung in Ruhe, ist auf der einen Seite noch ein Uebergewicht angebracht, so würde

0,277 (oder wäre, wie es bei Eisen auf Eisen der Fall ist, der Reibungscoefficient 27,7 Prozent der Last), so könnte man sich um den Zapfen ein Seil mit dem Gewichte 0,277 · 440 Pfunde = 111,88 bei weggedachter Reibung geschlungen denken, und das würde dieselbe Kraftänderung zeigen, als wenn man an dem Umfange der Welle die Last um $\frac{1}{6}$ · 111,88 Pfunde = 18,65 Pfunde vermehrte. Es würden also in diesem Beispiele gegen 19 Prozent der angewendeten Kraft zur Ueberwindung des Reibungswiderstandes verbraucht.

5) Friktionsrollen. Bei der Drehung eines Rades um eine Ase ist die Reibung um so nachtheiliger, je weiter die reibenden Stellen von dem Drehungsmittelpunkte entfernt sind, d. h. je stärker die Ase ist. Deshalb sind dünne Aesen vortheilhafter, als dicke. Ferner aber wird die Reibung durch Verminderung der Anzahl der Berührungspunkte der auf einander bewegten Körper verkleinert. Es ist also die Gestalt der Ase wichtig. Eine zylindrische Ase berührt eine ähnlich, aber nur wenig gebogene Unterlage in einem schmalen, länglichen Streifen, und, könnte letztere eine Ebene sein, in einer graden Linie. Lauft aber die Ase in eine kegelförmige Spitze mit einem nicht zu kleinen Winkel aus, welche auf der Innenfläche eines weiteren Hohlkegels ruht, so ist die Menge der Berührungspunkte noch geringer. Ruht endlich die Ase der Rolle



(Fig. 202.)

R (Fig. 202) auf zwei leicht drehbaren Rollen A und B, so berührt sie die letzteren nur sehr wenig und wenn sie selbst in der Richtung des oberen Pfeiles sich dreht, gerathen die Rollen, ohne daß die Ase an ihren Umfänger sich hinschiebt oder irgend bedeutend reibt, in Drehung, wie sie die an ihnen gezeichneten Pfeile angeben; dagegen erleiden die Aesen der Rollen A und B zusammen an der Ase von R eine ebenso große Reibung, wie die Ase von R. Wäre die Reibung ein gewisser Antheil x von ihrer Belastung k , also $x \cdot k$, und somit die Reibung an der Ase jeder der beiden Rollen $\frac{1}{2} x \cdot k$, so könnte dieser Reibungswiderstand nur durch eine ebenso große Kraft aufgehoben werden, wenn sie auch, wie die Reibung selbst, an dem Umfange der Ase angriffe; greift sie aber weiter an, so braucht sie nur in demselben Verhältnisse kleiner zu sein, in welchem ihr Angriffspunkt von dem Drehpunkte sich entfernt. Da nun die Berührungspunkte der Ase von R mit den Umfängen der Rollen die Angriffspunkte der Kräfte sind, welche die Reibung an den Umfängen ihrer eigenen Aesen zu überwinden haben, so wird die Reibung der Ase R um den so vielen Theil herabgesetzt, als es das Verhältniß des Radius R der Rolle zum Radius r ihrer Ase anzeigt, und es ist daher die zur Ueberwindung der Reibung nöthige Kraft für jede Rolle

$\frac{1}{2} \cdot \frac{r}{R} \times k$, also für beide Rollen zusammen $\frac{r}{R} \cdot x k$. Dieser Ausdruck gibt nur insofern einen etwas zu kleinen Werth, als hierbei das Gewicht der beiden Rollen, welches die Reibung um etwas vermehrt, und die Reibung des R an den Berührungsstellen mit A und B vernachlässigt ist. Ist das Gewicht von A und B unbedeutend und die sonstige Einrichtung angemessen, so ist die wirkliche Reibung durch solche sogenannte Friktionsrollen auf ein möglichst geringes Maß zurückgeführt.

6) Wenn bei Maschinen Tauen, Ketten, Riemen angewendet werden, welche wegen ihrer Steifigkeit nicht genau an den Orten angreifen und in der Richtung wirken, welche bei der Berechnung des Erfolges zum Grunde gelegt werden, so liegt darin auch noch ein Hinderniß der Bewegung, welches im graden Verhältnisse mit der darauf wirkenden Last (L), so wie der Dicke (Durchmesser d) der Tauen und im umgekehrten des Durchmessers (D) der Rolle oder Welle steht, um welche das Tau geschlungen ist. Da man hierbei die Erfahrung gemacht hat, daß eine Schnur von 1 Linie Dicke bei einer Last von 1 Pfund an einer Welle von 1 Zoll Durchmesser durch die Steifheit einen Widerstand von 1 Loth oder $\frac{1}{30}$ Pfund leistet, so ist der allgemeine Ausdruck für den Widerstand $\frac{1}{30} \cdot \frac{dL}{D}$. Bei dickeren Tauen wächst der Erfahrungskoeffizient

bis zu 0,2, so daß der Ausdruck $\frac{0,2 \cdot d}{D} \cdot L$ wird.

Ist ein Seil um einen unbeweglichen Zylinder gewickelt, so hält es wegen seiner Reibung um so größere Lasten im Gleichgewichte, je mehr es umgewickelt ist, aber es steigt seine tragende Kraft dabei in auffallender Weise. Wenn man die Reibung nur $\frac{1}{4}$ des Druckes annimmt, so braucht man, um eine Last von 100 Pfunden zu heben, bei einer Umwicklung von 90° , 148 Pfunde, bei 180° Umwicklung 206 Pfunde, bei 360° schon 481 Pfunde, bei 540° 1055 Pfunde, bei 700° 2314 Pfunde, bei drei ganzen Umwickelungen 11131 Pfunde. Es hält also ein sehr geringes Gewicht nach einigen Umwickelungen des Seiles einer sehr bedeutend ziehenden Kraft das Gleichgewicht: bei sechs Umwickelungen ein einziges Pfund 12300 Pfunden.

Wenn aber der Zylinder um seine Axe ganz frei drehbar ist, so bedarf es einer weit geringeren Kraft, weil das angezogene Seil nicht über der Oberfläche desselben fortgezogen zu werden braucht, indem es ihn dreht und der noch vorhandene Widerstand ist fast nur der Steifheit des Seiles beizumessen, welches der Krümmung des Zylinders nicht gleich folgt.

Wie groß aber der gemeinschaftliche Einfluß der Steifheit der Seile und der Reibungswiderstand werden kann, zeigt sich u. a. bei den später noch genauer anzuführenden Flaschenzügen. Bei einem öfters schon ge-

brauchten und gut eingeschliffenen Flaschenzuge mit zwei Kloben, von denen jeder zwei Rollen besaß, hatten die beiden größeren Rollen einen Halbmesser von 23 Linien, die beiden kleineren von 18,5 Linien, die Are 3,5 Lin. An dem unteren Kloben von 10 Pfund Gewicht hingen 50 Pfund, die vier Seile wogen 12 Pfund, also war die Gesamtlast 72 Pfunde. An dem fünften Seile waren 25 Pfunde nothwendig, um eine gleichmäßige Bewegung zur Ueberwindung der Reibung hervorzubringen, ohne Reibung wären nur 18 nothwendig gewesen.

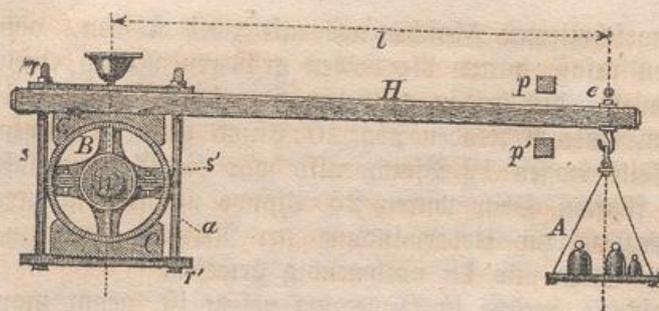
7) Bei einer Maschine, welche in Bewegung gesetzt ist, nennt man das Produkt einer beständigen Kraft und des von ihrem Angriffspunkte in einer gewissen Zeit beschriebenen Weges die Arbeit der Kraft. Wird nun bei der Maschine die Arbeit der Kraft auf einen anderen Angriffspunkt übertragen, so erleidet sie wegen der verschiedenen Reibungswiderstände einen Verlust und der von ihr noch übrig bleibende Erfolg wird der Nutzerfolg oder Nutzeffekt der Maschine genannt. Es muß beim Baue der Maschinen das Bestreben dahin gerichtet sein, den Nutzerfolg möglichst groß zu erhalten. Wie dazu aber unter Umständen die Reibung auch förderlich sein kann, werden wir später sehen.

Der Bremskraftmesser.

Es ist praktisch höchst wichtig, die Größe der Arbeit irgend einer Kraftmaschine, z. B. eines Wasserrades, des Schwungrades einer Dampfmaschine oder einer Gasmaschine, Luftexpansionsmaschine zu bestimmen. Man könnte allerdings wohl auf theoretischem Wege zum Ziele gelangen, wenn man Rechnungen, welche bisweilen ziemlich umständlich sind, nicht scheuen wollte; es ist aber leicht möglich, unmittelbar zum Ziele zu gelangen, wobei sich die in der Rechnung bisweilen nicht mit der nöthigen Schärfe zu berücksichtigenden Hindernisse der Bewegung gleichzeitig geltend machen.

Man könnte zu diesem Zwecke an der Triebwelle der Maschine eine Last anbringen und beobachten, bis zu welcher Höhe dieselbe in einer gewissen Zeit bei der Drehung der Welle gehoben wird. Die Kraft der Maschine ist dann in Fußpfunden, Kilogrammetern oder Pferdekraften darstellbar. Diese Art des Versuches läßt sich aber nicht überall ohne große Unbequemlichkeiten ausführen und deshalb hat man auf ein in jedem Falle anwendbares Mittel gedacht. Man untersucht nämlich, welchen Reibungswiderstand die Arbeitswelle, wenn die Maschine eine bestimmte Arbeit verrichtet, also eine gewisse Geschwindigkeit besitzt, zu überwinden im Stande ist, statt daß sie Gewichte zieht.

In Fig. 203. ist W der senkrechte Durchschnitt der Welle des Arbeitsrades; um sie schließt sich dicht an ein eisernes Rad B, welches aus zwei Hälften besteht, die sich durch die Schrauben ss' und nöthigenfalls durch Keile mit der Welle in feste Verbindung bringen lassen; um



(Fig. 203.)

drücken. Der obere Theil des Rahmens läuft in einen Stab oder Hebel H aus, an dessen Ende e sich eine Wageschale A befindet. Der Rahmen mit den Backen wird die Bremse genannt.

Um nun den Versuch zur Bestimmung der Kraft einer Maschine zu machen, nimmt man ihr die sonst zu leistende Arbeit ab, indem man die anderen Maschinenteile auslöst, dann preßt man zunächst das Rad B an die Welle W so fest, daß es bei jeder Bewegung der Welle mitgenommen werde; und nun zieht man die Schrauben des Rahmens so stark an, daß der Hebel H mit der Wageschale A ohne weitere Belastung und im Ruhezustande der Maschine eine horizontale Lage behält. Wird jetzt die Maschine in den Gang gesetzt, so dreht sich wegen der Reibung des Rades an den Backen der ganze Rahmen mit dem Hebel eben so geschwind herum, als die Aze. Soll dies nicht geschehen, so muß die Wageschale A mit Gewichten belastet werden. Da aber jede Maschine zu einer gewissen Leistung eine gewisse Geschwindigkeit haben muß, so wird man die Schrauben des Rahmens so stark anziehen und dabei durch Versuche die Gewichte so einrichten, daß der Hebel bei der gewünschten Geschwindigkeit eine horizontale Lage behält.

Damit die Reibung den Hebel nicht zu weit mit hinauf und die Gewichte beim Versuche nicht zu weit herabnehme, hat man oberhalb und unterhalb seiner horizontalen Lage zwei sogenannte Fangebalken p und p' angebracht.

Das Rad R läßt sich dann wohl entbehren, wenn die Welle W nicht zu dünn ist.

Zur Beurtheilung der von der Maschine bei ihrer angenommenen Geschwindigkeit auch anderweitig zu leistenden Arbeit ist festzuhalten, daß diese gleich dem jetzt bei dem Versuche überwundenen Reibungswiderstande ist. Es sind hier eigentlich drei Kräfte zu betrachten:

1) die Kraft, mit welcher der im höchsten Punkte des Rades gestützte und bei e mit der Schale versehene Hebel, ohne daß er anderweitig belastet ist, aus der horizontalen Lage zu sinken sucht und deren Moment das Produkt gl ist, wenn g das in e angreifende Gewicht des Hebels mit Schale und l seine Länge ist;

2) die Kraft, welche nach der Belastung der Schale mit den Ge-

die Felge dieses Rades legen sich zwei hölzerne Sättel CC oder Backen genau an, lassen sich innerhalb des Rahmens $r r'$ durch Schrauben an demselben beliebig stark an den Umfang des Rades

wichten k auch in e angreift und dieselbe Entfernung l von dem Stützpunkte des Hebels hat und somit als Moment das Produkt $k \cdot l$ besitzt;

3) der Reibungswiderstand w an dem Umfange des Rades, welcher um den Radius c des Rades von seinem Drehungsmittelpunkte entfernt ist, so daß also das Bewegungsmoment dafür $w \cdot c$ ist.

Soll nun das Gleichgewicht stattfinden, so müssen die beiden ersten Kräfte zusammen der dritten das Gleichgewicht halten oder muß $w \cdot c = g \cdot l + k \cdot l$ oder $= (g + k) \cdot l$ sein, woraus sich für den Reibungswiderstand $w = (g + k) \cdot \frac{l}{c}$ ergibt.

Die von der Maschine unter Festhaltung der beim Versuche angenommenen Geschwindigkeit in einer gewissen Zeit geleistete Arbeit wird endlich gefunden, wenn man den so ermittelten Widerstand w mit dem Wege multipliziert, welchen ein gewisser Punkt der Welle in dieser Zeit zurückgelegt hat. Jeder Punkt des Radumfanges hat nach einer Umdrehung den Weg $2\pi \cdot c = 6,283 \cdot c$, also nach x Umdrehungen den Weg $6,283 \cdot x \cdot c$ zurückgelegt; also ist die während dieser Zeit verrichtete Arbeit

$$(g + k) \cdot \frac{l}{c} \cdot 6,283 \cdot x \cdot c = (g + k) l \cdot x \cdot 6,283.$$

Wenn der Hebel eine Länge von 3 Metern besitzt, sammt der leeren Schale mit 41 Kilogrammen herabzieht, wenn die Belastung der Schale während des Ganges der Maschine 70 Kilogramme beträgt, die Welle in jeder Minute 45, also in einer Sekunde $\frac{45}{60} = 0,75$ Umdrehungen macht, so ist die Kraft der Maschine

$(41 + 70) \cdot 3 \cdot 0,75 \cdot 6,283 = 1564$ Kilogrammometer,
was durch Division mit 75 gegen 21 Pferdekkräfte gibt.

Hätte man die Gewichte nach Pfunden und die Länge des Hebels nach Fußten angenommen, so würde das Resultat Fußpfunde sein und man müßte es mit 500 (für preussisches Maß mit 510) dividiren, um Pferdekkräfte zu erhalten.

Aus dem Begriffe der wälzenden Reibung ergibt sich schon, daß sie viel kleiner sein muß, als die gleitende, wenn in beiden Fällen alle übrigen Umstände dieselben sind, also die Körper gleiches Gewicht, gleiche Beschaffenheit ihrer Oberfläche, die Unterlagen gleiche Lage und auch sonst gleiche Beschaffenheit besitzen.

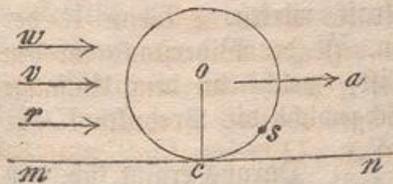


Fig. (204.)

Nehmen wir zunächst eine vollkommen harte und polirte Kugel auf einer eben solchen Ebene, welche horizontal liege; so berühren die beiden Körper, mathematisch betrachtet, einander nur in einem Punkte c (Fig. 204). Läge ein solcher Zylinder auf der Ebene,

so fände die Berührung in einer graden Linie und von jedem kreisförmigen Querschnitte desselben auch in einem Punkte statt. Fände im Berührungspunkte c keine Reibung statt, so würde eine mit m n parallel durch den Schwer- und zugleich Mittelpunkt wirkende Kraft die Kugel so fortbewegen, daß c stets der Berührungspunkt bliebe. Bei der in der Wirklichkeit stets vorhandenen Reibung aber wird der Punkt c der Kugel die Ebene verlassen und die Kugel sich wälzen, wobei wir uns den einfachsten Fall denken wollen, daß ihre Wälzungsaxe mit der Ebene parallel bleibt.

Ist die Wälzung vollkommen, so geht der Punkt c durch die Drehung der Kugel um ebensoviele zurück, als ihr Mittelpunkt vorwärts gelangt. Wirkt eine Kraft in der Richtung des Pfeiles bei w auf die Kugel, so kann c eine schnellere Drehungsbewegung nach rückwärts, als c nach vorwärts bekommen; aber die Drehung nimmt nach und nach ab und es tritt ziemlich bald die vollkommen wälzende Bewegung ein. Wirkt endlich die Kraft in der Richtung des Pfeiles bei r , so kann die Kugel so sich bewegen, daß der Punkt c in der Richtung nach s sich dreht, während der Mittelpunkt in grader Richtung nach a fortgeht. In diesem Falle wird die Drehungsbewegung vermindert und kann sogar in die entgegengesetzte übergehen, so daß der fortrückende Körper auf seinem Wege umkehrt; die fortrückende Geschwindigkeit hat aufgehört und die rückwärts wälzende Bewegung ist noch zum Theil vorhanden. Nur im ersten Falle bringt die Reibung durch Verminderung der Rotationsgeschwindigkeit eine vermehrte Bewegung des Mittelpunktes hervor. Eine vollkommene Wälzung, bei welcher die drehende Bewegung des Berührungspunktes rückwärts genau so schnell, als die Fortrückung des Schwerpunktes vorwärts wäre, findet in der Wirklichkeit nicht statt, weil die Reibung stets diese Stelle, welche kein Punkt ist, zurückhält.

Wenn die von der Kugel in einem einzigen Punkte berührte Ebene gegen den Horizont geneigt ist, so fängt die Wälzung der Kugel schon wegen ihres Gewichtes an. Was von einer Kugel gilt, findet auch von einem Zylinder statt, wenn seine Axe horizontal liegt, und auch von einem kreisförmigen Reifen oder Rade mit ebenso liegender Drehungsaxe.

Bei einem Wagenrade findet an dem Umfange des Rades wälzende, an der Axe gleitende Reibung statt, die beide nach entgegengesetzten Richtungen auf die bewegende Kraft wirken. Wenn K der Halbmesser der Räder, r der von den Axen, W der Widerstand an den Axen und K die entgegenwirkende Kraft ist, welche an dem Umfange des Rades angreift; so sind für das Gleichgewicht die Produkte $K \cdot R$ und $W \cdot r$ einander gleich, also ist $K = \frac{W \cdot r}{R}$. Daraus ergibt sich, daß K um so kleiner wird, je größer R und je kleiner r ist, d. h. je größer

der Radius (oder Durchmesser) des Rades und je dünner seine Aze ist, woraus sich, abgesehen von der Verschiedenheit der Reibung, dünne eiserne Azen als vortheilhafter erkennen lassen, als die wegen der nöthigen Haltbarkeit dickeren hölzernen, und große Wagenräder besser sind, als kleine, wie z. B. an den sogenannten Kollwagen.

Nachdem $W. r$ kleiner oder größer als $K. R$ ist, dreht sich zufolge der äußerlich am Wagen angebrachten Kraft das Rad oder schleift nur auf seiner Unterlage, wie es im Winter auf glatten Schneebahnen und bei großer Belastung, also bei starker Reibung an der Radaxe oder starr gewordener Schmiere öfters vorkommt. Wenn bei einer Lokomotive die Räder nur schleiften, so würde sie nicht im Stande sein, eine Last zu ziehen; ohne angehängte Last wäre in diesem Falle die Dampfkraft gleich der Summe der Reibungswiderstände und mit einer angehängten Last kleiner.

Obwohl die Reibung der Lokomotive an den Schienen oft kleiner ist, als die eines längeren Wagenzuges, so setzt jene diesen doch in Bewegung, weil die nur durch nachgebende Kuppelung verbundenen Wagen bloß nach einander, nicht gleichzeitig in Bewegung gerathen, und das Beharrungsvermögen der vorderen, schon in Bewegung befindlichen, auch die hinteren fortführt. Dies hat aber seine Gränze in der Gleichung zwischen den Reibungen, wie sie das Bewegungsmoment der Maschine einerseits und der sämmtlichen angehängten Wagen andererseits angibt.

Zur Verminderung der Reibung bei der Fortschaffung großer Lasten wendet man als Unterlagen runde Stangen, Zylinder oder Walzen und auch Kugeln an, wenn für sie die Unterlage selbst noch hart und unnachgiebig genug ist, denn in diesem Falle hat die kleine Berührungsstelle der Kugel den ganzen auf ihr lastenden Druck zu ertragen, welchem ein weicherer Körper nicht gewachsen ist. Dicke Walzen sind als Unterlagen besser, als dünne. — Die Schiffer hängen in den Häfen an ihre Schiffe Rollen, um die Reibung mit anderen Schiffen zu vermeiden.

Schmiermittel.

Wenn die festen Körper in trockenem Zustande über einander hin gleiten, so verändern sie ihre Oberflächen je nach ihrer Beschaffenheit in verschiedenem Grade. Die körnigen Körper weniger, als die faserigen; die Metalle werden glatter und statt der verminderten Reibung tritt, namentlich bei größeren Berührungsflächen, die vermehrte Adhäsion als Widerstand ein; die Hölzer und alle faserigen Körper werden rauher und somit die Reibung größer. Unter übrigens gleichen Umständen wird durch das Poliren die Reibung herabgesetzt bei Kupfer und Eichenholz um 0,62 auf 0,17; bei Eisen auf Eiche bis zu 0,08; bei Stahl auf Eis zu 0,15. Um aber beiden Uebelständen zu begegnen und zugleich die bei starker Reibung entstehende Wärme, welche sich bei

Hölzern bis zum Entzünden, bei Metallen bis zum Glühendwerden und Erweichen steigern kann, in einem möglichst geringen Grade aufkommen zu lassen, wendet man Schmiermittel an, d. h. man bestreicht oder begießt die einander reibenden Theile mit einem Stoffe, welcher in die kleinen Vertiefungen der festen Körper eindringt und ihre Oberflächen glatter macht, ohne die Adhäsion zu befördern. Das Schmiermittel aber selbst wird um so besser sein, je weniger es klebrig und zähe ist oder die Neigung hat, theils am festen Körper sich festzusetzen, theils in sich selbst zusammenzuhängen.

Als Schmiermittel wendet man an: fein geriebenen und geschlemmten Graphit, Theer, Talg, Seife, Schweinesfett, fette Oele, Wasser und andere zusammengesetzte Stoffe, namentlich die aus Fett und fein gepulvertem Graphit bestehende Antifrictionschmiere. Für poröse Körper sind die zähen, für Metalle die leicht flüssigen Schmiermittel geeignet; bei Wasserrädern kann man einen feinen Wasserstrahl fortwährend auf die Radaxe leiten; bei Eisenbahnwagen wendet man ein fettes Del an, welches aus einem kleinen Gefäße tropfenweise auf die Radaxen gelangt. Bei Holz auf Holz, Metall auf Metall und bei Holz auf Metall oder umgekehrt, kann man durch das Schmiermittel die Reibung auf $7\frac{1}{2}$ bis 8 Hundertel des Druckes herabsetzen. Da aber die Schmiermittel durch die Reibung selbst Veränderungen erleiden und zähe werden, wodurch sie die Bewegung hemmen, so müssen die Körper von Zeit zu Zeit gereinigt werden.

Wenn die Friktion zwischen Guß und Erz noch 0,25 betrug, so wurde sie durch Del 0,17, Fett 0,11, Seife 0,026, Talg 0,025, Antifrictionschmiere 0,019.

Erfahrungen für das Maß der Reibung.

Da die verschiedenen Körper in Betreff der Beschaffenheit ihrer Oberfläche, ihrer Härte, ihres ganzen Gefüges u. s. w. außerordentlich verschieden sind, so ist es nicht möglich, ein für alle Körper geltendes Gesetz zur Bestimmung der Reibung anzugeben. Unter übrigens gleichen Umständen steht die Reibung harter Körper so ziemlich, namentlich bei großen Belastungen und kleinen Reibungsflächen, mit der drückenden Kraft, welche die Oberflächen der Körper lothrecht gegen einander preßt, in gleichem Verhältnisse, ist aber von der Größe der Oberflächen weniger abhängig, weil bei der vermehrten Anzahl der einander reibenden Punkte der Druck auf gleich große Stellen in demselben Verhältnisse vermindert wird, wenn er nur im Ganzen derselbe geblieben ist. Je härter die Körper sind, von desto geringerem Einflusse auf die Reibung ist die Größe der Berührungsfläche. Wenn auch Schmiermittel die eigentliche Reibung vermindern, so ist doch ihre Anwendung bei großer Berührungsfläche der hervorzubringenden Bewegung weniger

förderlich, da sie das Zusammenhängen der beiden Oberflächen vermehren.

In Betreff der bei der Bewegung stattfindenden Reibung ist zu bemerken, daß unter übrigens gleichen Umständen bei großen Reibungsflächen die Reibung mit vermehrter Geschwindigkeit etwas zunimmt, während sie bei sehr kleinen Reibungsflächen innerhalb ziemlich weiter Grenzen der Geschwindigkeit, nämlich von 0,003 bis 3 Meter für die Sekunde, unverändert bleibt, ja sogar eher abnimmt. Es ist also im Ganzen die Reibung von der Geschwindigkeit wenig abhängig.

Im Allgemeinen ist die Reibung zweier Körper aus demselben Stoffe größer, als die verschiedenartiger, und ist in beiden Fällen von der Zeit, während welcher die Körper in ruhiger Berührung waren, nicht unabhängig. Der Reibungskoeffizient erreicht erst nach einiger Zeit seinen größten Werth: bei Metallen fast sogleich, bei Holz auf Holz nach einigen Minuten, bei Holz auf Metall sogar erst in einigen Tagen. Es ist also bei Körpern, die längere Zeit mit einander in Berührung gewesen sind, die Reibung bei beginnender Bewegung größer, als während derselben, so daß man nach einigem Stillstande einer größeren Kraft bedarf, um die Bewegung wieder anzufangen, als die war, welche vorher angewendet wurde. Die Reibung kann während der Bewegung so groß sein, daß ein weicherer Körper (Kupfer, Eisen) einen härteren und ruhenden abzuschleifen im Stande ist.

Der Reibungskoeffizient läßt sich für die verschiedenen Fälle und Körper nur durch die Erfahrung finden und wir wollen nun darüber Einiges angeben.

Wenn Eichenholz auf eben solchem nach der Richtung der Fasern geschleift wird, so war der Koeffizient 0,42. Bei einer größeren Reibungsfläche war für einen bis zu 2474 Pfunden steigenden Drucke die Reibung kaum halb so groß, wenn man die Berührung nur einen Augenblick dauern ließ, in Beziehung auf die nach einiger Zeit erst erlangte volle Stärke; bei einer kleinen Reibungsfläche und demselben Drucke war der Einfluß der Berührungszeit unmerklich. Gesah die Bewegung des als Unterlage dienenden Eichenholzes mit seinen Fasern quer gegen die Fasern des festliegenden Tisches, so war der nach einiger Berührungszeit hervorgehende höchste Werth des Reibungskoeffizienten nur 0,27, also viel kleiner, als der vorige, weil bei Kreuzung der Fasern nicht ein so starkes Ineinandergreifen der kleinen Unebenheiten stattfinden kann, als bei der parallelen Richtung.

Bei Holz und Metall ist die längere Berührungszeit von auffallendem Einflusse. Eine Last von 1650 Pfunden auf Unterlagen von Eisen über Eichenholz nach der Richtung der Fasern gezogen, verlangte nach einer Berührungszeit von $\frac{1}{2}$ Sekunde nur 125 Pfunde Kraft, nach 80 Sekunden schon 145 Pfunde, nach 16 Stunden 280 Pfunde, und nach 4 Tagen gar 340 Pfunde, so daß der Reibungskoeffizient

zwischen 0,08 und 0,2 mit zunehmender Berührungszeit wächst. — Bei Metallen dagegen ist die Berührungszeit von geringem Einflusse, die durch wiederholten Gebrauch vermehrte Politur wirkt bei kleinen Berührungsflächen günstig und kann den Koeffizienten von 0,26 auf 0,17 herabsetzen.

Bei der Anwendung von Schmiermitteln auf Holz nimmt die Reibung während einer auffallend langen Zeit zu. Wenn man eine Seifenschicht von $\frac{1}{2}$ Linie Dicke bei größeren Reibungsflächen anwendete, so erreichte die Reibung, selbst wenn die Bestreichung nach mehrmaligem Gebrauche abgeglättet war, erst nach 6 Tagen ihren größten Werth: bei 3250 Pfunde Druck betrug sie im ersten Augenblicke 120 Pfunde, nach 1 Minute 413 Pfunde, nach 1 Stunde 880 Pfunde, nach 5 Tagen 1200 bis 1550 Pfunde. Bei einer sehr kleinen Reibungsfläche erlangte die Reibung sehr bald ihre größte Stärke.

Metallflächen zeigen auch mit Anwendung von Schmiermitteln keine große Verschiedenheit bei ungleicher Dauer des Druckes, indem die Reibung etwa nur von 0,09 bis 0,10 steigt.

Ist die Bewegung eingeleitet, so ist zu ihrer Fortsetzung nur eine Kraft erforderlich, welche die Reibung überwindet. Die Reibung während der Bewegung bei Eichenholz auf Eichenholz ist ziemlich genau 0,105 und mit gekreuzten Fasern nicht viel geringer, als bei parallelen, doch beträgt sie bei geringerer Belastung einen größeren Theil des Druckes, was wohl von der Beugung der Fasern herührt. — Wenn Eisen auf Eichenholz mit geringer Geschwindigkeit sich bewegt, so beträgt die Reibung etwa 0,18 des Druckes, bei größerer Geschwindigkeit etwas mehr. Wird das Eichenholz mit Seife bestrichen und über Eichenholz fortgezogen, so beträgt der Reibungskoeffizient nur 0,037; wird aber der Druck dabei vermindert, so nimmt er zu, weil die Adhäsion dann merklicher wird (welche auf 180 Quadratzoile 5 Pfunde beträgt), während sie bei starkem Drucke gegen den dem Drucke verhältnismäßigen Theil fast nicht in Betracht kommt.

Stählerne Axen in kupfernen Büchsen geben 0,15 bis 0,19 bei allen stärkeren Belastungen als Reibungskoeffizient, während er bei schwachen etwas größer ist. Bei Anwendung von feiner Seife geht er sogar bis auf 0,09 herab. Die gleitende Reibung der Axen in ihren Büchsen ist im Allgemeinen etwas kleiner, als die ebener Flächen über einander.

Auch über die wälzende Reibung sind hinreichend Versuche angestellt. Eine Scheibe aus Tannenholz von 22 Zoll Umfang rollte auf einer schiefen Ebene für alle Neigungswinkel bis zu 21° genau mit vollkommener Wälzung herab und erst bei 50° Neigung konnte, da hier die gleitende Reibung etwas mehr als $\frac{1}{3}$ betrug, eine Abweichung von der vollkommenen Wälzung ziemlich merklich werden. Bei lothrechtter Stellung der Ebene hört natürlich die Wälzung ganz auf.

Eine Walze von Goujakholz auf Eichenholz fortgewälzt, zeigte bei 6 Zoll Durchmesser eine Reibung von 0,006 des Druckes und bei 2 Zoll Durchmesser 0,018; also ist die wälzende Reibung, wie es als gesetzmäßig angegeben worden ist, wirklich im umgekehrten Verhältnisse des Durchmessers vorhanden.

Ein nur oberflächlich eben gemeißelter Steinblock von 1080 Pfunden wurde zuerst auf der Felsenfläche des Steinbruches mit 758 Pfunden Kraft fortgeschleppt; dann legte man ihn auf einen Bretterschlitten und zog ihn auf einer hölzernen Unterlage fort mit 606 Pfunden, so daß der Reibungskoeffizient 0,56 beträgt; darauf wurden beide Holzflächen mit Seife bestrichen und man bedurfte nun bloß 182 Pfunde Kraft (Reibungskoeffizient 0,17); endlich legte man den Stein auf Walzen von 3 Zoll Durchmesser, welche auf einem Bretterboden sich befanden und die Kraft zum Fortziehen des Steines betrug nur 28 Pfunde, folglich die wälzende Reibung 0,026.

Wie vortheilhaft schon das bloße Einseifen ist, zeigt sich auch, wenn man Schiffe vom Stapel läßt.

Wenn bei Eisenbahnwagen die gleitende Reibung an den Büchsen bei guter Schmiere 0,035 (im Mittel freilich höher) gerechnet wird, so ist die wälzende an den Rädern nur 0,00032 von der Last gefunden worden.

Das Zugvieh hat auf einer genau horizontalen Straße nur die Reibungswiderstände zu überwinden. Wäre ein Weg so gut geebnet, daß ein Lastwagen auf ihm, wenn er auf 36 Fuß Länge 1 Fuß Steigung hat, von selbst herabrollte und somit die Reibung von der gleitenden (respektiven) Kraft überwunden würde, so wäre zur Fortschaffung des Lastwagens auf einem solchen horizontalen Wege nur $\frac{1}{36}$ seiner Last erforderlich, so daß 100 Pfunde Kraft eine Last von 3600 Pfunden in Bewegung setzen würden. Aber beim Schleifen der Last auf einem solchen Wege oder beim Fahren auf einem Sandwege beträgt die Reibung wohl die Hälfte bis 0,8 der Last, bei Schlitten auf guter Schneebahn nur $\frac{1}{2,5}$.

Auf weichen Wegen wächst der durch das Einschneiden der Räder erzeugte Widerstand in einem größeren Verhältnisse, als die Last, und daher ist es vortheilhaft, dieselbe auf mehre Wagen zu vertheilen. Bei gleichem Gewichte einer Last sammt den Wagen ziehen 8 Pferde auf 8 Wagen ebensoviel, als 16 Pferde auf einem Wagen. Die Tiefe des Einschneidens eines bestimmten Wagens hängt im graden Verhältnisse von der Weichheit des Weges und im umgekehrten der Breite der Radsfelgen ab. Vierrädrige Wagen sind besser, als zweirädrige Karren bei derselben Belastung.

Wollte man die Reibung auf Eisenbahnen nur $\frac{1}{10}$ von der auf Kunststraßen rechnen (was ohngefähr so ist, wenn man das Verhältniß der Reibungskoeffizienten 0,003 zu 0,027 annimmt), so würde auf

horizontaler Bahn die Kraft nur $\frac{1}{360}$ von der Last sein und man könnte mit 100 Pferden Kraft eine Last von 36000 Pfunden in Bewegung setzen; man nimmt aber die Reibung im Mittel gewöhnlich auf $\frac{1}{200}$ der Last an.

Wenn der Reibungskoeffizient für eine gute Chaussée 0,037 ist, so würde ein Pferd zum Ziehen von 1000 Pfunden gegen 37 Pfunde Kraft verwenden müssen; ist aber der Reibungskoeffizient bei Eisenbahnen mit gewölbten Schienen nur 0,004, so bedarf man zu 1000 Pfunden nur 4 Pfunde, und rechnet man eine Pferdekraft zu 500 Pfunden, so würde sie im Stande sein, 125 mal 1000 oder 125000 Pfunde in Bewegung zu setzen, wenn die Reibung sich gleich bliebe mit der Vergrößerung der Last. — Gußeiserne Räder auf ebenen Gußeisenschienen haben 0,018 und Wagenräder auf sandigem Wege 0,13 als Reibungskoeffizient.

Die Eisenbahnen lassen keine bedeutenden Steigungen zu, weil die gleitende Kraft die Reibung an den Schienen bald übertrifft, wobei besonders das bedeutende Gewicht der Eisenbahnwagen zu berücksichtigen ist, denn auf derselben schiefen Ebene wird ein leichterer Wagen mit geringerer Kraft herabrollen, als ein schwererer, und zwar im graden Verhältnisse des Gewichtes. — Ist der Reibungskoeffizient sehr klein, so muß die Kraft zum Hinaufziehen einer Last auf einer schiefen Ebene sehr bedeutend wachsen, wenn auch der Neigungswinkel nur um Weniges zunimmt. Wäre der Reibungskoeffizient 0,00625 (oder $\frac{1}{160}$), so müßte für eine Steigung von 9 Fuß auf 1000 Fuß (Neigungswinkel 1°) die Kraft schon zum $2\frac{1}{2}$ fachen wachsen gegen die auf horizontaler Bahn nothwendige. Brauchte man auf horizontalem Wege nur den 380sten Theil der Last, so müßte man bei 1 Fuß Steigung auf 380 Fuß die Kraft schon verdoppeln. Wäre aber der Reibungskoeffizient 0,04 (oder $\frac{1}{25}$), so müßte die Zugkraft bei $17\frac{1}{2}$ Fuß Steigung auf 1000 Fuß nur bis zum $1\frac{1}{2}$ fachen vergrößert werden.

Die Verminderung der Reibung gewährt also nur bei ganz horizontalen Bahnen den größten Vortheil, und da man bei Pferde-Eisenbahnen dem einen Pferde so viel zu ziehen zumuthet, als es auf einer horizontalen Bahn fortbringen kann, so müßte man bei 7 Fuß Steigung auf 1000 Fuß schon 2 Pferde vorspannen.

Die folgende Tabelle enthält die Reibungskoeffizienten für einige wichtige Fälle mit einigen Abweichungen anderer Beobachter.

Eisen auf Eisen (0,138)	0,277	Kiefern auf Kiefern (Tannen) . .	0,562
" " Messing	0,263	Wege mit losem Sande	0,227
" " Kupfer	0,170	Frisch beschüttete Chausséen . . .	0,134
Gußeisen auf Bronze	0,147	Landwege	0,103
Eichenholz auf Eichen quer (0,32)	0,273	Fester Wiesenboden	0,040
" " " lang (0,48)	0,418	Gute Chausséen	0,027
Eichen auf Gußeisen	0,372	Eisenbahnen	0,003
" " Kiefern (Tannen)	0,667		

Um also z. B. 100 Pfunde Eisen auf Eisen zu bewegen, ist eine Kraft nothwendig, welche 27,7 Pfunde zu heben im Stande ist. — Nach diesen Untersuchungen würden bei Wagen eiserne Radaxen in bronzenen Naben Futterern das Vortheilhafteste sein. Ueberhaupt ist im Allgemeinen die Reibung zwischen gleichartigen Körpern größer, als die zwischen ungleichartigen. — Bei feinen Wagen läßt man stählerne Zapfen auf gut polirten harten Steinen, wie z. B. Achaten, sich bewegen. Ebenso bei Pendeln, welche lange und gut schwingen sollen.

Vortheile und Nachtheile der Reibung.

Die Reibung ist in einer doppelten Beziehung zu berücksichtigen: einerseits erleichtert sie uns die Erhaltung der Ruhe, andererseits erschwert sie die Bewirkung der Bewegung. Für die Ruhe ist sie ein Vortheil, für die Bewegung ein Hinderniß, und es fragt sich nur, was wir bezwecken, um in ihr einen Vortheil oder Nachtheil zu erkennen: wollen wir aus der Bewegung die Ruhe haben, so gewährt sie uns Vortheil, wollen wir aus der Ruhe die Bewegung erhalten, so ist sie nachtheilig. Bei der Verwerthung von Kräften durch Maschinen bringt sie sowohl Nachtheile, als Vortheile, jene aber in höherem Maße.

Denken wir uns einmal einen Augenblick alle Reibung zwischen den Körpern fort, so würde selbst auf einer vollkommen horizontalen Ebene der leiseste Anstoß hinreichend sein, den schwersten Körper in Bewegung zu setzen, und das Beharrungsvermögen würde ihn in der durch die angewendete Kraft ertheilten Geschwindigkeit in alle Ewigkeit erhalten. Der leiseste Luftzug würde hinreichend sein, alle Körper in Bewegung zu setzen, so daß sie in wilder Verwirrung durch einander stürzen würden. Diese Bewegung würde auch ohne äußeren Anlaß eintreten, wenn sich die Körper auf einer selbst äußerst wenig geneigten Ebene befänden. Es wäre uns selbst absolut unmöglich, auf einer schiefen Ebene auf- und abwärts zu gehen; auf recht glatter, horizontaler Ebene wird uns ja das Laufen wegen der geringen Reibung schon sehr erschwert. Ohne alle Reibung würde man auch auf der horizontalen Ebene nicht gehen, reiten oder fahren können; man könnte nichts mit den Händen oder einer Zange anfassen; die Nahrungsmittel würden uns entchlüpfen; man würde keinen Knoten machen können, die Fäden der Gewebe würden auseinander gleiten, die Nägel würden nicht fassen, die Keile nicht eindringen, die Schrauben nicht anziehen. Doch, wir wollen das trostlose Bild der Verwirrung in der irdischen Welt, welches sich ohne Reibung zeigen würde, nicht weiter ausmalen, sondern uns lieber zu den wirklichen Thatsachen wenden.

In Betreff der Schrauben ist noch zu bemerken, daß die Reibung bei ihnen gestattet, jede andere Kraft wegzunehmen, wenn es blos auf

ein Erhalten der Last ankommt. Hat man mit einer Schraube auch eine bedrückende Last hinaufgeschraubt, so dreht sich dieselbe nicht zurück, wenn man losläßt, sondern die Gänge klemmen sich aneinander so fest, daß man zum Erhalten der Last weiter gar keine Kraft nöthig hat. — Von großem Nutzen ist uns die Reibung beim Herablassen und beim Freihalten einer großen Last oder wenn man die Bewegung eines massigen Körpers, z. B. eines Schiffes, allmählig vermindern will. Hat man eine um ihre Ase drehbare Welle und schlingt man ein Seil mehre Male um sie, so kann man wegen der Reibung des Seiles an dem Umfange der Welle an dem Seile eine bedeutende Last mit einer geringen durch die Reibung unterstützten Kraft entweder in der Schwebe halten oder auch langsam herablassen, indem sich dann die Welle dreht. Ist die Welle nicht drehbar, so kann man das Seil weniger oft umschlingen und es allmählig loslassen, ohne die Umwicklung aufzugeben, wobei sich das Seil an dem Umfange der Welle schleift. Dies benutzen die Schiffer häufig, um ihre Schiffe beim Landen allmählig anzuhalten. — Die Reibung der Taue an den Rollen der Flaschenzüge gestattet es auch, große Lasten mit einer geringeren Anstrengung schwebend zu erhalten, als es ohne dieselbe der Fall sein würde.

Die Reibung ist nur nachtheilig, insofern sie den verlangten Uebergang eines Körpers aus dem Zustande der Ruhe in den der Bewegung erschwert und die Geschwindigkeit des bewegten verzögert und allmählig schon aufhebt, wenn wir noch Bewegung zu haben wünschten.

Auch bei Maschinen bringt die Reibung mehr Vortheile als Nachtheile. Ohne sie würde es sehr schwierig, wenn nicht unmöglich sein, eine in Bewegung befindliche Maschine, z. B. eine Windmühle, zum Stillstande zu bringen. Durch Schnuren, Riemen, Ketten, welche man um Scheiben legt, trägt man die Bewegung eines Maschinentheiles auf einen anderen, oft sehr entfernten, aber bequem gelegenen über, was man Transmission nennt. Beim Herabfahren von steilen Wegen hemmen die Fuhrleute, indem sie entweder unter eines der Räder einen mittelst einer Kette am Wagen befestigten Hemmschuh schieben oder ein Rad ankettet, damit es sich nicht drehe, sondern auf dem Wege nur schleife, oder endlich an die beiden Hinterräder eine dicke Stange oder einzelne Holzstücke mittelst einer Schraube u. dergl. anklemmen, damit die Räder sich nicht so schnell drehen können. — Auf den Eisenbahnen nennt man das Hemmen mittelst kreisbogenförmig ausgehöhlter Holzstücke, welche an die Räder ziemlich stark angeschraubt werden, Bremsen. — Die durch den Dampf gedrehten Triebräder der Lokomotive sind nur dann im Stande, auf der festen Unterlage eine wälzende Bewegung anzunehmen, wenn die Reibung an den Rädern und Schienen größer ist, als an den Radaxen, erstere wächst bei zunehmendem Gewichte der Lokomotive verhältnißmäßig mehr, als letztere.

Um auf der Violine und ähnlichen Instrumenten leicht Töne er-

zeugen zu können, müssen sowohl die Saiten, als auch der Haarbogen rauh sein, was man durch Bestreichen des Bogens mit Kolophonium erreicht, wodurch dann die Saite ihre Glätte auch verliert. — Die Seil- und anderen Tänzer bestreichen sich die Schuhsohlen mit Kreide; bei Glattteis streut man Sand oder Asche, was auch auf Eisenbahnen vortheilhaft ist. — Nur durch die Reibung ist es möglich, daß man Gegenstände, welche pulverisirt worden sind oder in kleinen Körnern vorkommen, wie Mehl, Sand, Hirse, Korn, Weizen, Erbsen, Linsen, Delfrüchte u. s. w. kegelförmig aufhäufen kann, wobei sie, je nach dem Grade ihrer Reibung, mit ihrer Seitenfläche einen bestimmten Winkel gegen die Grundfläche bilden. — Ohne Reibung würde man Instrumente nicht schärfen und poliren können.

Wie weit es in letzterer Beziehung und der damit zusammenhängenden Verminderung der Reibung die praktische Mechanik gebracht hat, davon führt der Astronom Bessel in seiner Schrift über die Länge des einfachen Sekundenpendels ein auffallendes Beispiel an. Ein massiver Zylinder paßte in einen hohlen, auf der einen Seite geschlossenen, von Glockenmetall so gut, daß, wenn er jenen in diesen steckte, die darin enthaltene Luft nicht entweichen konnte, sondern sich zusammendrücken ließ, und daß er dennoch eine ihm ertheilte Umdrehung in dieser Lage einige Minuten fortsetzte. Hierbei war unstreitig ein Spielraum zwischen den beiden Zylinderflächen, welcher nicht leer sein konnte, sondern Luft enthielt, und es ist diese Thatsache ein neuer Beweis davon, daß die festen Körper an ihrer Oberfläche eine Schicht verdichteter Luft besitzen, welche mit Hartnäckigkeit an ihnen haftet, indem sie in diesem Falle durch die vom massiven Zylinder zusammengepreßte Luft nicht verdrängt werden konnte.

Die Reibung flüssiger Körper gegen feste.

Wenn Wasser in offenen Gerinnen oder in abgeschlossenen Röhren, ebenso wenn Leuchtgas in Röhren fortgeführt wird, so erleiden sie zufolge der Reibung an den Wänden der festen Körper eine Verzögerung. Dasselbe gilt natürlich von allen übrigen Flüssigkeiten, wenn sie auch weniger oft angewendet werden. Das Fließen tropfbarer Körper in offenen Gerinnen wird durch ihr Gewicht, in geschlossenen Röhren durch den hydrostatischen Druck und das luftiger nur durch den mit ihrer Spannkraft verbundenen Druck hervorgebracht. Es zeigen aber verschiedene Flüssigkeiten gegen dieselben festen Körper, so wie dieselbe Flüssigkeit gegen verschiedene feste Körper und endlich auch dieselbe Flüssigkeit je nach ihrer Temperatur gegen einen bestimmten festen Körper ein verschiedenes Verhalten.

Durch Glasröhren fließt Wasser leichter, als Quecksilber, und letzteres hört bei geringem Drucke und engen Röhren sogar auf zu fließen,

während ersteres noch hindurchgeht. Wasser hat zu Glas mehr Anziehung (Adhäsion), als Quecksilber, und deshalb wird ersteres gleichsam durchgesaugt. — In gleicher Weise zeigt dieselbe Flüssigkeit, z. B. Quecksilber, ein verschiedenes Verhalten, jenachdem sie Kapillarattraktion oder Depression gegen sie zeigt. — Durch eine Röhre von bestimmter Weite und Länge fließt in einer gewissen Zeit mehr warmes Wasser durch, als kaltes, und bei Röhren von geringer Weite kann der Unterschied so bedeutend werden, daß 3 bis 4 mal mehr Wasser von 100° C. oder 80° R. als von 0° Temperatur durchfließt. Dies scheint ein Widerspruch zu sein gegen die früher angeführte Thatsache, daß Vermehrung der Temperatur die Haarröhrenanziehung vermindert, nicht aber gegen die obige Erscheinung, daß bei der geringeren Anziehung des Quecksilbers auch die Ausflußmenge vermindert wird. Wir werden zur Lösung dieses Widerspruches wohl annehmen dürfen, daß die Wärme, weil sie die Körper ausdehnt, auch leichter flüßig macht, und die Reibung im Inneren, welche das Fließen hindert, mehr aufhebt. Bei Alkohol tritt mit Verminderung der Temperatur bis 110° Kälte ein Zustand von Zähigkeit ein, so daß er nur wie Del flüßig ist.

Fließt Wasser in einem offenen Bette mit Gefälle, so sollte sich seine Geschwindigkeit eigentlich beschleunigen, weil die Schwere fortwährend bewegend auf dasselbe einwirkt; aber die Geschwindigkeit ist nicht nur kleiner, als es das Gefälle verlangt, sondern sie kann selbst eine ziemlich gleichmäßige werden, weil es sich an dem Boden und den Seitenwänden des Bettes reibt und die Kohäsion der Wassertheilchen im Innern des Gewässers, so wie selbst die Reibung an der Luft hindernd einwirkt. Daher ist auch in einem Flußbette die Geschwindigkeit des Wassers am größten gegen die Mitte unterhalb seines Spiegels und es steht in der Mitte wegen des geringern Widerstandes etwas höher, als an den Ufern. Bei einem graden Kanale ist die mittlere Geschwindigkeit des Querschnittes 0,8 von der größten Geschwindigkeit. Es ist also auch natürlich, daß bei einer bestimmten Wassermenge und einem bestimmten Gefälle die Geschwindigkeit mit der Breite des Bettes oder des Gerinnes abnehmen muß. Will man sich des Wassers als einer bewegenden Kraft bedienen, so muß man darauf bedacht sein, ihm eine möglichst große Geschwindigkeit zu geben, unmittelbar ehe es zur Wirksamkeit gelangt. Je kleiner der Umfang des benetzten Querschnittes im Vergleiche zu seinem Flächeninhalte ist, desto vortheilhafter ist das Gerinne: ein Halbkreis ist vortheilhafter, als ein halbes Quadrat, dieses besser, als ein halbes regelmäßiges Sechseck u. dergl.

Die Reibung des Wassers am Flußbette ist auch der Grund von der Erweiterung desselben; je schneller das Wasser fließt, desto mehr spült es von diesem ab, und setzt den Sand und Schlamm an den langsamer fließenden Stellen ab. Machen also Flüsse Biegungen, so ist das Ufer von der äußeren (oder konvexen) Seite derselben steiler, als

an der inneren. Es ist natürlich, daß Verengungen der Flußbette die Geschwindigkeit des Wassers vergrößern und auf diese Weise bewirken, daß das Bett mehr ausgetieft wird. Wenn daher ein Fluß für die Schifffahrt nicht mehr das nöthige Fahrwasser darbieten will, so baut man vom Ufer aus Wuhnen, d. h. Dämme aus Strauchwerk, Erdboden und Steinen ins Bett. Die Wuhnen dienen zugleich dem Ufer zum Schutze gegen das weitere Ausspülen desselben, weil sich das Wasser an ihnen stößt und nur sehr abgeschwächt ans Ufer selbst gelangen kann. Wuhnen, die gegen die Verbreiterung des Flusses gerichtet sind, hindern natürlich auch die Verflachung. Bisweilen wird es nothwendig, die Flüsse vollständig einzudämmen, um die nöthige Tiefe, unter Umständen auch Geschwindigkeit (bei Mühlen z. B.) zu erhalten und Ueberschwemmungen zu erschweren oder zu verhindern.

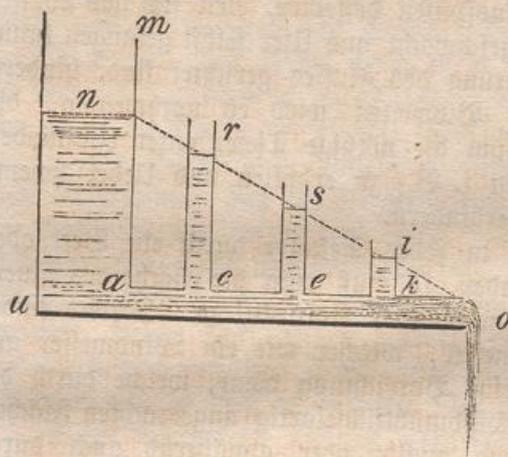
Will man die Menge des in jeder Sekunde durch ein Bett oder Gerinne abfließenden Wassers finden, so muß man die Fläche des Querschnittes mit der mittleren Geschwindigkeit multiplizieren. Letztere findet man durch einen sogen. Strommesser, welcher wie ein Windmesser angefertigt sein kann, wozu auch eine Vorrichtung dient, welche durch die Schnelligkeit der Drehung von windmühlflügelartig angebrachten Flächen die Geschwindigkeit der Strömung angibt oder annähernd auch durch die Bestimmung der Geschwindigkeit von Gegenständen, welche man auf der Wasseroberfläche schwimmen läßt.

Ist Wasser in Röhren einem Drucke ausgesetzt, indem es mit einem höher gelegenen Wasserbehälter verbunden ist, so ist dieser Druck im Ruhezustande auf gleich große Stellen, welche in derselben horizontalen Richtung liegen, gleich groß; wenn aber das Wasser durch solche Röhren fließt, so wird der Druck auf die Röhrenwand um so kleiner, je näher man der Ausflußstelle kommt, oder je weiter das Wasser in der Röhre bereits geflossen ist, und in demselben Verhältnisse wird auch die Geschwindigkeit des fließenden Wassers kleiner, bis sie endlich bei einer gewissen Länge der Röhre Null wird, so daß das Wasser nicht mehr in einem bogenförmigen Strahle herausströmt, sondern an der Röhrenmündung lothrecht herabfällt. Die Länge der Röhre aber, bei welcher dieses stattfindet, ist noch von der Weite derselben abhängig; denn das Wasser wird sich an den Wänden einer engen Röhre mehr reiben, als an denen einer weiten, indem die Wassermenge in der engen Röhre im Verhältnisse zur Reibungsfläche kleiner ist, als in der weiten, und somit der Widerstand in jenem Falle größer, als in diesem. Endlich aber wird eine glatte Porzellanröhre einen kleineren Reibungswiderstand darbieten, als eine unglasirte Thonröhre oder als eine raue Eisengußröhre.

Wenn für den letzteren Fall, wie er bei Wasserleitungen in Städten meistens vorkommt, die Länge der Röhre l , ihr Durchmesser d und die drückende Kraft k heißt, so gibt Prony für die in Metern

ausgedrückte Geschwindigkeit des ausfließenden Wassers den Ausdruck $g = 26,79 \sqrt{\frac{dk}{l}}$ an.

In welcher Weise der Druck des Wassers auf die Röhrenwände durch die Ueberwindung des Reibungswiderstandes und der Adhäsion geschwächt wird, kann man leicht erkennen, wenn man vom Boden eines



(Fig. 205.)

ausgangspunkte a der Röhre a o die grade Verbindungslinie nach der Mündung o zieht: das Wasser steigt nur bis zu dieser Linie.

Fließt aber das Wasser bei o noch mit einer gewissen Geschwindigkeit aus, so kann es in den Röhren nicht so hoch steigen. Je größer die Geschwindigkeit des Wassers in der Röhre ist, desto geringer ist sein Druck auf die Röhrenwände, und wir sehen auch hier die früher schon bei der Bewegung der festen Körper aufgestellte Behauptung bestätigt, daß die Kraft eines bewegten Körpers sich um so mehr in der Richtung seiner Bewegung geltend macht und die Schwere (hier den Druck) überwindet, je größer die Geschwindigkeit ist. Ist die Ausflußgeschwindigkeit bei o z. B. noch $\frac{1}{4}$ von der theoretischen, d. h. von der, wie sie ohne Reibung stattfinden würde, so muß die Röhre dicht am Boden des Gefäßes als Seitendruck noch $\frac{3}{4}$ aushalten und in der dort befindlichen Aufsatzröhre e r muß dann das Wasser noch bis auf $\frac{3}{4}$ der Druckhöhe steigen. Wenn die Röhre e s im Halbierungspunkte der a o aufgesetzt ist, so ist von e bis o nur noch die Hälfte der Reibung zu überwinden und das Wasser kann in e s nur halb so hoch, als in e r steigen.

Aus diesen Betrachtungen ergibt sich, wie in den zum häuslichen Gebrauche vorhandenen Wasserleitungen die Kraft und Geschwindigkeit des ausfließenden Wassers verschieden ist, je nach dem anderwärts in Anspruch genommenen Gebrauche der Leitung.

Um bei Sprin. strahlen die Höhe möglichst zu vergrößern, muß

Gefäßes m u (Fig. 205) aus eine so lange Röhre a o gehen läßt, daß an ihrer Mündung das Wasser ohne Seitendruck ausfließt und auf dieser Röhre an verschiedenen Stellen lothrechte Aufsatzröhren, wie e r, e s, e k anbringt; so wird das Wasser in ihnen um so weniger hoch steigen, je näher sie der Mündung o sind. Die Steighöhen bekommt man, wenn man von dem Niveau n des Druckwassers im Gefäße lothrecht über dem An-

man den Leitungen so wenig als möglich Biegungen geben, weil das Wasser durch den an ihnen erlittenen Stoß seine Geschwindigkeit vermindert, namentlich, wenn die Wendungen unter kleinen Winkeln geschehen; sind sie nicht zu vermeiden, so muß man sie so flach als möglich machen, wenn auch der Weg dadurch etwas länger ist. Ferner ist es zur Verminderung der Reibung gut, an dem Ende der Leitung, wo die eigentliche Springröhre aufgesetzt wird, nur eine dünne Platte aufzulegen.

Wenn Wasserleitungen nicht grade fortgehen, sondern abwechselnd steigen und fallen, so bringt man an den höchsten Stellen sogenannte Windstöcke an und an den tiefsten Wechselhäuschen, um durch jene die etwa sich ansammelnde Luft, durch diese den Schmutz abzulassen.

Wie das Wasser, erleidet auch die Luft bei ihrer Bewegung in Röhren, wie z. B. in Leuchtgasleitungen, und überhaupt an anderen Körpern einen Reibungswiderstand. Um ihn zu überwinden, wird ein Theil der Spannung des zusammengedrückten Gases verwendet und dieser Theil geht dann für die Geschwindigkeit verloren. Der Reibungswiderstand nimmt um so mehr ab, je mehr man sich dem Ende der Röhre nähert, je geringer die Geschwindigkeit und je größer der Durchmesser der Röhre ist, so daß er mit der ganzen Länge der Röhre und dem Quadrate der Geschwindigkeit in gradem und mit dem Durchmesser der Röhre im umgekehrten Verhältnisse steht.

Die Ausflußgeschwindigkeit ist um so kleiner, je dichter das Gas ist. Wenn die Geschwindigkeit für atmosphärische Luft gleich 1 gesetzt wird, so ist sie nach genauen Versuchen bei einem gleichen Drucke für Sauerstoff 0,950, Kohlenäure 0,812, Kohlenwasserstoffgas 0,1332, Wasserstoffgas 3,613. Durch enge Oeffnungen geht Wasserstoff am leichtesten, Sauerstoff am schwersten. Ueberhaupt aber verhalten sich die Ausflußgeschwindigkeiten unter übrigens gleichen Umständen wie umgekehrt die Quadratwurzeln der spezifischen Gewichte: verhalten sich die letzteren z. B. wie 9:4, so verhalten sich die Geschwindigkeiten wie 2:3. Wenn die Luft in einen luftleeren Raum strömt, so ist ihre Geschwindigkeit unabhängig von dem Drucke, welchen sie erleidet, weil dieser mit der Dichtigkeit in gradem Verhältnisse steht, und sie beträgt 1217,4 Fuß. Strömt aber Luft in einen Raum mit Luft von geringerer Spannung, so ist die Ausflußgeschwindigkeit von dem Unterschiede beider Spannungen abhängig. Der Unterschied der Spannungen wird gewöhnlich (z. B. bei den Gasometern) durch die Höhe einer Wassersäule angegeben. Um der Luft eine Geschwindigkeit von 50 Metern oder 158 Fuß, also eine größere, als sie die heftigsten Orkane besitzen, zu geben, ist eine Druckdifferenz von 18 Centimetern oder 82,6 Linien erforderlich.

Die Ausflußmenge nimmt unter übrigens gleichen Umständen, d. h.

bei einer gewissen Röhrenweite und einem gewissen Drucke auf die Luft in der Art mit der Länge der Röhren zu, daß die Menge des Gases bei 4, 9, 16, 25 . . . mal längeren Röhren 2, 3, 4, 5 . . . mal geringer ist. (Die Mengen des ausfließenden Gases verhalten sich wie umgekehrt die Quadratwurzeln aus den Röhrenlängen.) —

Sollen Schornsteine oder sogen. russische Röhren bei übrigens richtiger Anlage und Weite, wozu bei Schornsteinen, wie wir in der Lehre von der Wärme noch näher entwickeln werden, eine angemessene Verengung nach oben gehört, einen recht guten Zug haben, so ist es nothwendig, daß ihre Innenflächen möglich glatt seien, was immer noch zu wenig beachtet zu werden scheint, aber aus der oben angegebenen, ziemlich schnellen Abnahme der Ausflußmenge, also auch der Geschwindigkeit, einer Berücksichtigung werth sein dürfte.

Ein unter einem gewissen Drucke aus einer Oeffnung fließender Luftstrahl behält nicht die Weite der Oeffnung bei, sondern verengt sich oder zieht sich wegen des Stoßes an den Wänden der Mündung ganz in ähnlicher Weise zusammen, wie es bei tropfbaren Flüssigkeiten der Fall war. Daher ist die wirkliche Ausflußmenge aus einem Luftbehälter stets kleiner, als das Produkt aus der Weite der Oeffnung und der Geschwindigkeit: sie beträgt bei atmosphärischer Luft nur 0,52 davon, steigert sich bei einer kurzen, kegelförmigen Ansaugröhre bis auf 0,6 und ist am größten, wenn bei einer sich erweiternden der äußere Durchmesser das Doppelte des inneren und die Länge 5 bis 10 mal so groß ist, als der letztere.

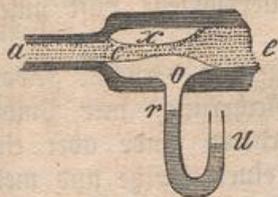
Die Stärke der Zusammenziehung des Luftstrahles richtet sich nach dem Unterschiede des Druckes, welcher zwischen dem abgesperrten ausströmenden Gase und dem äußeren stattfindet: ist jener um 0,003 oder 0,010 oder 0,50 oder um 1 größer, so ist der Durchmesser des engsten Theiles des Strahles von dem der Mündung des Gefäßes nach der Reihe 0,71, 0,65, 0,58, 0,55.

Eine recht auffallende Erscheinung ist es, daß der durch einen engen Spalt oder ein Röhrchen dringende Luftstrahl einen vorgehaltenen breiteren Gegenstand nicht wegbläst, sondern daß dieser Gegenstand in einzelnen, schnell auf einander folgenden Schlägen sogar an die Mündung angeedrückt wird. Man erkennt dieses schon, wenn man die eine Hand horizontal mit der inneren Seite nach unten hält, durch einen Spalt zwischen zwei Fingern mit dem Munde heftig bläst und ein Stückchen Papier unter den Spalt hält. Das Papier wird während des Blasens nicht herabfallen, sondern frei getragen. Man kann auch durch den Spalt ein Röhrchen bis zur Gränze der Handfläche stecken und ein Kartenblatt unterhalten. Kommt ein hinreichend starker Strahl aus einem Rohre durch eine Fläche, so kann sogar eine Metallscheibe

schon in einiger Entfernung angedrückt werden und bewegt sich dann abwechselnd mit einem brausenden Tone hin und her.

Der Grund zu dieser sonderbaren Erscheinung liegt theils darin, daß sich wegen der Zusammenziehung des Luftstrahles an seiner engsten Stelle, wo er die größte Geschwindigkeit hat, die Neigung zur Bildung eines luftleeren Raumes zeigt, in welchen die Scheibe durch den Druck der äußeren Luft gepreßt wird, theils darin, daß die auf die Scheibe schnell geblasene Luft ebenso schnell auf der Innenfläche derselben seitwärts zu entweichen sucht, weshalb ihr Druck auf diese Innenfläche geringer wird, als der von der Atmosphäre auf die Außenfläche ausgeübte.

Man kann es an dem ausströmenden Luftstrahle selbst sehr leicht erkennen, wie sein Seitendruck nach außen mit zunehmender Geschwindigkeit, also gegen die engste Stelle hin, abnimmt, wenn man die Luft aus der



(Fig. 206.)

engeren Röhre *a c* (Fig. 206) in eine weitere *c e* gelangen läßt. Geht nämlich von *o* aus in der Nähe der engsten Stelle *x* des zusammengezogenen Strahles nach unten eine zweischenkliche offene Glasröhre *o u n*, worin sich etwas Wasser befindet, so steht dasselbe in beiden Schenkeln gleich hoch, wenn durch das Rohr die Luft nicht geblasen wird. Geht aber ein Luftstrahl hindurch, so steigt das Wasser sofort in dem mit dem Rohre verbundenen Schenkel, zum Zeichen, daß jetzt der Druck auf die Mündung *o* im Rohre geringer ist, als auf den äußeren offenen Schenkel *u*, auf welchen die freie Atmosphäre drückt.

Zum Theil hierher gehörig ist auch die Erscheinung, daß bei und vor Stürmen das Barometer oft bedeutend fällt, denn die über die Erdoberfläche hinweg stürmende Luft legt ihre ganze Kraft in die Richtung ihrer Bewegung und somit wird ihr Druck nach unten auf alle Körper, also auch auf das Quecksilber im offenen Schenkel des Barometers, geringer. Wenn das Barometer schon vor dem Sturme fällt, so ist derselbe entweder bereits in höheren Schichten der Atmosphäre vorhanden oder es findet an dem Beobachtungsorte eine bedeutende Auflockerung der Luft statt. Auch Wirbelstürme müssen außerhalb des Wirbels das Barometer fallen machen.

R e a k t i o n .

Wenn Gase unter einem gewissen Drucke einseitig aus geschlossenen und leicht beweglichen Röhren strömen, so zeigt sich, wie bei tropfbaren Flüssigkeiten, die Erscheinung der Reaktion oder Rückwirkung, indem sich dergleichen Röhren nach der Richtung bewegen, namentlich drehen, in welcher der Druck geblieben ist. Wenn also z. B. das Gas, welches

auch angezündetes Leuchtgas fein kann, aus der Mündung einer nach rechts gekrümmten und drehbaren Röhre unter einem Drucke strömt, so wird die Röhre nach links gedreht, weil nach der rechts liegenden Oeffnung der innere Druck auf die fehlende Röhrenwand verschwunden, nach der links liegenden Wand aber geblieben ist. Diese Rückwirkung ist es auch, welche bei Feuerwerken durch die bei der Entzündung des Pulvers in Röhren an drehbaren Rädern einseitig ausströmenden, oft buntfarbigen Pulvergase die interessantesten Erscheinungen zeigen, besonders wenn bunte Räder hintereinander gleichzeitig und entgegengesetzt sich drehen.

Auch das Steigen der Leuchtkugelgranaten und Raketen, manchmal bis zu einer Höhe von 4000 Fuß, ist eine Folge jener Rückwirkung. Die Mündung der Rakete muß durch Verlegung des Schwerpunktes unter sie mittelst eines langen Stabes stets unten erhalten werden, damit bei der Ausströmung des Gases von unten der Druck nach oben bleibt. Der Stoß des ausströmenden Gases auf die unterhalb in Ruhe befindliche und dem Beharrungsgesetze unterworfenen Luft unterstützt die Bewegung nach oben.

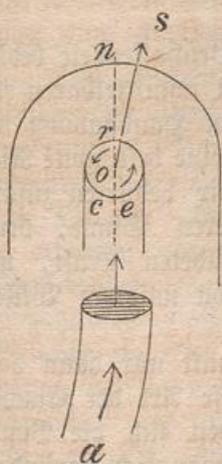
Hierher gehören auch die in manchen Kriegen so berühmt gewordenen Kongrevischen Raketen, welche aus blechernen, mit Pulver vollgeschlagenen Röhren bestehen, an deren vorderen Ende aber eine mit einem Brandsatz gefüllte eiserne Kugel mit einer Spitze und mehreren Löchern sich befindet. Die Rakete wird in eine Rinne horizontal auf ein Gestell gelegt, hinten angezündet, fährt mit gewaltigem Kruschen weite Strecken vorwärts, ehe sich die Füllung der Kugel entzündet, welche dann nach allen Richtungen hin Feuer sprüht, welches sich überall anhängt und nicht zu löschen ist, bis endlich die Kugel selbst wie eine Granate zerplatzt.

Die Bahn von Geschossen.

Wir haben schon früher (S. 345) erwähnt, daß abgeschossene Kugeln wegen der Axendrehung der Erde in der nördlichen Halbkugel immer rechts vom Ziele einschlagen müssen. Eine andere Abweichung der Richtung einer abgeschossenen Kugel von der Axe des Rohres wird aber nicht blos durch die Erdanziehung gegen sie hervorgebracht, sondern beruht noch auf dem Widerstande der Luft gegen die Kugel, wenn sie sich um eine Axe dreht, welche nicht in der Richtung der Axe des Rohres liegt. Solche Drehungen werden erzeugt, wenn der Schwerpunkt der Kugel nicht ihr Mittelpunkt ist, wenn die Kugel zu lose im Laufe vorwärts geht und sich an einzelnen Stellen der Innenwand stößt, wenn der Lauf nicht vollkommen grade ist und wenn das entzündete Pulver auf verschiedene Stellen der Hinterfläche der Kugel verschieden stark stößt. Um solche Drehungen der Kugel zu vermeiden, müssen die Kugeln sehr gut in den Lauf eingepaßt sein, so daß sie nur mit einiger Gewalt können eingetrieben werden, wobei man sie auf ein mit Talg bestrichenes Lappchen (Pflaster)

legt; ferner muß man sogenannte gezogene Läufe anwenden, d. h. Läufe, in deren Innerem drei, fünf oder selbst mehr Furchen spiralförmig eingeschnitten sind, welche im Ganzen $\frac{3}{4}$ bis höchstens $1\frac{1}{4}$ Windungen um die Ase machen und wegen der zunehmenden Geschwindigkeit der Kugel gegen das Ende weniger gekrümmt sind, als anfangs. Nur Bleikugeln oder Eisenkugeln mit einem Bleimantel sind für gezogene Läufe geeignet, weil nur ein so weiches Metall im Stande ist, bei der Bewegung im Laufe in die Rinnen gepreßt zu werden, und so der Kugel eine Drehungsbewegung um die durch ihren Schwerpunkt gehende und in der Bewegungsrichtung liegende Ase zu geben. Dreht sich die Kugel in dieser Weise, so bohrt sie sich gewissermaßen nach allen Richtungen hin gleichmäßig in die Luft ein und folgt übrigens nur noch der Schwere, welche aber auch dann nicht im Stande sein würde, die Kugel herabzuziehen, wenn sie mit einer Geschwindigkeit von etwa 1 deutschen Meile in der Sekunde abgeschossen würde und die Luft ihr keinen Widerstand leistete, denn sie würde in 1 Stunde und 30 Minuten die Erde umkreisen.

Erfolgt aber bei einer abgeschossenen Kugel eine Drehung um eine anders liegende Ase, so weicht die Kugel stets in einer der Drehung entgegengesetzten Richtung ab. Hat die Kugel



(Fig. 207.)

sie selbst durch den Widerstand der Luft nach rechts geworfen werden. Es ist klar, daß die Kugel je nach ihrer Drehungsrichtung nach allen Seiten hin abweichen kann.

Wenn Körper aneinander gerieben werden oder sich reiben, so entstehen noch eigenthümliche Molekularbewegungen in ihnen, welche wir mit dem Namen Wärme, Elektrizität und Licht bezeichnen, denen aber wegen ihrer Eigenthümlichkeit und außerordentlichen Wichtigkeit besondere Abschnitte später gewidmet werden müssen.