Es ist aber wieder $w + \frac{w^2 - 1}{2} = w^2 - \frac{(w-1)^2}{2}$ oder annähernd $= w^2$, mithin

$$K_2 = \frac{Q}{1+w}\left(w^2 - \frac{R}{r}\right), \tag{16}$$

was für $w^2 > R : r$ (Gl. 15) positiv wird.

Beispiel: Für $w = 1{,}05$ ist $w^2 = 1{,}1$, $1 : w^2 = 0{,}909$. Wählt man nun $r : R = 14 : 15$, so ist $\frac{14}{15} = 0{,}93 > 0{,}909$, d. h. die Bedingung (15) der Selbstsperrung erfüllt. Es ist ferner (nach Gl. 10) $v : c = 30 = Q : K_0$. Für das Aufwinden wird (nach Gl. 13) $K = \frac{Q}{2{,}05}\left(1{,}1 - \frac{14}{15}\right) = \frac{Q}{12{,}1}$. Da nun $K_0 = \frac{Q}{30}$, so ist

$$\eta = \frac{12{,}1}{30} = 0{,}40.$$

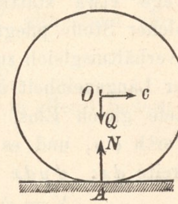
Zum Hinabwinden ist die Kraft $K_2 = \frac{Q}{2{,}05}\left(1{,}1 - \frac{15}{14}\right) = \frac{Q}{71}$ aufzuwenden. Also mit Aufwand von $K = 10^{\text{kg}}$ kann man $Q = 121^{\text{kg}}$ heben, während zum Hinabwinden $K_2 = 1{,}7^{\text{kg}}$ hinreicht.

Der Differenz-Flaschenzug ist offenbar keine vortheilhafte Aufzugsmaschine, da sein Wirkungsgrad nur 0,4 beträgt. Angenehm sind aber seine Einfachheit und die Bequemlichkeit der Handhabung. Beim Einspannen einer schweren Achse in eine Drehbank oder beim Versetzen eines schweren Steines ist die Selbstsperrung sehr werthvoll. Der ihn handhabende Arbeiter braucht ihn nicht vorsichtig festzuhalten, sondern kann seine volle Aufmerksamkeit auf die genaue Einstellung der Last richten, indem er durch Ziehen an der einen oder anderen Kette die Last bald hebt, bald senkt, wie es erwünscht ist.

12. Rollwiderstand der Walzen und Räder. Gleichmässige Bewegung der Fuhrwerke.

Wird eine starre cylindrische Walze auf eine starre wagerechte Ebene gelegt, so findet die Berührung längs einer Cylinderseite statt (Fig. 306). Das Gewicht Q der Walze wird von dem Widerstande N der Ebene aufgehoben, und versetzt man die Walze in eine Rollbewegung, wobei die Geschwindigkeit c des Mittelpunktes O gleich der Umfangsgeschwindigkeit $r\omega$ der Drehbewegung ist, so ist an der Berührungsstelle A die Gesammtgeschwindigkeit $v = c - r\omega =$ Null, d. h. es findet kein Gleiten statt, und da die sonstigen Kräfte Q und N sich aufheben, so kommt keine Reibung

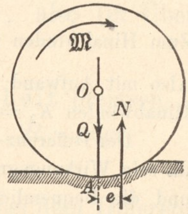
Fig. 306.



zur Wirkung. Daher sind die Bedingungen der gleichmässigen Drehbewegung und der gleichmässigen Verschiebung, mithin auch der gleichmässigen Rollbewegung erfüllt, d. h. es ist bei vollkommener Starrheit zur Unterhaltung der Rollbewegung keine weitere Kraft erforderlich.

Bei den wirklichen festen Körpern kann aber der Druck N nicht von einer Linie aufgenommen werden, sondern er vertheilt sich auf eine Fläche, indem sowohl die Walze wie die Unterlage ihre Form ändern, sich gegenseitig zusammendrücken. Diejenigen Theile der Bahn, welche die Walze schon überrollt hat, kehren in den meisten Fällen nicht ganz in den früheren Zustand zurück; sie sind um ein gewisses Mafs dauernd niedergewalzt. In Folge dessen liegt der vor der Walze befindliche Theil der Unterlage höher als der andere; der Druck N vertheilt sich nicht gleichmässig zu beiden Seiten der Walzenmitte, vielmehr überwiegt der Gegendruck auf der Vorderseite. Dadurch verschiebt sich dann der Gesammtdruck N nach vorn, sodass er nicht mehr mit Q zusammenfällt, sondern mit Q ein Kräftepaar Ne bildet, das Moment des Rollwiderstandes. Zur Unterhaltung der gleichmässigen Rollbewegung ist daher ein treibendes Moment

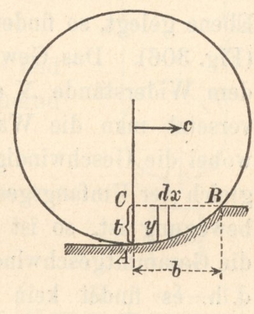
Fig. 307.



1) $$\mathfrak{M} = Ne \text{ erforderlich.}$$

Zur Beurtheilung der Vertheilung des Druckes N auf die Unterstützungsfläche darf man wohl für die meisten Fälle die vereinfachende Annahme machen, dass nur die Unterlage eine Formänderung erfährt, während die Walze ihre runde Form behält. Zuerst werde der Fall betrachtet, dass der von der Walze niedergedrückte Theil der Unterlage sich gar nicht wieder elastisch hinter ihr hebt, sondern niedergedrückt verbleibt (Fig. 308), wie es bei einem thonigen oder sandigen Wege etwa stattfinden wird. Den Gegendruck solcher Stoffe pflegt man mit der Eindrückungstiefe y verhältnisgleich zu nehmen. Ist ψ der Gegendruck der Längeneinheit der Horizontalprojektion für eine Tiefe gleich Eins, so hat er bei der Tiefe y den Werth ψy, und es ist dann der Gegendruck einer Breite dx: $\psi y dx$ und der gesammte Druck

Fig. 308.



$$N = \psi \int y\,dx = \psi \cdot ABC.$$

Selbstverständlich geht dann auch N durch den Schwerpunkt der Fläche ABC.

Weil nun AB in den wichtigeren Fällen ein kleiner Bogen, so kann er annähernd als ein Parabelstück vom Parameter r (= dem Halbmesser des Rollkreises) betrachtet werden. Dann wird, wenn b und t die beiden Projektionen von AB, $b^2 = 2\,rt$, $t = b^2 : (2\,r)$ und

2) $$N = \psi \cdot {}^2/_3\, b\, t = {}^1/_3\, \psi\, \frac{b^3}{r},$$

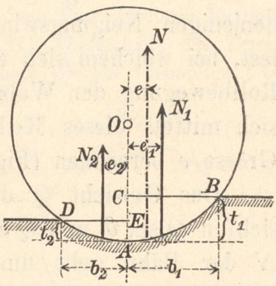
$$\text{daher } b^3 = \frac{3\,N r}{\psi}.$$

Der Abstand e der Kraft N von dem Mittelpunkte ist (S. 134)

3) $$e = {}^3/_8\, b = {}^3/_8 \sqrt[3]{\frac{3\,N r}{\psi}}.$$

Ist die Unterlage aber nicht so vollkommen bildsam oder plastisch, dass jeder erzeugte Eindruck in voller Grösse bleibt; kann vielmehr ein gewisser Grad von Elasticität vorausgesetzt werden, so hebt sich die um die Tiefe t_1 eingedrückte Unterlage hinter der Walze um t_2 wieder empor (Fig. 309) und leistet dann entsprechende Gegendrücke.

Fig. 309.



Dann wird der Druck auf der Vorderseite

$$N_1 = \psi\, {}^2/_3\, b_1 t_1 = {}^1/_3\, \psi\, \frac{b_1{}^3}{r},$$

der auf der Rückseite

$$N_2 = {}^1/_3\, \psi\, \frac{b_2{}^3}{r}.$$

Ferner ist $b_1{}^3 = \dfrac{3\,N_1 r}{\psi}$; $b_2{}^3 = \dfrac{3\,N_2 r}{\psi}$.

4) Setzt man $b_1 = n\, b_2$,

so ist n von dem Grade der Elasticität der Unterlage abhängig. Dann kann man $N_2 = \dfrac{1}{3}\psi\, n^3 \dfrac{b_1{}^3}{r}$ schreiben. Somit wird der Gesammtdruck

5) $$N = N_1 + N_2 = \frac{1}{3}\,\psi\, \frac{b_1{}^3}{r}(1 + n^3) \quad \text{und}$$

6) $$b_1 = \sqrt[3]{\frac{3\,N r}{\psi\,(1 + n^3)}}.$$

Die Abstände der Kräfte N_1 und N_2 von dem Mittelpunkte O betragen $e_1 = {}^3/_8\, b_1$; $e_2 = {}^3/_8\, b_2 = {}^3/_8\, n\, b_1$. Für die Mittelkraft N gilt dann die Momentengleichung in Bezug auf O

$$-\,N e = -\,N_1 e_1 + N_2 e_2 = -\,{}^3/_8\, b_1\,(N_1 - n\,N_2),$$

daher wird, wenn man den gemeinschaftlichen Faktor ${}^1/_3\,\psi : r$ in allen Gliedern fortlässt,

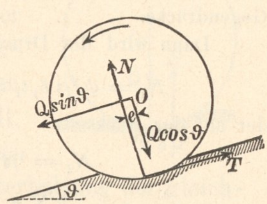
7) $$e = {}^3/_8\, b_1\, \frac{1 - n^4}{1 + n^3} = {}^3/_8 \sqrt[3]{\frac{3\,N r}{\psi\,(1 + n)^3}}\, \frac{1 - n^4}{1 + n^3}.$$

Für $n = 0$ entsteht wieder der Werth der Gl. 3.

Hiernach ist e in verwickelter Weise von ψ und n, d. h. von der Beschaffenheit der Unterlage, oder, weil die Zusammendrückung in Wirklichkeit eine gegenseitige ist, von den Stoffen der Walze und der Unterlage abhängig, ausserdem aber auch von der Grösse des Druckes N und von dem Halbmesser r des Rollkreises. Hat man aber e für einen Werth von N und r durch unmittelbare Messung oder auf mittelbarem Wege gefunden, so bringt eine Änderung von N oder von r nur geringe Änderung von e hervor, da Nr schon auf das Achtfache wachsen muss, wenn e sich verdoppeln soll. Daher zieht man es vor, für eine Gruppe praktisch wichtiger Fälle bei Mittelwerthen von N und r die Grösse e ein Mal zu bestimmen und diese Länge e dann für andere ähnliche Fälle innerhalb gewisser Grenzen unverändert beizubehalten.

Die Ermittelung der Grösse e kann durch Versuche in ähnlicher Weise erfolgen, wie man die Reibungsziffer mittels der schiefen Ebene (S. 192) feststellt. Giebt man der Rollbahn eine veränderliche Neigung, legt die Walze auf und stellt durch Versuche denjenigen Neigungswinkel ϑ der Bahn fest, bei welchem sich eine gleichmässige Rollbewegung der Walze erhält, so lässt sich mittels dieses Rollwinkels ϑ die Grösse e berechnen (Fig. 310).

Fig. 310.



Das Gewicht Q der Walze zerlegt sich in $Q \sin\vartheta$ und $Q\cos\vartheta$. Der Druck N der Bahn geht um e an O vorbei. Ausserdem tritt nun noch die Reibung T an der Bahn auf. Diese 4 Kräfte müssen den Gewichtsbedingungen genügen, daher

$$N = Q\cos\vartheta; \quad T = Q\sin\vartheta.$$

Die beiden auftretenden Kräftepaare müssen sich aufheben, daher

$$Q\cos\vartheta\, e = Q\sin\vartheta\, r \quad \text{oder} \quad e = r\,\mathrm{tg}\,\vartheta,$$

wofür man wegen der Kleinheit des Winkels ϑ auch

$$8) \qquad e = r\vartheta$$

schreiben kann.

Für Walzen und Bahn aus nicht sehr hartem Holze ist etwa . . . . $e = 0{,}001\ ^{\mathrm{m}}$,
bei sehr hartem Holze . . . . $e = 0{,}0005\ ^{\mathrm{m}}$,
bei Eisenbahnwagen-Rädern auf Schienen . $e = 0{,}0005\ ^{\mathrm{m}}$.

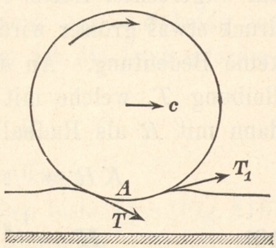
Danach beträgt der Rollwinkel im letzteren Falle, wenn $r = 0{,}5\ ^{\mathrm{m}}$, $\vartheta = 0{,}0005 : 0{,}5 = 0{,}001 = 1 : 1000$, d. h. auf einem Gefälle von $1 : 1000$ kann eine Eisenbahnwagenachse durch ihr Gewicht gleichmässig rollen.

Nach den vorstehenden Betrachtungen würde der Rollwiderstand verschwinden, wenn die zusammendrückbare Fahrbahn sehr elastisch, annähernd $n = 1$ wäre, indem dann $e =$ Null entsteht. Man könnte glauben, dass eine Kaukschukplatte oder auch eine Unterlage von Stahl in solchem Mafse elastisch wäre, dass dafür nahezu $n = 1$ gesetzt werden müsste. Damit steht nun freilich die Erfahrung im Widerspruche, denn bei dem Rollen einer eisernen Walze auf einer Kaukschukplatte zeigt sich ein ziemlich erheblicher Widerstand, oder es ist eine ziemlich erhebliche Neigung ϑ erforderlich, damit ein gleichmässiges Rollen auf schiefer Ebene stattfinden kann.

Diese Erscheinung erklärt sich in folgender Weise. Wenn auch die Bahn von Kautschuk bezw. von Stahl so elastisch ist, dass nach einiger Zeit keine Spur des Hinüberrollens mehr bemerkt wird, so erfolgt die Rückkehr in die ursprüngliche Form niemals sofort, sie erfordert vielmehr immer eine gewisse Zeit. Daher wird die Oberfläche der Fahrbahn dicht hinter der Walze immer etwas tiefer liegen als vor derselben und erst später, wenn die Walze sich von der Stelle entfernt hat, zur ursprünglichen Höhe zurückkehren.

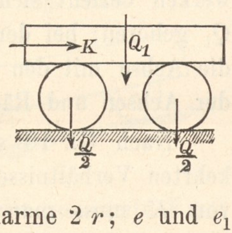
Auch ist die Rollbewegung nach Versuchen von Prof. Osborne Reynolds im Jahre 1875 (Philosophical transactions, Bd. 166; Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 1877, S. 417) stets mit einem Gleiten verbunden. Die Strecke s, welche eine eiserne Walze vom Halbmesser r auf einer Kaukschukplatte bei einer Umdrehung zurücklegt, zeigt sich kleiner als der Umfangsweg $2\,r\,\pi$. Mit dem Zusammendrücken der Kautschukplatte ist vor und hinter der Zusammendrückung eine wulstartige Erhebung verbunden (Fig. 311). In der Nähe des Punktes A wird vielleicht kein Gleiten stattfinden, wohl aber zu beiden Seiten; aus dem Gleiten entstehen dann Reibungswiderstände T und T_1, die ein Widerstandsmoment liefern. Hiernach darf auch für elastische Bahnen die Formel 1 (S. 248) für den Rollwiderstand beibehalten werden, so lange eine bessere nicht gefunden ist.

Fig. 311.



Wird eine Last Q_1 auf Walzen vom Gesammtgewichte Q fortgeschoben, so tritt unten wie oben an den Walzen ein Rollwiderstand auf; die erforderliche Kraft ist dann

Fig. 312.



9) $$K = \left\{Q_1 e + (Q + Q_1) e_1\right\} : (2\,r);$$

denn die Kraft K überträgt sich durch Reibung auf die oberen Theile der Walzen und bildet mit den unten an den Walzen auftretenden Reibungswiderständen ein Kräftepaar vom Hebelarme $2\,r$; e und e_1 sind die Arme der Rollwiderstände oben bezw. unten.

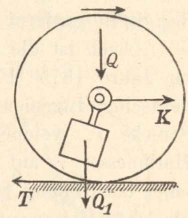
Sind alle in Frage kommenden Theile aus sehr hartem Holze, ist $Q_1 = 1000^{\text{kg}}$, $Q = 50^{\text{kg}}$, $r = 0{,}1^{\text{m}}$, so wird

$$K = \frac{1000 \cdot 0{,}0005 + 1050 \cdot 0{,}0005}{0{,}2} = 5{,}1^{\text{kg}}.$$

Hieraus erkennt man die Zweckmässigkeit der Walzen zum Fortschaffen schwerer Körper (eiserner oder steinerner Bautheile).

Bei den **Fuhrwerken** nun ist die Last des Wagenkastens mittels Achslager auf die Achsen der Räder gestützt, und da der Wagenkasten wohl an der Verschiebung, nicht aber an der Drehung der Walze theilnimmt, so findet an den Zapfen vom Durchmesser d eine Zapfenreibung statt. Wir wollen zunächst eine einzige Wagenachse von dem Gewichte Q betrachten und an ihr eine Last Q_1 aufgehängt denken (Fig. 313). (Das Gehänge stellt sich dann wegen des Zapfenreibungsmoments $\frac{1}{2} f Q_1 d$ etwas schief). Der Bodendruck beträgt $Q + Q_1$, daher das Moment des Rollwiderstandes $(Q + Q_1)e$. Die Zugkraft K auf wagerechter Ebene veranlasst, dass der Zapfendruck etwas grösser wird, doch hat dieser Umstand keine Bedeutung. An der Fahrbahn entsteht eine Reibung T, welche mit K das treibende Kräftepaar liefert: es ist dann mit R als Radhalbmesser:

Fig. 313.



$$KR = \tfrac{1}{2} Q_1 f d + (Q + Q_1)e, \quad \text{so dass}$$

10) $$\boldsymbol{K = \frac{\frac{1}{2} Q_1 f d + (Q + Q_1)e}{R}} \quad \text{wird.}$$

Diese Formel bleibt auch gültig, wenn die Last des Wagenkastens Q_1 auf mehrere Achsen vom Gesammtgewichte Q vertheilt ist. Genauer bedeutet Q das Gewicht der rollenden, Q_1 das der der nur fortschreitenden Theile. Bei gewöhnlichen Strassenfuhrwerken bezieht sich Q nur auf die Räder, während die Achsen zu Q_1 gehören; bei den gewöhnlichen Eisenbahnfuhrwerken dagegen ist die Achse mit den Rädern fest verbunden, so dass Q das Gewicht der Achsen und Räder bedeutet.

Nach Gl. 10 steht die erforderliche Zugkraft K im umgekehrten Verhältnisse zu dem Radhalbmesser R; zur Verminderung von K muss man daher R so gross machen, wie die sonstigen Umstände und Rücksichten gestatten.

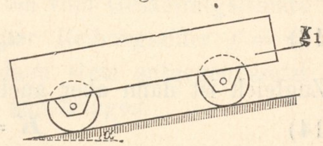
Beispiel: An einem zweiachsigen Eisenbahnwagen wiegen die beiden Achsen mit den Rädern $Q = 2000^{\text{kg}}$, die übrigen Theile nebst der Last $Q_1 = 8000^{\text{kg}}$; der Radhalbmesser sei $R = 0{,}5^{\text{m}}$, der Zapfendurchmesser $d = 0{,}1^{\text{m}}$, die Reibungsziffer $f = 0{,}02$, die Grösse $e = 0{,}0005^{\text{m}}$, dann ist die auf wagerechter gerader Bahn erforderliche Zugkraft

$$K = \frac{4000 \cdot 0{,}02 \cdot 0{,}1}{0{,}5} + 10000 \cdot \frac{0{,}0005}{0{,}5} = 16 + 10 = 26^{\text{kg}},$$

wovon 16^{kg} durch Zapfenreibung, 10^{kg} durch Rollwiderstand erfordert werden.

Soll das Fuhrwerk gleichmässig eine Steigung unter dem Winkel α hinan gezogen werden, so bleibt der ganze Zapfendruck $= Q_1$, der Normalwiderstand N beträgt aber nur $(Q_1 + Q) \cos \alpha$; doch ist $\cos \alpha$ bei allen Bahnen und Wegen, die frei (ohne Seil oder Zahnstange) befahren werden, von der Einheit so wenig verschieden, dass Zapfenreibung + Rollwiderstand wiederum $= K$ gesetzt werden können. Es tritt aber nun noch die schräg abwärts gerichtete Seitenkraft der Schwere $Q \sin \alpha$ und $Q_1 \sin \alpha$ auf, die beide von K_1 mit überwunden werden müssen. Daher ist die jetzt erforderliche Zugkraft

Fig. 314.



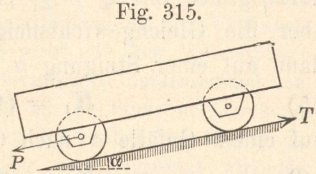
11) $$K_1 = (Q + Q_1) \sin \alpha + K,$$

worin aber α statt $\sin \alpha$ geschrieben werden kann.

Diese Kräfte K und K_1 müssten nach dem bisherigen (Fig. 313) eigentlich an den Mittellinien der Achsen angreifen. Bringt man sie aber in beliebiger Höhe an dem Fuhrwerke an, so wird durch diese Verschiebung nur die Vertheilung der Last Q_1 auf die beiden Achsen etwas geändert, im Übrigen bleibt die Wirkung die gleiche.

Bewegt sich das Fuhrwerk gleichmässig abwärts und wird auf dasselbe (etwa mittels eines Seiles) eine hemmende Kraft K_2 ausgeübt, so ist $(Q + Q_1)\,\alpha - K_2$ die gesammte treibende Kraft P mit dem Sinne abwärts (Fig. 315). Die Neigung α hat einen gewissen Einfluss auf die Vertheilung der Last Q_1 auf die beiden Achsen; davon abgesehen, kann man sich aber die gesammte Kraft P in der Achsenmitte angreifend denken. An den Berührungsstellen

Fig. 315.



der Räder mit der Bahn tritt eine gesammte Reibung $T = P$ auf und bildet mit P das Kräftepaar PR zur Überwindung der Widerstandsmomente $\frac{1}{2} Q_1 f d + (Q + Q_1) e$, und da letztere Summe $= KR$ (Gl. 10), so ist

$$(Q + Q_1)\, a - K_2 = K,$$

oder die erforderliche Hemmkraft

12) $$K_2 = (Q + Q_1)\, a - K.$$

Für ein gewisses Gefällverhältnis $a = a_0$ reicht $(Q + Q_1)\, a_0$ gerade zur Überwindung der Widerstände hin, so dass die erforderliche Hemmkraft $K_2 = 0$ wird. Dieses Gefälle heisst die Gleichgewichtsneigung a_0, u. zw. ist

13) $$a_0 = \frac{K}{Q + Q_1}.$$

Zugleich ist dann aber auch

14) $$K = (Q + Q_1)\, a_0,$$

d. h. die auf wagerechter Ebene erforderliche Zugkraft K gleich dem Gesammtgewichte $(Q + Q_1)$ mal der Gleichgewichtsneigung a_0.

Durch Vorrichtungen zur Messung der Zugkraft oder durch Ermittelung der Gleichgewichtsneigung kann die für einen Wagen erforderliche Zugkraft K ziemlich scharf gemessen werden; von den beiden Widerständen aber, die von K überwunden werden, kann man nur die Zapfenreibung einigermassen befriedigend berechnen, während der Betrag des Rollwiderstandes bisher nur sehr unvollkommen berechnet werden kann, wie aus den Bemerkungen auf S. 251 ersichtlich ist. Man zieht es deshalb vor, nur den Gesammtwiderstand K durch Versuche eingehender zu prüfen und K in ein Verhältnis zu dem Gesammtgewichte $Q + Q_1$ des Fuhrwerks zu bringen, trotzdem nach Gl. 10 der Werth K nicht genau verhältnisgleich mit $Q + Q_1$ ist. Diese Verhältniszahl ist nach Gl. 14 aber die Gleichgewichtsneigung a_0. Mit deren Einführung wird dann auf einer Steigung a nach Gl. 11

15) $$K_1 = (Q + Q_1)\,(a + a_0),$$

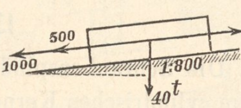
auf einem Gefälle a nach Gl. 12 die Haltkraft

16) $$K_2 = (Q + Q_1)\,(a - a_0).$$

Auf Grund dieser Vereinfachungen bekommt nun die Gleichgewichtsneigung a_0 eine ähnliche Bedeutung, wie sie der Reibungswinkel φ bei gleitender Bewegung hat. Da bei Fuhrwerken a_0 stets ein kleiner Bruch, so ist $\sin a_0 = a_0 = \operatorname{tg} a_0$ zu setzen, ebenso wie bei kleinem Reibungswinkel $\sin \varphi = \varphi = \operatorname{tg} \varphi = f$ gesetzt werden konnte. Die Gleichgewichtsneigung a_0 ist zugleich die Widerstandsziffer des Fuhrwerks, welche man nur mit dessen Gewicht zu multipliciren braucht, um den Gesammtwiderstand auf wagerechter Bahn zu erhalten. Man braucht daher zur zahlenmässigen Berechnung der erforderlichen Zug- oder Haltkräfte K_1 und K_2 auf die rollenden Räder und die damit zusammenhängenden Widerstände keine Rücksicht mehr zu nehmen, sondern kann, weil diese Widerstände in dem Werthe a_0 stecken, bei gleichmässiger Bewegung das Fuhrwerk wie einen Schlitten vom Gesammtgewichte $Q + Q_1$ auf sehr glatter Bahn mit einer Reibungsziffer $f = a_0$ betrachten. Die Kraft $(Q + Q_1) a_0$ ist dann stets entgegengesetzt der Bewegung, $(Q + Q_1) a$ stets abwärts anzubringen.

Beispiel: Für den Eisenbahnwagen auf S. 253 ist $K = 26$, $Q + Q_1 = 10000$, daher $a_0 = 0{,}0026 = 1 : 385$, wofür man $a_0 = 0{,}0025 = 1 : 400$ zu setzen pflegt. Ein Zug aus 40 derartigen Wagen hat ein Gewicht $Q + Q_1 = 400\,000^{\text{kg}}$. Es ist dafür auf wagerechter Bahn $K = 400\,000 \cdot 0{,}0025 = 1000^{\text{kg}}$. Auf einer Steigung $a = 1 : 800$ ist dann die Zugkraft nöthig (Fig. 316)

Fig. 316.



$K_1 = 400\,000 : 800 + 1000 = 1500^{\text{kg}}$;

soll der Zug aber auf derselben Rampe abwärts fahren, so wirkt 500 abwärts, der Widerstand $= 1000^{\text{kg}}$ aufwärts; es ist also noch in der Richtung der Bewegung eine Zugkraft $1000 - 500 = 500^{\text{kg}}$ nöthig. — Für $a = a_0$ ist bei der Abwärtsbewegung keine bewegende oder hemmende Kraft erforderlich, dagegen ist bei der Aufwärtsbewegung $K_1 = (Q + Q_1)\, a_0 + K = 2\, K$, d. h. doppelt so gross wie auf wagerechter Bahn. — Ist $a > a_0$, z. B. $a = 1 : 200$, so wird für Aufwärtsfahrt $K_1 = 400\,000 : 200 + 1000 = 3000^{\text{kg}}$, für Abwärtsfahrt eine Hemmkraft (Gl. 16) $K_2 = 400\,000 : 200 - 1000 = 1000^{\text{kg}}$ nöthig. Diese wird erzeugt, indem man Bremsbacken oder Bremsklötze mit solcher Kraft an die Räder presst, dass dadurch eine Gesammtreibung an den Umfängen der Räder im Betrage von K_2 entsteht. Diese wirkt mit dem Widerstandsmomente $K_2 R$ an den Achsen wie eine vielfach vergrösserte Zapfenreibung und erfordert in ähnlicher Weise wie diese (Fig. 313) ein im Sinne der Drehung der Achsen wirkendes Kräftepaar $K_2 R$, indem an den Stellen der Berührung der Räder mit den Schienen eine der Bewegung entgegengesetzt wirkende Reibungskraft von der Grösse K_2 hervorgerufen wird, welche nach dem Satze von der Bewegung des Schwerpunktes (S. 142) auf die Bewegung des Fuhrwerkes im Ganzen gerade so einwirkt, als ob sie im Schwerpunkte des

Fuhrwerks oder in den Achsmitten oder irgend wo am oberen Theile des Wagenkastens angriffe.

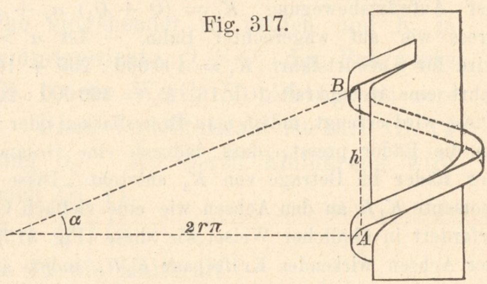
In den bisherigen Betrachtungen und Beispielen sind als Widerstände nur Zapfenreibung und Rollwiderstand berücksichtigt. Dies genügt nur für Bewegung mit geringer Geschwindigkeit. Denn es tritt noch ein Luftwiderstand hinzu, der bei langsamer Bewegung des Zuges gering, bei schneller Bewegung aber sehr bedeutend ist. Auf diesen Widerstand kann hier nicht eingegangen werden; es sei nur erwähnt, dass bei schnell fahrenden Personenzügen die Widerstandsziffer oder Gleichgewichtsneigung α_0 auf 0,01 steigt, dass also der Gesammtwiderstand bei voller Geschwindigkeit etwa 4 Mal so gross ist wie bei langsamer Bewegung.

Für Strassenfuhrwerke ist die Ziffer α_0 erheblich grösser als für Eisenbahnwagen. Einmal sind die Achslager oder Achsbüchsen nicht so vollkommen; namentlich aber ist die Fahrbahn eine viel weniger regelmässige, so dass der Rollwiderstand ganz bedeutenden Einfluss gewinnt. Aber auch bei diesen Fuhrwerken kann man nur den Gesammtwiderstand durch α_0 ausdrücken. Für bestes Steinpflaster ist etwa $\alpha_0 = 1 : 80$, für gewöhnliche Landstrasse $\alpha_0 = 1 : 30$. Soll nun auf Landstrassen im Flachlande, wo die gewöhnlichen Fuhrwerke nicht mit Bremsen versehen sind, beim Abwärtsfahren ein Zurückhalten des Wagens durch die Pferde nicht nöthig sein, so dürfen die vorkommenden Gefälle nicht stärker als die Gleichgewichtsneigung α_0 sein. Für $\alpha = \alpha_0$ läuft der Wagen abwärts frei, während die zum Aufwärtsziehen erforderliche Kraft doppelt so gross ist wie auf der Wagerechten.

13. Die Schraube.

Die Schraubenspindel kann man betrachten als bestehend aus einem cylindrischen Kerne, um den die Schraubengänge als nach einer Schraubenlinie gestaltete vorspringende Leisten herumgelegt sind. Die Schraubengänge bilden mit dem Kerne einen festen Körper. Bei der flachgängigen Schraube hat der Schraubengang rechteckigen Querschnitt, bei der scharfgängigen Schraube ist seine Querschnittsform ein gleichschenkliges (nahezu gleichseitiges) Dreieck. Die Schraubenmutter ist ein fester Körper, der die Schraubenspindel mit geringem Spielraume umschliesst.

Fig. 317.



Wird die Schraubenmutter festgehalten, so kann die Schraubenspindel nur eine sog. Schraubenbewegung ausführen, indem mit der