

Badische Landesbibliothek Karlsruhe

Digitale Sammlung der Badischen Landesbibliothek Karlsruhe

Theoretische Maschinenlehre

in 4 Bänden

Theorie der Getriebe und der mechanischen Messinstrumente

Grashof, Franz

Leipzig, 1883

[Einleitung]

[urn:nbn:de:bsz:31-282938](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-282938)

dadurch erreicht werden soll, bestehend bei den Beispielen unter 1) in der Verwandlung der gegebenen Bewegungsart eines Gliedes in eine andere Bewegungsart eines anderen Gliedes, unter 2) in der an gewisse Bedingungen geknüpften Erzielung einer bestimmten Bahn, die von einem gewissen Körperpunkte durchlaufen werden soll, unter 3) in der Verwandlung einer gegebenen Bewegungsart (dort Rotation um eine gewisse Axe) in eine eben solche (Rotation um dieselbe Axe) mit anderer Geschwindigkeit, unter 4) in der Zusammensetzung verschiedener Bewegungen zu einer resultirenden Bewegung, unter 5) in der Förderung einer Flüssigkeit oder in ihrer Benutzung als Arbeitsflüssigkeit einer Kraftmaschine. Noch mannigfaltiger, als solche Zwecke selbst, sind die möglichen Arten ihrer Erfüllung, so dass eine allgemeine und erschöpfende synthetische Entwicklung von dergleichen nicht elementaren Mechanismen kaum thunlich erscheint. Eine mit Bezug auf technische Anwendungen beschränkte, in erster Reihe vom Zwecke, sowie event. von der Form des zum Betriebe disponiblen Arbeitsvermögens ausgehende Uebersicht derselben und ihre Besprechung mit Rücksicht auf die Vollkommenheit und Einfachheit der Erreichung des Zweckes, mit Rücksicht ferner auf die Anforderungen der praktischen Ausführung und des Betriebes, auch auf die Wirthschaftlichkeit der Benutzung des disponiblen Arbeitsvermögens, ist aber theils als Aufgabe der Technologie und des Maschinenbaues zu betrachten, theils in die einzelnen folgenden Abschnitte der theoretischen Maschinenlehre zu verweisen, wenigstens so lange die synthetische Entwicklung und systematische Uebersicht selbst der elementaren Mechanismen, als Grundlage jener weiteren Aufgabe, einstweilen nur so unvollständig durchgeführt ist, wie aus dem Vorhergehenden sich ergeben hat.

B. Allgemeine Bewegungswiderstände.

§. 65. Einleitende Erklärungen.

Die auf die Glieder eines Getriebes wirkenden äusseren Kräfte können unterschieden werden als active oder treibende Kräfte, als passive Kräfte oder Widerstände und als indifferente Kräfte, jenachdem ihre Arbeiten bei der Bewegung des Getriebes positiv, negativ oder Null sind. Diese Charaktere sind also nicht den Kräften an sich eigenthümlich, sondern davon abhängig, wie sie an dem betreffenden Getriebe zur Wirkung kommen; so kann die Schwerkraft ebensowohl treibende Kraft (z. B. bei

hydraulischen Kraftmaschinen u. s. f.) wie Widerstand (z. B. bei Hebe-
maschinen) oder indifferente Kraft (z. B. als Gewicht einer Transmissions-
welle) oder auch abwechselungsweise das Eine oder Andere sein (als Schwere
eines periodisch auf- und niedergehenden Gliedes).

Die Widerstände sind theils primäre oder Nutzwiderstände, theils
secundäre oder Bewegungswiderstände, jenachdem sie durch den Zweck
des Getriebes (als Maschine oder als Theil einer solchen) unmittelbar oder
aber mittelbar durch die Art und Weise bedingt werden, wie die Erreichung
dieses Zweckes durch das Getriebe vermittelt wird. Sofern es eine der
wesentlichsten Aufgaben der theoretischen Maschinenlehre ist, die Bedin-
gungen zu untersuchen, unter denen das zum Betriebe einer Maschine
disponible Arbeitsvermögen möglichst vollkommen nutzbar, d. h. zur Ueber-
windung der Nutzwiderstände zu verwerthen ist, sowie die Grösse des unter
gegebenen Umständen erreichbaren Vollkommenheitsgrades solcher Ver-
werthung (des sogen. Wirkungsgrades) nachzuweisen, ist es hier am Platze,
diese Bewegungswiderstände, die stets einen gewissen Theil jenes dispo-
niblen Arbeitsvermögens zu ihrer Bewältigung in Anspruch nehmen, wenig-
stens die allgemeiner vorkommenden derselben einer zusammenfassenden
Besprechung zu unterwerfen. Sie sind theils von den Nutzwiderständen
abhängig und zwar wachsend mit denselben (namentlich in Folge des da-
durch vermehrten Druckes zwischen den Elementen der betreffenden Ele-
mentenpaare), theils werden sie unabhängig vom Nutzwiderstande entweder
durch die Bewegung der Maschine an und für sich verursacht (z. B. der
Luftwiderstand, überhaupt der Widerstand des Mediums, in dem sich die
Maschine oder einzelne bewegte Glieder derselben befinden) oder zugleich
durch indifferente Kräfte (z. B. die Kolbenreibung und die Reibung der
Schwungradwelle einer Dampfmaschine u. s. f.). Sind M und μN die Ar-
beiten, die in einer gewissen Zeit zur Ueberwindung beziehungsweise der
vom Nutzwiderstande unabhängigen und der damit wachsenden Bewegungs-
widerstände aufzuwenden sind, unter N die Arbeit des Nutzwiderstandes
selbst verstanden, so ist die erforderliche Betriebsarbeit (Arbeit der trei-
benden Kräfte) für dieselbe Zeit:

$$L = M + (1 + \mu) N \dots \dots \dots (1).$$

Alle Bewegungswiderstände werden veranlasst durch relative Bewe-
gungen entweder der Theile eines und desselben Kettengliedes, oder der
Elemente eines Elementenpaares an ihrer Berührungsstelle gegen einander,
oder von Kettengliedern gegen das umgebende Medium. Die letzteren
Widerstände sind meistens von untergeordneter Grösse und übrigens nach
den Gesetzen der Hydraulik zu beurtheilen, insbesondere, was den hier

vorzugsweise in Betracht kommenden Widerstand der Luft betrifft, nach §. 156 des I. Bandes. Die durch innere relative Bewegungen, nämlich durch die Deformation von Kettengliedern veranlassten Bewegungswiderstände können bei der Verwendung von bildsamen Körpern, insbesondere von Zug- oder Druckkraftorganen (§. 28) als Kettenglieder zwar unter Umständen von wesentlicher Bedeutung sein, doch sind von allgemeinstem Vorkommen und erheblichem Einflusse solche, die durch die relativen Bewegungen der Elemente von Elementenpaaren veranlasst und als Reibungswiderstände im engeren Sinne bezeichnet zu werden pflegen. Nur von ihnen und zwar mit Bezug auf feste Körper wird (ausser von dem inneren oder Deformationswiderstande der Zugkraftorgane) hier die Rede sein, da in Betreff der äusseren und inneren Reibung von Flüssigkeiten als Druckkraftorganen auf die Gesetze der Hydraulik im I. Bande zu verweisen ist.

Was überhaupt die relative Bewegung einer Körperoberfläche (Elementenfläche) E gegen eine andere E' betrifft, so ist sie identisch mit der absoluten Bewegung von E , die dadurch hervorgeht, dass beiden Flächen zu ihren schon vorhandenen noch eine gemeinschaftliche, derjenigen von E' entgegengesetzte Bewegung mitgetheilt und somit E' in Ruhe versetzt wird. Sollen dabei E und E' beständig einander berühren und zwar, wie zunächst angenommen werde, in einem Punkte P, P' (P der Fläche E, P' der Fläche E' angehörig und mit P zusammenfallend), so kann jede unendlich kleine Elementarbewegung von E im Allgemeinen zerlegt werden in eine Gleitung längs einer gemeinsamen Tangente der Flächen und in eine Drehung um eine durch den Berührungspunkt P, P' gehende Axe, letztere wieder in zwei Drehungen beziehungsweise um die gemeinsame Normale und eine gemeinsame Tangente der Flächen. Hiernach zerfällt die Elementarbewegung im Allgemeinen in eine gleitende, bohrende und rollende (wälzende).

Die bohrende Bewegung ist dadurch charakterisirt, dass E und E' sich beständig mit denselben Punkten P und P' berühren, während eine durch P gehende Linie in E und eine durch P' gehende Linie in E' sich unter veränderlichem Winkel schneiden.

Bei gleitender Bewegung ist von den Berührungspunkten P und P' der Flächen E und E' nur der eine, etwa P unveränderlich, der andere P' aber nach und nach in den stetig auf einander folgenden Punkten einer Linie p' in E' gelegen, und es wird diese Linie p' von einer durch P gehenden Linie in E stets unter demselben Winkel geschnitten. Wäre letzteres nicht der Fall, so wäre die Bewegung eine bohrend-gleitende.

Die rollende Bewegung ist dadurch charakterisirt, dass die Berührungspunkte P und P' beziehungsweise in E und E' gewisse Linien p und p' durchlaufen der Art, dass 1) je zwei sich entsprechende (von P und P' gleichzeitig durchlaufene) Bögen PQ , $P'Q'$ derselben gleich lang sind, und dass 2) die Flächen E , E' in den Linien p , p' von abwickelbaren Flächen berührt werden können, deren entsprechende erzeugende Gerade PR , $P'R'$ die Linien p , p' unter gleichen Winkeln schneiden und von den folgenden entsprechenden Erzeugenden QR , $Q'R'$ in den Punkten R , R' der Wendecurven jener abwickelbaren Flächen stets so geschnitten werden, dass $PR = P'R'$ ist. Wäre diese Bedingung unter 2) nicht erfüllt, so wäre die relative Bewegung eine bohrend-rollende; wären entsprechende Bogenelemente PQ , $P'Q'$ der Linien p , p' nicht gleich lang, so wäre sie gleitend-rollend; fände beides nicht statt, so läge damit der allgemeine Fall einer bohrend-gleitend-rollenden Bewegung vor.

Berühren sich E und E' in einer Linie p , p' (p in E , p' in E' liegend und mit p zusammenfallend), so ist in den verschiedenen Punkten derselben die Art der relativen Bewegung im Allgemeinen verschieden. Bohrend kann die Bewegung nur in einem Punkte P , P' sein; in den übrigen Punkten der Berührungslinie ist sie dann gleitend, und zwar senkrecht zur Bohrungsaxe (der gemeinsamen Normale von E und E' im Punkte P , P') gerichtet, der Grösse nach proportional dem Abstände von dieser Axe. Dieselbe Curve der einen Fläche, z. B. p in E , fällt mit stets anderen congruenten Curven p' in E' zusammen, die sich alle in P' schneiden, und ist dann also E' , so weit diese Curven p' reichen, eine Umdrehungsfläche. — Gleitend in solcher Weise, dass in allen Punkten der Berührungslinie p , p' die Gleitungen gleich gerichtet und gleich gross sind, kann die relative Bewegung dann sein, wenn die eine der beiden Flächen, etwa E' , durch Translationsbewegung der Linie p entstanden gedacht werden kann, längs welcher sie von der anderen Fläche E in den wechselnden Linien p' berührt wird. — Rollend kann die Bewegung im Allgemeinen nur in einem Punkte sein, während sie in den übrigen Punkten der Berührungslinie dann gleitend-rollend ist. Diese gleitend-rollende Bewegung kann in allen Punkten der Berührungslinie gleich sein, wenn E und E' geradlinige Flächen sind, die sich stets in einer gemeinschaftlichen geraden Erzeugungslinie p , p' berühren, längs welcher die elementare Gleitung und um welche die elementare Drehung stattfindet. Sind E und E' abwickelbare Flächen, so kann die relative Bewegung eine für alle Punkte der geraden Berührungslinie gleiche rollende Bewegung sein, und sind dann die gleichzeitig abgewickelten Flächenelemente von E und E' stets einander gleich.

Berühren sich endlich E und E' in einer Fläche, so ist die Bewegung im Allgemeinen nur gleitend; die bohrende Bewegung ist wieder nur in einem Punkte, die rollende dagegen nur vorübergehend in Punkten des Umfanges der Berührungsfläche möglich.

Zwei Körper, die einen gegenseitigen Druck auf einander ausüben, berühren sich, da sie nie absolut starr sind, streng genommen stets in einer Fläche. Was dabei als eine bohrende Bewegung erscheint, ist eigentlich eine Gleitung, die in den verschiedenen Punkten jener Berührungsfläche senkrecht gegen die Perpendikel auf die Drehungsaxe gerichtet und denselben proportional ist. Die scheinbar rollende Bewegung ist eine stetige Folge von Drehungen um Berührungslinien der auf einander folgenden Berührungsflächen und wegen der wechselnden Deformationen beider Körper sowohl mit Gleitung und Reibung an ihren sich berührenden Oberflächen wie auch, den relativen Bewegungen im Innern der Körper entsprechend, mit inneren Reibungen verbunden.

Die Arbeitsverluste durch Bewegungswiderstände bei einer in Betrieb befindlichen Maschine nach vorstehenden Andeutungen einzeln und vollständig in Anschlag zu bringen, ist meistens unthunlich theils wegen mangelnder Kenntniss der dazu nöthigen Erfahrungswerthe, theils wegen übergrossen Zeitaufwandes, der dazu erforderlich wäre und weder dem erreichbaren Genauigkeitsgrade noch der beschränkten Wichtigkeit des Resultates entsprechen würde. In der Regel muss man sich vielmehr mit erfahrungsmässiger Schätzung der Werthe von M und μ in Gl. (1) für die verschiedenen Arten von Maschinen begnügen, besonders dann, wenn ihre Bewegungswiderstände von sehr mannigfaltiger und grossentheils von besonderer, der betreffenden Maschine eigenthümlicher Art sind. Insoweit sie aber von mehr einfacher und allgemeiner Art und dabei von erheblichem Einflusse sind, kann eine eingehendere Berechnung derselben doch thunlich und nützlich sein, und gilt das namentlich von denjenigen, welche durch die drei zwangläufigen niederen Elementenpaare, also durch Prismenpaare, Drehkörperpaare (insbesondere als Zapfenreibung von Wellen in ihren Lagern) und durch Schraubenpaare, sowie auch von solchen, die durch die vorzugsweise zu kinematischer Kettenbildung verwendeten höheren Elementenpaare veranlasst werden, nämlich durch Zahnräderpaare, Walzenpaare (Reibungsräder- oder Rollenpaare) und durch Elementenpaare mit Zugkraftorganen, während dergleichen mit Druckkraftorganen, insbesondere als mit Hohlcylindern (Röhren) gepaarte Flüssigkeiten vorkommend, solche Widerstände verursachen, die nach hydraulischen Gesetzen zu beurtheilen sind und deshalb hier ausser Betracht bleiben. Widerstände

der genannten Gruppen von Elementenpaaren sind es vorzugsweise, die den gesammten mit einem Maschinenbetriebe verbundenen Arbeitsverlust bedingen und deshalb im Folgenden in nähere Untersuchung gezogen werden sollen, nachdem vorher die ihnen zu Grunde liegenden allgemeinen Reibungsgesetze im nächsten Paragraph besprochen sein werden.

§. 66. Reibungsgesetze im Allgemeinen.

Wenn zwei feste Körper sich in einer gewissen Fläche berühren, sei es in Folge ihrer Form (wie z. B. bei den Elementen eines Umschluss-paares) oder in Folge ihrer Deformation durch den gegenseitigen Normaldruck, so kommt die Reibung im engeren Sinne nur als Widerstand gegen die relativ gleitende Bewegung der Körper in Betracht, d. i. in Bezug auf die Bewegung des einen Körpers gegen den anderen als eine Kraft, die dieser Bewegung in der Berührungsfläche gerade entgegen gerichtet ist.*

* Wenn Reuleaux in einer Anmerkung zu seiner „theoretischen Kinetik“ (S. 599) die allgemein übliche Auffassung der Reibung als Widerstand für praktisch und wissenschaftlich unrichtig, für einen der logischen Klarheit ermangelnden Rest altererbter Auffassung der Mechanik erklärt, da man bei „Verfeinerung der Untersuchung“ finde, dass in jedem Falle die Reibung sowohl Bewegung verhindere wie solche erzeuge, so beruht dieses absprechende Urtheil theils auf dem Missverständnisse, als ob die Bezeichnung einer Kraft als Widerstand etwas dieser Kraft an und für sich Eigenthümliches ausdrücken solle, theils aber auch auf der Ausserachtlassung wirklich verfeinerter Anschauungen heutiger Naturwissenschaft. Wenn z. B. geltend gemacht wird, dass die Kolbenreibung einer Dampfmaschine deshalb kein Widerstand sei, weil der ihr entsprechende Verlust an lebendiger Kraft der Dampfwärme und somit der Leistung der Maschine wieder zu Gute komme, so bleibt damit doch diese Reibung ein Widerstand mit Bezug auf die bewegten Massen der Maschine und ist es übrigens nicht nur von der Reibung, sondern von allen Kräften gültig, dass jede Arbeit einer solchen den Uebergang von Arbeitsvermögen in eben solches von derselben oder von anderer Erscheinungsform, jedenfalls aber von gleicher Grösse vermittelt. Nach einem die heutige Naturwissenschaft beherrschenden Fundamentalgesetze ist eben die Gesamtgrösse des im Weltall vorhandenen Arbeitsvermögens unveränderlich, wie auch die Formen desselben, durch die Arbeiten von Kräften vermittelt, in beständiger gegenseitiger Umwandlung begriffen sein mögen. Als solche Formen des Arbeitsvermögens sind zu unterscheiden: äusseres und inneres freies und gebundenes Arbeitsvermögen. Unter einem freien Arbeitsvermögen (gewöhnlich als lebendige Kraft bezeichnet) ist ein solches zu verstehen, das eine bewegte Masse vermöge ihrer Bewegung besitzt, unter gebundenem aber ein solches, welches einer Gruppe von Massen in Folge ihrer relativen Lagen und der zwischen ihnen wirksamen Kräfte inne-

Ihre Grösse ist vor Allem von der des Normaldruckes Q abhängig und zwar wachsend mit demselben, weshalb sie $= \mu Q$ gesetzt zu werden pflegt, unter μ den sogenannten Reibungscoefficienten verstanden. Ist $\mu = \operatorname{tg} \varrho$, so heisst ϱ der Reibungswinkel, indem er derjenige Winkel ist, unter welchem eine den einen Körper gegen den anderen in der Berührungsfäche drückende Kraft P wenigstens gegen die gemeinsame Normale geneigt sein muss, um entgegen der Reibung seine gleitende Bewegung einleiten oder beschleunigen zu können. Wäre nämlich dieser Winkel $= \varphi$, so wäre die auf Gleitung wirkende Kraftcomponente $= P \sin \varphi$, der Normaldruck $= P \cos \varphi$, also die Reibung $= \mu P \cos \varphi$, und somit der Ueberschuss jener activen über diese passive Kraft

$$= P (\sin \varphi - \mu \cos \varphi)$$

nur dann positiv, wenn $\operatorname{tg} \varphi > \mu$, also $\varphi > \varrho$ ist.

wohnt. Dieses wie jenes kann weiter als äusseres und inneres unterschieden werden; ebenso nämlich wie das äussere freie Arbeitsvermögen einer als solche wahrnehmbaren Bewegung entspricht, d. h. einer Bewegung, bei der die materiellen Punkte des betreffenden Körpers Wege von messbarer Länge durchlaufen, das innere dagegen den hypothetischen, als solche nicht wahrnehmbaren und messbaren relativen Bewegungen der die Körper constituirenden Atome, kommt das äussere gebundene Arbeitsvermögen Systemen von messbaren Massen zu vermöge ihrer relativen Lagen in gegenseitigen Entfernungen von messbaren Grössen, das innere den Körpern selbst vermöge der relativen Lagen ihrer sie constituirenden hypothetischen Atome und der zwischen diesen wirksamen Kräfte. So wird in dem obigen Falle des Dampfkolbens durch die Reibung eine Verwandlung von äusserem in inneres freies Arbeitsvermögen (Wärme) vermittelt. In anderen Fällen hat die Reibung eine zusammengesetztere, mehr mittelbare Wirkung, wie z. B. in dem von Reuleaux gleichfalls angeführten Falle der durch den Geigenbogen angestrichenen Saite, wobei sie es möglich macht, dass äussere lebendige Kraft vom Bogen auf die Saite übergehen kann, nicht aber ohne Verlust, da zugleich ein der Reibungsarbeit gleicher Theil der lebendigen Kraft des Bogens in innere lebendige Kraft, d. i. inneres freies Arbeitsvermögen (Wärme) verwandelt wird. Letzteres, nämlich die Verwandlung von äusserem in inneres Arbeitsvermögen (in freilich meist untergeordnetem Grade auch gebundenes inneres Arbeitsvermögen, insbesondere z. B. mit Rücksicht auf die Abnutzung der sich reibenden Körper) ist unter allen Umständen der unmittelbare Erfolg von Reibungsarbeit, und insofern unter Arbeit, Arbeitsvermögen und lebendiger Kraft schlechtweg in der Mechanik und Maschinenlehre allgemein äussere Arbeit, äusseres Arbeitsvermögen resp. äussere lebendige Kraft verstanden zu werden pflegt, kann man sagen, dass mit Reibung stets ein Verlust von Arbeit resp. äquivalenter lebendiger Kraft verbunden ist. Auf zwei in relativ gleitender Bewegung begriffene Körper wirkt sie zwar in entgegengesetztem Sinne, auf jeden aber als relative Widerstandskraft, nämlich in umgekehrten Sinne seiner relativen Bewegung gegen den anderen.

Mittelwerthe von μ , insbesondere gemäss den umfassenden Versuchen von Morin, finden sich in technischen Taschenbüchern angegeben. Erfahrungsmässig ist übrigens dieser Coefficient abhängig

1) von der materiellen Beschaffenheit der sich reibenden Körper (gleichartigen Körpern entspricht im Allgemeinen ein grösseres μ , als ungleichartigen),

2) von ihrer Oberflächenbeschaffenheit sowohl an und für sich (wachsend mit der Rauigkeit), als in Bezug auf die Bewegungsrichtung (insbesondere z. B. bei Hölzern, überhaupt bei faserigen Körpern),

3) von der Beschaffenheit einer zwischen den Reibungsflächen etwa vorhandenen flüssigen oder weichen Substanz (Wasser, Oel, Fett, Seife), die den Werth des Coefficienten μ um so ausschliesslicher bestimmt, in je dickerer Schicht sie vorhanden und je kleiner der specifische Druck (Druck pro Flächeneinheit) ist, so dass die Oberflächen sich um so weniger unmitttelbar berühren, je glatter sie zugleich sind,

4) von der Grösse des specifischen Druckes p ,

5) von der relativen Geschwindigkeit v , mit der die Körper längs einander gleiten.

Was diese Einflüsse unter 4) und 5) betrifft, so wächst μ zugleich mit p insbesondere nach Versuchen von Rennie (Stahl und Messing auf Gusseisen, Gusseisen und Schmiedeeisen auf Schmiedeeisen bei etwas fettigen Oberflächen); wenn indessen p unter eine gewisse Grenze sinkt, so kann es bei sehr glatter oder fettiger Oberfläche auch der Fall sein, dass μ mit weiter abnehmenden Werthen von p nicht ab-, sondern zunimmt.

Dass μ mit wachsender Geschwindigkeit v abnimmt, haben insbesondere die Versuche von Bochet ergeben, angestellt mit Eisenbahnfahrzeugen, die bei festgestellten Rädern mittels besonderer, an der Sohle mit verschiedenen Substanzen bekleideter Schuhe auf den Schienen gleitend fortbewegt wurden. Ihnen zufolge soll, wenn v in Metern pro Secunde ausgedrückt ist,

$$\mu = \frac{\mu_0 - \mu_1}{1 + 0,3 v} + \mu_1$$

gesetzt werden können, in welcher Formel μ_0 und μ_1 die Werthe von μ beziehungsweise für $v = 0$ und $v = \infty$ bedeuten. Für dieselben ergaben sich u. A. die folgenden Werthe bei den angeführten Bekleidungen der Schuhe und specifischen Drucken p in Kgr. pro Quadratcentim.

	μ_0	μ_1
Trockenes weiches Holz bei $p > 10$	0,6	0,3
Trockenes hartes Holz bei $p > 10$	0,55	0,25

	μ_0	μ_1
Halbpolirtes Eisen, trocken oder nass, bei $p > 300$. . .	0,3	0,15
" " , trocken bei $p > 100$	} 0,25	} 0,075
" " , polirt und geschmiert bei $p > 20$		
Nicht harziges Holz, genässt mit Wasser bei $p > 20$		
Polirtes und angefettetes Holz bei $p > 20$	0,16	0,06

Die Werthe von μ_0 sind zugleich im Allgemeinen als die sogenannten Reibungscoefficienten der Ruhe, d. h. als diejenigen zu betrachten, die einer erst beginnenden Bewegung entsprechen. In gewissen Fällen, insbesondere z. B. für Holz oder Leder auf feuchten oder fettigen Eisenbahnschienen, sowie auch bei sehr grossen Werthen von p ist indessen dieser Reibungscoefficient der Ruhe, namentlich wenn letztere lange Zeit gedauert hat, merklich grösser als derselbe für eine selbst sehr langsame Bewegung. —

Die Mannigfaltigkeit der Umstände, von denen hiernach der Reibungscoefficient abhängt, deutet auf verschiedene Ursachen, deren Zusammenwirken den fraglichen Widerstand zur Folge hat. Als diese Ursachen sind anzuführen: die Rauigkeit der Oberflächen, die Deformation der Körper und die Molekularanziehung.

Die Rauigkeit der Oberflächen hat zur Folge, dass die Körper mit kleinen Vorsprüngen und Vertiefungen in einander eingreifen, und dass somit die Verschiebung des einen Körpers gegen den anderen wiederholte Erhebungen des ersteren entgegen dem Drucke Q längs kleinen schiefen Ebenen des anderen nöthig macht. Ist φ der mittlere Neigungswinkel der letzteren gegen die scheinbare Berührungsfläche der Körper, so muss die längs dieser wirkende Kraft R , um eine Verschiebung zu ermöglichen, die durch folgende Gleichung bestimmte Grösse haben:

$$R \cos \varphi = Q \sin \varphi, \text{ woraus } \mu = \frac{R}{Q} = \operatorname{tg} \varphi$$

folgt. Indem man sich die Erhabenheiten und Vertiefungen der Körperoberflächen von sehr verschiedenen abgerundeten Formen vorzustellen hat, wird φ und somit μ um so grösser sein, je tiefer die einen in die anderen durchschnittlich eingreifen, und das wird um so mehr der Fall sein, nicht nur je rauher die Körperoberflächen, sondern auch je gleichartiger die Rauigkeiten beider sind, womit es abgesehen vom Einflusse der Molekularkräfte zusammenhängen mag, dass der Reibungscoefficient grösser für gleichartige, als für ungleichartige Körper gefunden zu werden pflegt.

Durch den Druck Q werden die Körper mehr oder weniger deformirt und zwar so, dass der kleinere resp. der nächst der Berührungsfläche

stärker convex gekrümmte Körper abgeplattet und in den anderen um einen gewissen Betrag hinein gedrückt wird. Je mehr das der Fall ist, unter desto grösserem Winkel ist die effective Berührungsfläche gegen die scheinbare, längs welcher die gleitende Bewegung stattfindet, am Rande geneigt, desto grösser deshalb auch μ , sofern ein gewisses beständiges Hinaufgleiten des abgeplatteten Körpers längs dem Eindrucke des anderen vorhergehen muss, um diesen Eindruck im Sinne der Bewegung von Stelle zu Stelle fortschreiten zu lassen. Indem aber solche Deformation natürlich um so beträchtlicher ist, je grösser der specifische Druck p , erklärt sich dadurch das Wachsen von μ mit p .

Dass μ auch mit abnehmender Geschwindigkeit v zunimmt, mag u. A. dadurch bedingt sein, dass sowohl das periodische Eingreifen der Erhabenheiten der einen in die Vertiefungen der anderen Körperoberfläche, als auch die so eben erwähnte Deformation einer gewissen Zeit zur Ausbildung bedarf, dass somit beides um so vollständiger zu Stande kommt, je langsamer die relative Bewegung ist.

Die Molekularanziehung kommt um so mehr zur Geltung, je inniger die Berührung ist, je glatter nämlich die Oberflächen sind oder je mehr ihre Vertiefungen durch eine flüssige oder weiche Zwischensubstanz ausgefüllt werden. Geschieht letzteres in solchem Grade, dass die festen Körper sich überhaupt kaum mehr unmittelbar, sondern vorzugsweise mittelbar, nämlich eben durch Vermittelung jener Zwischensubstanz berühren, so beruht der Widerstand gegen die relativ gleitende Bewegung vorwiegend auf der inneren Reibung, mit der die relativen Molekularverschiebungen dieser Zwischensubstanz verbunden sind. Je grösser übrigens der specifische Druck p ist, desto weniger wird das Eindringen der Erhabenheiten der einen in die Vertiefungen der anderen Körperoberfläche durch die fragile Zwischensubstanz verhindert.

I. Reibung von Prismenpaaren.

§. 67. Kolbenreibung.

Die Reibung von Prismenpaaren ergibt sich meistens so unmittelbar als Folge des Druckes in der prismatischen Elementenfläche und eines erfahrungsmässigen Reibungscoefficienten, dass sie weiterer Besprechung an dieser Stelle nicht bedarf. Besondere Erwähnung wegen ihres erheblichen