

Biblioteka Główna i OINT
Politechniki Wrocławskiej



100100375356

Ł 422
m

Archiwum



E 422
m

Ueber die Reibung

und

den Widerstand der Fuhrwerke auf Straßen

von

verschiedener Beschaffenheit.

Von

Herrn Dr. r.



Mit 3 Tafeln

Aus den Verhandlungen des Vereins zur Beförderung des Gewerbefleißes in Preußen besonders abgedruckt.

1912. 1133

Berlin.

Gedruckt bei S. Petzsch.

1850.

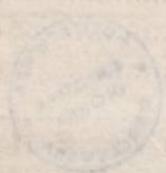
g22. c.

Heber die Hebung

den Wirtstand der Arbeiter auf Strafen

Verfälschung des Geschäfts

Herrn Herr



Jan. 1973.

357771L/1

Wrocław

Wrocławski Instytut Techniczny

1850

von verschiedener Beschaffenheit S. 108 bis 222

181 Zusammenstellung dieser Versuche mit Erfahrungen	
177 Erfahrungen über den Widerstand der Reibwerke beim Einweichen von Straßen auf weiche	
181 Zusammenstellung der neueren Versuche über den Widerstand auf Straßen	

I n h a l t.

I. Historischer Vorbericht S. 2 bis 32

II. Zusammenstellung der Versuche über die gleitende Reibung » 33 » 114

Versuche von Musschenbroek.....	» 34
» » Coulomb.....	» 36
» » George Kennie.....	» 53
Zusammenstellung verschiedener anderer Versuche.....	» 64
Versuche von Morin.....	» 66

III. Zusammenstellung der Versuche über die drehende Reibung S. 115 bis 151

Versuche von Musschenbroek.....	» 115
» » Coulomb.....	» 117
» » George Kennie.....	» 125
Bemerkungen über die Kennie'schen Versuche.....	» 129
Neue Theorie der drehenden Reibung.....	» 134
Coulomb's Versuche zur Bestimmung der Reibung, die ein Körper erleidet, der sich auf der Spitze einer senkrecht stehenden Spindel dreht.....	» 139
(Die Morin'schen Verf. über die drehende Reibung sind S. 222 nachgetragen.)	

IV. Experimentelle und theoretische Untersuchungen über die wälzende Reibung S. 152 bis 167

Versuche von Coulomb und einigen Andern.....	» 152
» » Ronbelet.....	» 154
» » Dupuit.....	» 155
Theoretische Untersuchungen über die wälzende Reibung.....	» 159

Es giebt im Bereich der Naturerscheinungen vielleicht wenig Gegenstände, welche die Aufmerksamkeit der Physiker so lange und, ich darf sagen, mit so geringem Erfolge gefesselt haben, als das Phänomen der Reibung. — Während des ganzen vorigen Jahrhunderts haben sich die berühmtesten Autoritäten, denen die physikalischen und mathematischen Wissenschaften anderweitig die wichtigsten Entdeckungen verdanken, mit der Untersuchung der Reibung beschäftigt, ohne gleichwohl diesem scheinbar so einfachen Gegenstande allgemein gültige Gesetze und mit der Erfahrung übereinstimmende Resultate abzugewinnen. Und selbst jetzt, nachdem seit den ersten Beobachtungen über die Reibung fast anderthalb Jahrhunderte verflossen sind, sehen wir uns blos auf eine gewisse Anzahl von Näherungswerthen beschränkt, die entweder der Erfahrung nur innerhalb sehr beschränkter Grenzen genügen, oder die, was das Schlimmste dabei ist, theilweise im directen Widerspruch mit einander stehen. In der That ist es eine eigenthümliche, und für das Wesen der Reibung sehr charakteristische Erscheinung, die durch frühere Beobachtungen gewonnene Erkenntniß durch spätere Versuche jedesmal wieder in Frage gestellt zu sehen, so daß abermals neue Versuche wünschenswerth bleiben, um jene Widersprüche zu heben, und das Wahre vom Falschen zu unterscheiden. — Betrachtungen dieser Art mögen wohl die Veranlassung gewesen sein, daß der Wohlthätige Verein zur Beförderung des Gewerbleißes in Preußen im Jahr 1827 eine, den Reibungswiderstand betreffende, Preisaufgabe stellte, in welcher, außer neuen Versuchen zur Vervollständigung der früheren, eine sorgfältige Zusammenstellung der bis dahin bekannt gewordenen Beobachtungen über die Reibung verlangt wurde. Wenn gleich nun auf den Antrag der Abtheilung für Mathematik und Mechanik, deren Mitglied zu sein ich die Ehre habe, obige Preisaufgabe mit Rücksicht auf die inzwischen von Herrn Morin in Metz, nach einem sehr umfassenden Plane angestellten Versuche im Jahr 1835 zurückgenommen wurde, so konnte doch die Sache selbst keinesweges als völlig erledigt angesehen werden; vielmehr blieb dem wissenschaftlichen Techniker immer noch der Wunsch übrig, die durch so mannichfache Beobachtungen gewonnenen, und theilweise in verschiedenen Schriften zerstreuten Resultate in einer übersichtlichen Zusammenstellung geordnet vorlegen zu sehen.

In wie fern die gegenwärtige Abhandlung geeignet ist, etwas zur Befriedigung dieses Wunsches beizutragen, muß der sachkundigen Beurtheilung anheimgestellt bleiben. Der Verfasser erlaubt sich, bevor er zu der speciellen Darlegung der durch die verschiedenen Versuche über die Reibung gewonnenen Resultate übergeht, zunächst in einer historischen Uebersicht diejenigen Naturforscher, welche sich hauptsächlich mit der Untersuchung des fraglichen Widerstandes beschäftigt haben, namhaft zu machen, und die Ansichten, welche sie von diesem Gegenstande hegten, darzulegen.

I.

Historischer Vorbericht.

Amontons*) scheint der erste gewesen zu sein, der über die Reibung Beobachtungen anstellte. Seine Versuche, die er in Gegenwart der Akademie der Wissenschaften zu Paris machte, tragen noch ganz den Character des ersten rohen Anfangs. Auf einer Ebene von Kupfer, Eisen, Blei, oder Holz, überzogen mit Wagenschmiere (vieux oing), wurden andere Körper aus ähnlichen Materialien und von verschiedener Größe gelegt. Nachdem dieselben durch eine gespannte Feder, welche einen bestimmten Druck ausübte, angepreßt, und die zu ihrer Fortbewegung erforderliche Kraft durch eine Federwaage ausgemittelt war, fand man folgende Resultate: 1) daß der Reibungswiderstand proportional der Pressung und unabhängig von der Größe der Berührungsfläche sei; 2) daß dieser Widerstand für alle Körper, womit die Versuche angestellt wurden, beinahe gleich groß, und ohngefähr $\frac{1}{3}$ der Pressung sei; 3) daß derselbe bei bewegten Körpern im zusammengefügten Verhältnisse der Pressung, der Zeit und der Geschwindigkeit sei.

Letzteres bezieht Amontons auf eine drehende Bewegung; denn zur Erläuterung vergleicht er den Widerstand bei einem Wagen mit dem einer Schleife, indem er bemerkt, daß derselbe bei jenem in dem Verhältnisse des Umfangs der Ase zu dem Umfange des Wagenrades geringer sei, als bei dieser. In Folge derselben Prinzipien, setzt Amontons noch hinzu, zeige sich auch die Reibung in allen Maschinen und bei allen Lasten, die sich horizontal um eine Ase drehen, wie z. B. bei der Waage, verhältnißmäßig so gering. Man sieht hieraus, daß Amontons den absoluten Werth der Reibung mit dem Momente dieses Widerstandes bei drehender Bewegung verwechselt, ein Fehlschluß, der nach ihm auch noch von andern Physikern gemacht wird.

Daß die Reibung von der Größe der Berührungsfläche unabhängig ist, sucht Amontons noch durch Vermuthschlüsse darzuthun; allein dessenungeachtet verursachte dieser Satz einiges Erstaunen bei den Mitgliedern der Akademie, weil man bis dahin geglaubt hatte, die Reibung wachse im geraden Verhältnisse mit der Berührungsfläche. Daher sah sich De la Hire**) veranlaßt, die Versuche mit Hölzern von verschiedenen Seitenflächen, aber bei ungleicher Pressung, zu wiederholen. Er befestigte eine Schnur an dieselben, leitete diese horizontal über eine Rolle und hing Gewichte daran auf, wodurch er fand, daß in der That immer derselbe Widerstand zu überwinden war, die Hölzer mochten mit einer großen, oder mit einer kleinen Seitenfläche aufliegen. Denselben Erfolg hatten ähnliche Versuche mit Marmorstücken, die bloß auf Sandstein abgeschliffen, aber nicht polirt waren.

De la Hire sucht nun diese Erscheinung aus der physikalischen Beschaffenheit der Körper, die über einander fortgleiten, zu erklären, indem er voraussetzt, die Unebenheiten der Berührungs-

*) Mémoires de l'Académie royale des Sciences. An 1699. p. 206.

**) Hist. de l'acad. An 1699. p. 104.

flächen, durch deren Steinandergreifen der Reibungswiderstand entsteht, seien entweder biegsam und elastisch, oder ganz hart und unelastisch. Im ersten Falle denkt er sich die Rauigkeiten als kleine elastische Federn, welche sich bei der gleitenden Bewegung biegen und niederlegen müssen, und dabei werde der Widerstand um so größer seyn, je stärker diese Federn gebogen werden müssen. Dies als richtig vorausgesetzt, so würde natürlich bei einerlei Druck auf die ganze Berührungsfäche die Biegung einer jeden Feder, folglich auch ihr Widerstand, sich umgekehrt wie die Anzahl sämmtlicher Federn verhalten, so daß also der gesammte Widerstand für jede Anzahl Federn, mithin für jede Größe der Berührungsfäche, constant einerlei Werth behalten müßte. Im zweiten Falle, wo die vorspringenden Unebenheiten hart und unbiegsam sind, kann der eine Körper über den Andern nur dadurch fortgleiten, entweder daß er etwas gehoben wird, um die Vorrangungen aus den Vertiefungen zu befreien, und dann ist der Widerstand nur allein vom Druck abhängig; oder die vorspringenden Theilchen müssen abbrechen, welches offenbar eine desto größere Kraft erfordert, je mehr solcher Theilchen loszureißen sind, so daß also in diesem Falle der Widerstand mit der Berührungsfäche zunimmt.

De la Hire bemerkt noch, daß der Widerstand auch in einer andern Beziehung mit der Größe der Berührungsfäche wachsen könne, wenn nämlich eine so innige Berührung in allen Punkten stattfinde, daß durchaus keine Luft dazwischen ist, welche durch ihre Repulsivkraft dem äußern Luftdrucke das Gleichgewicht hält. Dieser Fall trete z. B. jedesmal ein, wenn die Berührungsfächen mit Del oder Schweinfett geschmiert, und durch eine beträchtliche Kraft zusammen gepreßt werden, wodurch alle Luft ausgetrieben wird.

Zu diesen Hypothesen über die Ursachen der Reibung fügt *Paréut* noch eine neue, wie es scheint, hauptsächlich in der Absicht erfunden, um die sonderbare Behauptung *Amatons*, daß die Reibung für alle Körper einerlei und gleich $\frac{1}{8}$ des Normaldruckes sei, geometrisch zu beweisen. Er betrachtet nämlich *) die Erhabenheiten der Flächen als Halbkugeln von gleichen Durchmessern, die sich bei der Berührung in die Zwischenräume dreier anderer Halbkugeln der berührten Fläche lagern, dergestalt, daß die Mittelpunkte der vier Halbkugeln, welche jedesmal in Berührung mit einander sind, die Eckpunkte eines regulären Tetraeders bilden. Von dieser Voraussetzung ausgehend bestimmt er die Kraft, welche an dem Körper nach horizontaler Richtung wirken muß, um ihn eben so im Gleichgewicht zu erhalten, als wenn er auf einer schiefen Ebene läge, und findet ihre Größe im Verhältniß zu dem Gewichte des Körpers $= 1:1/8$, oder näherungsweise $= 7:20$; woraus er nun schließt, daß die Reibung für alle Substanzen $\frac{7}{20}$ der Pressung betrage, welches nur wenig von $\frac{1}{8}$ abweiche. Die Richtigkeit dieses Gesetzes erfahrungsmäßig zu bestätigen, hat *Paréut* später noch Versuche angestellt, wozu er zuerst eine bewegliche schiefe Ebene gebrauchen lehrt, der man eine solche Reibung gegen den Horizont geben kann, daß ein darauf gelegter Körper bloß durch die Reibung eben am Abgleiten verhindert wird. Diese Reibung der schiefen Ebene nennt *Paréut* den Gleichgewichtswinkel (*l'élevation d'équilibre*) und zeigt, daß dessen trigonometrische Tangente das

*) Hist. de l'acad. An 1700. p. 145—150.

Verhältniß der Reibung zum Gewicht des Körpers angiebt*). Das Resultat dieser Versuche ist, daß die Reibung nicht genau für alle Substanzen dieselbe, sondern für Eisen, Kupfer, Blei und Holz, mit Wagenschmiere (vieux oing) geschmiert, manchmal etwas größer oder geringer als $\frac{1}{4}$ sei, so daß man diese Zahl als den Mittelwerth annehmen könne. Eine Fortsetzung dieser Versuche theilt Parent in einer zweiten Abhandlung**) mit, woraus hervorgeht, daß weder die Größe der Berührungsfläche, noch der Grad der Geschwindigkeit irgend einen Einfluß auf die Größe der Reibung habe.

Aus Veranlassung einer Abhandlung von L. E. Sturm, in den Berliner Miscellaneen, über die Reibung in den Maschinen, worin weiter keine neuen Ansichten aufgestellt werden, unterwirft der berühmte Leibnitz diesen Gegenstand einer kurzen Erörterung †). Er erklärt, wie De la Hire, die Entstehung der Reibung aus dem Ineinandergreifen der Erhöhungen und Vertiefungen der Berührungsflächen, welche bei der fortschreitenden Bewegung entweder abgebrochen, gebogen, oder auseinander gehoben werden müssen, und fügt die Bemerkung hinzu, daß, wenn durch länger anhaltende Bewegung die Berührungsflächen glätter werden, die Friction abnimmt, bis sie ein gewisses Minimum erreicht. In diesem Falle werden sich die niedergedrückten Theilchen vermöge ihrer Elasticität vollkommen wieder erheben und der Bewegung aufs neue widerstehen, ähnlich als wenn eine Kugel oder Walze über eine harige Fläche bewegt wird. Er tritt der Hypothese Amontons bei, daß die Größe der Berührungsfläche keinen Einfluß auf den Widerstand der Reibung habe; daß dagegen die physikalische Beschaffenheit derselben, welche Amontons ganz bei Seite setzt, allerdings mit in Betracht zu ziehen sei, wodurch also die Behauptung seiner Vorgänger, die Reibung sei für alle Substanzen gleich groß, zum erstenmal in Abrede gestellt wird. Ferner erwähnt Leibnitz der ungeheuren Reibung eines, um einen unbeweglichen Cylinder geschlungenen und an beiden Enden mit Gewichten belasteten Seiles, so wie er auch der Erste ist, der gemäß der Natur einer progressiven oder rollenden Bewegung eine gleitende und eine wälzende Reibung unterscheidet, von welchen letztere, die sich an den Umfängen der Wagenräder und der untergelegten Walzen beim Fortschaffen großer Lasten bemerklich mache, beträchtlich geringer sei, als erstere.

De Camus ††) stellte ziemlich ausgedehnte Versuche an, zur Ausmittelung des Widerstandes, den belastete Schlitten und Wagen bei ihrer Bewegung über eine horizontale Ebene erleiden. Die dadurch gewonnenen Resultate stimmen nur darin mit den von Amontons gefundenen überein, daß 1) die gleitende Reibung (coet. par.) von der Größe der Berührungsfläche unabhängig ist, und 2) mit der Größe der Bewegung zunimmt, welches letztere jedoch wieder auf drehende Bewegung bezogen und dabei das Moment der Reibung mit dieser selbst verwechselt wird. Dagegen findet De Camus, im Widerspruch mit Amontons, daß die Reibung nicht für alle Körper gleich groß, sondern je nach ihrer Beschaffenheit und je nachdem die Berührungsflächen trocken, mit

*) Mém. de l'acad. de Paris. An 1704. p. 173 seq.

**) a. a. O. p. 195.

†) Miscell. Berol. A. 1710. p. 307—317.

††) Traité des forces mouvantes. Paris 1722. p. 305 seqq.

Wasser genäßt, geölt oder mit Fett eingeschmiert sind, verschieden sei; daß ferner die Reibung der Pressung nicht proportional, sondern bei kleinen Pressungen verhältnismäßig viel größer sei, als bei großen, was sich besonders bei Anwendung von Fettschmiere sehr auffallend herausstellte, wo für Belastungen von 1 Unze die Reibung zwischen zwei bis dreimal so groß gefunden wurde, als wenn die Belastung 3 Pfund betrug. So war z. B. die Reibung des Eisens, bloß glatt gefeilt aber nicht polirt,

	bei einer Belastung von	3 P.,	hingegen bei 1 Unze;
Eisen auf Holz.....	{ trocken	5 —	6
	{ geschmiert	4½ —	10
„ auf Eisen.....	{ trocken	3 —	4
	{ geschm.	3½ —	13
„ auf Messing.....	{ trocken	3½ —	5
	{ geschm.	4½ —	13
„ auf „ polirt	{ trocken	3 —	6
	{ geschm.	4 —	13
„ auf Kupfer.....	{ trocken	3½ —	6
	{ geschm.	4½ —	13

wo die Zahlen sich auf Zwanzigstel der Belastung als Einheit beziehen. Ueberhaupt schließt de Camus aus seinen Versuchen, daß eine fettige Schmiere zwischen den Berührungsflächen nichts zur Verminderung der Reibung beitrage, sondern sie wohl eher noch vergrößere; allein dessen ungeachtet sei eine solche Schmiere in den Maschinen von Nutzen, insofern sie den Gang derselben gleichmäßiger und sanfter mache und das Abnutzen der reibenden Theile verhindere. Ich enthalte mich, die Camus'schen Versuche alle hier mitzutheilen, weil sie bei den geringen Belastungen von höchstens 3 Pfund unmöglich praktisch brauchbare Resultate liefern könnten, weshalb denn auch die angeführte Folgerung in Bezug auf die Vergrößerung der Reibung durch Anwendung fettiger Maschinenschmiere dem wissenschaftlichen Praktiker durchaus nicht unerwartet kommen kann.

Versuche über die Reibung bei größeren Belastungen sind zwar von Leupold*) angestellt, allein da er sich nur auf die Ausmittelung des Widerstandes für Holz auf Holz beschränkte, so ist dadurch für die Anwendung nicht viel gewonnen. Zur Beobachtung der gleitenden Reibung ließ Leupold gehobelte Bretter horizontal über einander fortgleiten; die Reibung der Wellenzapfen untersuchte er aber mit hölzernen Cylindern, die an beiden Enden in halbrunden Lagern von demselben Durchmesser ruhten. Um diese Cylinder wurde eine Schnur geschlungen, die herab hängenden Enden mit gleich großen Gewichten von 30 bis 60 Pfund belastet, und auf der einen Seite so lange Uebergewicht zugelegt, bis der Cylinder anfang sich zu drehen. Auf solche Weise findet Leupold, übereinstimmend mit Amontons, die Reibung unabhängig von der Größe der Berührungsfläche oder von der Dicke des Cylinders jedesmal gleich 1/20 der Last. Jedoch setzt er

*) Theatr. Machin. Gen. 1724. Cap. XVI. pag. 78 u. f.

hingzu, es sei dies in Bezug auf die Zapfenreibung so zu verstehen, daß $\frac{1}{2}$ des einen Gewichts die Reibung überwunden habe, so daß, wenn auf jeder Seite des Cylinders 24 Pfund, also zusammen 48 Pfund aufgehängt würden, alsdann das Drittel von 24 Pfund zur Ueberwindung der Friction hinreichend war^{†)}. Hiernach würde also bei hölzernen Zapfen und Lagern die Reibung nicht zu $\frac{1}{2}$, sondern zu $\frac{1}{3}$ der Last geschätzt werden müssen, was dann auch mit andern weitigen Erfahrungen besser übereinstimmt. — Den oben beschriebenen Versuch stellte Leupold mit Cylindern an, deren Oberfläche trocken und noch ganz in dem Zustande waren, wie sie der Drechsler angefertigt hatte. Würden dieselben aber nachher mit Baumöl eingeschmiert, so stieg die Reibung auf das Doppelte, wogegen sie sich um ein paar Pfund verminderte, wenn statt des Baumöls Seife oder Unschlitt angewendet wurde. Obgleich nun Leupold die Amontons'sche Regel von der Größe der Reibung beibehält, so verwahrt er sich doch gegen jede ungehörige Generalisation derselben^{**)}, indem er sagt: „es ist hierauf kein Universal-Schluss und Satz zu machen, daß man also bei jeder Maschine $\frac{1}{2}$ der Last zum Uebergewicht wegen der Friction nöthig hätte;“ man habe dabei vielmehr auf die Materie der Berührungsfäche, auf den Grad ihrer Rauigkeit oder Unebenheit, auf die Form der rauhen Theile und ihre Tiefe und Höhe, so wie auf die Richtungslinie der bewegenden Kraft Rücksicht zu nehmen. Auch erleide die Regel von der Größe der Berührungsfäche eine starke Ausnahme, wenn nämlich die Unebenheiten der Berührungsfächen losgerissen oder abgebrochen werden müssen; wegen die Reibung für jede Größe der Flächen dieselbe bleibe, wenn keine Abnutzung stattfindet. Uebrigens zeigt Leupold sehr richtig, daß mehrere seiner Vorgänger, und namentlich Sturm, in Bezug auf die Größe der Reibung bei drehender Bewegung in einem Quidproquo befangen waren, da hierbei keinesweges von dem absoluten Werthe der Reibung, wohl aber von ihrem statischen Momente (wofür man in neuerer Zeit ganz unndthiger Weise die Benennung „relative Reibung“ gebraucht hat) die Rede sein könne.

Die Versuche Bülfinger's^{††)} über die gleitende Reibung weichen nur insofern von den Amontons'schen ab, als sie die Größe der Reibung für alle Substanzen gleich $\frac{1}{2}$ der Pressung geben. Bülfinger bediente sich, nach dem Vorgange von Parent, einer aus Eichen- oder Buchenbaumholz gefertigten, schiefen Ebene, und findet, daß alle von ihm untersuchten Körper denselben Neigungswinkel erforderten, um auf der schiefen Ebene bloß vermöge der Reibung im Gleichgewicht zu bleiben. Diesen Winkel, den er den Ruhewinkel (angulus quietis) nennt, findet er unabhängig von dem Gewichte der Körper und von der Größe ihrer Lagerfläche, allemal zwischen 12 und 15 Graden, wobei es keine Aenderung hervorbrachte, wenn die schiefe Ebene mit Del eingeschmiert, oder nachher wieder abgetrocknet wurde. Daß aber auch metallene Kugeln und geglättete Cylindern, wenn sie auf die schiefe Ebene gelegt wurden, denselben

†) Comment. acad. sc. Imp. Petrop. T. II. A. 1727. p. 403. sqq. De frictionibus corporum solidorum specimen, auct. G. B. Bülfingero.

Nahewinkel wie hölzerner Prismata erfordert haben sollen, wie Buffinger angeblich gefunden hat, ist eine allen früheren Erfahrungen widersprechende Anomalie, und kann wohl nur auf reinem Mißverständnisse beruhen. In dem 2ten und 3ten Versuch wird die Ursache und die Ursache angegeben. Desaguliers*) und Belidor kommen wieder ganz auf die ursprünglichen Resultate Amontons zurück, die jeder nach seiner Art zu vertheidigen bemüht ist. — Ersterer nennt es zwar ein mechanisches Paradoxon, daß Körper aus Holz, Eisen, Kupfer, Messing, Blei etc., wenn diese Substanzen wie in den Maschinen mit Del oder Fett geschmiert werden, dieselbe Reibung erleiden, was er durch eigene Versuche bestätigt gefunden, allein er erklärt dies als ganz richtig durch die Anziehungskraft der Adhäsion, welche sich um so stärker äußert, je inniger sich die Körper mit den Flächen berühren. Dem durch eine größere Politur oder durch Anwendung fettiger Schmiere, sagt Desaguliers, werde zwar die Reibung an sich geringer, aber in demselben Maße nehme die Anziehungskraft zu, und so soll der gesammte Widerstand, sämmtlich genommen, stets constant bleiben. — Belidor**) hingegen stützt die Wichtigkeit dieses Satzes auf die geometrische Demonstration, von Parént, hergeleitet aus der Hypothese, daß die Berührungsfächen mit lauter kleinen Halbkugeln bedeckt sind, deren jede sich in dem Zwischenraum dreier anderer Halbkugeln festsetzen, und so den Reibungswiderstand hervorbringen. Er theilt diese Demonstration ausführlich mit, und drückt sein Bedauern darüber aus, daß sie leider, das gewöhnliche Schicksal der meisten nützlichen Entdeckungen habe, gerade von Denjenigen, für die sie am wichtigsten sein sollten, unbeachtet zu bleiben. Obgleich sich nun hieraus das Verhältniß der Reibung zum Druck = $1:18$ oder näherungsweise = $7:20$ ergibt, so behält Belidor doch die Verhältnißzahl $\frac{1}{3}$, der bequemeren Rechnung wegen, bei, weil sie nahe genug mit $\frac{7}{20}$ übereinstimme. Auch erwähnt er Versuche, die er nach der von Parént angegebenen Methode vermittelst einer beweglichen schiefen Ebene angestellt, und wodurch sich der Nahewinkel = $18^{\circ} 20'$ ergeben hat. Da nun die Tangente dieses Winkels = $0,33136$ ist, welches nur wenig von $\frac{1}{3}$ abweicht, so sieht man darin eine Bestätigung der Amontonschen Regel und der Parént'schen Demonstration. — Desaguliers theilt nicht bloß die Camus'schen Versuche vollständig mit, sondern versichert auch, sie sämmtlich wiederholt und bestätigt gefunden zu haben. Zu solchen Versuchen giebt er eine eigenthümliche Vorrichtung an, eine Friktionsmaschine, welche in Folgendem besteht. Eine Welle mit einem darauf festigenden kleinen Schwungrad liegt mit ihren $\frac{3}{8}$ Zoll dicken Zapfen auf Friktionsrädern, damit sie sich möglichst ohne Reibung drehen kann. Eine um diese Welle lose gewundene Spiralfeder ist mit dem einen Ende auf dem Mantel derselben, mit dem andern aber an einem unverrückbaren Gegenstande befestigt, und bewirkt auf diese Weise, daß die Welle mit dem Schwungrad, wenn sie um einen bestimmten Winkel gedreht wird, dann plötzlich losgelassen wird, wie die Uhr einer Taschenuhr, und hin- und hergehende Schwingungen macht. Um nun von irgend einer Substanz die Reibung zu untersuchen, wird ein aus dieser Substanz gefertigtes kreuzförmiges Blech horizontal auf die Welle gelegt, an einem Ende ver-

117091

*) Course of experim. philos. 1734. Von dem Jesuiten Mesme 1754 ins Französische übersezt.

) Architecture hydraulique 1737. in der Vorrede an Fontaine de la Minime de la Seine ()

mittelst eines durch eine Oeffnung gesteckten Stiftes so befestigt, daß es nicht kann verschoben werden, und durch verschiedene Gewichte, die wie bei einem einarmigen Hebel am andern Ende aufgehängt werden, mit dem breitem Theile mehr oder minder stark auf den Mantel der Welle gepreßt. Wird nun das Schwungrad um einen Winkel von etwa 90 Graden gedreht und dann plötzlich losgelassen, so ist die Anzahl der Schwingungen, die es bis zum Stillstande macht, desto kleiner, je mehr Gewichte an dem kleinern Ende des Bleches aufgehängt sind, und auf diese Weise zeigt die Zahl der Schwingungen, welche sich nach den Beobachtungen von Desaguliers umkehrt wie die Pressung verhalten soll, ein relatives Maas der Reibung zwischen der Substanz des Bleches und der der Welle.

Der berühmte Euler beschäftigte sich wiederholentlich, wiewohl bloß auf dem Wege der Spekulation, mit der Untersuchung der Reibung, und in den *Mémoires de l'Académie royale de Berlin* vom Jahr 1748, so wie in seinem Werke *Theoria motus corporum solidorum seu rigidorum* A. 1765. Supplementum, Caput I. entwickelt er mit der ihm eigenthümlichen Klarheit verschiedene Bemerkungen und Grundsätze, welche für spätere Untersuchungen über diesen Gegenstand von großem Nutzen waren. Die angeführten Memoiren enthalten zwei interessante Abhandlungen von ihm, von denen die eine *) Untersuchungen über die Reibung im Allgemeinen, die andere **) aber eine lichtvolle Theorie der Friktionsräder enthält. Als Ursache der Reibung betrachtet Euler die in einander greifenden Unebenheiten der Berührungsflächen, die er sich als eine Conglomeration von lauter sehr kleinen schiefen Ebenen vorstellt, über welche der zu bewegende Körper weggehoben werden muß. Dagegen sieht er es als ausgemacht an, daß die Reibung weder von einer Abschabung der Partikelchen noch von einer Niederdrückung der vorstehenden Fäden herrühren könnte, weil sonst die Größe der Berührungsfläche nothwendig mit ihr beträchtliche, was er im Widerspruch mit der Erfahrung glaubt. Aus der obigen Vorstellung von der Ursache der Reibung folgert er nun weiter, daß der Körper, sobald er in Bewegung gesetzt ist, abwechselnd steigen und fallen wird, da jene schiefen Ebenen äußerst klein sind; und weil das Abgleiten jedesmal von selbst geschieht, während der Körper sich bewegt, so macht sich der Widerstand der Reibung nur in Intervallen bemerkbar, da er nur in den Momenten des Aufsteigens, woraus er mit dem allerbüßigsten etwas gewägten Schluß zieht, daß während der Bewegung des Körpers die Reibung nur halb so groß sein soll, als wenn derselbe seinen Zustand der Ruhe noch nicht verlassen hat.

Dieß bringt er den Satz bei, daß die Tangente des Ruhewinkels einer schiefen Ebene, worauf ein Körper für sich im Gleichgewichte bleibt, das Verhältniß der Reibung zum Gewicht jenes Körpers anzeigt; aber wenn dieser von der schiefen Ebene herabgleitet, so giebt er zur Berechnung des Reibungscoefficienten, indem er die Reibung während der Bewegung als eine constante verzögernde Kraft voraussetzt, die Formel

$$\mu = \frac{g \sin \alpha}{g \cos \alpha}$$

worin

*) Sur le frottement des Corps solides. A. M. pag. 122—132.

**) Sur la Diminution de la Résistance du frottement. A. M. pag. 133.

worin μ das Verhältniß der Reibung zum Normaldruck, α den Neigungswinkel der schiefen Ebene, s den darauf zurückgelegten Weg, t die zugehörige Zeit in Sekunden und $g = 15,625$ rheinl. Fuß den Fallraum in der ersten Sekunde bedeutet. Auf diese Weise wurde also zuerst eine Verschiedenheit in der Größe der Reibung begründet, in so fern sie sich äußert, entweder kurz vor Anfang der Bewegung, oder während dieselbe schon stattfindet. Wenn auch spätere Beobachtungen die Meinung Euler's nicht bestätigen, daß während der Bewegung die Reibung unveränderlich und gerade nur halb so groß sei, als vor Anfang derselben, so stimmen sie doch darin überein, daß im ersteren Falle die Reibung beträchtlich kleiner ist als im letzteren. — von Segner *) unterscheidet daher beide Fälle durch die Benennungen Reibung der Ruhe und Reibung der Bewegung, welche Benennungen später beibehalten und noch jetzt gebräuchlich sind.

Sehr ausführlich und gründlich handelt Musschenbroek von dem Widerstande der Reibung, in seinen noch immer geschätzten physikalischen Werken**), worin er auch mehrere Reihenfolgen von Versuchen mittheilt, die er über diesen Gegenstand angestellt hat. In Betreff der physikalischen Erklärung des Phänomens der Reibung stellt er zwar keine neuen Ansichten auf, sondern ist darüber ziemlich einerlei Meinung mit De la Hire und Leibnitz; dagegen erklärt er die Folgerungen der meisten seiner Vorgänger, daß nämlich die Reibung für alle Körper gleich groß sei, als etwas zu voreilig. Denn aus guten Gründen und aus den von ihm angestellten Versuchen glaubt er sich zu dem Schlusse berechtigt, daß sich in Bezug auf die Größe des Reibungswiderstandes keine allgemeine Regel feststellen lasse, weil die Figur der kleinen Erhabenheiten und der Vertiefungen zwischen denselben, wie der Augenschein lehre, nicht bei allen Körpern gleich, sondern sehr verschieden sei. Diese Unebenheiten, sagt Musschenbroek, gleichen sich noch weniger hinsichtlich der Härte, der Weichheit, der Elasticität und des Zusammenhangs ihrer Theile, wosher es denn komme, daß bei zwei auf einander liegenden Körpern die Berührungsflächen sehr verschiedene Arten des Ineinandergreifens darbieten, und deshalb auch der bewegenden Kraft einen sehr verschiedenen Widerstand entgegensetzen. — Die Versuche, welche Musschenbroek angestellt hat, leiden zwar an denselben Mängeln, wie die meisten früheren Versuche, insofern sie nemlich nicht genug ins Große gehen; allein sie übertreffen diese in Hinsicht der Genauigkeit und der Schärfe der Beobachtung, die ihren Urheber so sehr auszeichnet. Deshalb, und weil die Resultate dieser Versuche interessante Vergleichungspunkte mit späteren Versuchen darbieten, sind sie im Verfolg dieser Abhandlung speciell aufgeführt, und mit den nöthigen Bemerkungen begleitet worden. Hier beschränke ich mich darauf, nur die allgemeine Folgerung darzulegen, welche der genannte Naturforscher daraus gezogen hat, und diese sind in Summa folgende:

1) Die Reibung, welche stählerne Axen in Lagern aus verschiedenen Metallen erleiden, ist am geringsten auf Messing, am größten aber auf Zinn, und zwar wächst sie in dieser Reihenfolge: Messing, Blei, Kupfer, Guajacholz, Stahl, Zinn. Die früheren Physiker waren daher

*) Diss. de Aëricu solidorum in motu constitutorum. Halae 1758.

**) Essai de Physique par Pierre van Musschenbroek. Traduit du Hollandois par Mas-suet. Leyde 1739. Introductio ad Philosophiam naturalem. Lugd. 1762.

sehr im Irrthum, wenn sie die Reibung für alle Substanzen gleich groß annahmen; dies ist eben so wenig der Fall, wenn die Aren mit Olivenöl eingeschmiert werden.

2) Musschenbroek glaubt die Reibung nicht dem Drucke proportional, sondern sie soll in einem höhern Verhältnisse wachsen. Er erklärt dies daraus, daß bei größeren Pressungen die Unebenheiten tiefer in einander greifen und daher bei der Bewegung stärker gebogen, oder näher an der Wurzel abgebrochen werden müssen, als bei geringeren Pressungen.

3) Es läßt sich durchaus kein allgemeines Gesetz aufstellen, um danach für alle Substanzen die Größe des Reibungswiderstandes a priori bestimmen zu können; dieser Widerstand richtet sich vielmehr in jedem besonderen Falle nach der Natur der Körper, so wie nach der Größe ihrer Belastung, und kann nur durch Versuche für jede Substanz ins Besondere bestimmt werden.

4) Zwei Metalle oder Hölzer derselben Art bewegen sich schwerer auf einander, als Substanzen verschiedener Art. Den Mechanikern ist dies aus eigener Erfahrung schon längst bekannt, weshalb sie auch niemals Stahl auf Stahl, wohl aber Stahl auf Kupfer, auf Messing, oder auf Guajacholz laufen lassen; auch läßt man wohl Kupfer auf Stahl laufen, allein nie Kupfer auf Kupfer etc. Musschenbroek erklärt dies daraus, weil bei gleichartigen Körpern eine größere Uebereinstimmung der Unebenheiten und demgemäß ein vollkommneres Ineinandergreifen statt finde, als bei Körpern verschiedener Art.

5) Die Meinung der Physiker, daß die Ausdehnung der Berührungsfläche keinen Einfluß auf die Größe der Reibung habe, erklärt Musschenbroek als unstatthaft und nicht übereinstimmend mit seinen Erfahrungen; aber eben so wenig sei die von andern Physikern aufgestellte Regel, daß die Reibung mit der Berührungsfläche wachse oder abnehme, als richtig anzunehmen. Vielmehr soll es für jeden Körper eine gewisse Größe der Berührungsfläche geben, auf welcher die geringste Reibung stattfindet, während alle andern Berührungsflächen, sie mögen nun größer oder kleiner als jene sein, allemal eine größere Reibung verursachen.

6) Wenn die Körper sich mit keiner großen Schnelligkeit über einander bewegen, so verhält sich die Reibung gewöhnlich wie die Geschwindigkeit, wenngleich nicht genau; allein bei einer sehr schnellen Bewegung wächst sie in einem beträchtlich höhern Verhältnisse, sowohl wenn die Berührungsflächen trocken, als auch wenn sie mit Del geschmiert sind. Zum Belag dieser Behauptung führt Musschenbroek folgende Erfahrung an. Eine hölzerne Welle, die mit ihren stählernen Aren in kupfernen Lagern lief und, einschließlic ihres eigenen Gewichtes, mit 95 Unzen belastet war, wurde durch verschiedene Gewichtszufagen so in Bewegung gesetzt, daß sie in der Sekunde 4 bis 10 Umdrehungen machte, welches letztere die größte hervorzubringende, und mit Sicherheit zu beobachtende Geschwindigkeit war. Man fand nun bei 4, 6, 7, 8, 10 Umdrehungen bezüglich die Reibung gleich 16, 24, 32, 48, 64 Unzen, oder in dem Verhältnisse der Zahlen 1, $1\frac{1}{2}$, 2, 3, 4 wachsend.

7) Del zwischen die Berührungsflächen der Metalle gebracht, vermehrt die Schlüpfrigkeit und vermindert die Reibung. Es bringt diese Wirkung vor allem bei großen Geschwindigkeiten hervor; denn wenn die Körper trocken sind, und man läßt sie mit großer Schnelligkeit über einander fortgleiten, so zeigt sich die Reibung beträchtlich groß, ja sogar größer als das Gewicht,

womit die Körper zusammengepreßt worden. — Dies soll nach Musschenbroek daher kommen, daß alle hervorspringenden Körpertheilchen sogleich abbrechen und dann in der Berührungsfläche Furchen schneiden, weil sie nicht Zeit haben sich zurückzubiegen. Das Del verhindert dieses Abbrechen der Theilchen; denn da es angeblich aus sehr kleinen Kügelchen besteht, welche die Vertiefungen ausfüllen, so verhindert es auf diese Weise die Unebenheiten, so tief, als bei ungeschmierten Körpern, in einander zu greifen. Und eben wegen dieser Kugelgestalt der kleinsten Deltheilchen, welche sehr leicht beweglich sind, wird nicht nur die Bewegung der Körper dadurch erleichtert, sondern auch das Erhitzen derselben bei sehr schneller Bewegung verhindert. — Soweit Musschenbroek.

von Segner sucht in seiner Dissertation das Gesetz auszumitteln, nach welchem die Reibung während der Bewegung, die er im Widerspruch mit Euler und andern Physikern als eine ungleichförmig verzögernde Kraft annimmt, von der Geschwindigkeit abhängig ist. Er legt den von Musschenbroek in dieser Beziehung angestellten Versuch zum Grunde, und leitet daraus das Gesetz ab, daß sich die Unterschiede der Geschwindigkeiten wie die Logarithmen der zugehörigen Reibungsgrößen verhalten*). So war z. B. nach dem angeführten Musschenbroekschen Versuch bei den Geschwindigkeiten 4, 7, 10 die Reibung beziehlich den Zahlen 1, 2, 4 proportional, und demgemäß verhält sich $7-4:10-4 = 3:6$, oder $= 1:2$; auch ist $\log. 2 : \log. 4$, oder $\log. 2 : 2 \log. 2 = 1 : 2$; mithin $7-4:10-4 = \log. 2 : \log. 4$, wobei also die Reibung, welche der kleinsten Geschwindigkeit 4 zugehört, gleich 1 gesetzt wird. Diese Deduktion als allgemein angenommen, würde sich ergeben, wenn man die den Geschwindigkeiten v , c und C angehörigen Reibungsgrößen mit φ , f und F bezeichnet

$$c-v : C-v = \log. \frac{f}{\varphi} : \log. \frac{F}{\varphi}; \text{ oder } c-v : C-v = \log. f - \log. \varphi : \log. F - \log. \varphi, \text{ so daß}$$

also das Gesetz eigentlich lauten müßte: die Differenzen der Geschwindigkeiten verhalten sich wie die Differenzen der Logarithmen der zugehörigen Reibungsgrößen. — Um dieses merkwürdige Resultat, welches, wie man gesehen hat, aus einer isolirten Beobachtung gefolgert wurde, wahrscheinlich zu machen, stellte v. Segner Versuche an mit einem aus vier Rädern bestehenden Uhrwerke ohne Hemmung, deren Walze durch verschiedene Gewichte in Bewegung gesetzt wurde. Mit diesem Uhrwerke war ein Zeiger verbunden, dessen Umlaufszeit vermittelst einer andern Uhr beobachtet wurde, und dadurch ergab sich die Geschwindigkeit. — Von den auf diese Weise angestellten Versuchen stimmen zwar einige mit dem obigen Gesetze überein; allein die meisten geben ganz abweichende Resultate. Zum Belag führe ich nur folgende drei Versuche an:

Beobachtete Geschwindigkeit.	Friction.	Logarithmen der Friction.	Differenz der Logarithmen.
0	7	0,845	
55	16	1,204	0,359
200	30	1,477	0,632

*) a. a. D. §. 12 u. f.

Nun ist das Verhältniß der Geschwindigkeiten $\frac{200}{55} = 3,64$; das Verhältniß der zugehörigen Logarithmen-Differenzen aber $\frac{632}{359} = 1,76$, also noch nicht halb so groß, als die vorige Verhältnißzahl. Dessenungeachtet findet diese Theorie einen Verfechter an Karsten, der sie im 4. Bande seines Lehrbegriffs der gesammten Mathematik, Greifswalde 1769. S. 426 u. f. ausführlich vorträgt, und daraus Formeln entwickelt, um danach die Reibung während der Bewegung für verschiedene Geschwindigkeiten zu berechnen. Es wird nicht nöthig sein, bei der Untersuchung dieser Theorie länger zu verweilen, da sie durch keine der späteren Versuche bestätigt wird, und dadurch hinlänglich widerlegt ist.

Anderer Beobachtungen über Aerenreibung theilt Schober mit, in seiner Theorie von der Ueberwucht, Leipzig 1751. Sie wurden beiläufig gemacht, als er Versuche anstellte, um die Verminderung der beschleunigenden Kraft der Schwere durch Gegengewichte, Massenträgheit und Reibung zu zeigen. Er läßt sich indessen nicht darauf ein, seine Versuche zu analysiren und daraus hinsichtlich der Natur und dem Verhalten der Reibung unter verschiedenen Umständen Folgerungen zu ziehen. Auch waren die Dimensionen zu gering, um brauchbare Resultate zu liefern, da die Aere nur 1 Linie im Durchmesser hatte und die Belastungen nicht über 2 Pfund betragen. Später hat Lambert*) die Schoberschen Versuche einer neuen Berechnung unterworfen, woraus er den Schluß zieht, daß die Theorie des Widerstandes der Flüssigkeiten, die sich wie das Quadrat der Geschwindigkeit verhält, auf den von der Reibung herrührenden Widerstand vollkommene Anwendung finde, was jedoch anderweitigen Erfahrungen nicht entspricht.

Der Abbé Nollet**) unterscheidet, wie schon von Leibnitz geschehen ist, zwei verschiedene Arten von Reibung, die er folgendergestalt definiert: Die Reibung der ersten Art entsteht, wenn zwei Körper so übereinander bewegt werden, daß immer dieselben Punkte des bewegten mit verschiedenen Punkten des ruhenden Körpers in Berührung kommen. Die Reibung der zweiten Art, wenn immer verschiedene Punkte des einen mit verschiedenen Punkten des andern in Berührung kommen, wie bei einer Billardkugel, die über eine Fläche gerollt wird. Als Beispiel der verschiedenen Wirkungen dieser beiden Arten des Widerstandes, führt er das Hemmen der Wagenräder bei steilen Abhängen an, wodurch er zugleich erläutert, daß die Reibung der ersteren Art beträchtlich größer ist, als die der anderen Art.

In Bezug auf den Einfluß der Berührungsfläche auf die Größe der Reibung erklärt sich Nollet nach seinen Versuchen, wozu er sich der von Desaguliers angegebenen Federmaschine bediente, mit Musschenbroek dahin einverstanden, daß die Größe der Berührungsfläche allerdings Einfluß habe, wiewohl nicht in dem Grade als die Pressung. Dagegen ist er hinsichtlich der Geschwindigkeit der Meinung, daß die Reibung zwar mit derselben zunehme, jedoch nur bis

*) Mémoires de l'Académie de Berlin. Année 1772.

**) Leçons de physique expérimentale. Amsterdam 1745. p. 230—258.

zu einer gewissen Grenze, so daß, wenn die Geschwindigkeit des Körpers diese Grenze erreicht hat, die Reibung alsdann für alle größeren Geschwindigkeiten unveränderlich bleiben soll.

Daß fettige Schmierer die Reibung vermindern, erklärt Nollet daraus, weil dieselben aus kleinen Kugeln bestehen, welche zwischen den Berührungsflächen rollen, und daher eine ähnliche Wirkung hervorbringen, wie untergelegte Walzen beim Fortschaffen großer Lasten.

Ähnliche Ansichten wie der vorige Physiker entwickelt der Abbé Bossut in seinem Lehrbuch der Mathematik*). Auch er unterscheidet die erwähnten zwei Arten der Reibung, je nachdem sie sich bei einer gleitenden oder rollenden Bewegung bemerklich macht, und fügt noch eine dritte Art hinzu, die er eine gemischte (*friction mixte*) nennt, weil sich bei dieser zu gleicher Zeit die gleitende und rollende Reibung bemerklich mache. Als Beispiel der letztern Art führt er die Reibung der Wagenaxen in den Naben an, wonach also die *friction mixte* nichts anders als eine Zapfenreibung ist, die wohl am richtigsten als eine besondere Art der gleitenden Reibung zu charakterisiren sein möchte. Denn wenn nach Nollet die gleitende Reibung von zwei sich berührenden Körpern erzeugt wird, von denen der eine sich über die Oberfläche des andern, als ruhend gedachten, so bewegt, daß immer dieselben Punkte des bewegten mit andern Punkten des ruhenden Körpers in Contact kommen, so paßt dieselbe Definition *vice versa* auch auf diejenige Reibung, welche die Zapfen bei der drehenden Bewegung in ihren Pfannen oder Lagern erleiden, wobei immer andere Punkte des bewegten mit denselben Punkten des ruhenden Körpers in Berührung kommen. Bossut bestätigt den zuerst von Musschenbroek aufgestellten Erfahrungssatz, daß die Reibung bei gleichartigen Körpern, wie z. B. Kupfer auf Kupfer o. p. größer sei, als bei ungleichartigen, wie etwa Kupfer auf Eisen, wofür er auch dieselben Gründe wie jener Naturforscher geltend macht. — Ferner bemerkt er, daß wenn die Reibungsflächen längere Zeit mit einander in Berührung bleiben, die Reibung beträchtlich größer wird, als sie im ersten Augenblick der Berührung ist; eine Bemerkung, die später von Coulomb durch vielfache Versuche bestätigt wird. In Bezug auf das Verhältniß der Reibung zum Normaldruck tritt Bossut zwar Amontons Meinung bei, der im Widerspruch mit andern Physikern die Reibung dem Drucke proportional setzt, macht aber dabei folgende Einschränkungen. Zuförderst sei erfahrungsmäßig die Reibung bei großen Massen ein geringerer Theil des Drucks, als bei kleineren Massen. Denn beim Herablassen der Schiffe vom Stapel betrage der Fall der geneigten Ebene nur 10 bis 12 Linien auf den Fuß, und dieser geringe Fall sei hinreichend, solche große Massen in Bewegung zu setzen, während kleine Massen dabei in Ruhe bleiben würden. Daher könne man den Satz, daß die Reibung sich wie der Druck verhalte, nur für Massen von einer mittleren Größe gelten lassen. Sodann setze Amontons Schluß voraus, daß die Berührungsflächen aus vollkommen harten oder vollkommen elastischen Theilchen bestehen. Aber weder das Eine noch das Andere sei wirklich der Fall; vielmehr müsse man annehmen, daß die vorragenden Theilchen der Berührungsflächen beim Uebereinandergleiten abbrächen, und da die Anzahl dieser Theilchen der Ausdehnung der

Bibl.
Pal. No. 1000.

*) *Traité élémentaire de Mécanique*, Paris 1775. §. 306—307.

Flächen proportional sei, so müsse letztere allerdings auf die Größe der Reibung Einfluß haben, wenn gleich dieser Einfluß nur gering sein möge. Alles, was man mit Sicherheit folgern könne, sei demnach, daß der Druck das hauptsächlichste, aber nicht das einzige Element für die Bestimmung der Reibung sei. — Gegen die häufig aufgestellte Behauptung, daß bei bewegten Körpern die Reibung sich wie die Geschwindigkeit verhalte, macht Bossut folgende begründete Einwendungen. Wenn man auf der einen Seite zugeben müsse, daß bei einer größeren Geschwindigkeit mehr Vorrangungen aus den Vertiefungen zu befreien, oder vortretende Theilchen zu biegen seien, so könne dagegen auf der andern Seite angenommen werden, daß eine größere Geschwindigkeit jenen Unebenheiten der Berührungsflächen nicht Zeit genug lasse, so tief ineinander einzugreifen, wie bei einer sehr langsamen Bewegung. Da nun unter diesem Gesichtspunkte die Reibung sich wieder vermindern müsse, so könne es auch sein, daß die Geschwindigkeit keinen merklichen Einfluß auf die Größe der Reibung habe; ein Schluß, der durch spätere Versuche bestätigt wird.

Ferguson fand die Reibung jederzeit dem Normaldruck proportional und unabhängig von der Ausdehnung der Berührungsfläche. Er fand ferner, daß dieser Widerstand mit der Geschwindigkeit wächst, wenn gleich nicht in einem proportionalen Verhältnisse. Dieser Physiker bestimmte*) die Reibung von weichem Holz auf weichem Holze = $\frac{1}{3}$, und mit rauher Berührungsfläche = $\frac{1}{2}$ im Verhältniß zum Drucke; bei weichem auf hartem Holze, oder umgekehrt, = $\frac{1}{3}$; bei polirtem Stahl auf polirtem Stahle, oder auf Zinn (pewter) = $\frac{1}{4}$; bei polirtem Stahle auf Kupfer = $\frac{1}{2}$; derselbe Stahl auf Messing aber = $\frac{1}{6}$ des Gewichtes.

In Bezug auf den Unterschied zwischen der gleitenden und wälzenden Reibung bemerkt Ferguson später**), es scheine aus den Versuchen von Musschenbroek, Schober und Meister evident zu sein, daß wenn ein Körper mit einer gleitenden Bewegung über die Oberfläche eines andern fortgezogen wird, alsdann die Quadrate der Zeiten sich wie die von Anfang an zurückgelegten Wege verhalten; wohingegen bei einer rollenden Bewegung ein solches Verhältniß zwischen den Zeiten und Wegen nicht stattfindet. — Verhalten sich aber die durchlaufenen Wege wie die Quadrate der zugehörigen Zeiten, so ist die Bewegung eine gleichförmig beschleunigte, die Reibung während der Bewegung also constant, und von der Geschwindigkeit unabhängig, welches Ferguson's erste Behauptung, daß die Reibung mit der Geschwindigkeit wachsen soll, wieder aufhebt. Man darf sich hierüber nicht sehr wundern; dergleichen Widersprüche kommen in Bezug auf die Reibung öfter vor, und scheinen in der Art und Weise der Beobachtung dieses Phänomens begründet zu sein.

Der Dr. Vince aus Cambridge stellte im Jahr 1781 eine Reihenfolge von Versuchen über die Reibung an, um dadurch auszumitteln: ob die Reibung während der Bewegung eine gleichförmig verzögernde Kraft, und von welcher Größe dieselbe unter gegebenen Umständen sei; ob dieser Widerstand sich im Verhältniß des Drucks oder des Gewichtes ändere, und endlich, ob derselbe

*) Ferguson's Tables and Tracts; second edition; p. 289.

**) Lectures on select subjects etc. second edition by D. Brewster; Edinburgh 1806. Vol. II. p. 338.

selbe einerlei bleibe, sei es, daß der bewegte Körper mit einer großen, oder mit einer kleinen Fläche aufliegt. Zu diesen Versuchen wurde eine Ebene genau horizontal gerichtet, und am Ende derselben eine Rolle so angebracht, daß sie etwas gehoben oder gesenkt werden konnte, um die darüber geleitete feine seidene Schnur, welche den Körper mit dem bewegenden Gewichte verbindet, fortwährend parallel mit der Ebene zu halten. Neben der Rolle war eine genau eingetheilte Skale vertikal befestigt, längs welcher das an der Schnur aufgehängte bewegende Gewicht herabsank. An dieser Skale war eine verrückbare Matte horizontal befestigt, die höher oder tiefer gestellt werden konnte, je nach dem Raume, durch welchen das bewegende Gewicht in einer gewissen Zeit herabsinken sollte. Die Zeit des Herabsinkens bis zu dem Augenblick des Aufschlagens auf die Matte beobachtete man vermittelst eines guten Sekundenpendels.

Die Resultate dieser Versuche, welche vielfältig wiederholt wurden, sind im 75ten Bande der Philosophical Transactions*) bekannt gemacht und bestehen in folgenden:

1) Die Reibung der harten Körper ist eine gleichförmig verzögernde Kraft, weil die durchlaufenen Wege den Quadraten der dazu verwendeten Zeiten proportional gefunden wurden. — Eine Ausnahme hiervon fand statt, wenn die Körper mit Tuch, Wolle &c. überzogen waren, in welchem Falle der Reibungswiderstand mit der Geschwindigkeit zunahm. Ein Ueberzug von Papier änderte dagegen nichts an jenem Gesetze.

2) Zur Berechnung des ganzen Betrages der Reibung aus den obigen Versuchen giebt Vince die Formel

$$F = M - \frac{(M+W)s}{rt^2},$$

worin M das bewegende Gewicht, W das Gewicht des bewegten Körpers, s den in t Sekunden durchlaufenen Raum, $r = 16\frac{1}{2}$ Fuß engl. den Fallraum in der ersten Sekunde und F den Widerstand gegen die Bewegung bedeutet. Es ist nicht angegeben, von welcher Materie und Beschaffenheit die untersuchten Körper waren, weshalb über die Größe der Reibung nichts festgestellt werden kann. Auch läßt sich Vince auf die Berechnung seiner Versuche gar nicht ein.

3) Der durchlaufene Raum ergab sich für größere Pressungen stets kleiner, als bei geringeren Pressungen, woraus Vince schließt, daß die Reibung in einem geringeren Verhältnisse zunimmt als der Druck. Auch zeigte sich die Reibung nicht für alle Körper gleich groß, sondern je nach ihrer Beschaffenheit verschieden, und selbst für einen und denselben Körper ließ sich aus den Versuchen keine allgemeine Regel herleiten.

4) In Bezug auf den Einfluß der Berührungsfläche argumentirt Vince, daß, wenn die Reibung der Pressung genau proportional wäre, sie alsdann bei einerlei Druck für alle Flächen gleich groß sein müßte, weil dann der Druck auf jeden einzelnen Theil der Fläche, mithin auch die davon erzeugte Reibung, in demselben Verhältnisse, als die Fläche kleiner wird, zunähme, so daß also das Produkt aus der Anzahl der Flächentheile in die Größe der darauf stattfindenden Reibung stets constant bleiben müßte. Nach dem vorigen Erfahrungssatze ist aber die Reibung

*) On the motion of bodies affected by friction. By the Rev. Samuel Vince, A. M. of Cambridge. Philos. transact. Vol. LXXV. for the year 1785. p. 165 etc.

bei größeren Pressungen verhältnißmäßig geringer als bei kleineren Pressungen, und daher wird auch bei kleineren Berührungsflächen, deren einzelne Theile stärker gedrückt werden, die Reibung geringer sein, als bei größeren Flächen. —

Um diese Consequenz, welche mit den früheren Angaben im Widerspruche steht, erfahrungsmäßig zu prüfen, stellte Vince mehrere Versuche an, wobei er Körper mit sehr verschiedenen Seitenflächen anwendete, welche, um möglichst einerlei Grad der Rauigkeit hervorzubringen, mit einem feinkörnigen Papier überzogen wurden. Er fand nun, daß ein Körper unter einer bestimmten Belastung und bei einer und derselben bewegenden Kraft auf einer kleinen Seitenfläche liegend einen größeren, auf einer größeren Seitenfläche hingegen einen kleineren Weg durchlief. Hieraus folgert nun Vince diesen Erfahrungssatz: daß die Reibung für verschiedene Berührungsflächen nicht dieselbe bleibt, sondern daß auf der kleinsten Fläche die geringste Reibung stattfindet, und umgekehrt.

Dr. Vince schließt seine Abhandlung mit folgender allgemeinen Bemerkung. Die vor ihm gemachten Versuche hatten immer nur zum Zweck, die Kraft auszumitteln, welche gerade hinreichend ist, einen ruhenden Körper eben in Bewegung zu setzen, und den auf diese Weise ausgemittelten Widerstand setzte man der beschleunigenden Kraft gleich. Allein abgesehen davon, daß die Kraft, welche einen Körper wirklich in Bewegung setzt, größer als der Widerstand der Reibung sein muß, weil dieser sonst nicht überwunden werden könnte, so giebt es noch einen andern Umstand, in Folge dessen das Unternehmen, durch Versuche dieser Art die Größe der Reibung bestimmen zu wollen, gänzlich fehlschlagen mußte, und dies sei der von der Adhäsion herrührende Widerstand. Vince stellte auch hierüber Versuche an, welche ergaben, daß im Zustande der Bewegung die Adhäsion im Verhältniß zur Reibung etwa $= \frac{1}{3}$ war, während sie bei einem ruhenden Körper sehr nahe bis zum ganzen Betrage der Reibung anwuchs. Alle Folgerungen aus Versuchen, durch welche die erforderliche Kraft bestimmt werden soll, um einen ruhenden Körper in Bewegung zu setzen, erklärt Vince demnach für ganz falsch, weil sie weiter nichts zeigen, als die Größe des Widerstandes, der von der Adhäsion und der Reibung zusammengenommen herrührt.

Dies sind die allgemeinen Ergebnisse der Vincesehen Versuche, von welchen, obgleich sie bei englischen Schriftstellern sehr in Ansehen stehen, dennoch bedauert werden muß, daß sie wieder nur Cabinet-Experimente sind, da die Belastungen bei denselben nicht mehr als 6 bis höchstens 16 Unzen betragen. Daher ist es denn auch nicht zu verwundern, wenn der Einfluß der Adhäsion sich so bemerklich machte, daß er in einzelnen Fällen selbst die Größe des Reibungswiderstandes erreichte. Wir werden später bei den Coulombschen Versuchen den Einfluß jenes Nebenhindernisses, welches der Adhäsion zugeschrieben wird, genauer kennen lernen; hier genüge es, diesen Gegenstand vorläufig erwähnt zu haben.

Zur Prüfung des von Vince aufgestellten Satzes, daß die Reibung während der Bewegung eine gleichförmig verzögernde Kraft sei, stellte der Baumeister Southern von Birmingham eine Reihe von Versuchen in Mahlmühlen an. Es sind die ersten, welche ganz im Großen ausgeführt wurden, denn der Druck auf die Reibungsfläche betrug an 33 engl. Centner und die

Geschwindigkeit des bewegten Körpers bis 4 Fuß in der Sekunde. Das Resultat war die Bestätigung des obigen Satzes, wenigstens für Geschwindigkeiten von 9 Zoll bis 4 Fuß; wobei sich zugleich ergab, daß die Reibung in günstigen Fällen den 40sten Theil des Druckes nicht übersteige.

Ueberblickt man die Ergebnisse der in dem Vorhergehenden dargelegten Bemühungen der Physiker zur Erforschung der Natur des Reibungswiderstandes, wobei ein Zeitraum von über hundert Jahren verstrichen ist, so muß man gestehen, daß sie eben so wenig der Wichtigkeit des Gegenstandes, als den Fortschritten der Künste und Wissenschaften während eines solchen Zeitraums entsprechen. Wenn daher Coulomb in der Einleitung zu seiner *Théorie des Machines simples* sagt: „Versuche im Kleinen, in einem physikalischen Cabinet angestellt, sind nicht geeignet, bei der Berechnung von Maschinen, die zum Heben großer Lasten von mehreren 1000 Pfunden bestimmt sind, uns als Richtschnur zu dienen, weil die geringsten Ungleichheiten, die kleinsten Hindernisse, sowie die Adhäsion der mehr oder minder homogenen Theile die größten Unregelmäßigkeiten in die Resultate bringen;“ so hat er damit, wie ich glaube, den bisher angeführten Versuchen das ihnen gebührende Urtheil gesprochen, und zugleich den wahren Grund bezeichnet, auf welchen die Verschiedenheiten und die Widersprüche in den gewonnenen Resultaten sich zuletzt alle zurückführen lassen.

Unstreitig war dieser geringe Fortschritt in der Erforschung des Phänomens der Reibung die Veranlassung, daß die Königl. Akademie der Wissenschaften zu Paris für das Jahr 1779 einen Preis von 1000 Livres für die beste Arbeit über die Widerstände in den Maschinen aussetzte, mit der Bedingung:

„die Gesetze der Reibung und die von der Steifigkeit der Seile herrührenden Widerstände durch neue und im Großen angestellte Versuche zu bestimmen; auch zu berücksichtigen, daß die Versuche anwendbar seien auf die in der Marine gebräuchlichen Maschinen, als: die Rolle, die Schiffswinde, die geneigte Ebene;“

welche Aufgabe später, mit Ansetzung des doppelten Preises, bis zum Jahr 1781 prorogirt wurde.

Diesen Preis gewann der als Physiko-Mathematiker ausgezeichnete französische Génie-Capitaine Coulomb nicht ohne Concurrenz zweier italienischen Gelehrten, nemlich des Abbate Kimenes, dessen Untersuchungen nachher unter dem Titel: *Theoria e Pratica delle resistenze de' solidi ne' loro attriti*, Pisa 1782, in zwei Bänden herauskamen, und eines gewissen DeLanges, der bei dieser Gelegenheit eine Schrift über die Reibung, betitelt: *Experienze intorno alla resistenza dello sfregamento*, herausgab. Leider sehe ich mich auf die bloße Anführung der Titel dieser beiden Werke beschränkt, ohne über ihren Inhalt das mindeste mittheilen zu können, da ich ihrer trotz aller angewandten Mühe nicht habhaft werden konnte.

Die Versuche von Coulomb, welche zuerst im 10ten Bande der *Mémoires de Mathématique et Physique*, présentées à l'academie royale des Sciences à Paris par divers Savants, p. 163, bekannt gemacht wurden*), fanden seitdem, wie Jedermann weiß, die ungetheilteste An-

*) Man findet sie auch ausführlich beschrieben in der *Théorie des Machines simples*, en ayant égard au frottement de leurs parties et à la roideur des Cordages; par C. A. Coulomb. Nouvelle édition.

erkenntnis, und wurden von allen wissenschaftlichen Mechanikern bei der Berechnung von Maschinen als sichere Anhaltspunkte zum Grunde gelegt. Ihre Mittheilung wird daher einen Haupttheil dieser Abhandlung ausmachen; vorläufig sollen jedoch nur die allgemeinsten Ergebnisse derselben hier aufgeführt werden, sofern sie sich nemlich bloß auf die gleitende Reibung beziehen. Die von Coulomb angestellten Versuche über drehende und wälzende Reibung sollen dagegen später an ihrem Orte zur Sprache gebracht werden.

Zu den Versuchen über die gleitende Reibung bediente sich Coulomb eines ähnlichen Apparats wie der schon früher von de Camus angewendete. Ein stark gebauter und mit verschiedenen Gewichten bis zu 1650 Pfund belasteter Schlitten wurde vermittelst eines horizontal über eine Rolle geleiteten Seiles, an dessen herabhängendem Ende das bewegende Gewicht befestigt war, über eine ebene und genau horizontal gerichtete Unterlage fortbewegt. Unter dem Schlitten waren Schienen derjenigen Substanzen befestigt, deren Reibung beobachtet werden sollte. Diese Schienen berührten die Unterlage entweder mit einer ebenen Seitenfläche von verschiedener Breite, um den Einfluß der Berührungsfläche kennen zu lernen, oder nur mit einer abgerundeten Kante, in welchem Falle wir die Berührungsfläche linear nennen werden. — Die allgemeinen Ergebnisse waren folgende:

1) Im Allgemeinen ist die Reibung dem normalen Druck auf der Berührungsfläche proportional, und wo die Versuche Abweichungen hiervon zeigten, da sind dieselben nur dem von der Reibung sehr verschiedenen Einflusse der Adhäsion zuzuschreiben. Wird dieser fremdartige Widerstand in Abzug gebracht, so findet sich das Gesetz der Proportionalität überall bestätigt.

2) Die Adhäsion erklärt Coulomb als einen Widerstand, der mit der Anzahl der Berührungspunkte zwischen beiden Körpern wächst, von der Pressung aber ganz unabhängig ist. Dieser Annahme gemäß habe ich aus seinen Versuchen, wo er es nicht selbst gethan hat, jenen Widerstand berechnet, und folgende Resultate gefunden:

die Größe der Adhäsion pro □ Fuß war für den Ruhestand:

bei Kupfer auf Eisen, trocken.....	= 8½ Pfund.
für den Zustand der Bewegung: bei Eichenholz auf Eichenholz, trocken.....	= 1½ »
desgleichen, mit Talg geschmiert.....	= 4½ »
desgl., nach Wegnahme der Talgschmiere, mit bloß fettiger Berührungsfläche	= 7(+)
bei Eisen auf Eisen, mit frischem Talg geschmiert.....	= 9(-) »
bei Kupfer auf Eisen, desgl.....	= 4½ »

Im letzteren Falle wurde die Adhäsion durch einen Ueberzug von Olivenöl annullirt.

Da dieser Widerstand von der Pressung unabhängig ist, so leuchtet ein, wie bedeutend sein Einfluß bei geringen Pressungen sein muß, und wie unregelmäßig die Resultate nur ausfallen

Paris 1821. Detaillirte Auszüge sind anzutreffen: im *Journal de Physique*; Septbr. u. Oktbr., 1785. Vol. XXVII; in der Preisschrift von Metternich, vom Widerstande der Reibung; Frankf. u. Mainz 1789; in van Swinden's *Positiones physicae etc.*; in Prony's *Nouvelle architecture hydraulique*, Vol. I. pag. 459 — 495.

können. Erst wenn die Belastung 3 Centner pro □Fuß übersteigt, ist jener störende Einfluß geringe genug, um ihn unberücksichtigt zu lassen.

3) Die Größe der Berührungsfläche hat nur insofern Einfluß auf die Größe des Widerstandes, als die Adhäsion der Berührungsfläche proportional wächst. Wird aber dieses Nebenhinderniß in Abrechnung gebracht, oder sind die Pressungen so groß, daß man es unberücksichtigt lassen darf, so zeigt sich die Reibung an sich als unabhängig von der Berührungsfläche (Vergl. Musschenbroek und Nollet). Eine Ausnahme hiervon bildet der Fall, wo die Berührungsfläche auf eine abgerundete Kante reducirt oder linear geworden war, denn alsdann ergab sich der Widerstand merklich kleiner und auch übereinstimmender in den Resultaten.

4) Seit Musschenbroek hielt man es für einen ausgemachten Erfahrungssatz, daß die gleitende Reibung gleichartiger Körper größer sei, als die der ungleichartigen. Die Coulombschen Versuche scheinen zwar in Bezug auf Eisen und Messing ein solches Gesetz zu bestätigen, in sofern nemlich die Reibung von Eisen auf Eisen sich zu der von Messing auf Eisen sehr nahe wie 10:9 verhält. In Bezug auf Hölzer geben sie aber ein entgegengesetztes Resultat zu erkennen; denn die Reibungsgrößen für Eichenholz auf Eichenholz, Kiefernholz auf Kiefernholz und für Eichenholz auf Kiefernholz verhalten sich beiläufig wie 11:14:16, alle übrigen Umstände gleich gesetzt.

5) Eben so soll nach Musschenbroek die Reibung der Hölzer bei überkreuz laufenden Fasern größer sein, als wenn sie eine parallele Lage haben. Allein die Coulombschen Versuche geben in dieser Beziehung keine bestimmt markirte Gesetzmäßigkeit zu erkennen; denn die Reibung von Eichenholz auf Eichenholz ohne Schmiere ergab sich für den Zustand der Bewegung fast gleich groß, sowohl bei parallel laufenden Fasern, als auch für den Fall, daß sie sich rechtwinklich durchkreuzten (in dem einen Falle war der Widerstands-Coeffizient = 0,103, im andern = 0,102). Für eine lineare Berührungsfläche fand man aber die Reibung der Ruhe bei überkreuz laufenden Fasern im Verhältniß 9:14 kleiner; die Reibung während der Bewegung hingegen in dem Verhältniß 11:8 größer, als bei einer parallelen Lage der Holzfasern.

6) Coulomb bestätigt den von Bossut aufgestellten Satz, daß die Reibung größer wird, wenn die reibenden Flächen längere Zeit mit einander in Berührung bleiben; jedoch ergibt sich zugleich aus seinen Versuchen, daß dieser Satz nicht auf alle Fälle paßt, sondern daß sich hauptsächlich hierin eine merkwürdige Verschiedenheit in dem Verhalten der Reibung bei verschiedenen Substanzen offenbart. Wenn nemlich Hölzer mit trockenen Berührungsflächen in paralleler Lage der Fasern über einander fortgezogen werden sollen, so wächst der Widerstand in den ersten Augenblicken der Ruhe sehr merklich, gelangt aber schon nach einigen Minuten zu seinem Maximum oder seiner Grenze. Bei Metallen hat dagegen die Zeitdauer der vorhergegangenen Ruhe gar keinen Einfluß auf die Größe der Reibung, welche vielmehr nach jeder beliebigen Ruhezeit eben so groß ist, als im ersten Augenblick. Ungleichartige Körper, wie Hölzer und Metalle, ebenfalls mit trockenen Berührungsflächen aufeinander gelegt, geben von den vorigen sehr verschiedene Resultate; denn die Größe des Reibungswiderstandes wächst in Bezug auf die Ruhezeit sehr langsam und erreicht erst nach Verlauf von fünf Tagen und darüber ihr Maximum. Dies gilt für den Fall, daß die Berührungsflächen ganz trocken sind. Werden sie aber mit einer fettigen

Schmiere bestreichen, so ändern sich die Resultate sehr wesentlich, besonders bei Anwendung von Talgschmiere. So erreicht z. B. bei Eichenholz auf Eichenholz, mit frischem Talg geschmiert, die Reibung ihr Maximum erst nach 5 bis 6 Tagen, und mit altem gebrauchten Talg geschmiert nach 16 Stunden, während sie ohne Anwendung von Schmiere in wenigen Minuten ihren größten Werth erreichte. Bei Kupfer auf Eisen gelangte die Reibung zu ihrem Maximum: mit frischem Talg geschmiert nach 4 Tagen; bei Anwendung von Olivenöl und Wagenschmiere aber fast augenblicklich, eben so, als wenn die Berührungsflächen ganz trocken geblieben wären.

In Bezug auf die Zunahme der Reibung mit der Größe der Ruhezeit, welche dem Versuche vorhergeht, glaubt Coulomb sogar eine bestimmte Gesetzmäßigkeit zu erkennen, und zwar von der Art, daß die Relation zwischen der Reibung und der Zeit, während welcher die Oberflächen der Körper mit einander in Berührung waren, sich darstellen lasse durch eine Gleichung von der Form $F = \frac{A+mT^\mu}{C+T^\mu}$, worin F die bewegende Kraft, T die Zeitdauer der Ruhe, A , C , m und μ aber durch geeignete Versuche zu bestimmende Constanten bedeuten. Indessen läßt sich Coulomb nicht auf die Ausmittlung dieser Constanten ein, weil diese ganze Theorie für die Maschinenlehre, wo nur die Reibung während der Bewegung in Betracht komme, von keinem Nutzen sei.

7) Hinsichtlich des Verhaltens der Reibung während der Bewegung ergibt sich im Allgemeinen die Thatsache, daß in den Fällen, wo Holz auf Holz gleitet, die Reibung im Zustande der Bewegung beträchtlich geringer ist, als im Zustande der Ruhe. So fand man z. B. bei Eichenholz auf Eichenholz, ohne Schmiere, die Reibung für beide Zustände in dem Verhältniß = 1:4, und bei einer linearen Berührung sogar = 1:6 beiläufig. Bei Eichenholz auf Kiefernholz = 1:4; bei Kiefernholz auf Kiefernholz wie 1:3, und bei Ulmenholz auf Ulmenholz wie 1:4½.

Hiervon bilden aber die Metalle wieder eine sehr charakteristische Ausnahme; denn bei ihnen ist die Reibung während der Bewegung durchaus eben so groß, wie die der Ruhe. Dagegen stimmen beide Substanzen wieder darin überein, daß sowohl bei Hölzern als bei Metallen, die trocken über einander gleiten, die Geschwindigkeit der Bewegung nur einen sehr unmerklichen Einfluß auf die Größe der Reibung äußert, während dieser Widerstand zwischen Hölzern und Metallen beträchtlich mit der Geschwindigkeit wächst. Bei einem Versuche, wo Eisen auf Eichenholz fortgezogen wurde, fand Coulomb die Reibung sogar im arithmetischen Verhältnisse wachsend, wenn die Geschwindigkeiten nach einem geometrischen Verhältnisse zunahmen.

8) Auf Grund dieser Beobachtungen entwickelt Coulomb zuletzt eine physikalische Theorie der Reibung, welche im Wesentlichen mit der von De la Hire gegebenen Erklärung dieses Phänomens übereinstimmt, wobei jedoch auf die von fettiger Schmiere bedingten Modifikationen keine Rücksicht genommen wird. Er nimmt nemlich an, die Oberflächen der Hölzer seien mit kleinen elastisch biegsamen Fasern bedeckt, welche borstenartig vorstehen, und sich nach jeder Richtung gleichmäßig biegen lassen; während die Oberflächen der Metalle aus eckigen oder sphärischen Unebenheiten bestehen, die, an sich hart und unbiegsam, ihre Gestalt auf keine Weise ändern können, mit welcher Kraft man auch auf sie einwirken möge. Hieraus erklärt nun Coulomb

die Eigenthümlichkeiten, welche bei der Reibung von Holz auf Holz, von Metall auf Metall und von Holz auf Metall wahrgenommen wurden. — Denn wird Holz mit Holz in Berührung gebracht, so senken sich die Fasern der einen Fläche auf eine ähnliche Weise zwischen die der andern Fläche ein, als wenn zwei Bürsten mit den haarigen Seiten zusammengebrückt werden, und weil der Widerstand gegen Bewegung mit der Größe dieser Einsenkung wächst, letztere aber bei der gleichen Richtung der Fasern in wenigen Minuten ihre Grenze erreichen wird, so muß auch der Widerstand sehr bald zum Maximum gelangen. Sind aber die Körper in Bewegung übergegangen, so findet ein solches Einsenken der Fasern nicht mehr statt; sie biegen sich vielmehr so lange, bis sie unmittelbar auf einander liegen und so einen beträchtlich geringeren Widerstand verursachen, als im Zustande der Ruhe. Und da diese Lage der Fasern bei gleichbleibendem Druck sich während der Dauer der Bewegung nicht ändern kann, so wird auch der Widerstand unverändert bleiben, folglich unabhängig von der Geschwindigkeit sein.

Bei den Metallen, welche nicht mit flexibeln Fasern bedeckt sind, sondern mit harten unbiegsamen Erhabenheiten, kann eben deshalb keine Aenderung in der Größe des Reibungswiderstandes eintreten; letzterer muß also stets derselbe bleiben, sowohl für den Zustand der Ruhe, als für den der Bewegung, weil in beiden Zuständen jene Erhabenheiten, durch deren Ineinandergreifen der Widerstand erzeugt wird, ihre ursprüngliche Form unverändert beibehalten.

Aber in dem Fall, wo Hölzer mit Metallen in Berührung gebracht werden, sind es die haarichten Fasern der erstern, welche allmählig in die Höhlungen der letztern eindringen, und weil sie dieselben wegen ihrer Elasticität nur nach und nach ganz auszufüllen vermögen, so wird der dadurch erzeugte Widerstand mit der Dauer der Ruhezeit immer größer, bis er zuletzt, wenn man den Fasern Zeit genug gelassen hat, die Höhlungen der Metallflächen ganz auszufüllen und sich den Wandungen derselben möglichst anzuschmiegen, seinen größten Werth erreicht. — Im Zustand der Bewegung müssen sich die Fasern so oft biegen, als sie über den Gipfel einer der Erhabenheiten fortgehen, während sie sich vermöge ihrer Elasticität wieder aufrichten können, sobald sie auf eine Vertiefung treffen. Je größer nun die Geschwindigkeit, desto öfter müssen die Fasern gebogen werden, was aber nicht ohne neuen Kraftaufwand geschehen kann, und so muß also der Widerstand nach irgend einem Gesetze mit der Geschwindigkeit wachsen, wie es auch die Versuche gelehrt haben.

Coulomb ist zwar der Meinung, daß sich aus dieser Theorie alle Phänomene der Reibung mit Leichtigkeit erklären lassen, allein da die Akademie bloß Untersuchungen verlangt habe, welche nützlich sein könnten, so enthalte er sich einer weiteren Ausführung derselben. Auch würde es gefährlich sein, setzt er hinzu, sich allzusehr einem System hinzugeben, welches vielleicht Einfluß haben könnte auf die Art und Weise, von den noch übrig bleibenden Versuchen Rechenschaft zu geben. Dieser weitem Ausführung der Coulombschen Theorie der Reibung unterzieht sich Metternich in seiner, von der Fürstlich-Zablonowskischen Societät der Wissenschaften zu Leipzig gekrönten Preisschrift, welche gelehrte Gesellschaft fürs Jahr 1787 folgende Preisaufgabe gestellt hatte:

Eine deutliche Auseinandersetzung der wichtigsten entscheidenden Versuche, betreffend die Friction der Körper, und worauf man dabei zu achten, für anfangende und fortdauernde Bewe-

gung; mit Beibringung der Gründe für oder wider die Behauptung, daß die Größe der reibenden Fläche dabei gar nicht in Betracht komme; und im Bejahungsfalle, mit bestimmter Anzeige, unter was für Umständen man darauf Rücksicht zu nehmen habe, und wie groß ihr Einfluß auf die Reibung sei.

Bei der Beantwortung dieser Frage legt Metternich bloß die Coulombschen Versuche zum Grunde, und indem er von den merkwürdigen Resultaten derselben eine physikalische Erklärung zu geben sucht, geht er ebenfalls von der Hypothese aus, daß Holzflächen mit haar- oder borstenähnlichen Fasern, Metallflächen aber mit unveränderlichen Erhabenheiten und Vertiefungen bedeckt sind. Allein außer der Flexibilität, welche Coulomb den Holzfasern beilegt, nimmt er auch noch ihre Längenausdehnung in Anspruch, die sie nämlich erleiden sollen, wenn sie sich bei der Berührung mit Metallflächen in die Poren derselben festgesetzt haben. Und gerade diesem Umstande schreibt Metternich die Ursache zu, weshalb die Reibung von Holz auf Metall so auffallend mit der Dauer der den Versuchen vorhergegangenen Ruhezeit zunahm, daß sie erst nach mehreren Tagen ihr Maximum erreichte. In Bezug auf den Hauptpunkt der gestellten Preisfrage, in wiefern nämlich die Größe der Berührungsfläche auf den Betrag der Reibung influire, erklärt sich Metternich dahin, daß ein solcher Einfluß nur bei mit Talg und Wagenschmier geschmierten Flächen stattfinde, und dann von der Klebrigkeit der Schmiermittel herrühre. Die Untersuchung dieser Klebrigkeit verweist er aber, als nicht hieher gehörig, in die Chemie, wo man sie wahrscheinlich aus den Affinitäten erklären werde. Von der Adhäsion spricht er dagegen gar nicht, obgleich die Coulombschen Versuche auch bei ungeschmierten, trocknen Berührungsflächen das Dasein eines, von der eigentlichen Reibung verschiedenen Widerstandes, der unabhängig vom Druck und der Fläche proportional ist, zu erkennen geben.

Ich könnte hier vielleicht die Erzählung der verschiedenen Hypothesen über den Ursprung der Reibung schließen, insofern ich voraussetzen darf, daß der Wohlthätliche Gewerbeverein, gleich der pariser Akademie der Wissenschaften, hauptsächlich nur Untersuchungen verlangt, die von practischem Nutzen sein können. Indessen sei es mir erlaubt, hier kürzlich noch die Ansichten eines berühmten englischen Naturforschers über diesen Gegenstand darzulegen, da sie gegen die vorigen einen merkwürdigen Contrast bilden. Es ist nämlich John Leslie^{*)}, Professor an der Universität zu Edinburgh, der die gewöhnliche Erklärung der Reibung, hergenommen von dem Sineinandergreifen der Unebenheiten, als durchaus ungenügend verwirft, und dafür eine andere setzt.

Die häufig wiederholte, auf das Prinzip der schiefen Ebene gegründete Definition der Reibung, nach welcher die reibenden Flächen betrachtet werden als ein Conglomerat von einer Menge kleiner schiefen Ebenen, die gegen einander in abwechselnder Aufeinanderfolge wirken, erklärt Leslie aus folgenden Gründen für ganz unzulänglich: Zuwörderst müßte die Reibung, der obigen Annahme gemäß, nothwendig von dem Neigungswinkel der elementaren schiefen Ebenen abhängen, und da die Wirkung des Polirens nur darin besteht, die Vorrangungen abzubrechen

^{*)} On the Nature and propagation of heat; Chap. XV, p. 299 sq. Vergl. auch Ferguson's Lectures etc. Vol. II, p. 345.

und ihre Anzahl zu vergrößern, ohne jedoch die Neigung oder Krümmung derselben im Geringsten zu ändern, so müßte der davon herrührende Widerstand offenbar für alle Grade der Rauigkeit oder Glätte stets derselbe bleiben*). Außerdem kann der bewegte Körper nicht fortwährend im Aufsteigen bleiben, sondern weil auf jede Erhabenheit allemal eine Vertiefung folgt, so ist der Körper genöthigt, abwechselnd zu steigen und zu fallen, so daß seine gesammte Erhebung sich ausgleichet mit der Summe seines Fallens. Wenn daher ein Theil der bewegenden Kraft durch den Widerstand beim Aufsteigen des Körpers consumirt werde, so müßte dieselbe im nächsten Augenblick einen gleich großen Theil durch das Fallen wieder gewinnen, und da diese entgegengesetzten Wirkungen sich einander aufheben, so könne in der That eigentlich gar kein Widerstand da sein. Offenbar ist dieser Schluß wohl etwas zu rasch, wenn von wirklichen schiefen Ebenen, die durch eckige Vorsprünge gebildet werden die Rede ist. (Man vergleiche hiemit die Folgerung, welche Euler aus dem abwechselnden Steigen und Fallen des bewegten Körpers zieht.) Sind aber die Vorrangungen und Vertiefungen abgerundet oder wellenförmig gebildet, so möchte gegen die Behauptung, daß in diesem Falle kein Widerstand stattfinden kann, vielleicht weniger einzuwenden sein, und dann läge darin die Begründung des in der neuesten Zeit von Badnall aufgestellten Prinzips der undulirenden Eisenbahnen enthalten.

Noch weniger, fährt Leslie fort, scheine die Adhäsion geeignet, den Ursprung der Reibung zu erklären. Denn da man diese als eine Kraft betrachten müsse, welche auf der gemeinschaftlichen Berührungsfäche beider Körper senkrecht steht, so könne sie die Bewegung längs dieser Fläche weder verzögern noch beschleunigen, so daß also auch von dieser Seite her kein Widerstand zu erwarten sei. Aus dem wirklichen Dasein der Reibung, die sich aus den vorhergehenden Hypothesen nicht genügend erklären lasse, schließt nun Leslie auf eine unaufhörliche Aenderung der Form, welche die sich berührenden Flächen erleiden sollen, indem sie beim Fortgleiten über einander beständig das Bestreben haben, sich allen kleinen und zufälligen Verschiedenheiten des Contactes anzupassen. Die eine Fläche werde, wenn sie gegen die andere gepreßt wird, manche Theile niederdrücken, andere in sich hineinziehen, und sich auf diese Weise in die andere Fläche fest einfügen. Diese Anschmiegunge kann jedoch nicht augenblicklich vollständig erreicht werden, sondern erfordert, je nach der Natur und dem gegenseitigen Verhalten der betreffenden Substanzen, sehr verschiedene Zeiträume. In manchen Fällen reichen wenige Sekunden hin, während in andern der vollständige Erfolg erst nach Verlauf von mehreren Tagen zu erwarten ist. Wird der aufliegende Körper in Bewegung gesetzt, so ändert er in jedem Stadium seines Fortganges die äußere Form seiner Grundfläche, und bringt sie in mehr oder minder genaue Berührung mit der Oberfläche des andern Körpers. Solchergestalt verhält sich der bewegte Körper eben so, als würde er unablässig über ein System von schiefen Ebenen fortgezogen, welches System jedoch

*) Auch für diese Folgerung, so widersinnig sie zu sein scheint, giebt es eine bestätigende Erfahrung. Nämlich die von Boistard (Réueil d'Expériences et d'Observations etc. sur le Pont de Némours) angestellten Versuche über das Gleiten der Werkseine, führten ihn zu dem Schluß, daß die Reibung von der Rauigkeit der Steinflächen unabhängig sei. Rondelet und andere fanden jedoch mit mehr Wahrscheinlichkeit das Gegentheil hievon, d. h. je rauher die Steinflächen desto größer der Widerstand.

in abwechselnder Aufeinanderfolge stets wandelbar ist. Die Reibung soll nun daher entstehen, daß der Körper unaufhörliche, jedoch erfolglose, Anstrengungen zu steigen macht; denn in demselben Augenblick, wo er die Gipfel der Vorrangungen erreicht hat, sinken diese unter ihm nieder, und die angrenzenden Vertiefungen steigen als Erhöhungen empor, eine neue Reihe von Widerständen bildend, die abermals zu übersteigen sind. So sieht man denn, schließt Leslie, in dem Phänomen der Reibung die Arbeiten des Sisyphus verwirklicht.

Wenngleich auch diese, in der That geistreiche Theorie noch manchen Einwendungen ausgesetzt sein dürfte, so ist doch andererseits nicht zu läugnen, daß sie vieles für sich hat, und ich bin daher nicht abgeneigt, der Annahme von undulirenden Unebenheiten in sofern beizutreten, als dieser Umstand auf das Phänomen der Reibung gewiß nicht ohne wesentlichen Einfluß ist, ohne jedoch dadurch die Mitwirkung anderer Umstände ganz und gar ausschließen zu wollen. Ich bin schon vor längerer Zeit, noch ehe mir die Leslie'sche Hypothese bekannt geworden war, durch eigenes Nachdenken über die Ursache der wälzenden Reibung, auf ganz ähnliche Folgerungen gekommen, und ich habe daraus eine Theorie dieses Widerstandes hergeleitet, die ich der vorliegenden Abhandlung gehörigen Orts einverleibt habe, um sie der geneigten Prüfung der Sachverständigen vorzulegen.

Seit der Zeit, wo die Versuche von Coulomb und Vince bekannt geworden, sind über vierzig Jahre verflossen, ohne daß neue Versuche in gleichem Umfange angestellt worden wären, einzelne Beobachtungen abgerechnet, die in England und Frankreich über den Widerstand der Fuhrwerke auf gewöhnlichen Straßen und Eisenbahnen gemacht wurden, und worauf ich später zurückkommen werde. — Erst vor etwa neun Jahren wurde der Gegenstand der Reibung wieder aufgenommen von dem englischen Civil-Ingenieur George Rennie, der eine sehr große Anzahl von Versuchen der verschiedensten Art anstellte, worüber er der Königl. Gesellschaft in London am 12. Juni 1828 einen ausführlichen Bericht vorlas, den man in den Philosophical Transactions of the Royal Society etc. etc. for 1829. Part. I. bekannt gemacht findet^{*)}. Diese Versuche erstrecken sich auf die mannichfaltigsten Substanzen, als: Eis, wegen seines Widerstandes gegen Schlitten, Schlittschuhe etc.; Luch, des eigenthümlichen Widerstandes wegen, der von jenem der harten Körper ganz abweicht; Leder, wegen seiner Anwendbarkeit bei Pumpenkolben; Holz, wegen dessen Anwendung in der Zimmermannskunst, beim Einrammen der Pfähle, Stapellassung der Schiffe etc.; Steine, für die Bestimmung des Gleichgewichts der Gewölbe etc.; Metalle, wegen ihrer Anwendung im Maschinenwesen. Außerdem versprach Rennie noch besonders viele Versuche über den Widerstand der Fuhrwerke für Eisenbahnen und sonstige Straßen, wovon seine oben angeführte Abhandlung jedoch nichts enthält.

Zu den Versuchen, welche die gleitende Reibung betreffen, bediente sich Rennie sowohl einer beweglichen schiefen Ebene, der man jede beliebige Neigung geben konnte, als auch eines ähnlichen

^{*)} Auch findet man die Rennie'schen Versuche ausführlich mitgetheilt im Repertory of patent inventions; London 1829. Vol. VIII. Hieraus überfetzt in Dingler's polytechnischem Journal; Bd. XXXIV. 1829; in den Wiener Jahrbüchern des Kaiserl. Königl. polytechnischen Instituts, Bd. XVII. 1832.

Apparates, wie der Coulombsche, wo nämlich der zu untersuchende Körper auf einer horizontalen Unterlage ruht und durch eine über eine Rolle geleitete Schnur, woran verschiedene Gewichte aufgehängt werden, in Bewegung gesetzt wird. Allein der Apparat zu den Versuchen über die drehende oder Zapfenreibung war sehr mangelhaft construirt, wie denn auch überhaupt diese letzteren Versuche als ganz verfehlt betrachtet werden müssen. Ich werde später Veranlassung nehmen, mich hierüber weitläufiger auszulassen; hier erlaube ich mir bloß einige allgemeine Bemerkungen über die Versuche der ersteren Art, deren speciellere Mittheilung ebenfalls vorbehalten bleibt.

Diese Versuche sind besonders dadurch interessant, daß sie auch den Widerstand berücksichtigen, der von der Abnutzung der Körper, d. h. von dem Losreißen der vorragenden Theile ihrer Berührungsflächen, herrührt. Sie lassen nemlich für den Anfang der Abnutzung eine gewisse Grenze der Belastung erkennen, bis zu welcher der Widerstand gegen Bewegung ziemlich übereinstimmend dem Drucke proportional bleibt, über diese Grenze hinaus aber in einem beträchtlich höheren Verhältnisse zunimmt. So war z. B. bei Schmiedeeisen auf Schmiedeeisen ohne Schmiere für alle Belastungen bis zu 1 Centner auf 6 □ Zoll der Widerstand gegen gleitende Bewegung im Durchschnitt $= \frac{2}{15}$ des Druckes; bei einer Belastung von 10 Centnern wuchs derselbe aber auf $\frac{1}{4}$, bei 20 Centnern auf $\frac{7}{20}$, und bei 30 Centnern auf $\frac{9}{22}$ des Druckes an. Der Anfang einer Abnutzung der über einander gleitenden Metalle wurde überhaupt beobachtet: bei Gußeisen auf weichem Stahle und bei Zinn auf Zinn, wenn die Belastung 8 Pfund für den □ Zoll; bei Messing und Zinn auf Gußeisen, wenn dieselbe 10 Pfd., bei Gußeisen auf Schmiedeeisen aber, wenn sie 12 Pfd. für den □ Zoll überstieg. Dies stimmt sehr nahe mit den Angaben Coulomb's überein, der bei Eisen auf Eisen und bei Messing auf Eisen den Anfang der gegenseitigen Abnutzung bei einer Belastung von 10 Pfd. für den □ Zoll beobachtete. Daß diese Angaben nicht vollkommen genau, sondern nur ungefähre Grenzwerte sein können, liegt in der Natur der Sache, und bedarf daher wohl kaum einer besondern Erwähnung. Ja in manchen Fällen zeigten die Kennie'schen Versuche in dieser Beziehung so unsichere Resultate, daß man die Grenze der Abnutzung nur innerhalb sehr großer Intervalle vermuthen konnte. So läßt sich z. B. für Messing auf Messing und auf Schmiedeeisen, für weichen Stahl auf weichem Stahle und für Zinn auf Schmiedeeisen nichts weiter schließen, als daß die Grenze der Abnutzung zwischen 16 und 32 Pfd. Belastung für den □ Zoll liegt.

Ueberhaupt zieht Kennie aus seinen Versuchen folgende allgemeine Schlussfolgerungen:

- 1) Die Gesetze, nach welchen die Verzögerung bei übereinander gleitenden Körpern erfolgt, sind abhängig von der Natur dieser Körper.
- 2) Bei faserigen Substanzen, wie z. B. bei Tuch ic., nimmt die Reibung mit der Zeit und der Berührungsfläche zu; dagegen vermindert sie sich mit einer Zunahme des Druckes und der Geschwindigkeit.
- 3) Bei harten Substanzen, wie z. B. Hölzern, Metallen, Steinen, ist die Reibung innerhalb der Grenzen der Abnutzung dem Drucke proportional, ohne Rücksicht auf die Größe der Berührungsfläche, auf die Zeit und die Geschwindigkeit.

- 4) Bei ungleichartigen Materien wird die Reibung durch die Grenze der Abnutzung des weicheren Körpers bestimmt.
 - 5) Die Reibung ist bei weichen Substanzen größer als bei harten.
 - 6) Die durch Schmieren bewirkte Verminderung der Reibung ist von der Natur der Schmiere, ohne Rücksicht auf die Beschaffenheit der gleitenden Körper, abhängig.
- Sehr weiche Hölzer, Steine und Metalle, setzt Rennie endlich noch hinzu, nähern sich den bei faserigen Substanzen statthabenden Gesetzen.

Zu den bemerkenswerthesten Unternehmungen, durch welche in der neuesten Zeit die mechanischen Wissenschaften bereichert worden sind, gehören unstreitig die von dem Artillerie-Capitän, Herrn Morin in Metz, mit Unterstützung der französischen Regierung in den Jahren 1831, 1832 und 1833 angestellten Versuche über die Reibung, deren Resultate uns nunmehr in drei auf einander folgenden Abhandlungen detaillirt vorliegen. Die erste dieser Abhandlungen führt den Titel: „Nouvelles Expériences sur le Frottement, faites à Metz en 1831, par Arthur Morin, Capitain d'Artillerie. Paris 1832.“ Die zweite Abhandlung betrifft die im Jahr 1832 gemachten Versuche, und ist unter demselben Titel 1834 zu Paris erschienen. Die dritte Abhandlung führt den Titel: „Nouvelles Expériences sur le Frottement, sur la transmission du mouvement par le Choc, sur la Résistance des Milieux imparfaits à la pénétration des projectiles, et sur le Frottement pendant le Choc; faites à Metz en 1833; par Arthur Morin etc., Paris 1835.“ — Diese schönen Versuche übertreffen alle früheren nicht bloß in Hinsicht des Umfangs und der Mannichfaltigkeit der untersuchten Substanzen, sondern besonders auch hinsichtlich der Genauigkeit der Methoden und Apparate, die dabei in Anwendung gekommen sind.

Was zunächst den zu den Versuchen gebrauchten Apparat betrifft, so hatte derselbe im Allgemeinen dieselbe Einrichtung, wie der von Coulomb und mehreren andern benutzte, insofern er nemlich in einem belasteten Schlitten bestand, welcher durch ein daran befestigtes und horizontal über eine Rolle geleitetes Zugseil vermittelst angehängter Gewichte über eine horizontale Bahn fortgezogen wurde. Allein außerdem waren noch sehr sinnreich construirte Vorrichtungen angebracht, um sowohl die Beschaffenheit der Bewegung mit Rücksicht auf die dabei verstrichene Zeit, als auch die in jedem Augenblick erforderlich gewesene Kraft zur Ueberwindung der Reibung, mit allen kleinen Abweichungen in einem stetigen Zuge zu erhalten. Zu dem erst genannten Zwecke diente eine Art Uhrwerk, welches einen Zeichenstift in gleichförmige Bewegung setzte, so daß dieser mit constanter Winkelgeschwindigkeit einen verticalen Kreis von 0,14 Meter (= $5\frac{1}{2}$ Zoll) Durchmesser beschrieb. Auf der Axe der Rolle, über welche das Zugseil lief, war eine verticale Scheibe befestigt, die zugleich mit jener Rolle eine der Bewegung des Schlittens entsprechende Rotationsbewegung annahm, und die vordere Fläche dieser Scheibe war mit Papier beklebt, auf welches der durch das Uhrwerk bewegte Stift eine Curve beschrieb, deren Natur von der gleichförmigen Bewegung des Stiftes in Verbindung mit der meist ungleichförmigen Bewegung des Schlittens abhängig war. Auf ähnliche Weise wurde die während der Bewegung des Schlittens in jedem Augenblick erforderlich gewesene Zugkraft ermittelt. Das Seil war

nemlich nicht unmittelbar an den Schlitten, sondern an einen zwischengesetzten Federdynamometer befestigt, dessen Flexibilität bei bestimmten Krafterwirkungen mit größter Genauigkeit vorher ausgemittelt und nach jedem Versuche verificirt wurde. Dieser Dynamometer trug einen senkrecht stehenden Zeichenstift, und unterhalb desselben befand sich eine horizontale Scheibe, die bei der fortgehenden Bewegung des Schlittens sich stets mit der Geschwindigkeit desselben um ihre verticale Axe drehte. Der Stift beschrieb nun auf der mit Papier überzogenen Oberfläche der Scheibe eine Curve, welche bei gleichbleibender Spannung des Dynamometers eine genaue Kreislinie war, hiervon jedoch mehr oder minder abwich, je nachdem sich die Spannung und somit die Entfernung des Zeichenstiftes von der Axe der Scheibe änderte. — Die Idee zu dieser sinnreichen Anordnung rührt von dem auch in unserem Vaterlande rühmlichst bekannten Poncelet her, dem die mathematischen und mechanischen Wissenschaften schon so viele wichtige Entdeckungen zu danken haben.

Mit Hülfe der beschriebenen Vorrichtungen sind nun von Herrn Morin über tausend Versuche in 179 Versuchsreihen unter den verschiedenartigsten Umständen ausgeführt worden, sowohl mit trocknen als auch mit geschmierten Berührungsflächen, wobei die Beobachtungselemente nach und nach in sehr weiten Grenzen abgeändert wurden, um so viel als möglich alle Umstände zu umfassen, die bei der Reibung von Einfluß sein können. So variierten z. B. bei den verschiedenen Versuchen die Geschwindigkeiten von den geringsten bis zu $9\frac{1}{2}$ Fuß in der Sekunde, die Berührungsflächen häufig im Verhältniß von 1 zu 81, bis zu 3 Quadratfuß preussisch, und die Belastungen stiegen allmählig von 200 bis auf 4 bis 5000 Pfd. Allein ungeachtet der Abänderungen in so weiten Grenzen stellen sich doch folgende Hauptresultate als ganz unzweifelhaft heraus:

- 1) Bei allen Versuchen zeigte sich die Reibung stets constant und unabhängig von der Geschwindigkeit der Bewegung, sowohl für trockne, ungeschmierte Flächen, als für alle Schmierarten, die den Versuchen unterworfen wurden. Dieses Gesetz bestätigte sich für Wasser, für fettige und Oelschmiere, für klebrige und syrupartige Substanzen, wie der Asphalt von Bechelbromt (Departement des Niederrheins) und selbst für Wagenschmiere (cambouis) der zähesten Art.
- 2) Die Untersuchung über den Einfluß der Berührungsflächen von verschiedener Größe bewies und bestätigte jedesmal das Gesetz, daß die Reibung von dieser Größe ganz unabhängig ist. Wenn in manchen Fällen, wo die Berührungsfläche des bewegten Körpers linear geworden, oder auf eine abgerundete Kante reducirt war, und dabei sehr weiche oder flüssige Schmiermittel, wie das Del, angewendet wurden, die Reibung größer zu sein schien, als bei großen Flächen, so widerspricht dies dem obigen Gesetze keinesweges, sondern ist einzig und allein dem Umstande zuzuschreiben, daß alsdann die Fettschmiere ganz oder zum Theil seitwärts herausgedrückt wurde, und die von der abgerundeten Kante berührte Stelle der Fläche sich eben so verhielt, als eine Fläche, die nach dem Abwischen der Schmiere durch das in die Poren eingedrungene Fett noch einen gewissen Grad von Fettigkeit beibehalten hatte.
- 3) Unter allen Umständen zeigte sich die Reibung genau der Pressung proportional, und nur der Werth dieses Verhältnisses, d. h. der Reibungscoefficient, ist verschieden, je nach der

Beschaffenheit der Körper und dem Zustande ihrer Berührungsf lächen, in welcher Beziehung die später mitzutheilenden Tabellen die betreffenden Angaben enthalten.

Senes Nebenhinderniß, welches Coulomb der Adhäsion zuschreibt, und dessen Größe sich nach seinen Versuchen unabhängig vom Druck und der Berührungsf läche proportional zeigte, hat Morin niemals bemerkt, weder bei trocknen noch bei geschmierten Flächen, was um so auffallender ist, als gerade in dieser Beziehung die Coulombschen Versuche ganz bestimmte Zahlenresultate liefern, der Erfahrungen von Vince und anderen nicht zu gedenken. Allein dies ist nicht der einzige Punkt, in welchem die Morinschen Versuche von den früheren, und namentlich von den Coulombschen abweichen. So wird unter andern der Angabe Coulomb's, daß die Reibung der Bewegung zwischen Hölzern und Metallen mit der Geschwindigkeit wachsen soll, von Morin bestimmt widersprochen, da er diesen Widerstand unter übrigens gleichen Umständen für alle Grade der Geschwindigkeit stets von gleicher Größe fand.

Nicht minder abweichend von einander sind die Angaben der beiden Physiker in Bezug auf den Einfluß der den Versuchen vorangegangenen Ruhezeit auf die Größe der Reibung. Auch hier findet Morin diesen Widerstand der Pressung proportional und unabhängig von der Größe der Berührungsf läche; allein daß derselbe in seinem größten Werthe irgend eine Funktion der Ruhezeit sein sollte, wie es aus Coulomb's Versuchen hervorgeht, hat er niemals finden können. Alles, was er in dieser Beziehung mit Sicherheit wahrnehmen konnte, ist, daß die Reibung gewöhnlich nach Verlauf von 4 bis 5 Minuten ihren größten Werth erreichte, besonders wenn keine Schmiere angewendet wurde, oder wenn die Berührungsf lächen nach Wegnahme der früher gebrauchten Schmieren in einem gewissen fettigen Zustand verblieben. Befand sich jedoch Talg oder Schweinfett zwischen den Flächen, so waren die Umstände schwieriger zu ermitteln, indem die Zeit, der Zustand der Flächen, die Konsistenz der Schmiere und die Porosität der Körper dazu beitragen, die Beobachtung unsicher zu machen und Anomalien herbeizuführen. Dennoch gelangte Morin zu dem Resultat, daß bei Holz auf Holz und bei Holz auf Metall das Maximum der Reibung erreicht ist, sobald die Fettschmiere seitwärts zwischen den Körpern herausgedrückt worden und die Berührungsf lächen sich daher in demselben Zustande der Fettigkeit befinden, als wenn die Schmiere wäre abgewischt worden. Dieser Zustand trat gewöhnlich schon nach einer Ruhezeit von 20 Minuten ein, während hiezu nach Coulomb, wie wir früher gesehen haben, ein viel größerer Zeitraum, in manchen Fällen sogar 5 bis 6 Tage, erforderlich gewesen sein soll, was Morin (Abh. II. S. 89) jedenfalls für irrig erklärt. Hinsichtlich der Reibung der Metalle auf einander findet Morin, daß bei ganz trocknen oder bloß fettigen Oberflächen der fragliche Widerstand für den Zustand der Ruhe eben so groß ist, als für den der Bewegung, welches mit Coulomb's Angaben übereinstimmt. Bei der Anwendung des Olivenöls, welches sich nach Verlauf von wenigen Minuten seitwärts leicht herausdrücken ließ, fanden dieselben Umstände statt, wie bei bloß fettigen Oberflächen, so daß also auch die Reibung stets nur für diesen letzteren Zustand berechnet zu werden braucht, so oft Olivenöl angewendet wird. Zu mehrerer Erläuterung fügt Morin noch die Bemerkung hinzu, daß bei den Versuchen über die Reibung der verschiedenen Hölzer ohne Schmiere, wenn der belastete Schlitten im Zustande der

Ruhe von einer Kraft angezogen wurde, die der Reibung während der Bewegung gerade gleich war, alsdann eine mäßige Erschütterung des Apparats hinreichte, um den Abgang des Schlitzens hervorzubringen. Bei den Versuchen über die Reibung der Metalle auf einander, mit oder ohne Schmiere, war dagegen eine solche Veranlassung zum Beginnen der Bewegung weder nöthig noch von bemerkbarer Wirkung, woraus er folgert, daß im letzteren Falle die Reibung während der Bewegung genau eben so groß sein müsse, als nach einer längeren Ruhezeit.

Ein bemerkenswerthes Resultat, zu welchem die Morinschen Versuche geführt haben, besteht darin, daß bei der gleitenden Bewegung von Hölzern und Metallen, wenn die Berührungsflächen mit Schweinefett oder mit Olivenöl geschmiert sind, die Reibung für alle Körper fast immer dieselbe, und zwar innerhalb der Grenzen 0,07 und 0,08 der Belastung eingeschlossen bleibt. Diese Zahlen sollen auch noch als Grenzwerte der Reibung für Talgschmiere gelten, jedoch nur in Bezug auf das Gleiten von Holz auf Holz und von Metall auf Holz; wogegen bei Metall auf Metall die Reibung = 0,1 der Pressung gefunden wurde. Dieses Resultat scheint die Angaben Kennie's zu bestätigen, der, wie bereits angeführt, den Reibungswiderstand nur von der Beschaffenheit der Schmiere, nicht aber von der Natur der reibenden Körper abhängig gefunden hat.

Die bekannte Regel, daß gleichartige Körper eine größere Reibung geben sollen als ungleichartige, erklärt Morin als ganz unzulässig, indem nach seinen Versuchen, ohne Schmiere, sich die Reibung der Bewegung von Gußeisen auf Gußeisen = 0,152, von Gußeisen auf Eichenholz = 0,49, von Eichenholz auf Schmiedeeisen = 0,619, von Eisen auf Eichenholz aber = 0,48 ergab. — Sowohl für den Ruhestand als für die Bewegung fand Morin die Reibung ohne Schmiere von Ulmen auf Eichenholz fast doppelt so groß, als umgekehrt für Eichen auf Ulmenholz, wo in beiden Fällen die Fasern des Holzes mit der Richtung der Bewegung parallel waren. Bei Ulmen auf Eichenholz war nämlich die Reibung der Ruhe = 0,69, die der Bewegung = 0,43; bei Eichen auf Ulmenholz dagegen bezüglich = 0,376 und = 0,246; was als eine Besonderheit hier bemerkt werden mag.

Vergleicht man die durch Coulomb und Morin gefundenen Reibungscoefficienten mit einander, so findet im Allgemeinen so wenig Uebereinstimmung statt, daß die Angaben des einen manchmal das zweifache, dreifache bis vierfache von denen des andern betragen. So ist z. B. die Reibung der Ruhe von Eichenholz auf Eichenholz, ohne Schmiere, nach Coulomb = 0,440, nach Morin = 0,625; mit Talg geschmiert dagegen nach dem einen = 0,402, und nach dem andern nur = 0,164, während die Reibung der Bewegung für dieselben Körper, ohne Schmiere, bezüglich = 0,104 und = 0,478 angegeben wird. Für Eisen auf Eichenholz, ohne Schmiere, findet Coulomb die Reibung der Ruhe = 0,197, Morin = 0,620, also mehr als das dreifache des ersteren; dagegen findet jener die Reibung von Eisen auf Eisen, ebenfalls ohne Schmiere, = 0,285, dieser aber nur = 0,137, d. h. kaum halb so groß. — Ich wage es nicht, zur Erklärung dieser auffallenden Abweichungen irgend eine Muthmaßung aufzustellen, die jedenfalls nur als eine willkürliche Annahme erscheinen würde. Indem ich daher mein Urtheil hierüber unterdrücke, bemerke ich bloß, daß Herr Morin jenen Mangel an Uebereinstimmung einer irrigen

Voraussetzung Coulomb's in Bezug auf die Beschaffenheit der reibenden Flächen zuschreibt, indem er annimmt, daß die Versuche, deren Resultate Coulomb als für trockne Hölzer geltend mittheilt, wahrscheinlich mit Hölzern angestellt worden seien, die entweder von früheren Versuchen her noch fettig geblieben waren, oder vielleicht durch den Gebrauch einer fetthaltigen Substanz als Polirmittel eine fettige Oberfläche erhalten hatten, zu dünn, um sich den Sinnen bemerkbar zu machen, aber hinreichend, um die Gesetze der Reibung ganz und gar zu ändern. Diese Vermuthung macht Herr Morin an verschiedenen Stellen seiner Abhandlungen geltend, indem er dabei mehrere Umstände hervorhebt, die allerdings geeignet sind, sie wahrscheinlich zu machen. Gleichwohl würden die oben erwähnten Abweichungen der Morinschen Versuche von denen Coulomb's, selbst wenn die bloße Wahrscheinlichkeit der angeführten Conjecturen volle Gewißheit wäre, nur zum Theil erklärt sein, während der übrige Theil derselben hierin eben so wenig seinen erklärenden Grund finden dürfte, als die anderen von mir in dem Vorhergehenden hervorgehobenen Abweichungen. Herr Morin hielt eine Verification der Coulombschen Versuche um so nöthiger, als mehrere geschickte Physiker und Mechaniker gegen die Richtigkeit derselben seit einiger Zeit Zweifel erhoben hatten. Ueberdies hält er die von Coulomb angewendeten Mittel zur Beobachtung nicht für geeignet, um genaue Resultate herbeizuführen, worüber er sich an verschiedenen Stellen seiner Abhandlungen auspricht, jedoch nicht ohne diesem allgemein geachteten Physiker im Uebrigen alle Gerechtigkeit widerfahren zu lassen. Geht man in das Detail der von Coulomb angewendeten Methode ein, so ist es in der That keine Frage, daß sie einer solchen Genauigkeit, wie das Verfahren von Morin, gar nicht fähig ist. Coulomb ließ seinen belasteten Schlitten einen Raum von nur 4 Fuß Länge durchlaufen, und beobachtete höchstens die Zeiten, welche zum Durchlaufen der ersten und zweiten Hälfte dieses Weges erforderlich waren; meistens begnügte er sich aber damit, die bewegende Kraft versuchsweise so abzapfen, daß der Schlitten in eine langsame, beiläufig als gleichförmig angenommene Bewegung gerieth, nachdem er durch Hammerschläge etwas war erschüttert worden. Daß nun die Reibung während einer so kurzen Bewegung nicht so in ihrer ganzen Eigenthümlichkeit hervortreten, gleichsam zum Beharrungsstande kommen kann, wie bei einer Bewegung von langer Dauer, ist eben so einleuchtend, als die Unmöglichkeit, bei Versuchen dieser Art aus höchstens zwei Zeitbeobachtungen das Gesetz der Bewegung mit Sicherheit erkennen zu wollen, wobei nicht unbeachtet bleiben darf, daß Erfahrungen gemäß gerade beim Anfang der Bewegung die meisten Unregelmäßigkeiten statt finden. — Bei den Versuchen von Morin durchlief dagegen der Schlitten einen Raum von wenigstens 12 Fuß Länge und zwar meistens mit beschleunigter Bewegung, da eine gleichförmige Bewegung, sofern der Betrag der Reibung nicht a priori bekannt ist, sich nur durch ein mühsames und zeitraubendes Abpassen des zur Bewegung dienenden Gewichtes, und dann doch nur näherungsweise hervorbringen läßt. Ueberdies wurde vermöge der getroffenen Anordnung die Natur dieser Bewegung, so wie die Größe des Widerstandes während derselben, mit der größten Genauigkeit in einem stetigen Zuge erhalten, wodurch also nach Beendigung des Versuchs eine Vergleichung des in jedem Augenblick statt gehabten Widerstandes mit der zugehörigen Geschwindigkeit möglich gemacht war. In Betracht dieser weit zweckmäßigeren Anordnung wird man unstreitig, ohne un-

gerecht zu sein, nicht umhin können, überall, wo zwischen den Coulombschen und Morinschen Versuchen Differenzen statt finden, diese letzteren als entscheidend anzusehen, wenigstens so lange, bis etwa künftige Versuche das hier ausgesprochene Urtheil bestätigen oder vielleicht theilweise modificiren werden.

Noch muß ich hier einer Beobachtung Erwähnung thun, die Morin in Bezug auf gewisse Aenderungen in dem Zustande der Berührungsflächen gemacht hat, Aenderungen, welche jedesmal eintraten, so oft die Körper trocken, ohne Schmiere, übereinander fortgezogen wurden. — Bei den Versuchen über die Reibung der Hölzer fand nämlich eine gegenseitige Abnutzung dadurch statt, daß sich an den übereinander gleitenden Flächen eine Menge kleiner Wärzchen von bräunlicher Farbe und solcher Härte bildeten, daß sie Furchen in die Flächen rissen, die manchmal eine halbe bis dreiviertel Linien tief sein konnten. Diese Wärzchen mußten nach jedem einzelnen Versuch, um ihren störenden Einfluß auf die Resultate möglichst zu vermindern, sorgfältig abgerieben werden, wodurch sie sich in ein Pulver verwandelten, welches sich der sinnlichen Wahrnehmung wie sehr feiner Holzstaub darbot. Nicht bloß beim Gleiten von Holz auf Holz, sondern auch wenn andere Körper, z. B. Metalle, über Holz fortgezogen wurden, trat diese Erscheinung auf gleiche Weise hervor; wohingegen der geringste Fettüberzug, ja selbst das bloße Abreiben des Holzes mit gegerbtem Leder, hinreichend war, die Entstehung jener Wärzchen zu verhindern und die Reibung beträchtlich, manchmal bis auf den sechsten Theil herabzusetzen. Coulomb hat diese auffallende Erscheinung niemals bemerkt, und hauptsächlich aus diesem Umstande nimmt Morin die Gründe her zu der vorhin erwähnten Conjectur in Bezug auf die Versuche des ersteren.

Auch bei den Metallen, wenn diese ohne Schmiere gleitend übereinander fortgezogen wurden, zeigte sich jedesmal eine gegenseitige Abnutzung, in der äußeren Erscheinung jedoch verschieden von der vorhin beschriebenen, und nicht minder verschieden nach der besondern Beschaffenheit und Härte eines jeden einzelnen Metalles. Im Allgemeinen zeigte sich diese Abnutzung am stärksten für die faserigen Metalle, wie Schmiedeeisen, die in der Richtung der Fasern übereinander gleiten; viel geringer, wenn eines der Metalle ein körniges Gefüge hatte, und am geringsten, wenn beide von dieser letzteren Beschaffenheit waren. Beim Schmiedeeisen zeigten sich nach jedem Versuche, ungeachtet der sorgfältigsten Politur, nicht bloß lange Furchen eingekraßt, die mit Gräten an den Rändern versehen waren, sondern einzelne Metallfasern hatten sich erhoben und, dem Laufe des Schlittens folgend, auf sich selbst zurückgelegt. Die Reibung von Gußeisen auf Gußeisen, ohne Schmiere, bot eine andere Art der Abnutzung dar, die jedoch der Bewegung nicht so hinderlich war, als die vorige. Die Berührungsflächen schienen sich nach zahlreicher Operation gegenseitig polirt zu haben, wobei sich selbst unter geringen Pressungen von 12 bis 14 Pfd. auf den Quadratfuß ein schwarzes, feines, metallisches Pulver, wie Gußeisen-Feilstaub, gebildet hatte. Diese Abnutzung nahm zu, wenn die Flächen mit Wasser benetzt wurden, während zugleich die Reibung auf das doppelte anwuchs. Auf gleiche Weise geschah auch bei den übrigen Metallen von körniger Textur, wie Messing, Bronze u., die gegenseitige Abnutzung durch Bildung eines metallischen Pulvers, wodurch jedoch die Reibung nur in einem geringen Grade vergrößert wurde. Dies war auch dann noch der Fall, wenn solche körnige Metalle über Schmie-

deisen fortgezogen wurden, woraus Morin die praktische Regel ableitet, ohne Schmiere niemals zwei faserige Metalle auf einander laufen zu lassen, sondern stets entweder zwei körnige Metalle, oder doch ein körniges mit einem faserigen in Berührung zu bringen.

Die von Coulomb aufgestellte physikalische Theorie der Reibung, gegründet auf die Annahme von kleinen elastischen Federn, womit die Holzflächen bedeckt sein sollen, verwirft Morin schon deshalb gänzlich, da er die verschiedenen Besonderheiten, welche Coulomb beobachtet haben will und aus der fraglichen Hypothese zu erklären bemüht ist, gar nicht hat wahrnehmen können. Ueberdies, argumentirt Herr Morin weiter, wären jene molekulären Federn die wahre Ursache der Reibung, so müßten dieselben, da letztere dem Drucke proportional gefunden worden, sich ebenfalls im Verhältniß zum Drucke niederbiegen, und folglich beim Zurückschnellen in ihre ursprüngliche Lage nicht bloß desto größere Schwingungen machen, sondern dadurch auch dem Versuchs-Apparate desto stärkere Erschütterungen mittheilen, je größer die Belastungen des Schlittens sind. Auch würden diese Erschütterungen mit der Geschwindigkeit des Schlittens zunehmen müssen, weil in demselben Verhältniß auch die Anzahl der schwingenden Federn wächst; wenigstens müßte in dieser Beziehung ein Unterschied wahrnehmbar sein. — Dies zu untersuchen, setzte Herr Morin eine Schale mit Wasser auf den Apparat, und stellte sich so davor hin, daß er das gegenüber befindliche Fenster durch Reflexion des Lichtes im Wasser sehen, und so die geringste Bewegung des Wasserspiegels wahrnehmen konnte. Hierauf ließ er den Schlitten in Bewegung setzen, und beobachtete dabei fortwährend den Wasserspiegel, um zu sehen, ob sich nicht jene concentrischen, ringförmigen Wellen bilden würden, die selbst bei der kleinsten Erschütterung zu entstehen pflegen; allein es war durchaus Nichts der Art zu bemerken, obgleich diese Beobachtungen mit großen Belastungen öfter wiederholt wurden, und dabei die Geschwindigkeiten zuweilen über drei Meter (etwa 10 Pr. Fuß) in der Sekunde betragen.

Hiermit schließe ich die historische Uebersicht der über die Reibung bis jetzt angestellten Beobachtungen, um sogleich zu der Mittheilung der hauptsächlichsten Versuche insbesondere überzugehen. Nach der von Rollet und Bossut gegebenen Klassifikation werde ich zuerst die gleitende Reibung abhandeln, nächstdem zu der drehenden oder Zapfenreibung übergehen, und zuletzt die wälzende oder rollende Reibung folgen lassen, wobei auch der Versuche Erwähnung geschehen wird, welche über den Widerstand der Fuhrwerke auf Straßen und Chausséen, besonders aber auf Eisenbahnen, angestellt worden sind.

II.

Zusammenstellung

der

Versuche über die gleitende Reibung.

Zu den Versuchen, deren specielle Mittheilung hier von Interesse sein dürfte, zähle ich besonders diejenigen, welche von Musschenbroek, Coulomb, George Rennie, und neuerdings von Morin in Metz angestellt worden sind. Die dadurch gewonnenen Resultate sind in dem Vorhergehenden schon im Allgemeinen mitgetheilt worden; hier kommt es insbesondere nur auf eine Zusammenstellung der Zahlenergebnisse in Bezug auf das Verhältniß der Reibung zum Druck an, welche Verhältnißzahlen man unter der Benennung der Reibungscoefficienten in den nachstehenden Tabellen zusammengestellt findet, theils so, wie sie die oben genannten Experimentatoren selbst berechnet haben, größtentheils aber nach den von ihnen angegebenen Bestimmungsstücken neu berechnet, um für alle Versuche die Reibungscoefficienten in einerlei Form auszudrücken, und so eine Vergleichung zwischen denselben möglich zu machen. Diese neue Berechnung, obgleich sehr mühsam, erschien mir doch um so unerläßlicher, als Coulomb und Rennie das Verhältniß zwischen Druck und Reibung dadurch ausdrücken, daß sie diejenigen Zahlen angeben, mit welchen der erstere dividirt werden muß, um die letztere zu erhalten, während hingegen Morin, wie es auch allgemein gebräuchlich ist, die Zahlenfactoren bestimmt, durch deren Multiplikation mit dem Druck die Reibung erhalten wird. Bezeichnet daher Q den Druck eines Körpers normal auf die Berührungsfläche, F die Kraft, welche parallel mit dieser Fläche auf den Körper wirken muß, um die Reibung zu überwinden, und behalten wir die von Euler eingeführte Bezeichnung des Reibungscoefficienten mit μ auch hier bei, so ist also in dem zuletzt angegebenen Sinne $F = \mu Q$, woraus sich nun, wenn F und Q bekannte Beobachtungsgrößen sind, $\mu = \frac{F}{Q}$ ergibt. Auf diese

Weise sind die in nachstehenden Tabellen verzeichneten Reibungscoefficienten berechnet, und demnächst ist von den zu einerlei Körpern gehörigen Zahlenwerthen derselben das Mittel genommen worden.

Die Buchstaben F , Q und μ hat man der Kürze wegen in der oben angegebenen Bedeutung überall beibehalten.

Versuche von Musschenbroek.

Bei den folgenden Versuchen wurden kleine Brettchen von 1 Zoll Breite, 13 Zoll Länge unter verschiedenen Belastungen über horizontale Unterlagsbohlen von Tannen-, Eichen- oder Buchsbaumholz fortgezogen. Das Brettchen bestand einmal aus Tannenholz, das zweite Mal aus Eichenholz; die Reibungsflächen waren bei allen Versuchen trocken.

Tafel I. Versuche über die Reibung der Hölzer, wenn die Fasern parallel laufen.

Belastung Q mit Ein- schluß vom Gewicht d. Brettch.	Tannen- auf Tannenholz.		Tannen- auf Buchsbaum.		Eichen- auf Eichenholz.		Eichen- auf Buchsbaum.	
	Zugkraft. F	μ	Zugkraft. F	μ	Zugkraft. F	μ	Zugkraft. F	μ
4 Unz.	8 Drachm.	0,250	6 Drachm.	0,188	6 Dr.	0,188	6 Dr.	0,188
6 "	11 "	0,230	8 "	0,167	8 "	0,167	8 "	0,167
8 "	15 "	0,234	9 "	0,141	10 "	0,156	10 "	0,156
10 "	17 "	0,213	11 "	0,138	12 "	0,150	11 "	0,138
12 "	22 "	0,230	13 "	0,135	15 "	0,156	12 "	0,125
14 "	25 "	0,223	16 "	0,143	17 "	0,144	14 "	0,125
16 "	28 "	0,219	20 "	0,156	21 "	0,164	16 "	0,125
18 "	31 "	0,215	23 "	0,159	25 "	0,174	18 "	0,125
	Mittel = 0,227		Mittel = 0,153		Mittel = 0,162		Mittel = 0,144	
48 Unz.	8 Unz. 6 Drachm.	0,182	6 Unz. 4 Drachm.	0,135	11 Unz.	0,229	5 Unz.	0,104
64 "	12 " 6 "	0,199	9 " 4 "	0,148	14 "	0,219	7 "	0,109
80 "	13 " 4 "	0,169	12 " — "	0,150	15 "	0,188	9 "	0,113
96 "	16 " 4 "	0,172	12 " 4 "	0,130	17 "	0,177	10 "	0,104
112 "	20 " — "	0,179	14 " — "	0,125	20 "	0,179	13 "	0,116
128 "	24 " — "	0,188	16 " — "	0,125	23 "	0,180	15 "	0,117
160 "	26 " — "	0,163	20 " 4 "	0,128	29 "	0,181	19 "	0,119
	Mittel = 0,179		Mittel = 0,135		Mittel = 0,193		Mittel = 0,112	

Bei diesen Versuchen fand nur eine langsame Bewegung gleichlaufend mit der Richtung der Holzfasern statt, welche Bewegung jedoch so abgepaßt wurde, daß das Brettchen jedesmal mit gleichbleibender Geschwindigkeit die ganze Länge der Unterlagsbohle durchlief.

Nachstehende Versuche wurden angestellt, um zu ermitteln, ob und wie weit die Größe der Berührungsfläche von Einfluß auf den Betrag der Reibung ist. Zu dem Ende wurde ein Tannenbrett von derselben Art, wie bei den vorigen Versuchen, aber von 2 Zoll 11 Linien Breite bei 13 Zoll Länge angewendet, und ohne Schmiere über Unterlagsbohlen von Tannen und Buchsbaum parallel mit den Fasern fortgezogen.

Tafel II. Versuche über den Einfluß der Berührungsfläche auf die Größe der Reibung.

Belastung. Q	Tannen auf Tannenholz.		Tannen auf Buchsbaum.		Belastung. Q	Tannen auf Tannenholz.		Tannen auf Buchsbaum.	
	Zugkraft. F	μ	Zugkraft. F	μ		Zugkraft. F	μ	Zugkraft. F	μ
6 Unz.	14 Drachm.	0,292	10 Drachm.	0,208	48 Unz.	12 Unzen	0,250	8½ Unzen	0,177
8 "	18 "	0,281	12 "	0,188	64 "	16 "	0,250	11½ "	0,180
10 "	22 "	0,275	15 "	0,188	80 "	23 "	0,288	13 "	0,163
12 "	26 "	0,271	16 "	0,167	96 "	40 "	0,417	15 "	0,156
14 "	32 "	0,286	18 "	0,161	112 "	41 "	0,366	17 "	0,152
16 "	36 "	0,281	22 "	0,172	128 "	43 "	0,336	20 "	0,156
18 "	40 "	0,278	24 "	0,167	160 "	48 "	0,300	27 "	0,170
Mittel = 0,281		Mittel = 0,179		Mittel = 0,315		Mittel = 0,165			

Um zu ermitteln, wie die Reibung des Holzes sich ändert, wenn sich die Fasern beim Gleiten übereinander rechtwinklig durchkreuzen, wurden die nachstehenden Versuche angestellt, bei welchen ein Brett von 1 Zoll Breite, 13 Zoll Länge über ein anderes horizontal liegendes Brett fortgezogen wurde.

Tafel III. Versuche über die Reibung der Hölzer, wenn die Fasern sich rechtwinklig kreuzen.

Belastung. Q Unzen.	Tannen auf Tannenholz.			Eichen auf Tannenholz.			Eichen auf Eichenholz.		
	Reibung F.		μ	Reibung F.		μ	Reibung F.		μ
	Unzen.	Drachmen.		Unzen.	Drachmen.		Unzen.	Drachmen.	
2	1	—	0,500	—	7½	0,469	—	4	0,250
4	1	4	0,375	—	—	—	—	7½	0,234
6	2	5	0,438	2	—	0,333	1	4	0,250
8	4	2	0,531	3	—	0,375	1	6	0,219
10	5	6	0,575	4	4	0,450	2	—	0,200
12	6	4	0,542	5	4	0,458	2	—	0,167
14	7	4	0,537	6	4	0,464	2	4	0,180
16	9	—	0,563	7	4	0,469	2	6	0,172
18	10	—	0,555	—	—	—	3	4	0,194
32	16	—	0,500	13	4	0,422	6	—	0,188
48	25	—	0,521	20	—	0,417	8	—	0,167
64	31	—	0,484	22	—	0,344	10	4	0,164
80	34	—	0,425	28	—	0,350	14	—	0,175
96	42	—	0,438	32	—	0,333	18	—	0,188
112	50	—	0,446	—	—	—	—	—	—
Mittel = 0,495			Mittel = 0,407			Mittel = 0,196			

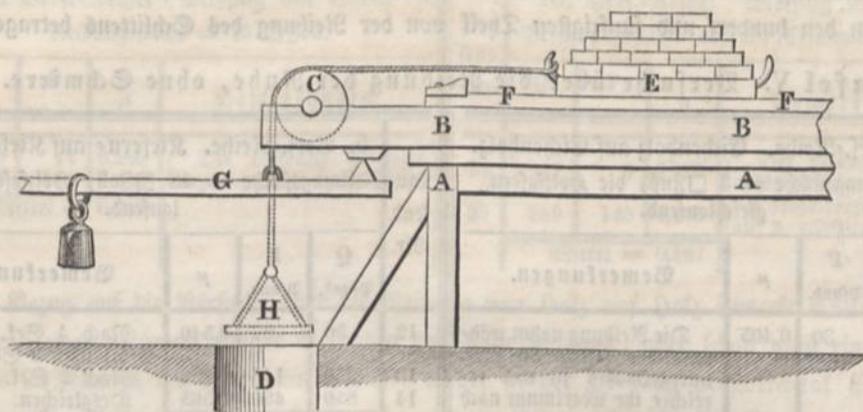
Noch sind folgende Versuche angestellt, um beim Eichenholz die Reibung zu finden, wenn dasselbe mit den glatt gehobelten Hirnseiten, also in verticaler Stellung der Fasern, übereinander gleitet. Das zu bewegende Stück Eichenholz wog $7\frac{3}{4}$ Unzen und erforderte, ohne anderweitig belastet zu sein, eine Zugkraft = 2 Unzen zur Ueberwindung der Reibung. Wenn dasselbe aber mit den Gewichten beschwert wurde, welche in der ersten Columne der nachstehenden Tabelle bemerkt sind, so mußte man jene 2 Unzen wegen der größeren Reibung um die in der zweiten Columne aufgeführten Gewichte vermehren. Die dritte, vierte und fünfte Columne sind von mir hinzugefügt, und geben nach der Reihe den gesammten Druck, den zugehörigen Widerstand und den danach berechneten Reibungscoefficienten.

Tafel IV. Versuche über die Reibung, wenn Hirnholz auf Langholz nach der Richtung der Fasern gleitet.

Aufgelegtes Gewicht.	Davon herrührende Vergrößerung der Reibung.		Gesammter Druck. Q		Gesammte Reibung. F		Reibungscoefficient $\frac{F}{Q} = \mu$
	Unzen.	Drachmen.	Unzen.	Drachmen.	Unzen.	Drachmen.	
2	—	1½	9	6	2	1½	0,224
4	—	4½	11	6	2	4½	0,218
6	—	6½	13	6	2	6½	0,205
8	1	1	15	6	3	1	0,198
10	1	3	17	6	3	3	0,190
12	1	6	19	6	3	6	0,190
14	2	2	21	6	4	2	0,195
16	2	4	23	6	4	4	0,189
18	2	7	25	6	4	7	0,189
32	5	—	39	6	7	—	0,176
48	7	6	45	6	9	6	0,213
64	14	—	71	6	16	—	0,223
80	16	—	87	6	18	—	0,205
96	21	—	103	6	23	—	0,222
128	23	—	135	6	25	—	0,184
Mittel =							0,201

Versuche von Coulomb.

Im Allgemeinen habe ich den von Coulomb gebrauchten Apparat schon in dem vorhergehenden beschrieben. Hier nur noch Folgendes zur nähern Erläuterung mit Bezug auf die beigefügte Skizze, welche die Anordnung des Apparates versinnlicht.



A, A ist ein stark gebauter und durch Streben am Boden befestigter Tisch, auf dessen Platte zwei Langhölzer B, B aus Eichenholz, jedes etwa 8 Zoll hoch, mit dreizölligem Zwischenraum neben einander liegen. In diesem Zwischenraum ist am vorderen Ende des Tisches die aus Guajacholz gefertigte Rolle C, von 1 Fuß Durchmesser, eingesetzt, woselbst sie sich um eine Ase aus Steineichen, 10 Linien im Durchmesser, dreht. Senkrecht unter dieser Rolle befindet sich im Fußboden eine brunnenartige Vertiefung D von 4 Fuß Tiefe. E ist der mit Gewichten belastete Schlitten und F, F die auf den Langhölzern befestigte Unterlage, aus derjenigen Substanz bestehend, auf welcher die Reibung der Schlittenläufe soll ermittelt werden. Am vorderen Ende dieser Unterlage ist eine Querleiste angebracht, welche den Schlitten, wenn er seinen Lauf vollendet hat, aufhält. — Um die Reibung für den Ruhestand zu untersuchen, dient der, wie die römische Waage, mit einem verschiebbaren Gewichte versehene Hebel G, dessen Wirkung auf den Schlitten vermittelt des über die Rolle C geleiteten Seiles leicht aus der Figur zu erkennen ist. Zur Beobachtung der Reibung während der Bewegung wird dagegen statt jenes Hebels die Wagschaale H gebraucht, welche die bewegenden Gewichte aufnimmt, und sich mit denselben in die Vertiefung D hinabsenkt.

Sene Schlittenläufe bestehen aus Schienen von verschiedenen Substanzen, welche gegen die Grundfläche des Schlittens befestigt werden. Bei den Versuchen über die Reibung der Hölzer wurden dieselben entweder nach der Länge, oder nach der Quere befestigt, je nachdem die Holzfasern beim Gleiten parallel laufen, oder sich rechtwinklig durchkreuzen sollten. Nach der Größe dieser Schienen bestimmte sich die Größe der Reibungsfläche; und wenn letztere möglichst klein oder linear sein sollte, so wurden statt flacher Schienen dreikantige Prismen, die mit einer abgerundeten Kante die obere Unterlage F, F berührten, unter dem Schlitten befestigt. Die sich reibenden Holzflächen wurden vorher mit dem Schlichthobel möglichst geebnet und demnächst mit einem Seehundsfell gut polirt. Außerdem wurde vor jedem neuen Versuche die höchst mögliche Politur der Reibungsfläche dadurch hervorgebracht, daß der Schlitten unter Belastungen bis zu 10 Centner etwa zwanzigmal über das Unterlager hin- und hergezogen wurde*).

*) Daß auf diese Weise die Politur von trockenen Flächen, die keine Spur von Fettigkeit haben, soll erhöht werden können, steht mit den Erfahrungen Morin's im direkten Widerspruch.

Die Reibung an der Are der Rolle C läßt Coulomb außer Acht, weil sie nur gering sei und kaum den hundert und fünfzigsten Theil von der Reibung des Schlittens betrage.

Tafel V. Versuche über die Reibung der Ruhe, ohne Schmiere.

Lau- fend. Nr.	1. Verf.-Reihe. Eichenholz auf Eichenholz. Reibungsfläche = 3 □ Fuß; die Holzfasern gleichlaufend.			Bemerkungen.	Lau- fend. Nr.	5. Verf.-Reihe. Kiefern- auf Kiefernholz. Reibungsfläche = 48 □ Zoll; Holzfasern gleich- laufend.			Bemerkungen.
	Q Pfund.	F Pfund.	μ			Q Pfund.	F Pfund.	μ	
1	74	30	0,405	Die Reibung nahm wäh- rend der ersten 30 Sek. unregelmäßig zu und er- reichte ihr Maximum nach 1 Minute. Desgleichen. Die Reibung war an- fänglich = 586 Pfd.; nach 2 Sek. wuchs sie bis auf 1106 Pfd. an, und erreichte nach 1 Min. ihr Maxim.	12	50	27	0,540	Nach $\frac{1}{2}$ Sek. F = 20 Pfd.; nach 3 Sek. $\frac{1}{2}$ Max. Nach 2 Sek. $\frac{1}{2}$ Maxim. Desgleichen.
2	874	406	0,465		13	250	145	0,580	
3	2474	1116	0,451		14	850	480	0,565	
Mittel = 0,440					Mittel = 0,562				
2. Verf.-Reihe. Eichenholz auf Eichenholz. Berührungsfläche linear; die Holzfasern gleichlaufend.					6. Verf.-Reihe. Ulmen- auf Ulmenholz. Reibungsfläche = 48 □ Zoll; Holzfasern gleichlaufend.				
4	250	106	0,424	Die Reibung erreichte sogleich ihr Maximum. Desgleichen. Desgleichen.	15	45	21	0,467	Nach $\frac{1}{2}$ Sek. F = 6 Pfd.; nach 3 Sek. = 10 Pfd.; nach 1 Min. = 19 Pfd.; nach 1 St. zum Maxim. Anfänglich F = 100 Pfd.; nach 3 Sek. = 160 Pfd.; nach 1 Min. zum Maxim. Anfängl. F = 356 Pfd.; nach 2 Sek. = 556 Pfd.; nach 10 Min. zum Maxim.
5	450	186	0,413		16	450	207	0,460	
6	856	356	0,416		17	1650	756	0,458	
Mittel = 0,418					Mittel = 0,462				
3. Verf.-Reihe. Eichenholz auf Eichenholz. Berührungsfläche linear; die Holzfasern sich kreuzend.					7. Verf.-Reihe. Eisen auf Eichenholz. Reibungsfläche = 45 □ Zoll; gleichlaufend mit den Holzfasern.				
7	50	13	0,260	Nach 1 Sek. und nach 1 Min. betrug die Reibung jedesmal 13 Pfd. Ohne Angabe der Ru- hezeit.	18	53	10	0,189	Anfänglich F = 5 Pfd.; nach 30 Sek. = 5 $\frac{1}{2}$ Pfd.; nach 1 Min. = 6 $\frac{1}{2}$ Pfd.; nach 1 St. = 9 Pfd.; nach 4 Tagen zum Maximum. Anfängl. F = 125 Pfd.; nach 10 Sek. = 130 Pfd.; u. 1 $\frac{1}{2}$ Min. = 145 Pfd.; nach 4 St. = 200 Pfd.; nach 16 St. = 280 Pfd.; nach 4 Tagen zum Maximum.
8	1650	450	0,273		19	1650	340	0,206	
Mittel = 0,266					Mittel = 0,197				
4. Verf.-Reihe. Eichenholz auf Kiefernholz. Berührungsfläche = 48 □ Zoll; die Holzfasern gleichlaufend.					8. Verf.-Reihe. Eisen auf Eisen. Reibungsfläche = 45 □ Zoll.				
9	50	36	0,720	Anfänglich war die Reib. = 25 Pfd.; nach 2 Sek. = 30 und nach 10 Sek. erreichte sie ihr Maximum. Nach $\frac{1}{2}$ Sek. F = 256; nach 1 Min. = 284 Pfd. Nach $\frac{1}{2}$ Sek. zum Maxim.	20	51	15	0,294	Die Reibung erreichte fast augenblicklich ihr Ma- ximum, denn man fand sie nach $\frac{1}{2}$ Sek. und nach ei- ner weit längern Ruhezeit von gleicher Größe.
10	450	284	0,631		21	450	124	0,276	
11	850	560	0,659		Mittel = 0,285				
Mittel = 0,670									

Lau- fend.		9. Verf.-Reihe. Messung auf Eisen. Reibungsfläche = 45 □ Zoll.		
Nr.	Q Pfund.	F Pfund.	μ	Bemerkungen.
22	50	14	0,280	
23	450	112	0,249	
Mittel = 0,265				

Lau- fend.		10. Verf.-Reihe. Messung auf Eisen. Berührungsfläche auf ein Minimum gebracht.		
Nr.	Q Pfund.	F Pfund.	μ	Bemerkungen.
24	47	8	0,170	
25	850	140	0,165	
Mittel = 0,167				

In Bezug auf die Versuche über die Reibung von Holz auf Holz bemerkt Coulomb, daß die Reibung zwar während einiger Sekunden der Ruhe zunimmt, aber schon nach einer Ruhezeit von 1 bis 2 Minuten ihr Maximum erreicht, wobei sie der Pressung proportional ist. In den Fällen, wo die Reibungsfläche auf eine abgerundete Kante reducirt oder linear geworden war, zeigte sich der Widerstand geringer und auch übereinstimmender, welches beides Coulomb dem Einfluß der Adhäsion zuschreibt, die sich bei sehr kleinen Berührungsflächen nicht so merklich äußern könne, als bei einer Fläche von 3 Quadratzußen, wie in den ersten drei Versuchen. — Wenn die Fasern des Holzes beim Uebereinandergleiten sich rechtwinklig durchkreuzen, so findet eine geringere Reibung statt, als wenn sie parallel laufen, und zwar nach Coulomb's Angaben in dem Verhältniß 2,34 : 3,76.

Gleiten Metalle auf Hölzern, so nimmt die Reibung anfänglich nur sehr langsam mit der Dauer der Ruhezeit zu. Selten erreichte sie vor vier oder fünf Stunden ihr Maximum, wozu manchmal sogar fünf bis sechs Tage erforderlich waren. Dies zeigte sich ebenso für Kupfer auf Eichenholz, worüber jedoch weiter keine speciellen Versuche mitgetheilt werden, als daß der Reibungscoefficient $\mu = \frac{1}{5,5} = 0,182$ angegeben wird.

Für Eisen auf Eisen und für Messing auf Eisen war es nicht möglich, die Reibung unter einer größeren Belastung als 450 Pfund zu beobachten, weil sonst die Metalle sich streiften, wodurch der Widerstand beträchtlich wuchs, und die Resultate unsicher wurden. Bei den letzten zwei Versuchen, wo vier sphärische Nagelköpfe aus Messing über die eiserne Unterlage fortgezogen wurden, war die Reibung anfänglich $= \frac{1}{5}$ des Drucks; aber nachdem der Schlitten unter einer Belastung von 5 bis 6 Centnern öfter hin und her gezogen worden, nahmen die Nagelköpfe einen solchen Grad der Politur an, daß die Reibung nur noch $\frac{1}{6} = 0,167$ war, und diesen Werth fortwährend beibehielt. Es ist zu verwundern, daß hier die Belastung bis auf 850 Pfd. gesteigert werden konnte, ohne dadurch eine merkliche Abnutzung herbeizuführen.

Tafel VI. Versuche über die Reibung der Ruhe, mit Schmieren zwischen den Körpern.

11. Verf.-Reihe. Eichenholz auf Eichenholz.					13. Verf.-Reihe. Kupfer auf Eisen.				
Lau- fend. Nr.	Reibungsfläche = 1½ □Fuß; mit frischem Talg ½ Linie dick geschmiert.				Lau- fend. Nr.	Reibungsfläche = 45 □Zoll; mit frischem Talg ½ Linie dick geschmiert.			
	Q Pfund.	F Pfund.	μ	Bemerkungen.		Q Pfund.	F Pfund.	μ	Bemerkungen.
26	47	9	*)0,191	Anfänglich F = 6½ Pfd.; nach 4 Min. = 8 Pfd.; nach 2 St. F = 9 Pfd.	31	50	7	0,140	Nachdem der Schlitten etwas angestoßen worden, war die Reibung anfängl. = 6 Pfd.; nach 4 Min. wie auch nach 30 Minut. ergab sie sich jedesmal = 7 Pfund.
27	1650	622	0,377	Anfänglich F = 64 Pfd.; nach 15'' = 209 Pfd.; nach 4 Min. = 318 Pfd.; nach 2 St. = 452 Pfd.; nach 6 Tagen zum Maximum.	32	450	48	0,107	Anfängl. war F = 42 Pfd.; nach einer Ruhezeit von 4 Min., und nach 2 St. war übereinstimmend F = 48 Pfd.
28	3250	1387	0,426	In den ersten 2 Stund. wuchs F von 120 bis auf 920 Pfd. an. Das Maxim. trat erst nach 5 Tagen ein, und war einmal = 1220, ein anderes Mal = 1554 Pfd., im Mittel = 1387 Pfd.	33	1650	168	0,102	Nach 10 Sek. F = 150 Pfd.; nach 3 Min. = 158 Pfd.; nach 4 St. = 168 Pfund und nach 4 Tagen noch eben so groß.
Mittel = 0,402				Mit Ausschluß des Ver- suchs Nr. 26.	Mittel = 0,116				
12. Verf.-Reihe. Eichenholz auf Eichenholz.									
Reibungsfl. = 4½ □Fuß; mit alter Talgschmiere, die innerhalb 8 Tagen nicht erneuert wurde.									
29	2310	514	0,222	Anfängl. F = 187 Pfd.; nach 2 Min. = 392 Pfd.; nach 1 St. = 451 Pfd.; nach 16 St. zum Maxim.					
30	5810	1535	0,264	Anfängl. F = 502 Pfd.; nach 2 Min. = 790 Pfd.; nach 26 Min. = 1036 Pfd.; nach 1 St. = 1186 Pfd.; nach 16 St. zum Maxim.					
Mittel = 0,243									

Den 26. Versuch verwirft Cou lomb, weil die Reibung noch nicht zu ihrer Grenze gelangt war. Der zugehörige, in der Tabelle mit einem *) bezeichnete Coefficient ist daher von der Berechnung des Mittelwerthes ausgeschlossen worden.

In Bezug auf die Versuche Nr. 31, 32 und 33 bemerkt Cou lomb, daß die Abnahme der Reibungscoefficienten mit der Zunahme der Belastung dem Einfluß der Adhäsion (coherence), oder der Anziehungskraft zwischen den Berührungsflächen, zuzuschreiben sei. Diese Adhäsion hängt, seiner Ansicht nach, von der Natur der Schmiermittel so wie von der Größe der Berührungsfläche ab, und wird für die genannten drei Versuche, bei welchen die Berührungsfläche unverändert geblieben, zu 1½ Pfund angegeben, was jedoch nicht genau ist. Bezeichnen wir nemlich das fragliche Nebenhinderniß mit a, so müssen nach den Angaben in der Tabelle folgende Gleichungen stattfinden:

Nach

$$\text{Nach Nr. 31. } 50 \cdot \mu + a = 7$$

$$\text{„ „ 32. } 450 \cdot \mu + a = 48$$

$$\text{„ „ 33. } 1650 \cdot \mu + a = 168.$$

Abdirt man diese Gleichungen, und dividirt das Resultat mit 3, so kömmt

$$716\frac{2}{3} \cdot \mu + a = 74\frac{2}{3};$$

und indem man die letzte Gleichung mit jeder der drei vorigen durch Subtraction verbindet, so wird a eliminirt, und man erhält

$$666\frac{2}{3} \cdot \mu = 67\frac{2}{3}; \text{ daraus } \mu = 0,101$$

$$266\frac{2}{3} \cdot \mu = 26\frac{2}{3}; \text{ „ } \mu = 0,099$$

$$933\frac{1}{3} \cdot \mu = 93\frac{2}{3}; \text{ „ } \mu = 0,100$$

Mit Ausschluß der Adhäsion ist demnach $\mu = 0,1$ der mittlere Reibungscoefficient, und wenn man diesen in die drei ersten Gleichungen setzt, findet man für die Adhäsion den Mittelwerth $a = 2\frac{2}{3}$ Pfd. auf 45 Quadratzoll, also auf den Quadratsfuß $= \frac{144}{45} \cdot \frac{8}{3} = 8\frac{2}{3}$ Pfd. sehr nahe.

Noch führt Coulomb folgende zwei Versuche an, die er mit Kupfer auf Eisen angestellt hat. Nachdem nämlich die vorigen Versuche vollendet waren, wurden die Berührungsflächen der genannten Metalle rein abgewischt und mit Olivenöl bestrichen, wonach die Reibung augenblicklich ihr Maximum erreichte. Es ergab sich $\mu = \frac{1}{4}$.

Wenn an der Stelle des Oels Theer oder Wagenschmiere (vieux-oing) gebraucht wurde, so erreichte die Reibung ebenfalls sehr schnell ihre Grenze, und es fand sich $\mu = \frac{1}{4}$.

In dem Maße, als diese letztere Schmiere dünner oder weicher wurde, vergrößerte sich allmählig die Reibung, indem sie sich dem Werthe $\mu = \frac{1}{3}$ näherte.

Reibung der Bewegung. Bei den folgenden Versuchen wurde das bewegende Gewicht entweder so abgepaßt, daß der Schlitten, nachdem er durch kleine Hammerschläge etwas aus der Ruhe gebracht worden, den 4 Fuß langen Weg möglichst gleichförmig durchlief, oder aber, daß er zum Durchlaufen der ersten Hälfte dieses Weges ohngefähr doppelt so viel Zeit gebrauchte, als zum Durchlaufen der zweiten Hälfte. Im ersteren Falle ist dann das bewegende Gewicht in der Wagschale, da von der Reibung der Rolle abstrahirt wird, unmittelbar das Maß der Reibung F , und die Verhältnißzahl μ wird wie früher gefunden, indem man jenes bewegende Gewicht durch die Belastung des Schlittens dividirt. Im letzteren Falle hingegen kann die Bewegung näherungsweise als gleichförmig beschleunigt angesehen werden*), und unter dieser Voraussetzung erhält man den Betrag der Reibung, wenn man die, bloß zur Ueberwindung der Trägheit der Massen erforderliche, Kraft von dem bewegenden Gewichte subtrahirt. Bezeichnet nämlich V die Kraft, welche die freie Masse M in t Sekunden durch den Weg s treibt, so ist nach den Lehren der Mechanik

$$s = g \frac{V}{M} t^2, \text{ und daraus } V = \frac{sM}{gt^2}.$$

*) Bei einer gleichförmig beschleunigten Bewegung verhalten sich die Zeiten, in welchen zwei auf einander folgende gleiche Stücke der Bahn durchlaufen werden, nahe wie 100 : 42, was freilich von dem oben angenommenen Verhältniß 2 : 1 nicht unbeträchtlich verschieden ist.

In dem vorliegenden Falle besteht die Masse M aus der Belastung Q des Schlittens, aus dem bewegenden Gewichte = P und aus dem halben Gewicht der Rolle, welche 14 Pfd. wiegt, so daß also $M = P + Q + 7$ Pfd. ist. Außerdem ist die Beschleunigung der Schwere für Paris = 15,1038 pieds du Roi, und weil bei den Versuchen stets $s = 4$ Fuß war, so ist $\frac{s}{g} = 0,265$;

$$\text{demnach } V = 0,265 \cdot \frac{P + Q + 7}{t^2}.$$

Ist hiernach V gefunden, so ergibt sich die Reibung des Schlittens oder $F = P - V$, und dann endlich $\mu = \frac{F}{Q}$, wonach die verschiedenen Werthe des Reibungscoefficienten berechnet sind.

Tafel VII. Versuche über die Reibung der Bewegung ohne Schmiere.

14. Verf.-Reihe. Eichenholz auf Eichenholz. Reibungsfläche = 3 □Fuß; Holzfasern gleichlaufend.					16. Verf.-Reihe. Eichenholz auf Eichenholz. Reibungsfläche linear; Holzfasern gleichlaufend.				
Lau- fend. Nr.	Q	F	μ	Bemerkungen.	Lau- fend. Nr.	Q	F	μ	Bemerkungen.
	Pfund.	Pfund.				Pfund.	Pfund.		
1a	74	12	0,162	Der Schlitten bewegte sich nach erhaltenem Anstoße langsam und unsicher. Die Bewegung ist als gleichförmig angenommen. Mit Ausschluß des Verf. Nr. 1a.	7a	47	4½	0,096	Unter Voraussetzung einer gleichförmigen Bewegung berechnet. Geschwindigkeit ½ bis ¾ Fuß in d. Sec.
2a	874	94	0,108		8a	447	36	0,081	
3a	2474	250	0,101		9a	847	60	0,071	
Mittel = 0,105					Mittel = 0,083				
1b	74	13,3	0,180	Unter einer Zugkraft P = 14 Pfd. wurde der Weg von 4' in 6 Sec. beschleunigt durchlaufen. Desgl. unter P = 105 Pfd. in 4½ Sec. Desgl. unter P = 270 Pfd. in 6½ Sec. Mit Ausschluß des Verf. Nr. 1b.	7b	47	3,94	0,084	Unter P = 6½ Pfd. wurden 4' Länge in 2½ Sec. beschleunigt durchlaufen. Desgl. unter P = 41 Pfd. in 5½ Sec. Desgl. unter P = 68 Pfd. in 5 Sec.
2b	874	92,1	0,105		8b	447	36,66	0,082	
3b	2474	252,8	0,102		9b	847	58,25	0,070	
Mittel = 0,104					Mittel = 0,080				
15. Verf.-Reihe. Eichenholz auf Eichenholz. Reibungsfläche = ½ □Fuß. Holzf. gleichlauf.					17. Verf.-Reihe. Eichenholz auf Eichenholz. Reibungsfläche = 36 □Zoll; Holzf. sich kreuzend.				
4a	47	5	0,106	Die Bewegung als gleichförmig angenommen; die Geschw. bis 1 Fuß in d. Sec.	10	47	4,57	0,097	Unter P = 5 Pfd., 4' Länge in 6 Sec. beschl. Unter P = 15 Pfd., 4' Länge in 7 Sec. beschl. Unter P = 51 Pfd., 4' Länge in 5 Sec. beschl. Unter P = 97 Pfd., 4' Länge in 5 Sec. beschl.
5a	447	47½	0,107		11	147	14,09	0,096	
6a	1647	166	0,101		12	447	45,65	0,102	
Mittel = 0,103					Mittel = 0,100				
4b	47	4,83	0,103	Unter P = 9 Pfd. wurden 4' Länge in 2 Sec. beschleunigt durchlaufen. Desgl. unter P = 54 Pfd. in 4½ Sec. Desgl. unter P = 172 Pfd. in 6½ Sec.	13	847	86,92	0,103	
5b	447	47,35	0,106		14	47	4,68	0,100	Unter P = 5 Pfd., 4' Länge in 7 Sec. beschl. Unter P = 58 Pfd., 4' Länge in 3½ Sec. beschl. Unter P = 172 Pfd., 4' Länge in 6½ Sec. beschl.
6b	1647	160,6	0,098		15	447	46,92	0,105	
Mittel = 0,102					16	1647	160,55	0,101	
					Mittel = 0,102				
18. Verf.-Reihe. Eichenholz auf Eichenholz. Reibungsfläche linear; Holzf. sich kreuzend.									

Lau- fend Nr.	19. Verf.-Reihe. Eichenholz auf Kiefernholz.			Bemerkungen.
	Q	F	μ	
	Verührungsfläche = 48 □ Zoll; Holzfasern gleichlaufend.			
17	47	7½	0,160	Die bewegenden Gewichte F wurden so abgepaßt, daß der Schlitten sich jedesmal gleichförmig bewegte.
18	447	72	0,161	
19	847	130	0,153	
	Mittel = 0,158			
	20. Verf.-Reihe. Kiefern auf Kiefernholz.			
	Die hierher gehörigen Versuche theilt Coulomb nicht speciell mit, sondern bemerkt nur, daß er die Reibung constant = $\frac{1}{2}$ des Drucks gefunden habe. Daher $\mu = 0,167$.			
	21. Verf.-Reihe. Ulmenholz auf Ulmenholz.			
	Wie vorhin ohne nähere Angabe des Details. Die Reibung soll $\frac{1}{10}$ des Drucks betragen. $\mu = 0,1$.			
	22. Verf.-Reihe. Eisen auf Eichenholz.			
	Reibungsfläche = 45 □ Zoll; Bewegung durchweg gleichförmig und parallel mit den Holzfasern.			
20	53	4½	0,085	Geschw. = 1 Fß. in 264 Sek.
		6½	0,123	" = 1 " " 3 "
		9	0,170	" = 1 " " $\frac{1}{2}$ "
21	453	35	0,077	" = 1 " " 132 "
		44	0,097	" = 1 " " 12 "
		53	0,117	" = 1 " " 6½ "
		65	0,144	" = 1 " " 2½ "
		78	0,172	" = 1 " " 1 "
22	853	67	0,079	Beweg. langsam u. unsicher.
		80	0,094	Geschw. = 1 Fß. in 40 Sek.
		105	0,123	" = 1 " " 10 "
		130	0,152	" = 1 " " 2½ "
		155	0,182	" = 1 " " 1 "
23	1653	125	0,076	Beweg. langsam u. unsicher.
		135	0,082	Geschw. = 1 Fß. in 1320 Sek.
		160	0,097	" = 1 " " 74 "
		185	0,112	" = 1 " " 22 "
		210	0,127	" = 1 " " 9 "
		235	0,142	" = 1 " " 2½ "
		260	0,157	" = 1 " " 1 "
	Mittel = 0,079			Für sehr langsame Beweg. für 1 Fuß Geschw. in der Sekunde.
	do. = 0,170			

Lau- fend Nr.	23. Verf.-Reihe. Eisen auf Eichenholz.			Bemerkungen.
	Q	F	μ	
	Reibungsfl. linear. Bewegung durchweg gleichförmig, die Holzfasern rechtwinklig kreuzend.			
24	1653	115	0,070	Geschw. = 1 Fß. in 476 Sek.
		135	0,082	" = 1 " " 220 "
		160	0,097	" = 1 " " 130 "
		185	0,112	" = 1 " " 48 "
		210	0,127	" = 1 " " 15 "
		235	0,142	" = 1 " " 6½ "
		260	0,157	" = 1 " " 2½ "
	24. Verf.-Reihe. Kupfer auf Eichenholz.			
	Reibungsfläche = 45 □ Zoll. Bewegung gleichförmig und parallel mit den Holzfasern.			
25	50	2½	0,050	Geschw. = 1 Fß. in 288 Sek.
		3½	0,070	" = 1 " " 88 "
		4	0,090	" = 1 " " 28 "
		6	0,130	" = 1 " " 2½ "
		9	0,190	" = 1 " " $\frac{1}{3}$ "
26	450	23	0,051	Geschw. = 1 Fß. in 1440 Sek.
		28	0,062	" = 1 " " 360 "
		33	0,073	" = 1 " " 200 "
		43	0,096	" = 1 " " 40 "
		53	0,118	" = 1 " " 8 "
		65	0,144	" = 1 " " 1½ "
		78	0,151	" = 1 " " $\frac{1}{2}$ "
27	850	42	0,050	Beweg. langsam u. unsicher.
		67	0,079	Geschw. = 1 Fß. in 180 Sek.
		80	0,094	" = 1 " " 64 "
		105	0,124	" = 1 " " 12 "
		130	0,153	" = 1 " " 3 "
		155	0,182	" = 1 " " $\frac{1}{2}$ "
	Mittel = 0,050			Für sehr langsame Beweg. für das Maxim. der Geschw.
	do. = 0,174			
	25. Verf.-Reihe. Eisen auf Eisen.			
	Verührungsfläche = 45 □ Zoll.			
28	53	15	0,283	Bewegung gleichförmig.
29	453	125	0,275	Die Versuche konnten nicht weiter fortgesetzt werden, indem das Eisen anfang sich zu streifen und abzunutzen.
	Mittel = 0,297			
	26. Verf.-Reihe. Kupfer auf Eisen.			
	Verührungsfläche = 45 □ Zoll.			
30	52	12½	0,240	Bewegung gleichförmig.
31	452	110	0,243	Bei der letzten Belastung von 452 Pfd. sängen die Metalle an sich zu streifen.
	Mittel = 0,242			

Durch eine Vergleichung der für Eichen auf Eichenholz gefundenen Resultate, welche in obiger Tabelle (14te und 15te Verf.-Reihe) unter Voraussetzung einer gleichförmigen sowohl als

ungleichförmigen Bewegung berechnet sind, gelangt Coulomb zu dem Schluß, daß die Reibung von der Geschwindigkeit unabhängig sei. Denn die für beide Voraussetzungen gefundenen Mittelwerthe von μ weichen so wenig von einander ab, daß man sie als ganz übereinstimmend ansehen kann, ungeachtet das eine Mal die Bewegung nur sehr langsam war, während dagegen das andere Mal ein Raum von 4 Fuß Länge durchschnittlich in 4 bis 5 Sekunden durchlaufen wurde.

Bei der 14ten Vers. Reihe zeigt sich eine progressive Abnahme der Reibungscoefficienten mit der Zunahme der Belastung, welche Coulomb wieder der Adhäsion zuschreibt. Und in der That, wenn man diese Versuche einer ähnlichen Berechnung unterwirft, wie sie auf S. 41 für die 13te Vers. Reihe Beispiels halber durchgeführt worden, so findet man die Größe der Adhäsion auf 3 Quadratsfuß für die Versuche 1a bis 3a gleich $4\frac{1}{2}$ Pfd., für die Versuche 1b bis 3b aber gleich $5\frac{1}{2}$ Pfd., im Mittel also = 5 Pfd., oder auf den Quadratsfuß = $1\frac{1}{2}$ Pfd. Nach Abzug dieses Nebenhindernisses ergibt sich dann der Reibungscoefficient aus allen sechs Versuchen fast ganz übereinstimmend gleich $\frac{1}{10}$ des Drucks. Der Einfluß dieses, von der Reibung verschiedenen Widerstandes wird aber nur bei so geringen Belastungen, wie sie in den beiden Versuchen Nr. 1a und 1b Statt gefunden, bemerklich, wohingegen er unter so großen Belastungen, wie bei den übrigen Versuchen der 14ten Versuchsreihe, oder, was auf dasselbe hinaus kommt, bei verhältnißmäßig so kleinen Flächen, wie in der 15ten Versuchsreihe, ganz unberücksichtigt bleiben kann. Nach Ausschluß der beiden ersten Versuche Nr. 1a und 1b stimmen die Mittelwerthe der 14ten und 15ten Versuchsreihe fast genau überein, und Coulomb schließt daher, daß man in allen Fällen der Anwendung, wo Eichenholz einen Druck von mindestens 2 bis 4 oder 5 Centner auf den Quadratsfuß erleidet, das Verhältniß der Reibung zum Druck = $1 : 9\frac{1}{2}$, also den Reibungscoefficienten $\mu = 0,105$ annehmen könne. Diese Bemerkungen beziehen sich auf den Fall, wo die Holzfasern mit der Richtung der Bewegung parallel sind. Durchkreuzen sie sich gegenseitig rechtwinklig, wie in der 17ten und 18ten Versuchsreihe, so ist von jenem Nebenhinderniß nichts mehr zu bemerken, indem die Reibungscoefficienten sehr nahe übereinstimmen. Im Mittel kann $\mu = \frac{1}{10}$ angenommen werden, was von den Ergebnissen der vorhergehenden Versuche so wenig abweicht, daß Coulomb die Reibung des Eichenholzes, sowohl bei parallel laufenden als bei sich kreuzenden Holzfasern, als gleich annimmt.

Um aus den Versuchen über die Reibung zwischen Metallen und Hölzern (22ste, 23ste und 24ste Versuchsreihe), die unter sehr verschiedenen Pressungen und bei nicht minder verschiedenen Geschwindigkeiten angestellt wurden, die nöthigen Folgerungen ziehen zu können, stellt Coulomb diejenigen Versuche, bei welchen die Geschwindigkeiten möglichst gleich waren, auf folgende Weise zusammen.

Für Eisen auf Eichenholz waren die Versuche mit unmerklichen Geschwindigkeiten folgende:

Vers. Nr. 20.	Q = 53 Pfd.;	F = $4\frac{1}{2}$ Pfd.;	$\mu = 0,085.$
„ „ 21.	Q = 453 „	F = 35 „	$\mu = 0,077.$
„ „ 22.	Q = 853 „	F = 67 „	$\mu = 0,079.$
„ „ 23.	Q = 1653 „	F = 125 „	$\mu = 0,076.$
			<u>Mittel = 0,079.</u>

Hieraus schließt Coulomb, daß die Reibung des Eisens auf Eichenholz für sehr geringe

Grade der Geschwindigkeit der Belastung proportional ist, und gleich $\frac{1}{15}$ der letzteren anzunehmen sei. Die Versuche für dieselben Substanzen bei dem Maximum der Statt gehaltenen Geschwindigkeiten, welche fast überall einen pariser Fuß in der Sekunde betragen haben, geben folgende Ergebnisse:

Vers. Nr. 20. $Q = 53$ Pfd.; $F = 9$ Pfd.; $\mu = 0,170$.

„ „ 21. $Q = 453$ „ $F = 78$ „ $\mu = 0,172$.

„ „ 22. $Q = 853$ „ $F = 155$ „ $\mu = 0,182$.

„ „ 23. $Q = 1653$ „ $F = 260$ „ $\mu = 0,157$.

Mittel $\mu = 0,170$.

Aus der genügenden Uebereinstimmung dieser Resultate unter sich schließt Coulomb, daß überhaupt für einerlei Geschwindigkeiten, diese mögen groß oder klein sein, das Verhältniß der Reibung zum Druck jedesmal als constant anzusehen sei, jedoch verschieden nach dem Grade der Geschwindigkeit. Beträgt letztere 1 Fuß in der Sekunde, so soll $\mu = \frac{1}{5}$ als wahrscheinlichster Werth des Reibungscoefficienten gelten, der also in diesem Falle ohngefähr doppelt so groß ist, als für den Fall einer unmerklichen Geschwindigkeit.

Aus einer Vergleichung der durch die Versuche Nr. 23 und 24 gefundenen Resultate glaubt Coulomb folgern zu dürfen, daß weder die Größe der Berührungsfläche, noch die Richtung der Bewegung in Bezug auf die Lage der Holzfasern den geringsten Einfluß auf die Reibung habe, indem beide Versuche für dieselbe Belastung von 1653 Pfd. nur wenig verschiedene Zahlenergebnisse liefern, ungeachtet die Berührungsfläche in dem einen Falle 45 Quadrat Zoll, in dem andern hingegen so gut als Null war.

Ferner macht Coulomb darauf aufmerksam, daß in der Zunahme der Reibung mit der Geschwindigkeit eine bestimmte Gesetzmäßigkeit zu herrschen scheine, die sich namentlich in den sieben einzelnen Beobachtungen des Versuchs Nr. 23 dahin ausdrückt, daß die Reibungsgrößen nach einer arithmetischen Progression wachsen, wenn die Geschwindigkeiten nach einer geometrischen zunehmen. Denn wenn man die Werthe von F nach der Reihe von einander subtrahirt, so findet man 25 als constante Differenz; dividirt man dagegen die auf einander folgenden Geschwindigkeiten mit einander, so ist der Quotient beinahe = 3, manchmal etwas mehr, manchmal weniger. Indessen läßt sich Coulomb nicht darauf ein, jenes Gesetz näher zu begründen, weil es, wie er sagt, doch nur für die ersten Paar Stunden der Bewegung gelten würde, bei einer länger anhaltenden Bewegung aber die Reibung nicht mehr nach einem so großen Verhältniß mit der Geschwindigkeit wüchse; ja bei sehr kleinen Berührungsflächen die Geschwindigkeit sogar ganz aufhörte, auf die Reibung zu influiren.

Für die Reibung von Kupfer auf Eichenholz (24ste Versuchsreihe) ist der Reibungscoefficient, wenn eine sehr langsame Bewegung Statt findet, $\mu = 0,05 = \frac{1}{20}$; für das Maximum der Geschwindigkeit, welche bei den Versuchen durchschnittlich $1\frac{1}{2}$ Fuß in der Sekunde betragen hat, ergiebt sich dagegen als Mittelwerth $\mu = 0,174$.

Wirkung der Schmieren. In dieser Beziehung bemerkt Coulomb, daß nach seinen Erfahrungen Talg und Theer die einzigen Schmieren sind, welche bei den Hölzern zur Verminderung der Reibung dienen können, während Del nur bei Metallen eine vortheilhafte Anwen-

bung finde. Da die Schmieren weiche Substanzen sind, so vermindern sie die Reibung nur, indem sie die kleinen Vertiefungen der Berührungsflächen ausfüllen, und diese Flächen gleichsam in einer gewissen Entfernung von einander halten. Daher kommt es, daß bei großen Pressungen die weichsten Schmieren immer die schlechtesten sind, und daß, wenn die Berührungsfläche des bewegten Körpers auf eine abgerundete Kante reducirt wird, die Schmieren sehr wenig zur Reibung beitragen. Bei den nachfolgenden Versuchen machte Coulomb die Erfahrung, daß der Talg sich dem Ineinandergreifen der vortretenden Theile nur sehr unvollkommen widersetze, sobald der belastete Schlitten mit einer großen Berührungsfläche über diese Schmiere hin- und herbewegt wurde, so daß bei verschiedenen Versuchen, die ohne Erneuerung der Talgschmiere wiederholt wurden, sich eine beträchtliche Vergrößerung der Reibung ergab. — Sowohl bei Anwendung des Talges als auch des Theers als Schmiermittel zeigten sich anfänglich große Unregelmäßigkeiten in der Reibung, welche desto merklicher hervortraten, je größer die Berührungsflächen und je kleiner die Pressungen waren. Nachdem man aber den Schlitten mehrere Tage hintereinander unter großen Belastungen über die mit Talg oder Theer geschmierte Unterlage hatte gleiten lassen, zeigte sich die Reibung fast immer dem Drucke proportional und ziemlich unabhängig von der Geschwindigkeit, wie dies aus den folgenden Versuchen näher hervorgeht.

Tafel VIII. Versuche über die Reibung der Bewegung mit Schmieren.

Lau- fen- de Nr.	27. Vers.-Reihe. Eichen auf Eichenholz. Reibungsfläche = 1½ □Fuß. Nach jeder Operation immer aufs neue mit frischem Talg geschmiert.			
	Q Pfund.	F Pfund.	μ	Bemerkungen.
1	3250	118	0,036	Nach ertheiltem Anstöße erfolgte eine langsame und unsichere Bewegung.
2	1650	64	0,039	Desgleichen.
3	850	36	0,042	Desgleichen.
4	450	21	0,047	Beweg. gleichförmig mit 1' Geschw. in 10 Sek.
5	250	13½	0,054	Desgl. Geschw. = 1' in 60 Sekunden.
6	50	6½	0,130	Desgl. Geschw. = 1' in 7½ Sekunden.
Mittel = 0,044			Mit Ausschluß von Nr. 6.	
Lau- fen- de Nr.	28. Vers.-Reihe. Eichen auf Eichenholz. Reibungsfläche = 1½ □Fuß. Nach jeder Operation aufs neue mit Theer geschmiert.			
	Q Pfund.	F Pfund.	μ	Bemerkungen.
7	50	13	0,260	Beweg. gleichf. 1' in 450 Sek.
		16	0,320	Desgleichen 1' in 4 "
		22	0,440	Desgleichen 1' " 1½ "
8	250	20	0,080	Sehr langsame Bewegung.
		26	0,104	Gleichf.; 1' in 4 Sek.
		32	0,128	" 1' " 1½ "
9	450	34	0,078	" 1' " 4½ "
		40	0,089	" 1' " 1½ "
Lau- fen- de Nr.	29. Vers.-Reihe. Eichen auf Eichenholz. Reibungsfläche linear; mit frischem Talg geschmiert.			
	Q Pfund.	F Pfund.	μ	Bemerkungen.
10	50	3	0,060	Die angegebenen Zugkräfte waren so abgepaßt, daß eine langsame, gleichförm. Bewegung entstand. Gleichf.; 1 Zoll in der Sek.
11	250	15	0,060	
12	450	28	0,062	
13	850	50	0,059	
14	1650	100	0,061	
Mittel = 0,060				
Lau- fen- de Nr.	30. Vers.-Reihe. Eisen auf Eichenholz. Reibungsfläche = 45 □Zoll. Nach jeder Operation mit frischem Talg geschmiert. Bewegung parallel mit den Holzfasern.			
	Q Pfund.	F Pfund.	μ	Bemerkungen.
15	53	3½	0,066	Beweg. 1 Zoll in 255 Sek.
		5½	0,106	" 1 " " 126 "
		10	0,189	" 1 " " 6 "
16	450	12	0,027	" 1 " " 380 "
		18	0,040	" 1 " " 85 "
		23	0,051	" 1 " " 20 "
		33	0,074	" 12 " " 30 "
		53	0,118	" 12 " " 2½ "
17	850	30	0,035	" 1 " " 100 "
		55	0,065	" 1 " " 24 "
		80	0,094	" 12 " " 16 "
		105	0,124	" 12 " " 4 "
		130	0,153	" 12 " " 1½ "

Lau- fen- de Nr.	Fortsetzung der 30. Vers.-Reihe.			Bemerkungen.
	Q Pfund.	F Pfund.	μ	
18	1650	47	0,028	Beweg. 1 Zoll in 240 Sek.
	"	50	0,030	" 1 " " 180 "
	"	85	0,052	" 1 " " 60 "
	"	110	0,067	" 12 " " 30 "
	"	135	0,082	" 12 " " 12 $\frac{1}{2}$ "
	"	160	0,097	" 12 " " 3 "
	"	185	0,112	" 12 " " 1 "
	Mittel = 0,030			für die kleinste Geschw. Mit Ausschluß von Nr. 15.
	" = 0,128			für die größte Geschw. Mit Ausschluß von Nr. 15.
31. Vers.-Reihe. Messing auf Eichenholz. Reibungsfläche = 45 □ Zoll; nach jeder Opera- tion frisch mit Talg geschmiert. Bewegung parallel mit den Holzfasern.				
19	1650	35	0,021	Beweg. 1 Zoll in 103 Sek.
	"	47	0,028	" 1 " " 60 "
	"	60	0,036	" 12 " " 24 "
	"	110	0,067	" 12 " " 1 "
32. Vers.-Reihe. Messing auf Eichenholz. Reibungsfl. nach der Länge des Schlittens linear. Die Unterlage mit frischem Talg geschmiert.				
20	47	2 $\frac{1}{2}$	0,053	Bew. gleichf.; 1 F. in 420 Sek.
	"	4 $\frac{1}{2}$	0,096	" " 1 " 80 "
	"	7 $\frac{1}{2}$	0,160	" " 1 " 2 "
21	447	21	0,047	" " 1 " 2164 "
	"	28	0,063	" " 1 " 280 "
	"	40	0,089	" " 1 " 9 "
	"	53	0,119	" " 1 " 4 "
22	847	55	0,065	" " 1 " 120 "
	"	80	0,094	" " 1 " 13 "
	"	105	0,124	" " 1 " 2 $\frac{1}{2}$ "
23	1647	85	0,052	" " 1 " 1640 "
	"	110	0,067	" " 1 " 420 "
	"	135	0,082	" " 1 " 120 "
	"	160	0,097	" " 1 " 20 "
	"	210	0,128	" " 1 " 5 "
	Mittel = 0,054			für die kleinsten Geschw.
	" = 0,133			" " größten "
33. Vers.-Reihe. Eichenholz auf Eisen. Berührungsfl. nach der Breite des Schlittens linear. a) Nach jeder Operation mit Talg frisch geschmiert.				
24	47	3	0,064	Der Schlitten behält die ihm ursprünglich durch An- stoß mitgetheilte Bewegung unverändert bei.
25	447	24	0,054	
26	1647	70	0,043	
	Mittel = 0,054			

Lau- fen- de Nr.	Fortsetzung der 33. Vers.-Reihe.			Bemerkungen.
	Q Pfund.	F Pfund.	μ	
b) Die Talgschmiere rein abgewischt.				
27	47	3 $\frac{1}{2}$	0,074	Gleichförmige Beweg. des Schlittens mit d. ursprüng- lich ertheilten Geschw.
28	447	30	0,067	
29	1647	115	0,070	
	Mittel = 0,070			
34. Vers.-Reihe. Eisen auf Eisen. Berührungsfl. = 45 □ Zoll. Nach jeder Opera- tion frisch mit Talg geschmiert.				
30	53	8 $\frac{1}{2}$	0,160	Nach erhaltenem Anstoß setzte der Schlitten seine Bewegung stets gleichförmig fort.
31	453	45	0,100	
32	1653	160	0,097	
	Mittel = 0,099			Mit Ausschluß von Nr. 30.
35. Vers.-Reihe. Kupfer auf Eisen. Berührungsfl. = 45 □ Zoll. Nach jeder Opera- tion frisch mit Talg geschmiert.				
33	52	6 $\frac{1}{2}$	0,125	Gleichförmige Bewegung nach Anstoß des Schlit- tens.
34	452	42	0,093	
35	1652	150	0,091	
	Mittel = 0,092			Mit Ausschluß von Nr. 33.
36	52	6 $\frac{1}{2}$	0,125	Ohne die vorher gebrauchte Talgschmiere zu erneuern, wurde bloß Olivenöl dar- über gestrichen.
37	452	56	0,124	
38	1652	210	0,127	
	Mittel = 0,125			
36. Vers.-Reihe. Kupfer auf Eisen. Berührungsfläche auf vier sphärische Nagel- köpfe reducirt.				
39	47	5 $\frac{1}{2}$	0,117	a) Mit bloß fettiger Oberfl. nach Wegnahme des schon gebrauchten Talgs. Bewe- gung gleichförmig.
40	447	51	0,114	
41	847	112	0,132	
	Mittel = 0,121			
42	847	95	0,112	b) Aufs neue m. frisch Talg geschmiert. Beweg. gleichf. c) Neb. d. vorige Talgschm. Olivenöl verbreitet.
43	847	109	0,129	

Bei den ersten sechs Versuchen dieser Tabelle (27te Verf.-N.) bemerkt man eine fortschreitende Zunahme der Reibungscoefficienten, die besonders vom 5ten bis zum 6ten Versuch einen schnellen Sprung thun. Coulomb schreibt diese Anomalie, wie früher, dem Zusammenhang der Talgtheile und der Anziehungskraft zwischen den Berührungsflächen zu, welches Nebenhinderniß er für die bei den Versuchen Statt gehabte Größe der Berührungsfläche von $1\frac{1}{2}$ Quadratfuß zu 5 Pfd. schätzt. Es dürfte nicht überflüssig sein, diesen Punkt einer nähern Untersuchung zu unterwerfen, zu welchem Ende wir jenes Nebenhinderniß als unabhängig vom Druck mit a bezeichnen wollen. Der gesammte Widerstand ist dann von der Form $F = \mu Q + a$, in welcher Gleichung für F und Q die zusammengehörigen Werthe der Tabelle gesetzt werden müssen. Es entstehen dann nach einander folgende Gleichungen:

$$118 = 3250 \cdot \mu + a$$

$$64 = 1650 \cdot \mu + a$$

$$36 = 850 \cdot \mu + a$$

$$21 = 450 \cdot \mu + a$$

$$13,5 = 250 \cdot \mu + a$$

$$6,5 = 50 \cdot \mu + a.$$

Addirt man diese Gleichungen, und dividirt dann mit 6, so entsteht:

$$43,167 = 1083,333 \cdot \mu + a;$$

und wenn man diese Gleichung mit jeder der obigen durch Subtraction verbindet, so findet man folgende Ergebnisse:

$$74,833 = 2166,667 \cdot \mu; \text{ also } \mu = 0,035$$

$$20,833 = 566,667 \cdot \mu; \text{ „ } \mu = 0,037$$

$$7,167 = 233,333 \cdot \mu; \text{ „ } \mu = 0,031$$

$$22,167 = 633,333 \cdot \mu; \text{ „ } \mu = 0,035$$

$$29,667 = 833,333 \cdot \mu; \text{ „ } \mu = 0,036$$

$$36,667 = 1033,333 \cdot \mu; \text{ „ } \mu = 0,035$$

$$\text{Mittelwerth } \mu = 0,035.$$

Setzt man den so gefundenen Mittelwerth statt μ in die vorige summatorische Gleichung, so findet man $a = 5\frac{1}{2}$ Pfd. für eine Berührungsfläche von $1\frac{1}{2}$ Quadratfuß, während Coulomb nach einer ohngefähren Schätzung nur 5 Pfd. angiebt. Für jeden Quadratfuß der Berührungsfläche ergibt sich hiernach die Größe des fraglichen Nebenhindernisses = $4\frac{1}{2}$ Pfd.

Ein Blick auf die verschiedenen Werthe von μ zeigt, daß dieselben von ihrem gemeinschaftlichen Mittelwerthe nur in der dritten Dezimalstelle um ein Geringes abweichen, was in der That eine Uebereinstimmung ist, die auch bei Versuchen feinerer Art, als die vorliegenden, hinreichend befriedigen würde. Eine noch größere Uebereinstimmung zeigen aber die Resultate der 34ten und 35ten Versuchsreihe, wenn man sie einer ähnlichen Berechnung wie vorhin unterwirft. In beiden Versuchsreihen enthielt die Berührungsfläche 45 Quadratzoll, oder $\frac{45}{144} = \frac{5}{16}$ Quadratfuß Inhalt, und wurde nach jeder Operation immer wieder aufs neue mit Talg geschmiert. Es ergibt sich nun für Eisen auf Eisen $a = 2\frac{1}{2}$ Pfd., oder fast 9 Pfd. auf den Quadratfuß, und nach Abzug

Abzug dieses Nebenhindernisses der mittlere Reibungscoefficient $\mu = 0,095$. Für Kupfer auf Eisen findet man eben so $a = 1\frac{1}{2}$ Pfd. oder $= 4\frac{1}{2}$ Pfd. für den Quadratfuß, und demgemäß $\mu = 0,09$. Bedenkt man nun, daß diese Reibungscoefficienten von denjenigen, deren Mittelwerthe sie sind, um nicht mehr als ein bis zwei Tausendtel abweichen, so erscheint jede andere Conjectur eher zulässig, als die Annahme des Herrn Morin, daß bei den Coulombschen Versuchen Irrthümer mit eingelaufen sein müssen. Ich muß mich eines entscheidenden Urtheils in dieser Sache um so mehr enthalten, als es hiezu, wenn man nicht ganz unstatthafte Muthmaßungen Raum geben will, an den nöthigen Daten gänzlich fehlt, und daher beschränke ich mich auf eine einfache Mittheilung der wichtigsten Folgerungen, welche Coulomb als Ergebnisse der in der letzten Tabelle zusammengestellten Versuche hinstellt.

In Bezug auf die 28ste Versuchsreihe, welche mit der größten Sorgfalt ausgeführt wurde, bemerkt Coulomb, daß der Theer die Reibung von Eichenholz auf Eichenholz nicht so gut vermindere als der Talg, so wie auch, daß mit dem Wachsthum der Geschwindigkeit eine Zunahme des Widerstandes statt gefunden, welche von der Belastung unabhängig zu sein scheine. Denn die unter drei sehr verschiedenen Belastungen zur Erzeugung einer Geschwindigkeit von $\frac{1}{4}$ Fuß erforderlich gewesene Zugkraft F mußte jedesmal um 6 Pfd. vergrößert werden, um eine $\frac{1}{2}$ füßige Geschwindigkeit hervorzubringen. Coulomb schätzt dieses Nebenhinderniß für eine Geschwindigkeit von einem Fuß in der Sekunde zu 6 bis 7 Pfd., bemerkt jedoch, daß es in der Praxis unberücksichtigt bleiben könne, sobald die Geschwindigkeiten nicht 4 bis 5 Zoll übersteigen und dabei die Belastungen zwischen 30 und 40 Centner auf den Quadratfuß betragen. In dem Fall, wo die Berührungsfläche linear geworden, wie bei der 29sten Versuchsreihe, hört auch die Geschwindigkeit auf, die Reibung des Eichenholzes irgend wie zu modificiren. Auch hatte es bei diesen Versuchen gar keinen Einfluß, ob die eichene Unterlagsbohle nach jeder Operation aufs Neue wieder mit Talg geschmiert, oder die Talgschmiere ganz abgewischt wurde, was nach Coulomb davon herrührt, daß die Talgschmiere in jedem Berührungspunkt seitwärts herausgedrückt wurde, und daher ohne Einfluß auf die Reibung blieb. — Bei diesen Versuchen waren die eichenen Leisten, welche mit einer abgerundeten Kante die Unterlagsbohle berührten, nach der Länge des Schlittens gegen dessen untere Fläche befestigt; wurden sie aber nach der Quere angebracht, so daß sich also die Holzfasern rechtwinklig kreuzten, so war der Erfolg ganz derselbe. Coulomb führt diese letzteren Versuche nicht besonders an, sondern bemerkt nur, daß er die Reibung eben so wie bei der 29sten Versuchsreihe im Verhältniß zum Druck $= 1 : 16\frac{1}{2}$ gefunden habe. Noch erwähnt Coulomb einiger Versuche mit Eichenholz, wobei die Berührungsfläche zwei Quadratfuß enthielt und bis zu 40 Centner belastet wurde. Hierbei ergab sich die Reibung, wenn die Talgschmiere nach einer zweitägigen Operation abgewischt wurde, gleich $\frac{1}{13}$, und wenn sie nicht abgewischt, aber nach einem zehnmaligen Hin- und Hergange des Schlittens auch nicht erneuert wurde, gleich $\frac{1}{14}$ des Drucks. Dabei soll das Nebenhinderniß der Adhäsion oder die Klebrigkeit der Schmiere über 7 Pfd. betragen haben.

Bei der gleitenden Bewegung der Metalle auf hölzernen Unterlagen, die mit einer fettigen Schmiere überzogen sind, wächst die Reibung, nach Ausweis der 30sten, 31sten und 32sten Versuchsreihe, sehr bedeutend mit der Geschwindigkeit; und zwar glaubt Coulomb hier dieselbe Ge-

sehmäßigkeit wahrzunehmen, welche für die Reibung ohne Schmiere (S. 45) angedeutet wurde, wobei jedoch abermals hervorgehoben wird, daß dieser Einfluß der Geschwindigkeit nur bei den ersten Operationen so merklich war, bei mehrfacher Wiederholung derselben aber viel geringer wurde. Ueberdies bemerkt Coulomb, daß die Schmieren, wenn sie nicht nach jeder Operation erneuert werden, sich mit der Zeit verdicken, ihre Natur ändern, und vermöge der Klebrigkeit allmählig einen immer größer werdenden Widerstand leisten, nach Maßgabe, wie die Operationen weiter fortgesetzt werden. Um diesen Einfluß der späteren Klebrigkeit der Schmiere näher zu studiren, wiederholte Coulomb den Versuch Nr. 19 (31ste Vers.=N.) unter derselben Belastung von 1650 Pfd. in der Art, daß die bei der ersten Operation zwischen die Berührungsflächen gebrachte Talgschmiere bei den folgenden Operationen nicht erneuert wurde. Das bewegende Gewicht F betrug fortwährend 100 Pfd., also dessen Verhältniß zum Druck = 1 : 16½. Der Schlitten durchlief mit gleichförmiger Bewegung einen Raum von 5 Fuß Länge:

bei der 1sten Operation in 4 Sekunden;	bei der 9ten Operation in 10½ Sekunde;
„ „ 2ten „ „ 4 „	„ „ 10ten „ „ 11½ „
„ „ 3ten „ „ 4½ „	„ „ 11ten „ „ 15 „
„ „ 4ten „ „ 5½ „	„ „ 12ten „ „ 34 „
„ „ 5ten „ „ 6 „	„ „ 13ten „ „ 550 „
„ „ 6ten „ „ 7½ „	„ „ 14ten „ „ 900 „
„ „ 7ten „ „ 8½ „	„ „ 15ten „ „ 1140 „
„ „ 8ten „ „ 10 „	„ „ 16ten Op. stockte d. Beweg. alle Augenbl.

Hieraus zieht Coulomb die Folgerung, daß die Talgschmiere, wenn sie nicht immer wieder erneuert wird, eher schädlich als nützlich sei, wogegen sie bei steter Erneuerung die Reibung zwischen Metallen und Hölzern wenigstens bei sehr kleinen Geschwindigkeiten mehr vermindert, als bei allen andern Substanzen, mit welchen er Versuche gemacht hat.

Auf eine weitere Vergleichung der Resultate, welche in der Tabelle unter der 30sten und 31sten Versuchsreihe aufgeführt sind, läßt sich Coulomb nicht ein, sondern giebt nur an, daß man für die ersten Grade der Geschwindigkeit das Verhältniß der Reibung zum Druck

für Eisen auf Eichenholz..... = 1 : 35,1

und für Messing auf Eichenholz = 1 : 47,1

annehmen könne.

Bei den Operationen der 33sten Versuchsreihe waren zwei Schienen aus Eichenholz mit abgerundeten Kanten vorn und hinten nach der Quere unter dem Schlitten befestigt, so daß beim Fortgleiten über die schmiedeeiserne Unterlage die Lage der Holzfasern stets senkrecht auf der Richtung der Bewegung war. Die hiebei gefundenen Resultate weichen besonders darin von den vorhergehenden ab, daß die Geschwindigkeit keinen bemerkbaren Einfluß auf die Reibung zeigte, während bei allen andern Versuchen, die Coulomb über die Reibung der Hölzer und Metalle angestellt hat, stets ein bedeutendes Wachsen der Reibung mit den Geschwindigkeiten beobachtet wurde, welcher Wachsthum nur nach einer großen Anzahl von Versuchen aufhörte. — Den Versuch Nr. 26 hat Coulomb noch weiter fortgesetzt, jedoch ohne Erneuerung der Talgschmiere,

um zu ermitteln, welchen Einfluß hier die spätere Klebrigkeit der Schmiere auf den Widerstand äußerte. Bei der angegebenen Belastung von 1647 Pfd. war eine horizontale Zugkraft = 90 Pfd. erforderlich, um den Schlitten unausgesetzt in gleichförmiger Bewegung zu erhalten, nachdem man denselben etwas angestoßen hatte; und dabei zeigte eine Aenderung der Geschwindigkeit von 1 Zoll bis 1 Fuß in der Sekunde keinen Einfluß auf die Reibung. Eine zwanzigmalige Wiederholung derselben Operation gab immer dasselbe Resultat, so daß also das Verhältniß der Reibung zum Druck unverändert = 1 : 18,3, oder $\mu = 0,0546$ blieb.

Der Einfluß der Adhäsion bei der 34ten und 35ten Versuchsreihe ist bereits erwähnt worden. Die Uebereinstimmung der unter Nr. 36, 37 und 38 aufgeführten Resultate giebt zu erkennen, daß der Ueberzug von Olivenöl jenes Nebenhinderniß annullirt hat. Um sich hievon noch mehr zu überzeugen, hat Coulomb dieselben Versuche noch öfter wiederholt, indem er dabei die Berührungsfläche von 45 Quadrat Zoll auf 12 Quadrat Zoll verkleinerte, und die Belastungen bis zu 2000 Pfd. steigen ließ; allein jedesmal fand sich dieselbe Reibung, so daß also bei einem Delüberzuge die Berührungsfläche ohne allen Einfluß war.

Folgende Bemerkungen fügt Coulomb bei dieser Gelegenheit noch hinzu: Wenn die Berührungsflächen der Metalle sehr groß und mit Talg geschmiert sind, so ändert die Reibung die Beschaffenheit des Talges und wird selbst größer, in dem Maße, als die Operationen ohne Erneuerung der Schmiere weiter fortgesetzt werden; doch ist der Widerstand stets unter $\frac{1}{3}$ der Pressung gefunden worden. Wurde dann über diesen gebrauchten und dadurch veränderten Talg eine dünne Lage Olivenöl gebracht, wie in den drei Versuchen Nr. 36 bis 38, so änderte sich die Reibung während mehrerer Stunden der Operation nicht merklich. Mit Theer geschmiert fand Coulomb die Reibung nie kleiner als $\frac{1}{3}$ der Pressung, und sie nahm zu, wenn diese Schmiere weicher wurde.

Tafel IX. Zusammenstellung der Reibungscoefficienten nach den Coulombschen Versuchen.

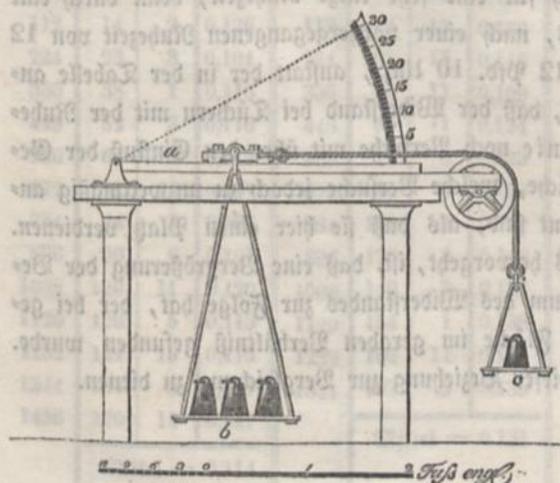
Anmerk. Das Zeichen (=) bedeutet, daß die Holzfasern beim Gleiten parallel waren; (+) daß sie sich rechtwinklig durchkreuzten.

Nr. der Versuchsreihe	Reibende Körper.	Zustand der Berührungsfläche.	Größte Belastung für den □Fuß. Pfund.	Reibungscoefficient. μ	Bemerkungen.
	A.				Die Zahlenwerthe von μ geben jedesmal das Maximum der Reibung, welches erreicht wurde: } nach einer Ruhezeit von 1 Minute.
	Reibung der Ruhe.	a. Trocken.			
1	Eichen- auf Eichenholz.	Holzfasern (=)	825	0,440	
2	desgleichen.	Linear; Holzf. (=)	—	0,418	
3	desgleichen.	desgl. Holzf. (+)	—	0,266	
4	Eichen- auf Kiefernholz.	Holzfasern (=)	2550	0,670	
5	Kiefern- auf Kiefernholz.	desgleichen	2550	0,562	
6	Ulmen- auf Ulmenholz.	desgl.	4950	0,462	" " " " 10 Min.

Nr. der Versuchsreihe.	Reibende Körper.	Zustand der Berührungsfäche.	Größte Belastung für den □Fuß. Pfund.	Reibungscoefficient.	Bemerkungen.
7	Eisen auf Eichenholz.	Holzfasern (=)	5280	0,197	} Nach einer Ruhezeit von 4 Tagen.
	Kupfer auf Eichenholz.	— — —	—	0,182	
8	Eisen auf Eisen.	— — —	1440	0,285	} Die Reibung gelangte augenblicklich zu ihrem Maximum.
9	Messing auf Eisen.	— — —	1440	0,265	
10	desgleichen.	Viersphär. Nagelköpfe b. Geschmiert.	—	0,167	
11	Eichen- auf Eichenholz.	Mit frischem Talg	5080	0,402	Maximum nach 5 bis 6 Tagen.
12	desgleichen.	Mit altem Talg, der schon während 8 Tage gebraucht war	1291	0,243	" " 16 Stunden.
13	Kupfer auf Eisen.	Mit frischem Talg	5280	0,116	" " 4 "
	desgleichen.	Mit Olivenöl	—	0,167	} " fast augenblicklich.
	desgleichen.	Mit Wagenschmiere	—	0,143	
B.					
14	Reib. der Beweg.	a. Trocken.			
15	Eichen- auf Eichenholz.	Holzfasern (=)	6588	0,104	Die Reibung zeigte sich als unabhängig von der Geschwindigkeit.
16	desgleichen.	Linear; Holzf. (=)	—	0,082	Desgleichen.
17	desgleichen.	Holzfasern (+)	2588	0,100	Desgleichen.
18	desgleichen.	Linear; Holzf. (+)	—	0,102	Desgleichen.
19	Eichen- auf Kiefern.	Holzfasern (=)	2541	0,158	Desgleichen.
20	Kiefern- auf Kiefern.	desgleichen	—	0,167	Desgleichen.
21	Ulmen- auf Ulmenholz.	"	—	0,100	Desgleichen.
22	Eisen auf Eichenholz.	"	5296	{0,079 {0,170	für sehr langsame Bewegung. " 1' Geschwindigkeit in der Sek.
23	desgleichen.	Linear; Holzf. (+)	—	{0,070 {0,157	für sehr langsame Bewegung. " 3' Geschwindigkeit in der Sek.
24	Kupfer auf Eichenholz.	Holzfasern (=)	2720	{0,050 {0,174	für sehr langsame Bewegung. " 1/2 bis 1 1/2 Geschw. in der Sek.
25	Eisen auf Eisen.	desgleichen	1456	0,279	Unabhängig von der Geschwindigkeit.
26	Kupfer auf Eisen.	"	1440	0,242	Desgleichen.
		b. Geschmiert.			
27	Eichen- auf Eichenholz.	Mit frischem Talg	2600	0,044	Desgleichen.
28	desgleichen.	Mit Wagenschmiere	360	{0,080 {0,109	für eine sehr langsame Bewegung. " 8 Zoll Geschw. in der Sekunde.
29	desgleichen.	Linear; mit frischem Talg geschmiert	—	0,060	Ohne Unterschied, in Bezug auf die Lage der Holzfasern.
	desgleichen.	Mit alter Talgschm., die während 2 Tage nicht war erneuert worden	2000	0,071	Constant.

Nr. der Versuchsreihe.	Reibende Körper.	Zustand der Berührungsfäche.	Größte Belastung für den □Fuß. Pfund.	Reibungscoefficient. μ	Bemerkungen.
	Eichen auf Eichenholz.	Blos fettige Fläche, nach Wegnahme des Talges	2000	0,077	Constant.
30	Eisen auf Eichenholz.	Mit frischem Talg (=)	5280	{ 0,030 0,128	für sehr langsame Bewegung. " $\frac{1}{2}$ bis 1' Geschw. in der Sek.
31	Messing auf Eichenh.	desgleichen	5280	{ 0,021 0,067	für sehr langsame Bewegung. " 1' Geschwindigkeit. in der Sek.
32	desgleichen.	Linear; mit frisch. Talg	—	{ 0,054 0,133	für sehr kleine Geschwindigkeit. " 3 bis 6 Zoll Geschw. in der Sek.
33	Eichenholz auf Eisen.	Linear (+); mit frischem Talg	—	0,054	} Unabhängig von der Geschwindigkeit.
	desgleichen.	Linear (+); blos fettige Fläche	—	0,070	
34	Eisen auf Eisen.	Mit frischem Talg	5280	0,099	Desgleichen.
	Kupfer auf Eisen.	desgleichen	5280	0,092	"
35	desgleichen.	Den Talg mit Olivenöl bestrichen	5280	0,125	"
	desgleichen.	Mit Wagenschmiere	—	0,111	"
36	desgleichen.	Vier sphär. Nagelköpfe; mit blos fettiger Fläche	—	0,121	"
	desgleichen.	Mit frischem Talg	—	0,112	"
	desgleichen.	Ueber den Talg Olivenöl gestrichen	—	0,129	"

Versuche von George Rennie.



Der Apparat, dessen sich Rennie zu seinen Versuchen über die gleitende Reibung bediente, ist in der beigelegten Skizze abgebildet, und besteht in einem stark gebauten hölzernen Tisch, auf welchem eine bewegliche Platte *a* angeordnet ist, die unter jedem beliebigen Winkel bis zu 30 Graden geneigt werden kann. Ein eingetheilter Gradbogen dient zum Messen derjenigen Neigung, bei welcher die aufgelegten Körper durch die Reibung im Gleichgewicht erhalten werden. Liegt die Platte horizontal, wie in der Figur angegeben, so kann die Reibung auch nach der von Coulomb in Ausübung

gebrachten Methode beobachtet werden, um die Resultate zu kontrolliren. Die Waagschale b dient dann zur Aufnahme von Gewichten, welche die Berührungsflächen durch stärkeren Druck in engere Berührung bringen, während die Schale c die bewegenden Gewichte aufnimmt und deren Wirkung vermittelst der über eine Rolle geleiteten Schnur auf die zu prüfenden Körper fortpflanzt. Die theils auf diese Weise, theils vermittelst der schiefen Ebene gefundenen Resultate sind in nachstehenden Tabellen enthalten.

Tafel I. Versuche über die Reibung von Wollentuch auf Wollentuch mit Flächen von 3 Quadratzoll.

Belastung. Q	Schwarzer, einziger Kasimir. (Black single Kerseymere.)			Superfein blaues Tuch. (Superfine Blue.)			Grober, gewalkter Kasimir. (Drab Milled Kerseymere.)			Grobes Jagdtuch. (Drab Kersey Hunter.)			Starkes, grobes Tuch. (Strong Drab.)		
	F		μ	F		μ	F		μ	F		μ	F		μ
	Pfund.	Unzen.		Pfund.	Unzen.		Pfund.	Unzen.		Pfund.	Unzen.		Pfund.	Unzen.	
1	1	6	—	1	3	—	1	11	—	1	5	—	—	15	0,937
2	2	4	—	2	12	—	2	11	—	1	15	—	1	8	0,750
5	4	2	0,826	5	3	—	5	3	—	3	8	0,700	3	2	0,625
10	6	4	0,625	8	4	0,825	7	13	*0,781	5	4	0,525	4	11	0,469
20	9	13	0,491	12	11	0,634	12	11	0,634	8	11	0,434	7	11	0,384
28	13	2	0,469	15	5	0,547	16	7	0,587	10	—	0,357	9	12	0,348
56	20	11	0,369	22	11	0,405	25	3	0,450	19	3	0,343	17	14	0,319

Bemerkungen des Autors. Bei solchen faserigen Substanzen, wie Wollentuche, nimmt die Reibung bei größeren Belastungen ab, und ist unter übrigens gleichen Umständen bei feinen Tüchern größer, als bei den groben. Im Allgemeinen variiert sie in ihrer Größe von $\frac{1}{3}$ bis zu einem Betrage, der größer als die ganze Belastung ist.

Die obigen Versuche gelten wahrscheinlich für eine sehr kurze Ruhezeit, denn durch eine Wiederholung des mit *) bezeichneten Versuchs, nach einer vorhergegangenen Ruhezeit von 12 Stunden, findet Kennie die Reibung gleich 12 Pfd. 10 Unz., anstatt der in der Tabelle angegebenen 7 Pfd. 13 Unz., und schließt daraus, daß der Widerstand bei Tüchern mit der Ruhezeit sehr stark wachse. — Außerdem theilt Kennie noch Versuche mit über den Einfluß der Geschwindigkeit und der Größe der Berührungsfläche, welche Versuche jedoch zu unzweckmäßig angeordnet und in ihren Resultaten zu unbestimmt sind, als daß sie hier einen Platz verdienen. Das einzige, was mit einiger Sicherheit daraus hervorgeht, ist, daß eine Vergrößerung der Berührungsfläche einen sehr bedeutenden Wachsthum des Widerstandes zur Folge hat, der bei geringen Belastungen sogar mit der Größe der Fläche im geraden Verhältniß gefunden wurde. Besser sind nachstehende Versuche geeignet, in dieser Beziehung zur Vergleichung zu dienen.

Tafel II. Reibung von Wollentuch auf einer schiefen Ebene unter verschiedenen Neigungswinkeln.

Berührungsfläche = 3 Quadratzoll.				Berührungsfläche = 27 Quadratzoll.			
Belastung.	Neigung der schiefen Ebene.	Tangente des Winkels.	Ein Weg von 24 Zoll wurde durchlaufen.	Belastung.	Neigung der schiefen Ebene.	Tangente des Winkels.	Ein Weg von 18 Zoll wurde durchlaufen.
Pfund.	Grade.	μ		Pfund.	Grade.	μ	
10	37,00	0,754	in 55 Sekund.	13½	45,00	1,000	in 32 Sekund.
20	28,20	0,536	" 55 "	20	40,30	0,848	" 42 "
28	26,00	0,488	" 47 "	28	35,45	0,712	" 32 "
56	20,45	0,373	" 44 "	56	26,00	0,488	" 28 "

Hiernach wird die Reibung mit der Zunahme der Belastung geringer, wogegen sie mit der Größe der Berührungsfläche zugleich wächst, wenn gleich nicht in einem proportionalen Verhältnisse.

Tafel III. Versuche über die Reibung verschiedener Hölzer mit 2 Quadratzoll Grundfläche.

Wie früher bedeutet Q die Belastung, F das bewegende Gewicht und $\mu = \frac{F}{Q}$ den Reibungscoefficienten.

Es wurden nur gleichartige Hölzer auf einander versucht.

Nothes Teakholz. (Red Teak.)				Amerik. Eichenholz. (American live Oak.)				Fichtenholz. (Pine.)				Norwegisches Eichenh. (Norway Oak.)			
Q	F	μ		Q	F	μ		Q	F	μ		Q	F	μ	
Pfund.	Pfund.	Unzen.		Pfund.	Pfund.	Unzen.		Pfund.	Pfund.	Unzen.		Pfund.	Pfund.	Unzen.	
56	6	14	0,123	56	7	15	0,142	56	16	3	0,289	784	115	11	0,148
112	14	2	0,126	112	14	13	0,132	112	27	14	0,249	896	124	10	0,139
224	23	3	0,104	224	25	15	0,116	224	68	4	0,305	1008	132	3	0,131
336	38	1	0,113	336	36	11	0,109	336	111	5	0,331	1120	148	11	0,130
448	52	3	0,116	448	55	11	0,124	Mittel = 0,293				Mittel = 0,141			
560	64	2	0,115	560	70	3	0,125	Norwegisches Eichenh. (Norway Oak.)				56	8	3	0,146
672	71	12	0,107	672	86	3	0,128	Rothbuchenholz. (Black Beech.)				112	14	5	0,128
784	84	3	0,107	784	109	7	0,140	56	8	6	0,150	224	26	4	0,131
896	90	8	0,101	896	128	4	0,143	112	15	5	0,137	336	41	3	0,123
1008	120	11	0,120	1008	140	3	0,139	224	28	—	0,125	448	56	7	0,126
1120	126	5	0,113	1120	154	1	0,138	336	45	3	0,134	560	67	3	0,120
1232	141	15	0,115	1232	162	14	0,131	448	69	7	0,155	672	80	4	0,120
1344	154	3	0,115	1344	187	5	0,139	560	83	3	0,149	784	102	—	0,130
1456	170	10	0,117	Mittel = 0,131				672	100	4	0,149	896	164	3	0,183
Mittel = 0,114												Mittel = 0,134			

Q				F				μ			
Pfund.		Ltnzen.		Pfund.		Ltnzen.		Pfund.		Ltnzen.	
Englisches Eichenholz. (English Oak.)				560 83 1 0,148				Hondura's Mahogany. (Honduras Mahogany.)			
56 7 — 0,125				672 105 2 0,156				56 12 7 0,222			
112 15 — 0,134				784 167 3 0,213				112 26 — 0,232			
224 29 3 0,130				Mittel = 0,152				224 39 3 0,175			
336 43 2 0,128				Ulmenholz.				336 59 5 0,174			
448 55 — 0,123				(Elm.)				448 74 7 0,166			
560 70 3 0,125				56 10 — 0,178				560 92 3 0,165			
Mittel = 0,128				112 22 1 0,197				672 107 6 0,159			
Weißbuchenholz. (Hornbeam.)				224 35 5 0,158				784 118 2 0,151			
56 8 10 0,154				336 53 2 0,158				896 136 4 0,152			
112 16 3 0,141				448 72 3 0,163				1008 154 1 0,153			
224 30 5 0,135				560 87 11 0,157				1120 171 — 0,153			
336 46 11 0,139				672 108 4 0,161				1232 182 3 0,148			
448 65 5 0,146				784 145 3 0,185				Mittel = 0,171			
				896 168 11 0,188							
				Mittel = 0,172							
				Roth-Tannenholz. (Yellow Deal.)							
				56 19 7 0,347							
				112 37 9 0,335							
				224 76 3 0,340							
				336 113 — 0,346							
				448 147 13 0,329							
				560 224 — 0,400							
				Mittel = 0,349							
				Weiß-Tannenholz. (White Deal.)							
				56 18 12 0,335							
				112 29 5 0,262							
				224 48 3 0,215							
				Mittel = 0,271							

Tafel IV. Versuche über die Reibung der Hölzer mit 2 Quadratzoll Grundfläche; vermittelst der schiefen Ebene angestellt.

Benennung der Holzarten.	Belastung.	Neigung der schiefen Ebene.		Zeit zum Durchlaufen von 11" Länge.	Tangente des Neigungswinkels.	Benennung der Holzarten.	Belastung.	Neigung der schiefen Ebene.		Zeit zum Durchlaufen von 11" Länge.	Tangente des Neigungswinkels.
		Gr.	Min.					Gr.	Min.		
		Pfund.	Gr.					Min.	Sekund.		
Roths Leatholz.	10	8	—	18	0,141	Rothbuchenholz.	10	8	15	20	0,145
	20	7	45	15	0,136		20	7	20	17	0,129
	28	7	15	20	0,127		28	7	40	19	0,135
	56	7	—	16	0,123		56	6	40	21	0,117
	Mittel	7	30	17	0,132		Mittel	7	29	19	0,131
Amerikanisches Eichenholz.	10	9	—	22	0,158	Norwegisches Eichenholz.	10	8	—	19	0,141
	20	8	—	24	0,141		20	7	30	20	0,132
	28	8	30	20	0,149		28	7	—	20	0,123
	56	7	45	25	0,136		56	6	20	25	0,111
	Mittel	8	19	23	0,146		Mittel	7	13	21	0,127

Benennung

Benennung der Holzarten.	Bela- stung.	Neigung der schie- fen Ebene.		Zeit zum Durch- laufen von 11'' Länge	Tan- gente des Nei- gungs- winkels.	Benennung der Holzarten.	Bela- stung.	Neigung der schie- fen Ebene.		Zeit zum Durch- laufen von 11'' Länge.	Tan- gente des Nei- gungs- winkels.		
		Pfund.	Gr.	Min.	Sekund.			μ	Pfund.	Gr.	Min.	Sekund.	μ
Englisches Eichen- holz.	10	9	30	17	0,167	Hondura's Mahagonyholz.	10	12	—	22	0,213		
	20	8	30	17	0,149		20	12	30	21	0,222		
	28	7	40	18	0,135		28	11	45	21	0,208		
	56	7	30	20	0,132		56	11	20	23	0,200		
	Mittel	8	18	18	0,146		Mittel	11	54	22	0,211		
Ulmenholz.	10	11	40	19	0,206	Roth-Tannenholz.	10	15	—	10	0,268		
	20	10	30	18	0,185		20	17	—	9	0,306		
	28	10	—	19	0,176		Mittel	16	—	9½	0,287		
	56	9	30	19	0,167			Weiß-Tannenholz.	10	18	—	10	0,325
	Mittel	10	25	19	0,184				20	12	30	11	0,222
Weißbuchenholz.	10	10	—	20	0,176	Mittel	15		15	10½	0,273		
	20	9	15	21	0,163		Fichtenholz.		10	16	—	14	0,287
	28	8	30	20	0,149				20	17	—	11	0,306
	56	8	15	19	0,145	Mittel		16	30	12½	0,296		
	Mittel	9	—	20	0,158								

Aus dem Vorhergehenden schließt Rennie, daß eine Vergrößerung der Belastung kaum die Reibung vermehrt. Dies soll nach der Meinung des Autors theilweise davon herrühren, daß die Holzflächen sich unter einem großen Druck verdichten, und so der Abreibung weniger unterliegen, obgleich dieselbe in manchen Fällen bereits angefangen hatte.

Die weichen Hölzer sollen einen größeren Widerstand darbieten, als die harten. Nach Tafel III. giebt Rothtannen die stärkste, rothes Teakholz die geringste Reibung.

Nach Herrn Knowles vom Seeamte betrug das Gewicht des Prinz-Regenten von 120 Kanonen beim Ablassen vom Stapel = 2400 Tons, welches, durch die gleitende Fläche der Laufbalken (= 1036 Quadratfuß) dividirt, einen Druck von 36 Pfund auf den Quadrat Zoll giebt. Dagegen betrug beim Salisbury von 58 Kanonen der Druck auf die Schmierplanke, nach der gleitenden Fläche der Laufbalken berechnet, 44 Pfd. auf den Quadrat Zoll.

Tafel V. Versuche über den Einfluß der Berührungsfläche auf die Reibung der Metalle.

Belastung	Berührungsfläche = 44 □Zoll.			Berührungsfläche = 6 $\frac{3}{4}$ □Zoll.			Belastung	Berührungsfläche = 44 □Zoll.			Berührungsfläche = 6 $\frac{3}{4}$ □Zoll.		
	Widerstand		Coefficient $\frac{F}{Q} = \mu$	Widerstand		Coefficient $\frac{F}{Q} = \mu$		Widerstand		Coefficient $\frac{F}{Q} = \mu$	Widerstand		Coefficient $\frac{F}{Q} = \mu$
	Pfd.	unz.		Pfd.	unz.			Pfd.	unz.		Pfd.	unz.	
Gusseisen auf Gusseisen.							Hartes Messing auf Gusseisen.						
14	2	2	0,152	2	4	0,161	14	1	14	0,134	1	11	0,121
24	3	3	0,133	3	11	0,154	24	3	5	0,138	4	—	0,166
36	4	14	0,135	5	14	0,162	36	4	9	0,127	6	—	0,166
48	6	8	0,135	7	10	0,159	48	6	4	0,130	7	13	0,163
60	8	4	0,138	9	8	0,158	60	7	12	0,128	9	—	0,150
72	10	—	0,139	11	7	0,159	72	9	12	0,135	11	—	0,153
84	11	10	0,138	13	5	0,158	84	11	8	0,137	13	2	0,155
96	13	12	0,143	15	5	0,160	96	13	1	0,136	14	8	0,151
Mittel = 0,139							Mittel = 0,152						
Messing auf Gusseisen.							Zinn auf Gusseisen.						
14	1	15	0,138	2	1	0,147	14	2	8	0,179	2	12	0,196
24	3	7	0,143	3	8	0,146	24	4	7	0,185	4	8	0,188
36	5	6	0,147	5	1	0,141	36	6	—	0,167	6	7	0,179
48	7	3	0,140	6	10	0,138	48	8	7	0,176	8	14	0,185
60	9	3	0,153	9	3	0,153	60	9	13	0,164	9	13	0,164
72	11	5	0,157	10	5	0,143	72	12	5	0,171	11	13	0,164
84	13	5	0,158	13	12	0,164	84	14	5	0,170	14	5	0,170
96	15	13	0,165	15	1	0,157	96	16	4	0,169	16	4	0,169
Mittel = 0,150							Mittel = 0,177						

Herr Rennie bemerkt zu diesen Versuchen, daß die Reibung zwischen Messing und Gusseisen von der Größe der Berührungsfläche ganz unabhängig ist, denn sie blieb für beide versuchte Flächen, deren Inhalte sich wie 1 : 6 $\frac{3}{4}$ verhalten, von einerlei Größe. Beim Zinn, welches als ein weiches Metall der Abnutzung leichter unterworfen ist, nahm der Widerstand zu, sobald die Belastung über 8 Pfd. für den Quadratzoll stieg; zeigte jedoch für die kleine und große Berührungsfläche keine auffallende Verschiedenheit. — Im Allgemeinen hält indes Herr Rennie die Reibung bei einer großen Berührungsfläche für geringer, als bei einer kleinen.

Tafel VI. Versuche über die Reibung verschiedener Metalle mit zunehmender Belastung bis zur Anfangsgrenze gegenseitiger Abnutzung.

Belastung Q Pfund.	Messing auf Schmiedeeisen.			Messing auf Messing.			Gusseisen auf Schmiedeeisen.			Weicher Stahl auf weich. Stahl.			Zinn auf Schmiedeeisen.		
	Reibung F		$\frac{F}{Q} = \mu$	Reibung F		$\frac{F}{Q} = \mu$	Reibung F		$\frac{F}{Q} = \mu$	Reibung F		$\frac{F}{Q} = \mu$	Reibung F		$\frac{F}{Q} = \mu$
	psd.	lms.		psd.	lms.		psd.	lms.		psd.	lms.		psd.	lms.	
14	2	2	0,152	2	10	0,188	2	4	0,161	2	—	0,143	2	10	0,188
24	3	11	0,153	3	8	0,146	4	2	0,172	3	7	0,143	4	6	0,182
36	4	14	0,135	6	5	0,175	6	2	0,170	5	4	0,146	6	8	0,181
48	6	6	0,133	8	4	0,172	7	12	0,161	6	13	0,142	7	14	0,164
60	8	—	0,133	10	3	0,168	9	8	0,158	8	11	0,147	9	13	0,164
72	9	6	0,130	12	—	0,166	11	5	0,157	10	5	0,143	11	13	0,164
84	10	10	0,126	14	—	0,166	13	13	0,164	12	2	0,144	13	15	0,166
96	12	9	0,133	16	—	0,166	17	—	0,177	13	12	0,143	15	13	0,165
192	27	—	0,141	44	8	* 0,232	33	8	0,175	31	8	0,164	32	8	0,169
	Mittel = 0,137			Mittel = 0,168			Mittel = 0,166			Mittel = 0,146			Mittel = 0,171		
	Weicher Stahl auf Schmiedeeisen.			Messing auf Stahl.			Gusseisen auf weichem Stahl.			Schmiedeeisen auf Schmiedeeisen.			Zinn auf Zinn.		
14	2	8	0,179	2	1	0,147	2	2	0,152	2	1	0,147	3	10	0,259
24	4	8	0,188	3	8	0,146	3	10	0,151	3	13	0,159	7	8	0,312
36	6	13	0,189	5	—	0,139	5	7	0,151	5	12	0,156	9	8	0,236
48	9	5	0,194	7	11	0,160	7	2	0,148	7	2	0,148	12	13	0,267
60	12	6	0,206	9	11	0,161	9	8	0,158	9	8	0,158	17	7	0,291
72	14	13	0,206	11	5	0,157	11	9	0,161	11	6	0,158	22	2	0,307
84	17	5	0,206	13	—	0,155	13	9	0,161	12	15	0,154	28	8	0,339
96	19	4	0,200	15	—	0,156	15	5	0,160	14	3	0,148	36	—	* 0,375
192	32	8	0,169	28	—	0,146	32	—	0,166	27	—	0,141	66	8	* 0,346
	Mittel = 0,193			Mittel = 0,152			Mittel = 0,156			Mittel = 0,152			Mittel = 0,287		
	Gusseisen auf Gusseisen.			Gusseisen auf hartem Messing.			Messing auf Gusseisen.			Zinn auf Gusseisen.			Anmerkung.		
14	2	4	0,161	1	11	0,121	2	1	0,147	2	12	0,196	<p>Bei den oberen zehn Versuchen erhielt die Verührungsfl. 5,9 □Zoll, bei den nebenstehenden vier Versuchen aber 6¼ □Zoll Inhalt. Die mit * bezeichneten Versuche sind bei der Berechnung der Mittelwerthe ausgeschlossen worden.</p>		
24	3	—	0,125	4	—	0,167	3	8	0,146	4	8	0,188			
36	5	14	0,163	6	—	0,167	5	1	0,141	6	7	0,179			
48	7	10	0,159	7	13	0,163	6	10	0,138	8	14	0,185			
60	9	8	0,158	9	—	0,150	9	3	0,153	9	13	0,164			
72	11	7	0,159	11	—	0,153	10	5	0,143	11	13	0,164			
84	13	5	0,158	13	2	0,156	13	12	0,164	14	5	0,170			
96	15	5	0,160	14	8	0,151	15	1	0,157	16	4	0,169			
	Mittel = 0,155			Mittel = 0,153			Mittel = 0,148			Mittel = 0,177					

Tafel VII. Versuche über den mit der Belastung zunehmenden Widerstand, wenn beim Gleiten der Metalle übereinander Abnutzung statt findet.
Berührungsfläche = 6 Quadratzoll.

Belastung		Messing auf Gußeisen.			Schmiedeeisen auf Gußeisen.			Stahl auf Gußeisen.			Schmiedeeisen auf Schmiedeeisen.		
auf 6 □ Zoll.	auf 1 □ Zoll.	Widerstand.		μ	Widerstand.		μ	Widerstand.		μ	Widerstand.		μ
Cwt.	Cwt.	Cwt.	lbs.		Cwt.	lbs.		Cwt.	lbs.		Cwt.	lbs.	
10	1½	2	28	0,225	2	84	0,275	3	—	0,300	2	56	0,250
12	2	2	70	0,219	3	56	0,275	4	—	0,333	3	28	0,271
14	2½	3	—	0,214	4	56	0,321	4	84	0,339	4	—	0,286
16	2¾	3	42	0,211	5	28	0,327	5	56	0,344	4	84	0,297
18	3	3	98	0,215	6	—	0,333	6	28	0,347	5	70	0,313
20	3½	4	14	0,206	7	—	0,350	7	—	0,350	7	—	0,313
22	3¾	4	56	0,214	7	84	0,352	7	84	0,352	8	28	0,375
24	4	5	—	0,208	8	84	0,365	8	56	0,354	9	—	0,375
26	4½	5	84	0,221	9	56	0,366	9	28	0,356	10	28	0,394
28	4¾	6	28	0,223	10	28	0,366	10	—	0,357	11	28	0,402
30	5	7	—	0,233	11	—	0,367	10	84	0,358	12	28	0,408
32	5½	7	56	0,234	11	84	0,367	11	56	0,359			
34	5¾	8	—	0,235	12	56	0,368	12	56	0,368			
36	6	8	42	0,232	13	56	0,375	14	56	0,403			
38	6½	8	98	0,234	16	56	0,434						
40	6¾	9	42	0,234									
42	7	9	84	0,232									
44	7½	12	—	0,273									

Aus den in Tafel VI. und VII. zusammengestellten Versuchen folgert Rennie:

- 1) daß die Reibung nach der Härte der Metalle variiert, und zwar geben die härteren Metalle eine geringere Reibung als die weicheren;
- 2) daß ohne Schmiere und innerhalb der Grenze von 32½ Pfd. Druck auf den Quadratzoll die Reibung der harten Metalle auf einander ziemlich allgemein zu ½ des Drucks geschätzt werden könne;
- 3) daß die Reibung der Metalle innerhalb der Grenze ihrer Abnutzung beinahe gleich groß ist*);
- 4) daß für Belastungen von 1½ engl. Centner bis aufwärts zu 6 Centnern auf den Quadratzoll die Reibung verhältnißmäßig sehr beträchtlich wächst, indem sie am größten ist bei Stahl auf Gußeisen, am kleinsten dagegen bei Messing auf Gußeisen**).

*) Dieser Schluß soll wohl nicht allgemein gelten, sondern wahrscheinlich nur für die sogenannten harten Metalle. Welche Metalle aber zu dieser letzteren Kategorie gerechnet werden, läßt der Autor unbestimmt.

**) Im Original steht Schmiedeeisen (wrought-iron). Nach Tafel VII. findet aber der kleinste Widerstand bei Messing auf Gußeisen (cast-iron) statt, während Messing auf Schmiedeeisen unter den Versuchen gar nicht vorkommt, so daß es hiernach zweifelhaft bleibt, welches Eisen denn nun eigentlich gemeint

Bei einem Versuch mit gehärtetem Stahle fand Abnutzung statt, wenn die Belastung 10 Tonnen auf den Quadratzoll betrug. Ueberhaupt soll gehärteter Stahl der Abnutzung am besten widerstehen, und daher mehr als irgend eine andere Substanz geeignet sein, bei sehr feinen Instrumenten die Reibung zu vermindern. Zum Beleg dieser Behauptung bezieht sich der Autor auf Versuche, die in der königlichen Münze, so wie in der Münze der englischen Bank mit Probirs und anderen Waagen angestellt sind, ohne jedoch etwas Näheres über diese Versuche mitzutheilen.

Versuche über die Reibung des Eises. Ein Eisblock, 18 Zoll lang, 2 Zoll dick und möglichst frei von allen Luftblasen, wurde sorgfältig so zugerichtet, daß er eine glatte und ebene Seitenfläche darbot, und demnächst auf den Apparat befestigt. Hierauf wurde ein Stück desselben Eisblockes, nur von geringeren Abmessungen, ebenfalls genau zugerichtet, und wie bei den vorigen Versuchen die Anordnung getroffen, daß dieses zweite Eisstück mittelst einer daran befestigten feinen seidnen Schnur mit seiner glatten Grundfläche über die Oberfläche des ersteren fortgleiten konnte. Hiernach wurden zwei Schlittschuhe mit Stahlläufen, jeder $4\frac{1}{2}$ Zoll lang, $\frac{3}{16}$ Zoll breit, auf dieselbe Weise über die Oberfläche des Eisblockes fortgezogen. — Diese Versuche wurden bei einer Temperatur von 28 Gr. Fahrenh. oder von $1\frac{1}{2}$ Gr. Reaum. unter Null angestellt.

Tafel VIII. Versuche über die Reibung von Eis auf Eis und Stahl auf Eis.

Eis auf Eis.						Stahl auf Eis.							
Berührungsfläche = 16 Quadratzoll.						Berührungsfläche = 1,69 Quadratzoll.							
Ganze Belastung Q	Belastung auf den □Zoll.	Für eine augenblickliche Ruhezeit.		Nach einer Ruhezeit von 16 Stunden.		Ganze Belastung Q	Belastung auf den □Zoll.	Für eine augenblickliche Ruhezeit (?)		Ganze Belastung Q	Belastung auf den □Zoll.	Für eine augenblickliche Ruhezeit (?)	
		Reibung F	$\frac{F}{Q} = \mu$	Reibung F	$\frac{F}{Q} = \mu$			Reibung F	$\frac{F}{Q} = \mu$			Reibung F	$\frac{F}{Q} = \mu$
Pfund.	Pfund.	Pfund.	Unzen.	Pfund.	Unzen.	Pfund.	Pfund.	Pfund.	Unzen.	Pfund.	Pfund.	Pfund.	Unzen.
1½	0,09	—	3	0,125	—	3	0,125	1½	0,9	—	1	0,042	
4	0,25	—	5	0,078	—	6	0,094	4	2,4	—	3	0,046	
16	1,00	—	10	0,039	—	15	0,059	16	9,5	—	7	0,027	
36	2,25	1	—	0,028	1	9	0,043	36	18,0	—	15	0,026	
64	4,00	1	6	0,021	3	2	0,049	64	38,0	1	2	0,017	
81	5,06	1	13	0,022	4	—	0,049	81	44,0	1	10	0,020	
144	9,00	2	9	0,018	6	5	0,044	144	85,3	2	1	0,014	

Hiernach wird die Reibung des Eises mit der Zunahme der Belastung beträchtlich geringer, ohne jedoch in dieser Beziehung eine bestimmte Gesetzmäßigkeit wahrnehmen zu lassen.

Versuche über die Reibung des Leders. Zwölf Scheiben Leder (Hide Leather) wurden parallel auf einander in eine hölzerne Kapsel gepackt, deren eine Seite beweglich war, um

sei. Solche tadelnswürthe Ungenauigkeiten benehmen den Versuchen des Herrn Kennie einen großen Theil ihres Werthes, indem sie unwillkürlich auch Mißtrauen gegen seine numerischen Angaben erwecken; und in der That habe ich mehrfache Gelegenheit gefunden, in letzterer Beziehung Correctionen anzubringen.

einer größeren oder geringeren Anzahl Lederscheiben angepasst werden zu können. Um die Lederscheiben fest zusammen zu pressen und an einer ihrer gleichliegenden Kanten eine ebene Reibungsfläche hervorzubringen, war durch die ganze Packung ein eiserner Bolzen gesteckt und eine Mutter gegengeschraubt. Das Vergrößern oder Verkleinern der Reibungsfläche geschah dadurch, daß entweder noch mehr Lederscheiben in die Kapsel gebracht, oder aber einige derselben herausgenommen wurden, wonach man die Mutter wieder fest anzog.

Tafel IX. Versuche über die Reibung des Leders (Hide Leather) auf Gußeisen.

Beschaffenheit des Leders.	Belastung Q Pfund.	Für den Zustand der Bewegung.						Für eine Ruhezeit von 5 Minuten.					
		Reibungsfläche = 9 □ Zoll.			Reibungsfläche = 4½ □ Zoll.			Reibungsfläche = 9 □ Zoll.			Reibungsfläche = 4½ □ Zoll.		
		F Pfund.	Unz.	$\frac{F}{Q} = \mu$	F Pfund.	Unz.	$\frac{F}{Q} = \mu$	F Pfund.	Unz.	$\frac{F}{Q} = \mu$	F Pfund.	Unz.	$\frac{F}{Q} = \mu$
In Wasser aufgeweicht.	36	7	—	0,193	6	8	0,181	29	—	0,806	21	—	0,586
	64	28	—	0,437	21	—	0,328	42	—	0,656	38	—	0,594
			Mittel	0,315		Mittel	0,255		Mittel	0,731		Mittel	0,590
Das Leder trocken über die Gußeisenplatte bewegt, mit einer Geschwindigkeit von 1 Zoll in der Sekunde.		9 □ Zoll.			6½ □ Zoll.			4½ □ Zoll.			2½ □ Zoll.		
	6	1	8	0,250	1	4	0,208	1	2	0,188	1	1	0,177
	7	1	12	0,250	1	8	0,214	1	5	0,188	1	3	0,170
	8	2	—	0,250	1	12	0,219	1	9	0,195	1	8	0,187
	36	8	12	0,236	7	4	0,201	7	3	0,200	7	1	0,198
	49	12	—	0,249	11	—	0,224	9	5	0,190	9	1	0,185
	64	16	—	0,250	14	—	0,219	13	10	0,213	13	2	0,205
		Mittel	0,249		Mittel	0,214		Mittel	0,196		Mittel	0,187	

Herr Kennie bemerkt zu diesen Versuchen, daß die Reibung des vorher im Wasser erweichten Leders mit der Ruhezeit bedeutend zu wachsen schein, wodurch sich der enorme Widerstand erkläre, der bei den Pumpenkolben zu überwinden ist, wenn diese zum erstenmal in Bewegung gesetzt werden sollen.

Bei den letzten sechs Versuchsreihen war das Leder ganz trocken, und es fand jedesmal eine Bewegung statt, wobei eine Länge von 18 Zoll in eben so viel Sekunden durchlaufen wurde. Der Widerstand variierte von $\frac{1}{4}$ bis beinahe $\frac{1}{2}$ des Drucks, und nahm unter übrigens gleichen Umständen mit der Größe der reibenden Fläche ab.

Die allgemeinen Folgerungen aus vorstehenden Versuchen, welche der Autor am Schlusse seiner Abhandlung zusammenstellt, sind bereits in dem historischen Vorbericht von mir mitgeteilt worden, weshalb ich mich darauf beschränke, in nachstehender Tabelle eine Uebersicht der numerischen Ergebnisse in Bezug auf den Reibungscoefficienten zu geben.

Tafel X. Zusammenstellung der nach den Versuchen Rennie's berechneten Reibungs-Coefficienten.

Nr.	Reibende Körper.	Maximum der Belastung auf den □ Zoll. Pfd. engl.	Reibungs- Coefficient "	Bemerkungen.
1	Feines Wollentuch auf Wollentuch	10	0,500	Alle hier aufgeführten Versuche von Nr. 1 bis 27 wurden nur für den Zustand der Ruhe ange- stellt. Die Berührungsf lächen waren möglichst glatt gemacht, jedoch nicht geschmiert.
2	Grobes " " "	10	0,350	
3	Rothes Teakholz auf rothem Teakholze..	728	0,114	
4	Amerikanische Eiche auf amerik. Eiche...	728	0,131	
5	Norwegische Eiche auf norw. Eiche	448	0,134	
6	Englische Eiche auf englischer Eiche	280	0,128	
7	Ulmen- auf Ulmenholz	448	0,172	
8	Honduras Mahagony auf Hond. Mahagony	616	0,171	
9	Rothbuchen auf Rothbuchen	560	0,141	
10	Weißbuchen auf Weißbuchen	392	0,152	
11	Rothtannen auf Rothtannen	280	0,349	
12	Weißtannen auf Weißtannen	112	0,271	
13	Fichten- auf Fichtenholz	168	0,293	
14	Messing auf Schmiedeeisen	32 bis 33	0,137	
15	Weicher Stahl auf Schmiedeeisen	desgl.	0,193	
16	Gusseisen auf Schmiedeeisen	"	0,166	
17	Schmiedeeisen auf Schmiedeeisen	"	0,152	
18	Zinn auf Schmiedeeisen	"	0,171	
19	Gusseisen auf Gusseisen	14½	0,155	
20	Messing auf Gusseisen	"	0,148	
21	Zinn auf Gusseisen	"	0,177	
22	Messing auf Stahl	32 — 33	0,152	
23	Gusseisen auf weichem Stahle	"	0,156	
24	Weicher Stahl auf weichem Stahle	"	0,146	
25	Messing auf Messing	16 — 17	0,168	
26	Gusseisen auf hartem Messing	14½	0,153	
27	Zinn auf Zinn	"	0,287	
28	Eis auf Eis	2½	0,028	Für den Zustand der Bewegung.
		9	0,018	
		9½	0,027	
29	Stahl auf Eis	80	0,014	
		7	0,315	
30	In Wasser erweichtes Leder auf Gusseisen	14	0,255	
		7	0,249	
31	Trocknes Leder auf Gusseisen	14	0,196	

Ueber die Reibung der Steine scheint Rennie keine eigenen Versuche gemacht zu haben, obgleich er es im Eingange seiner Abhandlung versprach. Er theilt nur folgende, beim Bau der neuen Londonbrücke gemachte Beobachtungen über das Gleiten der Granitsteine mit. Die Gewölbsteine jener Brücke sind nämlich aus Granit mit gut geebneten und zugerichteten Lagerflächen bearbeitet, und fügen im Allgemeinen bei einem Neigungswinkel von 33 bis 34° zu gleiten an, wenn sie trocken, ohne Mörtel auf einander lagerten. Wurde aber frischer, fein gemahlener Mörtel zwischen die Berührungsflächen gebracht, so begann das Abgleiten schon bei einem Winkel von 25 bis 26°. — Nach Beobachtungen bei andern Brückenbogen aus Sandstein, von der Sorte, wie der Bramley=Fall und Whitby=Sandstein, dessen Lagerflächen auf die gewöhnliche Weise geebnet und zugerichtet waren, füng das Abgleiten an: ohne Mörtel bei einem Winkel von 35 bis 36°, und mit Mörtel versetzt bei 30 bis 34°. Die hieraus resultirenden Reibungscoefficienten findet man mit mehreren andern Versuchen, welche in verschiedenen Schriften zerstreut angetroffen werden, in nachstehender Tabelle für den practischen Gebrauch zusammengestellt.

Zusammenstellung der Reibungscoefficienten nach verschiedenen andern Versuchen.

Nr.	Reibende Körper.	Autorität.	Reibungscoefficient		Bemerkungen.
			für den Ruhestand.	für die Bewegung.	
1	Sandstein auf Sandstein; roh bearbeitet	Perronet *)	0,824	—	Der Reibungswinkel variierte von 39 bis 40 Graden; Mittel = 39½°.
2	Sehr fester Kalkstein (Pierre de Chateau Landon); Berührungsfläche gespitzt	Boisard **)	0,804	—	Die Berührungsfläche betrug 3 □Fuß und die Belastung darauf 167½ bis 754½ Pfund.
3	Derselbe Stein mit scharirter Fläche	desgl.	0,761	—	
4	Sandstein, mit gut zugerichteter Lagerfläche	Rondelet ***)	0,625	—	Der Reibungswinkel variierte von 28 bis 36°, und ist im Mittel zu 32° angenommen.
5	Sehr feinkörniger Kalkstein (Pierre de liais), gut bearbeitet u. geschliffen.	desgl.	0,577	—	Reibungswinkel = 30°; die Größe der Berührungsfl. ohne Einfluß.

*) Oeuvres de Perronet etc. Paris 1788. p. 606.

***) Recueil d'Expériences et d'Observations, faites sur differens travaux exécutés pour la construction du Pont de Némours. Paris 1822. p. 132.

***) Traité théorique et pratique de l'Art de Bâtir. Paris 1830. T. IV. p. 223 etc.

Nr.	Reibende Körper.	Autorität.	Reibungscoefficient		Bemerkungen.
			für den Ruhestand.	für die Bewegung.	
6	Sandstein (Bramley-Fall and Whiteby), die Lagerfläche auf gewöhnliche Weise zugerichtet; ohne Mörtel.....	G. Rennie	0,714	—	Reibungswinkel im Mittel = $35\frac{1}{2}^\circ$. " " " = $34\frac{1}{2}^\circ$. " " " = $34\frac{1}{2}^\circ$. " " " = $25\frac{1}{2}^\circ$.
7	Derselbe Stein mit frischem Mörtel.....	desgl.	0,662	—	
8	Granit, mit wohl geebener und gut zugerichteter Lagerfl.; ohne Mörtel.....	"	0,662	—	
9	Derselbe Stein mit frischem Mörtel.....	"	0,477	—	
10	Bruchstein; ein viereckiger Quader von 1080 Pfd. Gewicht erforderte zur Bewegung auf der rauh gemeißelten Fläche des Steinbruchs 758 Pfd.	Rondelet	—	0,702	Diese vier Angaben sind entlehnt aus dem Werke von Babbage, <i>On the Economy of machinery</i> . Third Edition. London 1833. p. 7. S. 13 der deutschen Uebersetzung.
11	Desgleichen zur Bewegung über eine Brettfläche 652 Pfd.	"	—	0,604	
12	Desgl. auf einer hölzernen Schleife über eine Brettfläche 606 Pfd.	"	—	0,561	
13	Desgl. die berührenden Holzflächen mit Seife geschmiert 182 Pfd.	"	—	0,170	
14	Eine hölzerne Kiste über Steinpflaster fortgezogen.....	Régnier	—	0,580	
15	Leder auf polirtem Marmor; trocken, das Leder noch ungebraucht.....	Poncelet *)	0,40	0,25	Für einen Druck unter 17 Pfd. auf den □ Zoll ist die Reibung geringer.
16	Desgl.; das Leder durch den Gebrauch polirt.....	desgl.	0,25	0,18	
17	Desgl.; das Leder leicht geölt oder fettig	"	0,32	0,20	Für 13 bis 39 Pfd. Druck auf den □ Zoll.
18	Leder auf unpolirtem Gußeisen, trocken.....	"	0,25	0,20	
19	Desgl., geölt.....	"	0,21	0,18	Die Reibung nimmt mit der Geschwindigkeit etwas zu; die Angaben gelten für eine sehr langsame Bewegung und für eine Geschw. von 3' in der Sekunde.
20	Leder auf polirtem Gußeisen, trocken.....	"	0,20	$\left. \begin{array}{l} 0,20 \\ 0,22 \end{array} \right\}$	

*) Cours de Mécanique industrielle, professé de 1828 à 1829 par Mr. Poncelet etc., 2ème Partie. Leçons rédigées par Mr. Gosselin. p. 100 — 102. Wer die unter Nr. 15 — 31 aufgeführten Versuche angestellt hat, ist in dem lithographirten Hest nicht angegeben.

Nr.	Reibende Körper.	Autorität.	Reibungscoefficient		Bemerkungen.
			für den Ruhef.	für die Beweg.	
21	Desgl., geölt.....	Poncelet	—	0,16	
22	Desgl., die Berührungsfläche mit Graphit und Del abgerieben.....	"	—	0,12	
23	Leder auf Eichenholz, nicht polirt, trocken, parallel mit den Holzfasern...	"	0,33	0,20	} Die Reibung variiert mit der Geschwindigkeit.
24	Desgl., das Leder gebraucht und polirt	"	0,30	0,18	
25	Desgl., das Leder leicht mit Wasser genezt	"	0,85	0,65	
26	Desgl., vollständig durchnäst.....	"	0,75	0,50	
27	Desgl., leicht geölt oder fettig.....	"	0,38	0,28	
28	Desgl., stark geölt.....	"	0,33	0,22	
29	Eichenholz auf polirtem Marmer, trocken.....	"	0,33	0,18	
30	Desgl., leicht geölt oder fettig.....	"	—	0,12	
31	Gedrehte Hanfseile auf Holz, oder einer anderen beliebigen Fläche.....	"	—	0,33	Ueberhaupt erzeugt der Hanf unter denselben Umständen, wie oben das Leder, auch dieselbe Reibung.

Versuche von Morin,

angestellt zu Metz in den Jahren 1831, 32 und 33.

Beschreibung des Apparates. Diese Versuche wurden in dem Lokale der alten Gießerei zu Metz, welche der Artillerie-Director, Oberst Evain, dazu hergegeben hatte, angestellt. Der dabei in Anwendung gebrachte Apparat, dessen specielle Beschreibung nachstehend erfolgt, ist auf Tafel I., Fig. 1, 2, 3 und 4, in seiner ganzen Zusammensetzung dargestellt, während Tafel II., Fig. 5 bis 10, die Details der einzelnen Theile nach größerem Maßstabe enthält.

In der Nähe zweier großen Flammen-Defen ist die Halle mit Steinplatten hinreichend genau horizontal gepflastert, welches einen festen, unwandelbaren Grund für das Auflager der horizontalen Bank darbietet, auf der man die zu untersuchenden Körper fortgleiten ließ. Diese Bank, deren Richtung senkrecht auf einer der Seiten der Grube*) und parallel mit der Gussrinne der Defen ist, besteht nach Fig. 1 bis 4, Tafel I., aus zwei langen Unterlagsbalken AA aus Eichenholz von 0,3 Meter (= 1 Fuß Pr.) ins Gevierte, in paralleler Lage von Mittel zu Mittel 0,8 Metr. (= 2½ Fuß) von einander entfernt. Sie sind 7,9 Metr. (= 25 Fuß) lang, von welcher Länge ungefähr 1,6 Metr. (= 5 Fuß) jenseits des Randes der Grube überstehen. Die genannten Balken ruhen auf sieben eichenen Querschwellen, die in Entfernungen von 0,75 Metr. (= 2' 4¾") auf dem ebenen Fußboden gestreckt und mit ersteren verlämmt

*) Wahrscheinlich eine Gießgrube, worin ehemals die Formen eingesetzt wurden.

sind, so daß diese, selbst unter den größten Belastungen, keine merkliche Biegung erleiden können. Die vorderen Enden der Unterlagsbalken AA, welche über den Rand der Grube vorstehen, sind durch Ueberschneidung und Verbolzung mit vier lothrechten Pfosten BB aus Kiefernholz verbunden, die bis auf den Grund der Grube, 5,3 Metr. (= 16' 10 $\frac{1}{2}$ "') unterhalb des gepflasterten Fußbodens, hinabreichen und hier mit den unteren Enden in einem Schwellwerk aus Eichenholz verzapft sind. Oberhalb, wo diese Pfosten sich um etwa 1,8 Metr. (= 5 $\frac{1}{2}$ Fuß) über den Fußboden verlängern, sind dieselben ebenfalls durch überschrittene und angebolzte Querhölzer tüchtig verbunden, so daß das Ganze ein Zimmerwerk von großer Festigkeit darbietet.

Auf den oberen horizontalen Flächen der Balken AA sind die Schienen CC befestigt, worauf man die zu untersuchenden Körper unmittelbar fortgleiten ließ; sie können nach Belieben weggenommen und durch andere ersetzt werden. Bei den Versuchen von 1831 bestanden sie aus zwei Stücken Eichenholz von beiläufig 0,11 Metr. (= 4 $\frac{1}{2}$ Zoll) Breite und 0,07 Metr. (= $\frac{1}{2}$ Zoll) Dicke, die genau parallel mit einander und durch eine Libelle mit Luftblase so sorgfältig als möglich in die Wage gebracht, auf den Unterlagsbalken festgeschraubt waren.

Der zum Gleiten bestimmte Schlitten D (Fig. 1 und 2) besteht zunächst aus einem rostrförmig verbundenen Rahmenwerk, unter welchem Keisten oder Schienen derjenigen Substanzen, deren Reibung man untersuchen will, vermittelst Holzschrauben befestigt sind. Auf der Oberfläche dieses Rahmenwerks steht ein viereckiger Kasten aus Eichenholz, behufs der Aufnahme von vier- und zwanzigpfündigen Kanonenkugeln, deren Gewichte einzeln genau ausgemittelt und auf ihrer Oberfläche angeschrieben waren.

Zwischen den vier vertikalen Pfosten BB war ein Boden FF von Eichenholz in einer angemessenen Höhe eingesetzt und durch vier Knaggen unterstützt. In der Mitte desselben ist eine Oeffnung angebracht, und zwei gußeiserne Lagergerüste GG, welche zu beiden Seiten dieser Oeffnung aufgestellt sind, enthalten die Lager zur Aufnahme der eisernen Axe einer, aus Eichenholz gefertigten Rolle H. Ueber diese Rolle läuft ein Seil I, mit dem einen Ende an dem Schlitten D befestigt, und am andern den absteigenden Kasten K (Fig. 2) tragend, worin die bewegenden Gewichte enthalten sind. Ist der Kasten K hinreichend belastet, so setzt er den Schlitten D mit seiner Last in Bewegung, und wenn er beim Hinabsinken auf dem Grunde der Grube angekommen ist, fällt er auf eine dicke Lage von Hobelspänen, die seinen Stoß auffängt und vernichtet. Nachdem dies geschehen, bewegt sich der Schlitten D nur noch in Folge der erlangten Geschwindigkeit, und um zu verhindern, daß er nicht gegen die Pfosten BB stoße, sind an den Obertheilen derselben zwei gebogene Ruthen LL von Eichenholz befestigt, die dem Schlitten einen elastischen Widerstand, wie Federn, entgegensetzen. Auch kann man die Länge des Seils I so abpassen, daß die Bewegung des Schlittens schon vernichtet ist, noch ehe er jene federnden Ruthen erreicht, so daß selbst bei großen Belastungen und Geschwindigkeiten keine Erschütterungen entstehen können, die der Festigkeit der Verbindung nachtheilig wären.

Da die erforderliche Kraft, um zwei seit langer Zeit mit einander in Berührung gewesene Körper zu befreien, beträchtlich größer ist, als diejenige, die zur Erhaltung einer schon stattha-

benden Bewegung hinreicht, so hat man folgende Einrichtung getroffen, um auf einmal die Verhältnisse in beiden Beziehungen zu beobachten.

Auf den absteigenden Kasten K wurden zwei kleine Kästen MM (Fig. 2) gesetzt, deren Länge so groß war, daß sie beim Herabsinken auf den, an den Pfosten seitwärts befestigten, Niegelhölzern NN stehen blieben, während der Kasten K zwischendurch gehen konnte. — Dieser Anordnung bediente sich Morin nur bei den ersten Versuchen über die Reibung von Eichen- auf Eichenholz; später verließ er sie, weil sie manche Unbequemlichkeit verursachte, und wandte statt dessen folgende Methode an:

Unter dem Schlitten befestigte man an dessen Rückseite eine Holzknagge a (Fig. 2), in der Richtung der Mittellinie der Bank, und auf diese Knagge wurde ein eiserner Absatz b festgeschraubt, der hinterwärts von einer vertikalen, auf der Richtung der Bewegung senkrechten Fläche begrenzt war. Ein Querholz g, zwischen den Balken AA in der Nähe ihrer hinteren Enden fest eingeklemmt, trägt zwei eiserne Zapfenlager, in welchen die Are des rechtwinklig gebogenen Hebels dec ruht. Der vertikale Schenkel ce, welcher oberhalb durch einen Bogen der Evolvente eines Kreises von 0,1 Metr. (= $3\frac{1}{2}$ Zoll) Radius begrenzt ist, drückt gegen den Absatz b, während der andere horizontale Schenkel zwei aus c beschriebene Kreisbögen trägt, an deren einem oder anderem ein kleiner, mit Gewichten beschwerter Kasten f mittelst Gurte aufgehängt ist. Auf diese Weise konnte man nun mit geringer Belastung des kleinen Kastens f einen großen Druck gegen den Schlitten hervorbringen, der überdies in Folge der obern Abrundung des Schenkels ce während der ganzen Dauer der Wirkung constant blieb. Beim Niedersinken legte sich der längere Arm jenes Winkelhebels auf ein zu diesem Zweck eingesetztes Querholz F, und indem man vor Anfang der Bewegung seinen Abstand von diesem Querholze gemessen hatte, konnte man auch leicht den Theil der Bewegung des Schlittens berechnen, während dessen der Hebel eingewirkt hatte.

Später hat man auch diese Vorrichtung wieder aufgegeben, da sich im Verlauf der Versuche ergab, daß eine einfache Erschütterung des Schlittens hinreichte, den Zustand der Ruhe aufzuheben.

Vorrichtung zur Erhaltung des Schlittens in gerader Richtung. Ungeachtet aller angewandten Sorgfalt, das Seil, welches den Schlitten über die Bank fortzog, stets in der Richtung ihrer Mittellinie wirken zu lassen, war es doch nicht ganz zu vermeiden, daß zuweilen Abweichungen nach einer Seite zu entstanden, wodurch die Größe der Berührungsfläche geändert, und noch andere Unregelmäßigkeiten herbeigeführt wurden. Dies zu beseitigen, befestigte man hinten am Schlitten eine lange, sehr leichte Latte EE (Fig. 1 und 2) von Tannenholz, 0,06 Metr. (= $2\frac{1}{2}$ Zoll) breit, 0,018 Metr. (= $\frac{2}{3}$ Zoll) dick, von welcher der laufende Meter 0,596 Kilogramme wog. Die Richtung dieser Latte, und somit auch der Lauf des Schlittens, wurde bestimmt durch zwei in der Verlängerung der Mittellinie der Bank hinter derselben aufgestellte Stützböcke, jede drei Rollen enthaltend, von denen eine unter der Latte vertikal, die beiden andern aber zur Seite derselben horizontal angebracht waren. Diese Rollen hatten einen Durchmesser von 0,05 Metr. (= 1,91 Zoll), und kleine eiserne Aren von

0,003 Metr. (= $1\frac{1}{4}$ Linie) Durchmesser, so daß die von ihnen erzeugte Reibung auf den Widerstand, den der Schlitten selbst erlitt, keinen merkbaren Einfluß äußern konnte. Neben dem Vortheil, den Lauf des Schlittens immer in derselben Richtung zu erhalten, gewährte die Anbringung der erwähnten Latte auch noch einen andern; indem nämlich dadurch das Gewicht des Seiles compensirt, und so die Belastung des Schlittens sehr nahe constant gemacht wurde; denn das angewandte Seil I bestand aus einem halbplattten Geflechte von sechszehn Strähnen oder Litzen, wovon der laufende Meter 0,3 Kilogramme wog; und die Hälfte vom Gewicht des horizontal gespannten Endes zwischen der Rolle H und dem Schlitten muß offenbar zur Belastung des letztern addirt werden. Dasselbe ist der Fall mit dem halben Gewicht der Latte, für diejenige Länge derselben, welche jedesmal zwischen dem Hintertheil des Schlittens und dem ersten Stützbocke enthalten ist. Da nun bei dem Fortgange des Schlittens die Seillänge sich um ebensoviel vermindert, als die Latte sich verlängert, so wird das mittlere Gewicht beider, welches jedesmal mit 1,165 Kilogr. zur Belastung des Schlittens addirt werden muß, sehr nahe constant bleiben.

Obgleich diese Anordnung den beabsichtigten Zweck bei allen im Jahr 1831 angestellten Versuchen vollkommen erfüllte, so fand Herr Morin sich doch veranlaßt, sie später aufzugeben und durch eine andere zu ersetzen. Bei den im folgenden Jahre anzustellenden Versuchen kamen nämlich fettige Schmieren in Anwendung, und weil dadurch die Reibung so sehr bedeutend vermindert wird, so entstand die Befürchtung, daß ungeachtet jener Latte der Schlitten dennoch seitwärts von den Bahnschienen herablaufen und so die Sicherheit der Apparate gefährden würde. Unfälle der Art zu vermeiden, wurde nun folgende Anordnung getroffen: Zwei Paar Frictionsrollen aus Gußeisen wurden an der unteren Fläche des Schlittens, das eine Paar am vorderen, das andere am hinteren Ende desselben so angebracht, daß auf beiden Seiten zwischen den Rollen und den Unterlagsbalken AA ein Spielraum von etwa $2\frac{1}{4}$ Linien blieb. Um die Seitenreibung dieser Rollen bei einem etwanigen schrägen Laufe des Schlittens so viel als möglich zu vermindern, sind auf beiden Unterlagsbalken neben den Bahnschienen CC hölzerne Leisten befestigt, und die inneren Seitenflächen derselben, welche von den Frictionsrollen berührt werden können, mit eisernen Schienen verkleidet. Durch besondere Versuche überzeugte sich Herr Morin, daß die fragliche Seitenreibung der Rollen an den eisernen Schienen für den nachtheiligsten Fall höchstens 0,006 der ganzen Reibung des Schlittens betragen konnte, welche Größe er um so mehr glaubte vernachlässigen zu dürfen, als die Resultate der verschiedenen Versuche wegen der Veränderlichkeit in dem Zustande der Fettigkeit der Berührungsflächen manchmal um $\frac{1}{10}$ von ihrem gemeinschaftlichen Mittelwerthe abwichen.

Um den absteigenden Kasten mit den bewegenden Gewichten wieder herauf und den Schlitten zugleich wieder zurück zu ziehen, war hinter der Bank eine Erdwinde mit einem Flaschenzuge aufgestellt, vermittelst welcher zwei Menschen sehr leicht eine Wirkung von 6 bis 800 Kilogrammen auf den Schlitten ausüben konnten, um ihn wieder nach dem Anfange der Bank zurück zu ziehen.

Messen der Spannungen des Seiles. Dies sind die allgemeinen Anordnungen des zu den Versuchen angewendeten Apparates. Es bleibt noch übrig, diejenigen Hülfsmittel zu be-

schreiben, welche in Anwendung gekommen sind, um sowohl die Größe der vermitteltst des Seils auf den Schlitten ausgeübten Wirkung, als auch den von letzterem durchlaufenen Weg im Verhältnis zu der Zeit und das Gesetz dieser Bewegung zu bestimmen. Das zu diesem Ende angewandte sinnreiche Verfahren rührt von Poncelet her, der schon zur Ausmittlung des Zuges bei Fuhrwerken, der bewegenden Kraft bei Maschinen und zu vielen andern Versuchen davon Gebrauch gemacht hat.

Es genügt nämlich nicht, zwischen dem Seil und dem Schlitten ein Federdynamometer einzusetzen, dessen bekannte Flexibilität die Größe der beständigen oder veränderlichen Spannung anzeigte, vielmehr erforderte die Schwierigkeit der Messung dieser Beugungen während der Bewegung, daß man ihre verschiedenen Aenderungen in einem stetigen Zuge erhielt. Dies wird nun durch folgende Vorrichtung erreicht, welche auf Tafel II. Fig. 5 im Grundriß, und Fig. 6 im Durchschnitt dargestellt ist. Das erwähnte Dynamometer besteht aus zwei, mit den Enden zusammengebolzten Stahlblättern *kk*, *ll*, deren eines mit dem Zugseile *I*, das andere aber vermitteltst des eisernen Zwischenstückes *m* und des am Schlitten befestigten gabelförmigen Vordergestelles *n* mit dem Schlitten verbunden ist. Das andere Blatt *kk* des Dynamometers trägt eine hohle Röhre, worin sich ein vertikaler mit chinesischer Tusche gefüllter Zeichenstift *o* befindet, der auf einer mit Papier überzogenen kreisrunden Scheibe *pp* eine Curve beschreibt, deren Radii vectores die Biegungen des Dynamometers anzeigen. Die Scheibe *pp* besteht aus Kupfer, ist genau geebnet, und wird zu jedem neuen Versuch immer aufs Neue mit Papier überzogen. Sie ist beweglich um eine vertikal stehende eiserne Axe, die, an beiden Enden mit sehr kleinen conischen Zapfen versehen, oben in einer angemessenen Höhlung des Bolzens, der das Zwischenstück *m* mit dem Vordergestell *n* verbindet, unten aber in der Höhlung einer Stellschraube *q* läuft. Mit derselben Axe ist unterhalb der Scheibe *pp* noch eine hölzerne Rolle *hh* verbunden, um welche eine feine und sehr biegsame Schnur *i*, Tafel I. Fig. 1 und 2, läuft, die mit dem einen Ende hinten an dem einen Unterlagsbalken befestigt, und am andern Ende, welches über eine auf dem Boden *FF* angebrachte feste Rolle geht, durch ein kleines Gewicht beschwert ist, um den Faden immer in einer mäßigen Spannung zu erhalten.

Begreiflich wird nun die Scheibe *pp*, wenn der Schlitten in Bewegung gesetzt ist, sich gleichzeitig um ihre Axe drehen, und die Geschwindigkeit im Umfang der Scheibe muß nothwendig der des Schlittens gleich sein, so daß also zwischen den vom Schlitten durchlaufenen Räumen und der Winkelbewegung der Scheibe ein constantes Verhältnis statt findet. Zugleich beschreibt der Zeichenstift *o* auf dem Papier, welches auf die Scheibe *pp* geleimt ist, eine circulare oder wellenförmige Linie, deren Radii vectores die Biegungen des Dynamometers anzeigen, und so ist es leicht, das Gesetz aufzufinden, welches die vom Schlitten durchlaufenen Räume mit den verschiedenen Wirkungen auf ihn verbindet. Dieses Gesetz hat Morin durch eine Curve dargestellt, deren Abscissen die durchlaufenen Räume, deren Ordinaten aber die correspondirenden Biegungen des Dynamometers repräsentiren, welcher Curve er den Namen der Spannungscurve beilegt. Die Figur 11, Tafel III., stellt als Beispiel die Curve dar, welche der Zeichenstift *o* bei der Bewegung von Eichenholz auf Eichenholz, ohne Schmiere (Versuch Nr. 2.

der nachfolgenden Tafel L), auf der Scheibe pp beschrieben hat, und Figur 12 ist die danach aufgetragene Spannungscurve.

Durch mehrere directe Versuche überzeugte man sich, daß die Biegungen des Dynamometers den durch das Zugseil darauf ausgeübten Wirkungen proportional, und in dem genauen Verhältniß von 0,00052 Metr. für das Kilogramm sind, von 0 bis 100 Kilogramme. Um endlich sicher zu sein, daß die Blätter des Dynamometers ihre Elasticität ohne Aenderung beibehielten, wurde an dem Zwischenstück w noch eine zweiarmlige Klaue angebracht, die das Dynamometer umfaßte und so verhinderte, daß es keine größere Biegung, als welche einer Wirkung von 95 Kilogrammen entspricht, annehmen konnte. Diese Einrichtung erfüllte den Zweck so gut, daß bei allen Versuchen, ungeachtet der stattgehabten Erschütterungen und heftigen Einwirkungen, das Dynamometer jedesmal auf seinen ursprünglichen Stand zurück ging, wovon man sich am Anfang eines jeden neuen Versuches dadurch überzeugte, daß man den Zeichenstift o, ehe noch das Zugseil eingehakt war, einen der natürlichen Biegung des Dynamometers correspondirenden Kreis beschreiben ließ. Der Radius dieses Kreises wurde fortwährend = 0,1 Metr. gefunden.

Beobachtung des Gesetzes der Bewegung. Um das Gesetz der Bewegung des Schlittens auszumitteln, wendete Morin ein von Poncelet angegebenes Verfahren an, welches in der Combination einer bekannten gleichförmigen Bewegung mit derjenigen, deren Gesetz bestimmt werden soll, besteht. Die Vorrichtung hiezu ist auf Tafel II. Fig. 7 bis 10 in $\frac{1}{2}$ natürlicher Größe dargestellt, und besteht in Folgendem:

Auf der eisernen Axe der Rolle H, worüber das Zugseil läuft, ist eine bröncene Nuss, und gegen deren Seitenfläche eine kupferne Scheibe aa von 0,35 Metr. Durchmesser mittelst der Schraubenmutter b befestigt und genau auf der Axe centrirt. Die beiden Flächen dieser Scheibe sind, wie die von ihr berührte Seitenfläche der Nuss, vollkommen genau abgedreht, so daß ihre Ebenen auf der Axe der Rolle senkrecht stehen. Auf diese Scheibe wird ein Blatt Papier geklebt. Gegenüber der Scheibe aa und parallel mit derselben ist auf dem Boden FF eine Art Uhrwerk vorgerichtet, welches durch eine gespannte Feder bewegt, und durch einen mit Flügeln versehenen Windfang regulirt wird. Dieser Mechanismus, der von einer kupfernen Büchse umschlossen wird, bewegt ein kleines kupfernes Schwungrad cc von 0,07 Metr. Radius, dessen Ebene mit der der Scheibe aa genau parallel gestellt werden kann. Ein geeigneter Zeichenstift e, in eine am Umfang des Schwungrades angebrachte Lücke eingefest, berührt mit seiner Spitze die vordere, mit Papier beklebte Fläche der Scheibe aa, und beschreibt auf derselben eine Curve, die, je nachdem der Schlitten und also auch die Scheibe sich in Ruhe oder in Bewegung befindet, ein Kreis oder eine Art Epicycloide ist, welche dann das Gesetz der Bewegung repräsentirt. Denn wenn der Zeichenstift sich mit einer bekannten gleichförmigen Geschwindigkeit bewegt, so läßt sich daraus leicht die Zeit herleiten, während die Winkelbewegung der Scheibe aa den in dieser Zeit durchlaufenen Raum des Schlittens giebt, dessen Geschwindigkeit der eines Punktes im Umfang der Rolle H gleich ist.

Der beschriebene Mechanismus steht auf einer Platte ff, die zwischen zwei Backen vermit-

telst der Schraube l vor und zurück geschoben werden kann, um den beschreibenden Stift der Scheibe aa zu nähern, oder nach Erfordern davon zu entfernen. g und g^1 sind zwei Docken, zwischen welche die kupferne, das Uhrwerk enthaltende Büchse mit Zapfen eingesetzt ist, um deren horizontale Are dieselbe mittelst der Stellschraube k so lange gedreht werden kann, bis der vertikale Durchmesser der Büchse mit der Scheibe aa parallel ist. Um aber auch den horizontalen Durchmesser und somit die ganze Büchse mit jener Scheibe parallel zu stellen, was natürlich unbedingt erforderlich ist, dienen die beiden Schraubenbolzen h, h^1 , welche die Docken g, g^1 mit der verschiebbaren Sohlplatte ff verbinden, und von welcher der eine h^1 durch einen länglichen Schlitz geht, wodurch eine Drehung des ganzen Apparates um die Are des andern Bolzens h möglich gemacht wird.

Die Art der Beobachtung mit diesem Apparat ist folgende:

Nachdem der Parallelismus der Büchse mit der Scheibe hergestellt, der Zeichenstift mit Tusche gefüllt, und seine Spitze mittelst der Stellschraube l mit der Scheibe aa in Berührung gebracht war, wurde das Uhrwerk in der Büchse in Bewegung gesetzt, wo dann der Zeichenstift auf der noch ruhenden Scheibe einen Kreis beschrieb, den Morin den Abgangskreis nennt. Die Geschwindigkeit des Zeichenstifts wurde dadurch ermittelt, daß man nach einiger Zeit, als die Bewegung des Uhrwerks gleichförmig geworden, die bei einer gewissen Anzahl von Umdrehungen verfllossene Zeit beobachtete, und nach dieser vorläufigen Beobachtung gab man das Signal zum Abgang des belasteten Schlittens. Dieser setzte sich nun in Bewegung und theilte dieselbe der mit Papier beklebten Scheibe aa mit, worauf nun der Zeichenstift e die oben erwähnte Curve beschrieb, welche die Relation zwischen den Zeiten und den durchlaufenen Räumen darstellte. Sobald der absteigende Kasten K den Boden der Grube erreicht, kommt der Schlitten und somit auch die Scheibe aa zur Ruhe; der Zeichenstift beschreibt daher abermals einen Kreis, den Ankunftskreis, und nachdem dies geschehen, wird das Uhrwerk arretirt, mittelst der Schraube l zurückgeschoben, die Scheibe aa abgenommen, und das darauf befindliche Papierblatt, behufs eines neuen Versuchs, durch ein anderes ersetzt.

Um das Abwickeln und Auftragen der so erhaltenen Curven zu bewirken, verfährt Morin auf folgende Art:

Die Figur 13 (Tafel III.) stellt die Curve dar, welche beim Versuch Nr. 2 der ersten Versuchsreihe über die Reibung von Eichenholz auf Eichenholz, ohne Schmiere und mit paralleler Lage der Fibern, entstanden ist. Der mit $0, 1, 2, 3, \dots, 9$ bezeichnete Kreis ist der Abgangskreis, welcher nach vorläufigen Beobachtungen in 2 Sekunden beschrieben wurde, und der Punkt 0 ist dem Anschein nach derjenige, wo der Zeichenstift diesen Kreis verläßt, um die verschlungene Curve zu beschreiben. Von diesem Punkte aus ist der Umfang des Abgangskreises in zehn gleiche Theile getheilt, und durch die Theilpunkte sind aus dem Mittelpunkt c der Scheibe concentrische Kreise beschrieben, welche die verschiedenen Verschlingungen der Curve in den mit $1', 2', 3' \dots, 17', 18'$ bezeichneten Punkten schneiden. Bald nach dem Durchgang der Curve durch den Punkt $18'$ wendet sie sich plötzlich einwärts und geht in einen zweiten Kreis über, der den Ankunftskreis repräsentirt.

Betrachten wir einen beliebigen Punkt 2, so ist einleuchtend, daß bei der Bewegung des Schlittens die Scheibe in derselben Zeit, worin der Zeichenstift den Kreisbogen 02 beschreiben würde, also in $\frac{2}{10}$ Sekunden, sich um den Winkel $2c2'$ gedreht hat. Nun ist der mittlere Radius der Rolle, über welche das Zugseil geleitet ist, = 0,111 Metr., also der Umfang = 0,6974 Metr., und demnach mißt jeder Grad des mittleren Umfanges 0,001937 Metr., so daß also der Schlitten für jeden Grad der Drehung der Scheibe um 0,001937 Metr. vorwärts rückt. In dem hier betrachteten Fall enthält der Winkel $2c2'$ nach directen Messungen mit einem eigens dazu eingerichteten Transporteur 56,3 Grade, und folglich ist der vom Schlitten in 0,2 Sekunden durchlaufene Weg = $56,3 \cdot 0,001937 = 0,109$ Metr.

Auf diese Art ist man im Stande, durch successives Abtragen der zusammengehörigen Bögen

01, 02, 03, 04, 05 . . .
11', 22', 33', 44', 55' . . . zc.

eine Tabelle der Zeiten und der correspondirenden Wege, welche der Schlitten durchlaufen hat, anzufertigen. Die folgende Tabelle enthält das so ermittelte Gesetz der Bewegung für den zweiten Versuch, nämlich für die Reibung von Eichenholz auf Eichenholz ohne Schmiere mit parallelen Fibern. Der Zeichenstift brauchte zu jedem Umlauf 2 Sekunden.

Theile des vom Stift beschriebenen Kreises.	Correspondirende Zeiten.	Winkel, um welche sich die Scheibe in diesen Zeiten gedreht hat.	Gleichzeitig durchlaufene Wege des Schlittens.
	Secunden.	Grade.	Meter.
0,0	0,0	0,0	0,000
0,1	0,2	9,7	0,018
0,2	0,4	56,3	0,109
0,3	0,6	127,5	0,247
0,4	0,8	228,0	0,441
0,5	1,0	354,0	0,686
0,6	1,2	490,0	0,948
0,7	1,4	648,5	1,255
0,8	1,6	803,2	1,553
0,9	1,8	1004,0	1,945
1,0	2,0	1197,0	2,318
1,1	2,2	1412,0	2,734
1,2	2,4	1642,0	3,180
1,3	2,6	1864,5	3,608
1,4	2,8	2018,0	3,905
1,5	3,0	2161,5	4,189

Zur graphischen Darstellung dieser Tabelle nahm man die durchlaufenen Räume nach einem Maßstabe von 0,1 Metr. für den Metr. als Abscissen, die zugehörigen Zeiten nach dem Maßstabe von 0,1 Metr. für die Sekunde als Ordinate, und zog durch die so erhaltenen Punkte eine stetige Curve, die Bewegungscurve genannt. Diese Curve ist für das in Rede stehende Beispiel in Fig. 14 (Tafel XIX.) dargestellt.

Ableitung des Gesetzes der Bewegung aus dieser graphischen Darstellung. Coulomb zog aus seinen Versuchen den Schluß, daß die Reibung eine constante, von der Geschwindigkeit unabhängige Kraft sei. Demgemäß müßten die vom Schlitten durchlaufenen Räume sich wie die Quadrate der zugehörigen Zeiten verhalten, wenn der obige Schluß genau richtig wäre, und die Bewegungscurve würde also eine Parabel sein. Um dies zu entscheiden, brachte Morin gewisse bekannte Eigenschaften der Parabel in Anwendung, vorzugsweise aber den von Maclaurin herrührenden Lehrsatz, welcher lautet:

„Wenn der eine Schenkel eines rechten Winkels fortwährend durch den Brennpunkt einer Parabel geht, und die Spitze desselben rückt in einer geraden, die Parabel im Scheitel berührenden Linie fort, so bleibt der andere Schenkel beständig eine Tangente zu dieser Curve, und umgekehrt.“

Durch solche Mittel überzeugte sich Morin von dem Gesetz, wonach sich die Bewegung des Schlittens änderte, und er fand das Resultat, daß bei allen seinen Versuchen ohne Ausnahme die Bewegungscurve jedesmal eine Parabel war. Der einzige Theil der Curve, welcher sich nicht parabolisch ergab, ist derjenige in der Gegend des Scheitels, während der übrige Theil mit einer richtig construirten Parabel genau zusammen traf.

Außer dem Fall einer beschleunigten Bewegung kann dieselbe auch gleichförmig und sogar verzögert sein, ohne daß deshalb die Reibung aufhören müßte, eine constante Kraft zu sein. Ist nämlich der Schlitten durch die vereinte Wirkung der mit Gewichten beschwerten Kästen K und M, M in Bewegung gesetzt, und die Kästen M, M sind auf den Kiegeihölzern N, N stehen geblieben, so setzt der Schlitten seine Bewegung bloß in Folge der Spannung des Zugseiles durch die Belastung des Kastens K fort. Ist nun diese Belastung der Reibung gerade gleich, so wird die fernere Bewegung gleichförmig, und wenn sie kleiner als die Reibung ist, verzögert sein. Allein sowohl bei beschleunigter als auch bei gleichförmiger Bewegung fand sich immer dasselbe constante Verhältniß der Reibung zur Belastung des Schlittens.

Formeln zur Berechnung der Versuche. Da das früher beschriebene Dynamometer die Spannungen des horizontalen Seilendes vermöge seiner besondern Construction nur innerhalb der Grenzen von 95 Kilogr. angiebt, so hätte man für solche Belastungen des Schlittens, die einer größern bewegenden Kraft bedürfen, noch ein zweites Dynamometer mit stärkern Federn anwenden müssen. Sobald man aber aus der parabolischen Form der Bewegungscurve die Ueberzeugung gewonnen hatte, daß die Reibung unter allen Pressungen stets constant blieb, hörte die Nothwendigkeit eines zweiten Dynamometers auf, und selbst das erste konnte bei den ferneren Versuchen entbehrt werden. Diese Vereinfachung des Apparates machte dagegen besondere Versuche über die Reibung an der Ase der Rolle, und über Widerstand der Steifigkeit des angewendeten Zugseiles nöthig, um daraus demnächst die Spannung des Seiles berechnen zu können.

Die Ase der Rolle war aus Eisen, die zugehörigen Lager aber waren aus Ebereschholz (Sorbier) angefertigt. Letzteres hatte man mit einer Mischung aus fünf Theilen Schweineschmalz und einem Theile Graphit tüchtig getränkt, welche Schmiere aber, nachdem die Ase mehrere Umdrehungen gemacht hatte, wieder abgewischt wurde, um alle fremdartigen, von der

mehreren oder mindern Flüssigkeit der Schmiere bei dauernder Bewegung herrührenden Störungen zu vermeiden. Die unter solchen Umständen angestellten zehn Versuche gaben den Widerstandcoefficienten der Arenreibung im Mittel = 0,164, und zwar unabhängig von der Geschwindigkeit und von der Größe der angebrachten Belastung.

Bei den Versuchen über die Steifigkeit des Zugseiles wurde derjenige Theil dieses Widerstandes, den Coulomb die natürliche Steifheit nennt, außer Acht gelassen, weil das in Form einer breiten Tresse geflochtene Zugseil Biegsamkeit genug besaß, um hiervon abstrahiren zu lassen, besonders in Betracht der großen Spannungen desselben. Dadurch vereinfachte sich der Ausdruck für die Steifigkeit beträchtlich, und reduzirte sich auf ein einziges Glied, welches der Spannung proportional ist. Man fand nämlich als Mittel von sechs Versuchen, die nur wenig von einander abwichen, das Verhältniß der Spannung zum Widerstande der Steifigkeit = 1 : 0,032, und zwar unabhängig von der Geschwindigkeit.

Gebrauch der vorigen Resultate zur Berechnung der Spannung des Zugseils durch die Belastung des absteigenden Kastens.

Nach diesen Versuchen über die Reibung an der Ase der Rolle und über die Steifigkeit des angewendeten Seiles ist es leicht, eine Gleichung zwischen der Last des absteigenden Kastens und der davon herrührenden Spannung des Zugseiles aufzustellen. Zu dem Ende sei:

- R, der von der Steifigkeit herrührende Widerstand, als eine im mittleren Umfange wirkende Kraft gedacht;
 N, der jedesmal bekamte Druck auf die Ase der Rolle;
 f = 0,164, das Verhältniß der Arenreibung zum Druck N;
 r, der mittlere Halbmesser der Rolle, = 0,111 Metr.;
 q, das Gewicht der Rolle und der damit verbundenen Scheibe, = 6,854 Kilogr.;
 P, die ganze Belastung des absteigenden Kastens mit Einschluß seines eigenen und des Gewichts von dem Seilende, welches stets unterhalb der Rolle bleibt;
 T, die Spannung des horizontalen Seilendes;
 ρ = 0,0093 Metr., der Halbmesser von der Ase der Rolle;
 ω, die Winkelgeschwindigkeit für irgend einen Augenblick der Bewegung;
 dm, ein Element der Masse der Rolle oder der mit ihr sich drehenden Theile;
 2g = 9,8088 Metr., die von der Schwere in jeder Secunde erzeugte Geschwindigkeit beim freien Fall.

Für irgend einen Augenblick der Bewegung hat man nun:

$$Tr = Pr - Rr - fN\rho - \frac{d\omega}{dt} \cdot \left(\sum r^2 \cdot dm + \frac{P}{2g} \cdot r^2 \right),$$

in welcher Gleichung

$$R = 0,032 \cdot T, \text{ und}$$

$$N = \sqrt{\left(P + q - \frac{P}{2g} \cdot \frac{rd\omega}{dt} \right)^2 + T^2} \text{ ist.}$$

Nach einem Lehrsatz von Poncelet*) kann man überdies, da

*) Crelle, Journal für die reine und angewandte Mathematik, Band 13. Seite 277.

$$\left(P + q - \frac{P}{2g} \cdot \frac{rd\omega}{dt} \right) > T \text{ ist, setzen}$$

$$N = 0,96 \cdot \left(P + q - \frac{P}{2g} \cdot \frac{rd\omega}{dt} \right) + 0,4 \cdot T.$$

Substituiert man diese Ausdrücke, so entsteht

$$T \left(1 + 0,032 + 0,4 \cdot f \frac{\rho}{r} \right) = P \left(1 - 0,96 \cdot f \frac{\rho}{r} \right) - 0,96 \cdot f \frac{\rho}{r} q - \frac{P}{2g} \cdot \frac{rd\omega}{dt} \cdot \left(1 - 0,96 \cdot f \frac{\rho}{r} \right) - \frac{\Sigma r^2 dm}{r^2} \cdot \frac{rd\omega}{dt}$$

Die Größe $\Sigma r^2 dm$ bleibt unverändert für alle Versuche, und hängt nur von den Abmessungen der Rolle und ihrer Scheibe ab. Es wurde gefunden $\Sigma r^2 \cdot dm = 0,00629$; und wenn man dies, so wie die Zahlenwerthe von r , ρ und f substituirt, entsteht $\frac{\Sigma r^2 \cdot dm}{r^2} = 0,51$, und

$$\text{demgemäß} \quad T = 0,95 \cdot \left[P - \left(0,516 + \frac{P}{2g} \right) \cdot \frac{rd\omega}{dt} \right] - 0,086 \text{ Kilogr.}$$

Da man sich nun überzeugt hat, daß die Bewegung des Schlittens eine gleichförmig beschleunigte, und folglich die Bewegungscurve eine gewöhnliche Parabel ist, so ist uns durch letztere die Größe $\frac{d\omega}{dt}$ gegeben. Denn es sei $2c$ der Parameter dieser Curve, e der in der Zeit t durchlaufene Raum, so ist $t^2 = 2ce$ die Gleichung der Curve, woraus man zieht

$$\frac{de}{dt} = \frac{2t}{2c} = r\omega$$

und folglich

$$\frac{r \cdot d\omega}{dt} = \frac{2}{2c}$$

Dies in die vorige Gleichung gesetzt, liefert

$$T = 0,95 \cdot \left[P - \frac{2}{2c} \cdot \left(0,516 + \frac{P}{2g} \right) \right] - 0,086 \text{ Kilogr.}$$

Vermittelt dieser Gleichung und der durch die Versuche erhaltenen Bewegungscurven, welche die Werthe von $2c$ liefern, findet man nun in jedem besonderen Falle den Werth der Spannung.

Für den Fall, wo die Bewegung gleichförmig wird, oder wenn man die Spannung des Seiles vor dem Anfange der Bewegung berechnen will, ist es hinreichend, in der obigen Formel $\frac{r \cdot d\omega}{dt} = \frac{2}{2c} = 0$ zu setzen, wodurch sie sich auf folgende reducirt:

$$T = 0,95 \cdot P - 0,086 \text{ Kilogr.};$$

oder einfacher auf

$$T = 0,95 \cdot P,$$

wegen der Kleinheit des zweiten Gliedes.

Vor der Anwendung dieser beiden Formeln hat man sich durch mehr als vierzig besondere Versuche von ihrer Uebereinstimmung mit der Erfahrung überzeugt, und die allergrößte Uebereinstimmung gefunden.

Relation zwischen der Spannung des Seils und der Reibung. Nachdem nun

mittels der vorhergehenden Formeln die Spannung des Seils in jedem besonderen Falle als bekannt angesehen werden kann, so bleibt noch übrig, die Relation zu ermitteln, welche zwischen jener Spannung und der Reibung des Schlittens statt findet. Zu dem Ende sei wie vorhin:

T die bekannte Spannung;

F die Reibung der unter dem Schlitten befestigten Leisten auf die zu versuchenden Schienen der Bahn;

e der in einer beliebigen Zeit durchlaufene Raum des Schlittens;

ω die Winkelgeschwindigkeit der Rolle am Ende jenes Weges;

Q das Gewicht des Schlittens mit seiner ganzen Belastung und

$r = 0,111$ Metr. der Halbmesser der Rolle mit Einschluß der halben Seildicke.

Herr Morin betrachtet zunächst den einfachsten Fall, der bei den Versuchen am häufigsten stattfand, nemlich den, wo die Belastung des absteigenden Kastens gerade hinreichte, den Abgang des Schlittens zu bewirken, und dessen Bewegung zu unterhalten. Die in der Richtung des Seils wirkende Kraft T ist, sowohl in Folge der vorigen Gleichungen, als auch nach allen Beobachtungen während der ganzen Dauer der Bewegung constant; daher wird das mechanische Moment, welches sie von Anfang an entwickelt hat, gleich Te^{tm} sein. Das mechanische Moment der Reibung, mag diese nun constant sein oder nicht, ist ferner $= \int F \cdot de$, von $e = 0$ bis zu dem der Zeit t correspondirenden Werth von e, und die lebendige Kraft des Schlittens ist $= Q \frac{\omega^2 r^2}{2g}$.

Man hat daher nach dem Prinzip der lebendigen Kräfte:

$$Q \cdot \frac{\omega^2 r^2}{2g} = 2 \cdot Te - 2 \cdot \int F de,$$

oder durch Differentiation dieser Gleichung, indem man dabei berücksichtigt, daß $r\omega = \frac{de}{dt}$ ist,

$$\frac{Q}{2g} \cdot \frac{r \cdot d\omega}{dt} = T - F;$$

$$\text{woraus } F = T - \frac{Q}{2g} \cdot \frac{r \cdot d\omega}{dt} \text{ folgt.}$$

Setzt man hierin für T den vorigen Werth, so findet man

$$F = 0,95 \cdot P - \left[0,95 \cdot \left(0,516 + \frac{P}{2g} \right) + \frac{Q}{2g} \right] \cdot \frac{r \cdot d\omega}{dt} - 0,086 \text{ Kilogr.},$$

welcher Ausdruck durchaus constant ist, und daher zu erkennen giebt, daß die Reibung von der Größe der Bewegung unabhängig ist, da alle Bewegungscurven

$$t^2 = 2ce, \text{ folglich } \frac{d^2e}{dt^2} = \frac{r \cdot d\omega}{dt} = \frac{2}{2c}$$

übereinstimmend gegeben haben.

Für eine gleichförmige Bewegung ist $\frac{rd\omega}{dt} = 0$, folglich:

$$F = T - 0,95 \cdot P.$$

Dieser letztere Fall, obgleich weit einfacher zu berechnen, als der einer beschleunigten Be-

wegung, ist dennoch sehr schwer herbeizuführen, und erfordert ein mehrfaches Probiren, weshalb ihn Morin nicht oft zu erreichen gesucht hat.

Ist die Belastung P des absteigenden Kastens K so klein, daß $T < F$ wird, so verzögert sich die Bewegung, welche durch die gleichzeitige Zusammenwirkung des Winkelhebels ced , oder der kleinen Kästen M, M und des absteigenden Kastens K hervorgebracht wurde, von dem Augenblick an, wo die Einwirkung des erstern aufhört, und nach Umständen kann die Bewegung auch ganz aufhören.

Die Gleichung
$$F = T - \frac{Q}{2g} \cdot \frac{r \cdot d\omega}{dt}$$

findet Anwendung auf jeden Zeitpunkt der Bewegung des Schlittens, von dem an, wo der Winkelhebel ced zu wirken aufgehört hat, und gestattet eine unmittelbare Berechnung, ohne daß man nöthig hätte, auf die Untersuchung dessen einzugehen, was während der kurzen Zeit der Zusammenwirkung des Winkelhebels und des absteigenden Kastens vorgeht. Morin hat daher auch bei der Berechnung aller seiner Versuche keine andere Formel in Anwendung gebracht, obgleich er sich noch auf eine theoretische Untersuchung der besondern Umstände einläßt, welche in den beiden Zeiträumen bei der Bewegung des Schlittens obwalten. Ich übergehe diese Digression hier mit Stillschweigen, da es nicht meine Absicht sein kann, in diese Abhandlung eine vollständige Uebersetzung des Morinschen Werkes aufzunehmen.

Numerische Anwendung der Formeln. Nach dieser Darlegung der theoretischen Grundsätze, worauf Morin die Berechnung seiner Versuche stützt, giebt er noch ein Beispiel von der Art und Weise, wie er bei dieser Berechnung zu Werke gegangen ist, indem er hierzu den Versuch Nr. 2. der ersten Tabelle wählt, wo Eichenholz auf Eichenholz, ohne Schmiere, die Fibern mit der Richtung der Bewegung parallel laufend, fortbewegt wurde. Dabei war

$$P = 92,22 \text{ Kil.}; \quad Q = 133,86 \text{ Kil.}$$

Der Entwurf der Bewegungscurve gab den Parameter

$$2c = 2,08 \text{ Meter}; \quad \text{daher} \quad \frac{r \cdot d\omega}{dt} = \frac{2}{2c} = 0,961;$$

und mit Rücksicht hierauf, liefert die Gleichung

$$T = 0,95 \left[P - \frac{2}{2c} \cdot \left(0,516 + \frac{P}{2g} \right) \right] - 0,086 \text{ Kil.}$$

$$T = 78,45 \text{ Kil.};$$

die Formel $F = T - \frac{Q}{2g} \cdot \frac{r \cdot d\omega}{dt}$ giebt ebenso

$$F = 65,34 \text{ Kil.};$$

wonach sich bei diesem Versuche das Verhältniß der Reibung zum Druck ergibt

$$\frac{F}{Q} = \frac{65,34}{133,86} = 0,488.$$

Für die Versuche, wo die Bewegung gleichförmig war, ist

$$T = F = 0,95 P.$$

Als Beispiel diene hier der Versuch Nr. 16. der ersten Tabelle, für die Reibung von Eichenholz auf Eichenholz, ohne Schmiere, mit parallel laufenden Fibern, wo man fand

$$Q = 199,52 \text{ Kil.}; P = 95,84 \text{ Kil.};$$

daher findet man

$$T = F = 91,04 \text{ Kil.},$$

und folglich

$$\mu = \frac{F}{Q} = 0,456.$$

Auf diese Weise sind alle Versuche, entweder durch Anwendung der einen, oder der anderen Formel, je nachdem es die Umstände der Bewegung mit sich brachten, berechnet und in den folgenden Tabellen zusammengestellt worden.

Tafel I. Versuche über die Reibung verschiedener Hölzer auf Eichenholz ohne Schmiere, sowohl für die Bewegung als auch für die Ruhe.

Anmerk. Die in dieser Tabelle angegebenen Geschwindigkeiten sind diejenigen, welche der Schlitten nach den ersten 3 Metern seines Laufes erreicht hatte. Die eingeklammerten Geschwindigkeiten fanden bei einer gleichförmigen Bewegung statt. Bei den Versuchen über die Reibung der Ruhe betrug die Dauer der Ruhezeit 15 Minuten.

1. Vers.-R. Eichenholz *) (=). Reibung der Bewegung.					Fortsetzung der 1. Vers.-Reihe.					3. Vers.-R. Eichenholz (+). Reibung der Bewegung.				
Nr.	Q. Kiloqr.	F. Kiloqr.	Geschw. nach 3 Met. Meter.	$\frac{F}{Q}$ = μ .	Nr.	Q. Kiloqr.	F. Kiloqr.	Geschw. nach 3 Met. Meter.	$\frac{F}{Q}$ = μ .	Nr.	Q. Kiloqr.	F. Kiloqr.	Geschw. nach 3 Met. Meter.	$\frac{F}{Q}$ = μ .
Reibgöfl. = 0,26 □ M.					Reibgöfl. = 0,0031 □ M.					Reibgöfl. = 0,088 □ M.				
1	133,86	64,00	(0,69)	0,477	18	97,79	46,79	(1,06)	0,477	31	54,66	33,14	3,93	0,34
2	133,86	65,34	2,37	0,488	19	145,76	60,46	1,81	0,483	32	128,09	40,21	1,48	0,31
3	151,21	73,67	—	0,487	20	273,89	133,08	2,70	0,484	33	175,83	59,02	1,57	0,33
4	440,01	217,23	(0,41)	0,493	Mittel = 0,478					34	224,44	72,90	1,23	0,32
5	440,01	211,48	2,05	0,480	2. Vers.-R. Eichenholz (=). Reibung der Ruhe.					35	224,44	72,69	1,90	0,32
6	679,73	321,52	2,04	0,472	Reibgöfl. = 0,26 □ M.					36	424,98	126,77	—	0,30
7	1039,03	489,96	1,92	0,471	21	133,86	74,34	—	0,55	37	424,98	139,37	1,56	0,30
8	1039,03	480,23	(1,07)	0,460	22	205,67	161,95	—	0,79	38	904,67	259,11	1,91	0,29
Reibgöfl. = 0,088 □ M.					23	440,01	333,47	—	0,47	39	904,67	293,13	1,51	0,32
9	46,29	23,06	1,37	0,498	24	1039,03	691,66	—	0,66	Mittel = 0,314				
10	49,21	24,38	(1,28)	0,496	Reibgöfl. = 0,088 □ M.					Reibgöfl. = 0,004 □ M.				
11	54,66	27,09	(1,50)	0,495	25	46,29	27,98	—	0,60	40	182,72	69,60	(1,33)	0,38
12	54,66	25,82	3,07	0,472	26	151,21	102,20	—	0,67	41	416,26	166,12	1,64	0,39
13	102,84	50,05	2,72	0,486	Reibgöfl. = 0,0031 □ M.					42	662,48	297,29	2,11	0,44
14	103,21	47,32	1,86	0,460	27	97,79	53,64	—	0,55	43	176,54	91,81	(1,00)	0,52
15	150,88	70,09	(1,25)	0,464	28	145,76	79,76	—	0,55	44	176,54	104,21	—	0,59
16	199,52	91,04	(0,61)	0,456	29	194,24	127,48	—	0,65					
17	199,61	90,65	(0,85)	0,454	30	273,89	150,23	—	0,55	Mittel = 0,604				

*) Das Eichenholz war von den Lothringer Gebirgen, wenig ästig, nicht rissig, etwas weich und zähe, vor mehreren Jahren geschlagen und seit 4 Jahren zu Bohlen geschnitten. Specifisches Gewicht = 0,712.

4. Verf. N. Eichenholz (+).
 Reibung der Ruhe.

Nr.	Q. Kilogr.	F. Kilogr.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q}$ = μ .
Reibg. = 0,088 □M.				
45	54,66	30,45	—	0,55
46	128,09	68,12	—	0,53
47	224,44	114,42	—	0,51
48	904,67	531,00	—	0,58
49	1145,63	583,63	—	0,51
Reibg. = 0,004 □M.				
50	176,54	92,41	—	0,52
51	182,72	96,33	—	0,53
52	662,48	387,58	—	0,52
Mittel = 0,531				

 5. Verf. N. Ulmenholz*) (=).
 Reibung der Bewegung.

Nr.	Q. Kilogr.	F. Kilogr.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q}$ = μ .
Reibg. = 0,1243 □M.				
53	117,91	53,13	2,30	0,45
54	117,91	53,90	2,88	0,45
55	417,77	177,86	1,97	0,42
56	417,77	185,75	1,41	0,44
57	417,77	175,30	1,37	0,42
58	417,77	169,82	3,08	0,41
59	897,81	372,60	2,26	0,43
60	897,81	392,45	1,23	0,41
61	897,81	357,03	1,73	0,41
62	897,81	408,07	2,47	0,45
Reibg. = 0,0059 □M.				
63	111,00	49,39	1,60	0,45
64	176,64	77,73	3,20	0,44
65	416,14	185,31	1,45	0,44
Mittel = 0,432				

 6. Verf. N. Ulmenholz (=).
 Reibung der Ruhe.

Nr.	Q. Kilogr.	F. Kilogr.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q}$ = μ .
Reibg. = 0,1243 □M.				
66	117,91	85,92	—	0,73
67	417,77	324,82	—	0,76
68	897,81	540,66	—	0,60
69	897,81	559,40	—	0,62
Reibg. = 0,0059 □M.				
70	176,64	134,33	—	0,76
Mittel = 0,694				

 7. Verf. N. Ulmenholz (+).
 Reibungsgl. = 0,0084 □M.

Nr.	Q. Kilogr.	F. Kilogr.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q}$ = μ .
a) Reibg. d. Bewegung.				
71	111,00	49,15	2,39	0,44
72	182,82	81,96	1,90	0,45
73	182,82	85,23	1,38	0,46
Mittel = 0,45				
b) Reibung der Ruhe.				
74	111,00	49,15	—	0,57
75	182,82	81,96	—	0,57
Mittel = 0,57				

 8. Verf. N. Eichenholz (=).
 a) Reibung der Bewegung.

Nr.	Q. Kilogr.	F. Kilogr.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q}$ = μ .
Reibg. = 0,0823 □M.				
76	123,06	49,00	1,67	0,40
77	123,06	49,42	2,40	0,40
78	549,10	230,53	1,26	0,42
79	549,10	229,50	2,47	0,42
80	1102,02	447,82	1,55	0,41
Reibg. = 0,022 □M.				
81	123,62	46,79	(0,90)	0,39
82	547,16	235,07	1,97	0,36
Mittel = 0,40				

Nr.	Q. Kilogr.	F. Kilogr.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q}$ = μ .
b) Reibung der Ruhe.				
Reibg. = 0,0823 □M.				
83	123,06	58,39	—	0,47
84	123,06	68,87	—	0,56
85	549,10	252,21	—	0,46
86	549,10	320,59	—	0,58
87	1102,02	541,03	—	0,49
Reibg. = 0,022 □M.				
88	547,16	252,16	—	0,46
Mittel = 0,503				

 9. Verf. N. Kiefernholz (=).
 Reibungsgl. = 0,1045 □M.

Nr.	Q. Kilogr.	F. Kilogr.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q}$ = μ .
a) Reibg. d. Bewegung.				
89	107,58	40,09	2,50	0,37
90	107,58	40,37	1,53	0,37
91	299,42	99,18	2,29	0,33
92	299,42	100,22	1,90	0,34
93	538,96	191,70	2,11	0,36
94	538,96	205,84	2,67	0,38
95	1019,20	347,91	2,10	0,34
Mittel = 0,356				

Fortsetzung der 9. Verf. Reihe.

Nr.	Q. Kilogr.	F. Kilogr.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q}$ = μ .
b) Reibung der Ruhe.				
96	107,58	58,26	—	0,54
97	107,58	46,79	—	0,44
98	299,42	138,34	—	0,46
99	539,96	309,41	—	0,57
100	1019,20	587,39	—	0,57
Mittel = 0,516				

 10. Verf. N. Rothbuchenholz (=).
 Reibungsgl. = 0,0902 □M.

Nr.	Q. Kilogr.	F. Kilogr.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q}$ = μ .
a) Reibg. d. Bewegung.				
101	114,79	46,20	2,39	0,40
102	114,79	40,05	2,46	0,35
103	804,42	275,56	2,35	0,34
104	804,42	277,51	3,03	0,35
Mittel = 0,36				
b) Reibung der Ruhe.				
105	114,79	61,33	—	0,53
106	804,42	388,79	—	0,48
107	804,42	479,98	—	0,59
Mittel = 0,533				

 11. Verf. N. Wild. Birnbaum (=).
 Reibungsgl. = 0,0858 □M.

Nr.	Q. Kilogr.	F. Kilogr.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q}$ = μ .
a) Reibg. d. Bewegung.				
108	107,02	37,37	1,86	0,35
109	107,02	42,91	3,10	0,40
110	418,84	145,99	1,90	0,35
111	418,84	165,12	1,96	0,39
Mittel = 0,372				
b) Reibung der Ruhe.				
112	107,02	46,78	—	0,44
113	418,84	183,79	—	0,44
Mittel = 0,44				

 12. Verf. N. Ebereschenholz (=).
 Reibungsgl. = 0,121 □M.

Nr.	Q. Kilogr.	F. Kilogr.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q}$ = μ .
a) Reibg. d. Bewegung.				
114	118,67	40,96	1,49	0,35
115	118,67	49,83	2,45	0,42
116	430,46	155,01	1,90	0,36
117	430,46	192,95	2,12	0,45
118	1006,46	430,63	1,55	0,42
Mittel = 0,40				
b) Reibung der Ruhe.				
119	118,67	69,59	—	0,59
120	430,46	234,89	—	0,55
121	1006,46	502,79	—	0,50
Mittel = 0,547				

*) Aus Lothringen; von einem sanften, gleichartigen Gefüge. Spezifisches Gewicht = 0,686.

Es ist bereits erwähnt worden, daß für den Fall einer beschleunigten Bewegung des Schlittens die parabolische Form der Bewegungscurve ein allgemeines Resultat ohne alle Ausnahme ist, woraus folgt, daß bei dieser Bewegung nur constante Kräfte thätig gewesen sein können. Herr Morin hat den Parameter $2c$ jener Curve durch das früher erwähnte Auftragen derselben für jeden einzelnen Versuch ermittelt, und ihn nebst den übrigen Bestimmungsstücken, welche den früher mitgetheilten Formeln gemäß zur Berechnung des stattgehabten Widerstandes F erforderlich sind, in den Tabellen seines Werkes jedesmal mit aufgeführt. Hier hat man dieselben, zur Ersparung des Raumes, weggelassen und sich damit begnügt, blos die Hauptresultate übersichtlich zusammenzustellen, wobei jedoch der Vergleichung wegen die Größe der Reibungsfläche und der Grad der Geschwindigkeit, unter welchen die Versuche angestellt wurden, überall mit angegeben sind.

Ueberblickt man nun die Resultate der obigen Tabelle, so wird man sogleich die von Morin daraus gezogenen Folgerungen, daß die Reibung der Hölzer ohne Schmiere, unter allen Umständen dem Drucke proportional, und sowohl von der Geschwindigkeit, als auch von der Größe der Berührungsfläche ganz unabhängig ist, vollkommen begründet finden. Die Versuche über die Reibung der Ruhe zeigen zwar für den Fall, wo die Holzfasern eine parallele Lage hatten, mitunter bedeutende Unregelmäßigkeiten in den Resultaten, besonders bei der zweiten und sechsten Versuchreihe; allein Morin bemerkt hiezu, daß diese Abweichungen nicht von der Größe der Berührungsfläche bedingt zu sein scheinen. Vielmehr führt er außer der Structur der Körper besonders den Umstand als Erklärungsgrund an, daß die harten Holzfasern der einen Berührungsfläche, wenn sie zufällig mit weichen Fasern der andern zusammentreffen, sich bei einer längeren Ruhezeit in festere eindrücken und auf diese Weise einen größeren Widerstand erzeugen müssen, als wenn gegentheils harte Fasern wieder auf harte zu liegen kommen. Daß in dieser Beziehung weit weniger Unregelmäßigkeiten statt finden müssen, sobald die Holzfasern sich rechtwinklig kreuzen, ist einleuchtend, und die Resultate der 4ten und 7ten Versuchreihe bestätigen dies zur Genüge. Morin verbreitet sich noch weiter über diesen Punkt, und bringt noch mehr Gründe für die Richtigkeit jener Erklärung bei, die ich jedoch um so mehr glaube mit Stillschweigen übergehen zu dürfen, als sich gegen die Annahme einer zufälligen Verschiedenheit des Contactes und einer daraus entspringenden Ungleichmäßigkeit des Widerstandes wohl billig nichts einwenden läßt.

Auch bei den Versuchen Nr. 40 bis 44 der 3ten Vers. Reihe, wo die Berührungsfläche auf $0,004 \text{ □ M.}$ ($= 5,85 \text{ □ Zoll Pr.}$) reducirt war, fanden Unregelmäßigkeiten statt, die Morin jedoch eben so wenig dem Einfluß der Berührungsfläche zuschreibt. Zur Erklärung derselben führt er folgendes an. Bei den fraglichen fünf Versuchen bemerkte man außer den früher erwähnten kleinen, schwärzlichen Wärrchen, von welchen nachher noch besonders die Rede sein wird, daß die Oberfläche des Eichenholzes an manchen Stellen zerrissene Fasern, an andern Stellen aber verkohlte Spuren von $0,2$ bis $0,3 \text{ M.}$ (7 bis 12 Zoll) Länge enthielt. Sobald der Schlitten über diese Stellen hingegangen war, spürte man selbst in der Entfernung von einigen Schritten einen Geruch wie von verbranntem Holze, und die Theile der Bahnschienen

fühlten sich merklich erhitzt an. Hieraus schließt Morin, daß in allen fünf Versuchen mit 0,004 QM. Berührungsfläche eine Aenderung in der Structur der Holzfasern stattfand, welche den Reibungswiderstand beträchtlich erhöhte, und daß folglich die in Anwendung gebrachten Belastungen für die Ausdehnung jener Fläche viel zu groß waren. In der That betrug die höchste Belastung nach Preussischem Maß und Gewicht etwa 9290 Pfund, die größte Belastung aber über 34860 Pfund auf den Quadratsfuß, welchen Werth sie in Fällen der Anwendung schwerlich jemals erreichen dürfte.

Der großen Verschiedenheit zwischen den Zahlenwerthen der Reibungscoefficienten nach den Coulombschen und nach den von Morin angestellten Versuchen ist in dem historischen Vorbericht bereits gedacht worden, so wie auch der Annahme, welche Morin zur Erklärung derselben macht, daß nämlich die von Coulomb bei seinen Versuchen gebrachten Arbeiter wahrscheinlich Körper mit einem geringen Grad von Fettigkeit angewendet haben, um mittelst derselben die Holzflächen abzureiben und zu poliren. In dieser Vermuthung sieht Morin sich noch mehr bestärkt durch gewisse Versuche, die er anstellte, um die Reibung des Leders und des Eisens auf Eichenholz zu ermitteln. Das Leder hatte nämlich keine andere als die natürliche, durch das Gerben erzeugte Fettigkeit; indem dasselbe aber unter dem Druck des Schlittens über die eisernen, mit Schachtelhalm geschliffenen Schienen fortgezogen wurde, nahmen letztere einen bedeutend erhöhten Grad von Politur und Glanz an, wobei ihre Farbe etwas dunkler wurde, als an den Seitenflächen, die mit dem Leder nicht in Berührung kamen. — Ohne an diesem Zustande der Schienen irgend etwas zu ändern, wurden nun gleich hinterher mehrere Versuche über die Reibung des Eisens gemacht, wobei sich eine große Regelmäßigkeit in der Bewegung des Schlittens, und ein unveränderlicher Werth der Reibung zeigte. Der Reibungscoefficient ergab sich nämlich übereinstimmend = 0,08, welches mit der Coulombschen Angabe ziemlich nahe zusammentrifft. Nach einigen Tagen wurde der Versuch wiederholt, nachdem in der Zwischenzeit die Oberfläche der eichenen Schienen behufs der Reinigung abgeschabt, und mit Schachtelhalm war polirt worden. Allein sofort wuchs die Reibung auf 0,6 des Drucks an, welchen Werth sie auch bei allen ferneren Versuchen unverändert beibehielt.

Geht nun aus diesen Beobachtungen unzweideutig hervor, daß der geringste Grad von Fettigkeit, oder ein bloßes Abreiben der Holzflächen mit einer fetthaltigen Substanz den Widerstand so bedeutend zu vermindern im Stande ist, so würden allerdings die erwähnten Abweichungen der Morinschen Resultate von den der Coulombschen Versuche durch die Annahme, daß letzterer sich über die wahre Beschaffenheit der Berührungsflächen getäuscht habe, wenigstens für die Reibung von Holz auf Holz hinreichend erklärt sein. In wie fern die Coulombsche Abhandlung zu einer solchen Annahme berechtigt, muß hier dahin gestellt bleiben; indessen darf nicht außer Acht gelassen werden, daß Coulomb ausdrücklich sagt, die Holzflächen seien erst durch Bearbeitung mit dem Schlichthobel und durch Abreiben mit einem Seehundsfell gehörig geglättet worden, und dann habe man noch vor jedem neuen Versuche den höchstmöglichen Grad der Politur dadurch hervorgebracht, daß man den belasteten Schlitten einige zwanzig mal über die Unterlage hin und her gezogen habe. Morin hat dagegen die Oberflächen der zu den Ver-

suchen bestimmten Eichenholzschienen mit der größten Sorgfalt zurechten lassen, so daß sie genau zusammenpaßten, und nächstdem ließ er sie mit Schachtelhalm sehr sorgfältig abreiben und glätten. Außerdem wurden sie vor jedem Versuche gebürstet, und mit einem weichen, trocknen Linnenuche abgewischt, um jeden Staub zu entfernen. Allein ungeachtet aller dieser Vorsichtsmaßregeln war es weder bei großen noch bei kleinen Flächen, und eben so wenig bei großen wie bei kleinen Belastungen möglich, auf die von Coulomb angegebene Weise die Politur des Holzes zu erhöhen. Ja selbst die erste Politur, welche durch das Abreiben mit Schachtelhalm war hervorgebracht worden, konnte nicht einmal unverändert erhalten werden, indem sich hier jene charakteristische Aenderung in der Beschaffenheit der Berührungsflächen durch die Bildung vortretender Wärzchen oder Körner von brauner Farbe zeigte, von welcher schon früher die Rede gewesen ist.

Diese harten, fest am Holze adhärirenden Wärzchen inkrustirten sich darauf, und rissen Furchen von 1 bis 2 Millim. Tiefe in die Schienen, wodurch der Widerstand beträchtlich vergrößert wurde. Sie zeigten sich auf den reibenden Leisten in größerer Anzahl als auf den Bahnschienen, wo sie über die ganze Länge unregelmäßig vertheilt waren, während sie auf den Leisten sich hauptsächlich vorn und hinten ansammelten. Ihre Anzahl und Größe schien übrigens, obgleich unter den stärkeren Pressungen etwas größer als unter den geringeren, mit dem absoluten Betrage der Reibung nicht im Verhältniß zu stehen. Ein einziger Lauf des Schlittens war zur Bildung derselben und zur vollständigen Aenderung der Politur hinreichend, und jedesmal, wenn der Schlitten mit seiner Belastung wieder zurückgezogen wurde, vermehrte sich ihre Anzahl und Größe dergestalt, daß es beim nächstfolgenden Versuche nicht möglich gewesen sein würde, ohne vorherige Entfernung derselben brauchbare Resultate zu erhalten.

Diese Aenderung in dem Zustande der Berührungsflächen hat Morin bei allen Körpern beobachtet, die er ohne Schmiere über Holz gleiten ließ, während Coulomb durchaus nichts dem Aehnliches anführt. Da nun der geringste Grad der Fettigkeit nicht bloß die Entstehung jener Wärzchen gänzlich verhinderte, sondern sogar veranlaßte, daß die Berührungsflächen nach wiederholten Versuchen einen Grad der Politur annahmen, der bis dahin noch nicht zu erreichen gewesen war, so glaubt Morin, es um so mehr als eine unzweifelhafte Thatsache hinstellen zu dürfen, daß Coulomb sich in Bezug auf den Zustand der Berührungsflächen seiner Hölzer getäuscht habe, indem er dieselben als ganz trocken vorausgesetzt, während sie im Gegentheil mit einem, wenn auch noch so geringen Fettüberzuge versehen waren.

Tafel II. Versuche über die Reibung der Metalle, des Leders und des Hanfes auf Eichenholz, ohne Schmiere, mit Ausnahme der 19. und 20. Versuchsreihe, wo die reibenden Körper mit Wasser benetzt waren.

13. Verf. N. Schmiedeeisen (=). Reibung der Bewegung.					15. Verf. N. Schwarz zugerichtetes Leder (=). Reibung der Bewegung.					Fortsetzung der 17. Verf. Reihe.								
Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q}$ = μ .	Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q}$ = μ .	Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q}$ = μ .				
	Kilogr.	Kilogr.	Meter.			Kilogr.	Kilogr.	Meter.			Kilogr.	Kilogr.	Meter					
Reibgöfl. = 0,0502 □ M.					Auf der Narbseite. Reibgöfl. = 0,0518 □ M.					b) Hochkantig gestellt. Reibgöfl. = 0,0077 □ M.								
1	283,41	183,59	langsam	0,647	24	151,19	39,34	1,79	0,26	40	115,16	38,17	2,59	0,33				
2	283,41	180,32		0,636	25	186,73	54,45	0,94	0,29	41	186,97	65,21	2,38	0,35				
3	283,41	185,73		0,654	26	234,99	58,27	langsam	0,25	42	180,78	59,49	3,78	0,32				
4	701,24	411,60	langsam	0,590	27	420,55	114,97	1,37	0,27	43	396,78	138,35	2,13	0,34				
5	701,24	390,95		0,564	Reibgöfl. = 0,0145 □ M.					Mittel = 0,335								
6	701,24	432,66		0,610	28	230,69	58,33	langsam	0,25	18. Verf. N. Rindsleder (=); in Scheiben zur Kolbenliederung. Reibung der Ruhe.								
7	701,24	412,75		0,588	29	420,17	117,65	1,26	0,28	a) Flach aufliegend. Reibgöfl. = 0,0588 □ M.								
8	703,41	439,14		0,624	Auf der Fleischseite. Reibgöfl. = 0,0518 □ M.					44					114,00	63,90	—	0,56
9	703,41	434,39	langsam	0,618	30	234,24	58,33	langsam	0,25	45	114,00	66,98	—	0,59				
10	703,41	434,39	langsam	0,618	31	234,24	63,98	desgl.	0,27	46	347,63	217,78	—	0,63				
Reibgöfl. = 0,0115 □ M.					Mittel = 0,265					Mittel = 0,593								
11	283,41	160,79	langsam	0,567	16. Verf. N. Schwarz zugerichtetes Leder (=). Reibung der Ruhe.					b) Hochkantig gestellt. Reibgöfl. = 0,0077 □ M.								
12	283,41	167,96		0,593	32	114,92	86,61	—	0,75	47	115,16	46,78	—	0,41				
Mittel = 0,609					33	234,99	156,31	—	0,67	48	186,97	81,10	—	0,43				
14. Verf. Reihe. Messing (=). Reibung der Bewegung.					34	111,25	86,61	—	0,77	49	396,78	183,59	—	0,46				
Reibgöfl. = 0,0403 □ M.					35	230,69	179,55	—	0,77	Mittel = 0,433								
13	116,59	69,55	langsam	0,60	Mittel = 0,74					19. Verf. N. Rindsleder (=); vollständig mit Wasser getränkt und wie bei der Kolbenliederung auf der hohen Kante gestellt. Reibungsf. = 0,0077 □ M.								
14	116,59	69,62	desgl.	0,60	17. Verf. N. Rindsleder (=); in Scheiben zur Kolbenliederung. Reibung der Bewegung.					a) Reibg. d. Bewegung.								
15	698,22	422,99	desgl.	0,60	Reibgöfl. = 0,0588 □ M.					50					115,16	31,78	2,29	0,28
16	698,22	456,95	desgl.	0,65	36	114,00	59,11	1,32	0,52	51	216,78	71,37	2,05	0,32				
17	698,22	438,48	2,28	0,62	37	114,00	62,54	2,44	0,54	52	408,78	124,79	2,40	0,30				
18	902,22	572,49	0,93	0,63	38	347,63	183,59	langsam	0,52	53	408,78	107,98	2,07	0,26				
Reibgöfl. = 0,0131 □ M.					39	347,63	166,75	2,70	0,48	Mittel = 0,290								
19	112,59	69,66	unsicher	0,61	Mittel = 0,515					b) Reibung der Ruhe.								
20	112,67	71,45		0,63	19. Verf. N. Rindsleder (=); vollständig mit Wasser getränkt und wie bei der Kolbenliederung auf der hohen Kante gestellt. Reibungsf. = 0,0077 □ M.					54					115,16	96,73	—	0,84
21	346,40	209,93		0,61	50					115,16	31,78	2,29	0,28	55	408,78	314,50	—	0,76
22	694,30	422,99	unsicher	0,61	51					216,78	71,37	2,05	0,32	56	408,78	319,67	—	0,78
23	694,30	440,60	2,29	0,63	Mittel = 0,617					Mittel = 0,793								

20. Vers.-R. Eichenholz (+).
Ganz mit Wasser benetzt.
Reibungsfl. = 0,088 □M.

Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q}$ = μ .
	Kiloar.	Kiloar.	Meter.	
a) Reibg. d. Bewegung.				
57	118,45	28,69	2,50	0,24
58	190,26	43,70	1,83	0,23
59	400,07	98,48	1,78	0,25
60	796,07	222,82	1,28	0,27
Mittel = 0,248				
b) Reibung der Ruhe.				
61	190,26	133,44	—	0,70
62	400,07	277,74	—	0,69
63	796,07	590,36	—	0,74
Mittel = 0,710				
21. Vers.-R. Hansgurte (=). Reibungsfl. = 0,0776 □M.				
a) Reibg. d. Bewegung.				
64	114,81	58,23	gleichf.	0,51
65	114,81	60,07	3,54	0,52
66	419,96	220,40	2,14	0,52
Mittel = 0,517				

Fortsetzung der 21. Vers.-Reihe.

Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q}$ = μ .
	Kiloar.	Kiloar.	Meter.	
b) Reibung der Ruhe.				
67	114,81	69,52	—	0,61
68	114,81	80,79	—	0,70
69	419,96	275,36	—	0,66
70	660,44	396,70	—	0,60
Mittel = 0,642				

22. Vers.-Reihe. Flechten aus
dünnen Seilen (=).
Reibungsfl. = 0,0172 □M.

Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q}$ = μ .
	Kiloar.	Kiloar.	Meter.	
a) Reibg. d. Bewegung.				
71	108,52	42,41	2,00	0,32
72	300,88	105,29	2,07	0,31
73	601,30	199,73	2,07	0,33
74	1201,30	356,63	0,99	0,31
Mittel = 0,318				

Fortsetzung der 22. Vers.-Reihe.

Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q}$ = μ .
	Kiloar.	Kiloar.	Meter.	
b) Reibung der Ruhe.				
75	108,52	46,79	—	0,43
76	300,88	155,76	—	0,52
77	601,30	263,17	—	0,44
Mittel = 0,463				

23. Vers.-Reihe. Altes Seil.
0,04 M. im Durchmesser (=).
Reibungsfl. = 0,0025 □M.

Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q}$ = μ .
	Kiloar.	Kiloar.	Meter.	
a) Reibg. d. Bewegung.				
78	112,60	58,14	tangf.	0,52
79	112,80	62,77	1,42	0,55
80	406,45	203,66	1,53	0,50
Mittel = 0,523				
b) Reibung der Ruhe.				
81	112,80	92,91	—	0,82
82	406,45	312,25	—	0,77
Mittel = 0,795				

Die metallenen Lauffschienen, welche bei der 13ten und 14ten Versuchs-Reihe in Anwendung kamen, waren sehr genau zugerichtet, und vermittelst der Schlichtfeile mit Del polirt. Vor den Versuchen ließ man sie mehrere Mal über die eichenen Bahnschienen hin und hergleiten, wobei sich ihre Politur anfänglich zu erhöhen schien. Im Laufe der Versuche änderte sich diese Politur jedoch später, indem sich auf den Reibungsflächen der Metalle kleine, schwärzliche Körner bildeten, die ein metallisches Ansehn hatten, und nach der Richtung der Bewegung leichte Streifen einrissen. Die Oberfläche des Eichenholzes erhielt bei dieser wiederholten Reibung von dem Eisen einen schwärzlichen, metallischen, von dem Messing aber einen kupferfarbigen Ton, von scheinbar hübscher Politur.

Bei allen Versuchen der beiden genannten Versuchs-Reihen fand Morin, daß der belastete Schlitten, sobald der absteigende Kasten die zur Ueberwindung der Reibung während der Bewegung erforderlichen Gewichte enthielt, sich jedesmal von selbst in Bewegung setzte, ohne dazu der Einwirkung des Winkelhebels oder selbst nur einer leichten Erschütterung zu bedürfen. Morin schließt hieraus, daß die Reibung der Bewegung dieselbe ist, wie nach einer längeren Ruhezeit, und schreibt dies dem Umstande zu, daß bei der verschiedenartigen Beschaffenheit der Metalle und des Holzes kein solches Zueinanderfügen der Fasern stattfinden kann, wie dies bei zwei aufeinander gepreßten Holzflächen offenbar der Fall ist.

Weitläufig wird noch bemerkt, daß die Reibung der Metalle auf Eichenholz größer ist, als die von Eichenholz auf Eichenholz; so wie auch, daß die Reibung von der Geschwindigkeit ganz unabhängig ist.

Bei der 17ten Versuchsreihe, über die Reibung des Rindsleders, bemerkt Morin, daß dieses Leder noch roh, rauh und ungleich war, so wie es aus den Händen des Verbers kam. Daher soll es denn auch kommen, daß dasselbe flach liegend eine größere Reibung gab, als auf die hohe Kante gestellt. Die Ergebnisse der 19ten und 20ten Versuchsreihe geben zu der Bemerkung Anlaß, daß sowohl beim Leder wie beim Holze die Reibung der Ruhe durch eine Bewegung dieser Körper mit Wasser vergrößert wird, während die Reibung der Bewegung sich dadurch vermindert. Uebrigens fand bei allen in vorstehender Tabelle enthaltenen Substanzen, mit Ausnahme des schwarz zugerichteten Leders, die mehrmals erwähnte Aenderung der Politur statt.

Tafel III. Versuche über die Reibung der Bewegung verschiedener Substanzen auf Eichenholz mit Schmiere.

Anmerk. Die Zeichen (=) und (+) haben die früher angegebene Bedeutung. (+) bedeutet, daß Hirnholz über Langholz nach der Richtung der Fasern des letztern gleitete.

24. Vers.-N. Eichenholz (=).
a) Mit trockner Seife eingerieben.

Nr.	Q. Kilogr.	F. Kilogr.	Geschw. nach 3 M. Meter.	$\frac{F}{Q}$ = μ .
	Reibfl. = 0,126 □M.			
1	198,10	36,18	1,57	0,182
2	318,10	51,90	langf.	0,163
3	318,10	61,67	1,67	0,192
4	498,10	75,67	1,33	0,152
5	491,91	83,39	3,27	0,169
6	1031,91	36,29	1,44	0,162
7	1031,91	179,86	2,73	0,172
	Reibfl. = 0,0026 □M.			
8	98,23	18,08	1,73	0,162
9	146,23	23,00	langf.	0,158
10	266,23	38,44	"	0,144
11	266,23	39,80	1,39	0,150
	Mittel = 0,164			
	b) Mit Talg geschm. Reibfl. = 0,126 □M.			
12	125,09	9,77	0,83	0,078
13	198,10	14,78	2,18	0,074
14	198,10	11,82	1,67	0,060
15	798,10	46,43	1,46	0,058

Fortsetzung der 24. Vers.-Reihe.

Nr.	Q. Kilogr.	F. Kilogr.	Geschw. nach 3 M. Meter.	$\frac{F}{Q}$ = μ .
16	798,10	49,57	1,12	0,062
17	791,10	50,73	1,83	0,064
18	1199,91	77,21	1,29	0,063
	Reibfl. = 0,0026 □M.			
19	301,28	21,39	1,09	0,070
	Mittel = 0,075			
	e) Mit Schweinefett. Reibfl. = 0,0026 □M.			
20	302,28	20,21	1,16	0,066
21	296,04	20,52	1,53	0,069
	Mittel = 0,067			
	d) Bloß fettige Fläche. Reibfl. = 0,126 □M.			
22	791,91	81,57	2,70	0,101
23	1199,91	135,50	1,03	0,114
24	1199,91	149,79	1,50	0,125
25	200,04	23,85	1,58	0,119
26	200,13	19,58	0,98	0,097
27	302,23	28,60	0,96	0,094
	Mittel = 0,108			

25. Vers.-N. Eichenholz (+).
Reibungsfläche = 0,0115 □M.

Nr.	Q. Kilogr.	F. Kilogr.	Geschw. nach 3 M. Meter.	$\frac{F}{Q}$ = μ .
	a) Ohne Schmiere.			
28	40,15	14,04	2,09	0,349
29	70,52	22,79	2,64	0,323
30	70,52	22,79	2,64	0,323
31	118,48	40,96	2,24	0,345
32	118,48	40,16	1,96	0,339
33	166,69	54,37	2,20	0,326
	Mittel = 0,336			
	Reibfl. = 0,088 □M.			
	b) Mit Talg geschm.			
34	493,15	43,37	1,94	0,087
35	493,15	39,94	2,70	0,079
	Mittel = 0,083			
	e) Mit Schweinefett.			
36	493,15	31,54	1,25	0,064
37	493,15	36,69	1,75	0,080
	Mittel = 0,072			
	d) Mit bloß fett. Oberfl.			
38	193,81	30,60	1,98	0,158
39	493,82	63,84	1,97	0,129
	Mittel = 0,143			

26. Verf.-N. Eichenhirnh. (L).

Reibungsfläche = 0,059 □M.

Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	F Q
	Kilogr.	Kilogr.	Meter.	= μ.
Ohne Schmiere.				
40	118,49	23,91	2,76	0,202
41	191,50	32,13	1,88	0,167
42	293,50	36,26	1,42	0,151
43	431,50	80,85	1,96	0,187
44	185,31	43,04	3,61	0,232
45	425,31	90,22	1,70	0,212
Mittel = 0,192				

27. Verf.-N. Buchenholz (=).

Reibungsfläche = 0,0902 □M.

a) Mit Talg geschm.				
46	501,68	29,07	1,32	0,058
47	501,68	26,26	2,09	0,052
Mittel = 0,055				
b) Bloß fettige Oberfl.				
48	189,49	25,66	1,50	0,135
49	189,49	30,62	2,28	0,161
Mittel = 0,148				

28. Verf.-N. Ulmenholz (=).

a) Mit trockner Seife eingerieben.

Reibungsfl. = 0,1243 □M.

50	318,04	39,71	langf.	0,124
51	318,04	44,87	1,28	0,141
52	771,85	143,69	langf.	0,147
53	971,85	113,79	3,45	0,117
Reib.fl. = 0,0059 □M.				
54	314,14	46,79	langf.	0,149
55	314,14	45,62	1,38	0,145
Mittel = 0,137				
b) Mit Talg geschm.				
Reib.fl. = 0,0059 □M.				
56	110,14	7,47	1,30	0,067
57	110,14	7,64	2,03	0,069
Reib.fl. = 0,1243 □M.				
58	971,85	69,59	langf.	0,071
59	971,85	74,30	1,27	0,076
Mittel = 0,072				

Fortsetzung der 28. Verf.-Reihe.

c) Mit Schweinefett geschmiert.

Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	F Q
	Kilogr.	Kilogr.	Meter.	= μ.
Reib.fl. = 0,1243 □M.				
60	498,04	29,91	1,79	0,060
61	791,65	42,46	1,00	0,053
62	791,65	44,42	2,03	0,056
Mittel = 0,056				
d) Mit bloß fett. Oberfl.				
Reib.fl. = 0,1243 □M.				
63	791,65	94,21	2,03	0,119
64	791,65	102,95	1,46	0,129
65	791,65	87,31	2,64	0,110
Mittel = 0,119				

29. V.-N. Starfes, gegerbtes
Rindsleder, flach liegend (=).

Ohne Schmiere.

Reibungsfläche = 0,588 □M.

66	109,94	31,75	2,21	0,289
67	229,94	64,51	1,74	0,280
68	229,94	77,20	2,16	0,320
Mittel = 0,296				

30. Verf.-N. Schmiedeeisen (=).

a) Mit Wasser benetzt.

Reibungsfläche = 0,0084 □M.

69	186,31	42,52	1,88	0,220
70	312,31	75,29	langf.	0,241
Reib.fl. = 0,052 □M.				
71	315,51	79,00	2,04	0,250
72	315,51	88,75	2,20	0,281
73	675,51	164,35	1,76	0,243
74	675,51	190,69	1,85	0,282
Mittel = 0,253				
b) Mit trockner Seife geschmiert.				
Reib.fl. = 0,052 □M.				
75	1035,51	239,19	langf.	0,231
76	249,70	46,78	"	0,190
77	249,70	54,09	0,97	0,216
78	1035,51	226,04	2,15	0,218
Mittel = 0,214				

Fortsetzung der 30. Verf.-Reihe.

Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	F Q
	Kilogr.	Kilogr.	Meter.	= μ.
c) Mit Talg geschm.				
Reib.fl. = 0,052 □M.				
79	128,69	11,21	langf.	0,087
80	128,69	11,24	2,06	0,087
81	128,69	13,82	1,79	0,107
82	128,69	10,60	2,73	0,082
83	128,69	14,03	2,63	0,109
84	501,51	36,20	1,00	0,072
85	501,51	40,70	1,37	0,081
86	501,51	36,34	1,83	0,072
87	1035,51	75,29	langf.	0,072
88	2001,51	165,48	"	0,083
89	2001,51	168,04	1,16	0,084
Mittel = 0,085				

31. Verf.-N. Gußeisen (=).

Reibungsfläche = 0,048 □M.

a) Ohne Schmiere.				
90	129,66	60,76	1,59	0,46
91	126,66	66,63	1,98	0,51
92	436,48	196,94	2,13	0,45
93	796,48	409,99	1,64	0,51
94	796,48	398,60	1,88	0,50
95	796,48	397,75	2,29	0,50
Mittel = 0,49				
b) Mit Seife geschm.				
96	129,66	28,85	2,23	0,222
97	202,67	40,23	1,20	0,198
98	250,24	46,79	langf.	0,187
99	250,24	40,37	1,16	0,161
100	442,67	81,23	langf.	0,183
101	442,67	81,23	1,90	0,183
102	436,48	75,33	3,05	0,172
103	1036,48	215,40	1,72	0,207
104	1036,48	183,45	2,74	0,177
105	1036,48	217,07	2,64	0,200
Mittel = 0,189				

Fortsetzung der 31. Vers.-Reihe.

Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	F Q
	Kilogr.	Kilogr.	Met.	= μ.
e) Mit Wasser benetzt.				
106	129,66	27,92	3,46	0,215
107	316,48	67,22	2,23	0,212
108	676,88	154,85	2,14	0,228
Mittel = 0,218				
d) Mit Talg geschmiert.				
109	502,67	38,21	0,96	0,076
110	502,67	33,90	1,92	0,069
111	1996,48	178,35	0,99	0,088
112	1996,48	161,27	1,72	0,080
Mittel = 0,078				
e) M. Schweinef. geschm.				
113	496,48	38,33	1,88	0,077
114	1000,67	69,59	langf.	0,069
115	1000,48	79,63	1,73	0,079
Mittel = 0,075				
f) Mit Del geschm.				
Reib. fl. = 0,0097 □M.				
116	122,43	9,48	1,73	0,076
117	236,24	21,03	1,44	0,089
118	236,24	23,63	2,02	0,100
119	248,43	19,76	langf.	0,079

Fortsetzung der 31. Vers.-Reihe.

Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	F Q
	Kilogr.	Kilogr.	Met.	= μ.
Reib. fl. = 0,048 □M.				
120	1042,67	73,30	langf.	0,072
121	1036,48	77,15	1,37	0,074
Mittel = 0,081				
g) Blos fettige Fläche.				
Reib. fl. = 0,097 □M.				
122	236,24	28,22	1,73	0,118
123	434,43	42,56	langf.	0,090
124	434,43	49,23	1,40	0,113
Mittel = 0,107				

32. Vers.-Reihe. Kupfer (=).

a) Mit Talg geschmiert.				
Reibungsfläche = 0,0403 □M.				
125	497,98	33,71	2,18	0,067
126	504,17	31,64	1,27	0,062
127	989,98	75,84	1,45	0,076
128	989,98	66,12	1,70	0,066

Fortsetzung der 32. Vers.-Reihe.

Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	F Q
	Kilogr.	Kilogr.	Met.	= μ.
Reib. fl. = 0,0131 □M.				
129	297,64	17,80	1,94	0,060
130	297,64	23,70	2,16	0,079
131	303,84	21,42	1,10	0,070
Mittel = 0,069				
b) Blos fettige Fläche.				
Reib. fl. = 0,0403 □M.				
132	497,98	50,72	1,37	0,102
133	504,17	46,7	langf.	0,099
Mittel = 0,100				

33. Vers.-Reihe. Hanfsirehen
Die Hanfsfasern senkrecht auf der
Richtung der Bewegung.
Reibungsfläche = 0,052 □M.;
mit Wasser benetzt.

134	146,25	46,920	2,70	0,320
135	140,06	48,450	1,67	0,345
Mittel = 0,332				

Bei den ersten elf Versuchen dieser Tabelle bediente sich Morin der blauen Seife (savon bleu) aus Marseille, von sehr harter und trockner Beschaffenheit, um die Berührungsflächen des Eichenholzes damit einzureiben. Nachdem dies geschehen, wurden sie abgewischt, und hiernach behielten sie nur noch einen so geringen Grad der Fettigkeit, daß ein Beobachter, ohne vorher davon unterrichtet zu sein, ihn nicht bemerkt haben würde. Dennoch reichte dies hin, den Werth der Reibung von 0,478 auf 0,164 herabzusetzen, welcher letztere Werth sich demjenigen sehr annähert, den die Coulombschen Versuche für die Reibung des trocknen Eichenholzes geben. Außerdem verhinderte jener geringe Grad von Fettigkeit die Bildung der schwärzlichen Wäzchen gänzlich, und die Politur der Flächen nahm zu, so daß also ganz die von Coulomb beschriebenen Umstände eintraten. Dasselbe gilt von den Versuchen Nr. 50 — 55, wo die reibenden Flächen ebenfalls mit trockner Seife eingerieben waren.

Die Versuche Nr. 28 — 33 (25. Vers.-R.) hatten zum Zweck, die früher unter denselben Umständen angestellten Versuche zu berichtigen, da bei diesen so große Belastungen in Anwendung gekommen waren, daß ein Losreißen der Holzfasern und eine anfangende Verkohlung statt gefunden hatte.

Bei der 26. Vers.=Reihe standen die Holzfasern der reibenden Leisten vertikal, während die der Bahnschienen horizontal lagen, und mit der Richtung der Bewegung parallel waren. Nach dem Gleiten zeigten sich auch hier einige Wärzchen aus zusammengeballtem Holzstaube, jedoch in geringerer Anzahl als für den Fall, wo die Fasern gleichlaufend oder kreuzweis auf einander lagen.

Das bei der 29. Vers.=Reihe gebrauchte Leder war dasselbe wie bei der 17. Vers.=Reihe; allein man hatte es vorher durch Schlagen wie Sohlleder geglättet, wonach sich die Reibung von 0,515 auf 0,296 verminderte, wenn das Leder flach liegend versucht wurde. Dieser letztere Werth weicht nur wenig von demjenigen ab, der in der II. Tabelle (Vers.=N. Nr. 40 — 43) für hochkantig gestellte Lederscheiben gefunden wurde, und Morin schließt daraus, daß in beiden Fällen einerlei Reibung stattfindet.

In Bezug auf die 30. Vers.=Reihe bemerkt Morin, daß die Reibung des Schmiedeeisens auf mit Wasser benetztem Eichenholze dieselbe ist, wie die des Eichenholzes auf benetztem Eichenholze. Die elf Versuche Nr. 79 bis 89 bestätigen das Gesetz, daß auch bei Anwendung von Talgschmiere die Reibung von der Geschwindigkeit ganz unabhängig ist. Coulomb findet bekanntlich ein ganz anderes Resultat (vergl. S. 49 und 50), indem nach seinen Versuchen die Reibung unter denselben Umständen sehr bedeutend mit der Geschwindigkeit zunahm; was jedoch von Morin als eine Anomalie bezeichnet wird, die von einer geringen Genauigkeit seiner Beobachtungsmethode herrühre. Ganz dasselbe gilt auch von der Reibung des Kupfers auf Eichenholz, die nach Ausweis der 32. Versuchsreihe sowohl von der Geschwindigkeit als auch von der Berührungsoberfläche ganz unabhängig gefunden wurde.

Bei der Reibung des Gußeisens auf Eichenholz, ohne Schmiere (31. Vers.=N.), bemerkte Morin wieder dieselben Aenderungen in dem Zustande der Berührungsoberflächen, von denen früher schon mehrmals die Rede gewesen ist. Die eichenen Bahnschienen schwärzten sich nämlich durch die Abnutzung des Metalles; letzteres verlor die durch die anfänglichen Operationen erlangte Politur, und seine Grundfläche bedeckte sich mit kleinen, schwärzlichen Körnern, welche aus nichts anderem, als sehr feinem Metallstaube zu bestehen schienen. — Die Versuche Nr. 96 — 195, mit trockner Seife, geben für die Reibung des Gußeisens fast denselben Werth, welcher für die Reibung des Schmiedeeisens gefunden wurde. Talg, Schweinefett und Del sollen nach Morin beim Gußeisen sehr nahe dieselbe Reibung geben, welche von der Größe der Berührungsoberfläche unabhängig ist. Indessen muß bemerkt werden, daß dieser Schluß wohl nur für die beiden erstgenannten Schmieren gültig sein kann, da der Mittelwerth der Versuche f, mit Delschmiere, von Morin irrig = 0,075 angegeben wird, während sich derselbe in der That = 0,081 herausstellt.

Die Versuche Nr. 134 und 135 finden Anwendung auf die Reibung der Pumpenkolben, die mit Hanf geliebert sind, und sich in Stiefeln aus Eichenholz bewegen; auch hier zeigte sich die Reibung als unabhängig von der Geschwindigkeit.

Tafel IV. Versuche über die Reibung der Bewegung verschiedener Substanzen auf Ulmenholz, mit geschmierten Berührungsflächen.

34. Vers.-R. Ulmenholz (=).
Reibungsfläche = 0,1243 □M.

Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	F Q
	Kiloogr.	Kiloogr.	Meter.	= μ.
a) Bloß fettige Oberfl.				
1	198,54	32,06	1,88	0,160
2	198,54	24,91	2,76	0,125
3	798,54	108,55	1,35	0,135
4	798,54	117,75	1,13	0,147
5	798,54	105,57	1,86	0,132
Mittel = 0,140				
b) Mit trockner Seife geschmiert.				
6	324,73	40,65	0,96	0,125
7	324,73	36,72	2,19	0,113
8	1002,54	177,11	2,20	0,176
9	1002,54	146,04	2,52	0,145
Mittel = 0,140				

35. Vers.-R. Eichenholz (=).

a) Ohne Schmiere.
Reibungsfläche linear.

Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	F Q
	Kiloogr.	Kiloogr.	Meter.	= μ.
10	194,04	51,02	1,71	0,263
11	200,43	51,12	1,95	0,255
Reib.fl. = 0,088 □M.				
12	201,26	59,40	2,10	0,295
13	201,26	41,47	2,71	0,206
14	795,07	173,55	1,78	0,218
Mittel = 0,247				
b) Mit Seife geschm. Reib.fl. = 0,088 □M.				
15	201,26	35,33	1,70	0,175
16	201,26	22,17	3,26	0,120
17	999,07	115,19	langf.	0,115
18	999,07	148,16	1,69	0,148
19	999,07	125,20	2,24	0,125
Mittel = 0,136				

Fortsetzung der 35. Vers.-Reihe.

Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	F Q
	Kiloogr.	Kiloogr.	Meter.	= μ.
e) Mit Talg geschm.				
20	498,10	33,14	1,18	0,066
21	491,91	36,72	1,84	0,074
22	991,91	23,43	1,94	0,068
23	995,91	72,09	1,05	0,072
24	995,91	86,14	1,73	0,086
Mittel = 0,073				
d) M. Schweinef. geschm.				
25	995,91	65,01	1,19	0,065
26	995,91	67,12	1,92	0,067
Mittel = 0,066				
e) Bloß fettige Oberfl. Reib.fl. = 0,126 □M.				
27	491,91	72,07	1,42	0,146
28	491,91	68,86	2,64	0,127
Mittel = 0,137				

36. Vers.-Reihe. Gußeisen (=).

a) Ohne Schmiere.

Reibungsfläche = 0,0097 □M.

Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	F Q
	Kiloogr.	Kiloogr.	Meter.	= μ.
29	200,24	38,34	1,39	0,191
30	200,24	40,23	1,99	0,191
31	398,24	73,32	1,49	0,184
32	398,24	81,74	1,95	0,205
Mittel = 0,193				
b) Mit Olivenöl geschm. Reib.fl. = 0,048 □M.				
33	500,93	28,00	1,41	0,056
34	500,93	38,01	1,79	0,077
Mittel = 0,066				
c) Mit Talg geschmiert.				
35	500,93	33,54	1,17	0,066
36	500,93	44,52	1,60	0,088
Mittel = 0,077				

Fortsetzung der 36. Vers.-Reihe.

Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	F Q
	Kiloogr.	Kiloogr.	Meter.	= μ.
d) Bloß fettige Oberfl.				
37	500,93	57,07	1,15	0,113
38	500,93	59,41	1,67	0,118
Mittel = 0,115				
e) Mit Schweinef. und Graphit geschmiert.				
39	500,93	37,97	0,95	0,075
40	500,93	46,80	1,49	0,093
41	500,93	53,81	1,80	0,107
Mittel = 0,092				
f) Bloß fettige Oberfl.				
42	500,93	64,34	0,83	0,128
43	500,93	73,20	langf.	0,146
Mittel = 0,137				

37. Vers.-R. Schmiedeeisen (=).

Reibungsfläche = 0,052 □M.

a) Ohne Schmiere.

Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	F Q
	Kiloogr.	Kiloogr.	Meter.	= μ.
44	208,39	58,71	1,48	0,282
45	208,39	63,62	1,83	0,303
46	1006,20	206,39	langf.	0,205
47	1006,20	229,21	1,02	0,229
48	1006,20	245,49	1,50	0,243
Mittel = 0,252				
b) Mit Talg geschm.				
49	507,96	33,81	1,14	0,066
50	507,96	39,49	1,74	0,079
51	508,39	37,16	1,00	0,073
52	508,39	41,92	2,21	0,083
53	994,20	97,67	1,40	0,097
54	994,20	80,56	2,16	0,081
Mittel = 0,078				
c) M. Schweinef. geschm.				
55	994,20	70,85	1,89	0,071
56	1000,39	80,99	langf.	0,080
Mittel = 0,076				
d) Mit Del geschmiert.				
57	507,96	26,16	1,46	0,050
58	507,96	31,45	1,96	0,061
Mittel = 0,055				
e) Bloß fettige Oberfl.				
59	502,20	70,04	1,26	0,137
60	502,20	77,36	1,54	0,154
61	508,39	63,18	1,50	0,124
Mittel = 0,138				

Nach der Angabe des Herrn Morin waren bei den ersten fünf Versuchen dieser Tabelle die hölzernen Bahnschienen bis dahin noch gar nicht mit Fett in Berührung gekommen; nur die reibenden Leisten des Schlittens hatten früher zu Versuchen mit Talgschmiere gedient, und obgleich man vorher etwa eine bis zwei Linien Holz hatte abnehmen lassen, schienen sie doch noch etwas fettig zu sein. Die folgenden vier Versuche, bei welchen die Berührungsflächen mit trockner Seife eingerieben waren, gaben denselben Reibungscoefficienten wie die vorhergehenden, woraus man sieht, wie leicht hier eine Täuschung in Bezug auf den Zustand der Berührungsfläche möglich gewesen wäre, wenn Morin die letzteren nicht unter seinen eigenen Augen hätte zurechten lassen. Vergleicht man den Mittelwerth der Versuche Nr. 10 bis 14 der 35ten Versuchsreihe mit demjenigen, den die Versuche Nr. 71 bis 73 der 7ten Versuchsreihe (Tafel I.) geben, so erhellet, daß die Reibung von Eichen auf Ulmenholz viel geringer ist, als von Ulmen auf Eichenholz. Sind aber in beiden Fällen die Holzflächen mit trockner Seife eingerieben, so ergibt sich die Reibung beinahe als gleich groß. Ueberdies folgt aus der Vergleichung der unter b und c aufgeführten Versuche der 35ten Versuchsreihe, daß ein bloßes Abreiben der Holzflächen mit trockner Seife denselben Zustand der Fettigkeit herbeiführt, als wenn sie vollständig mit Schweinesfett geschmiert und dann rein abgewischt werden.

Ferner bemerkt Morin, daß der Talg und das Schweinesfett, nach Ausweis der 35ten, 36ten und 37ten Versuchsreihe, fast einerlei Reibung geben, welches um so bemerkenswerther ist, als Morin dasselbe Resultat gefunden hat, sowohl für Schmiedeeisen, Gußeisen, Kupfer und Eichenholz auf Ulmenholz, als auch, wenn diese Körper auf Eichenholz nach der Richtung der Fasern gleiten.

Tafel V. Versuche über die Reibung der Bewegung verschiedener Substanzen auf Gußeisen, mit geschmierten Berührungsflächen.

38. Verf. = N. Eichenholz (=).					39. Verf. = N. Ulmenholz (=).					Fortsetzung der 40. Verf. = Reihe.				
a) Ohne Schmiere.					a) Mit Talg geschmiert.									
Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q} = \mu$.	Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q} = \mu$.	Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q} = \mu$.
	Kiloar.	Kilogr.	Meter.			Kilogr.	Kilogr.	Meter.			Kilogr.	Kilogr.	Meter.	
Reib. fl. = 0,0096 □ M.					Reib. fl. = 0,124 □ M.					Reib. fl. = 0,0336 □ M.				
1	507,86	179,61	0,57	0,352	6	1000,11	62,88	langf.	0,062	11	210,91	72,22	3,24	0,342
2	507,86	199,28	2,01	0,392	7	1000,11	71,40	2,20	0,071	12	210,91	87,76	2,73	0,416
Mittel = 0,372					Mittel = 0,066					Mittel = 0,394				
b) Bloß fettige Oberfl.					b) Mit bloß fettig. Oberfl.					b) Mit Talg geschm.				
Reib. fl. = 0,088 □ M.					Reib. fl. = 0,0096 □ M.					Reib. fl. = 0,0096 □ M.				
3	1002,66	170,98	0,79	0,175	8	1000,11	135,06	1,55	0,135	15	131,62	7,36	1,21	0,056
4	1002,66	162,80	1,77	0,162	40. V. = N. Weißbuchenholz (=).					16	261,40	20,15	1,27	0,076
Mittel = 0,168					a) Ohne Schmiere.					17	501,43	28,01	langf.	0,055
					Reibungsfläche = 0,0096 □ M.					18	501,43	36,06	1,00	0,071
					9	207,24	80,42	2,50	0,388	19	501,43	40,78	1,67	0,081
					10	213,43	79,48	1,49	0,372					

Fortsetzung der 40. Vers.-Reihe.

Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q}$ = μ .
	Kilogr.	Kilogr.	Meter.	

Reibfl. = 0,0336 □M.				
20	504,91	42,70	0,93	0,077
21	504,91	42,75	1,62	0,078
22	504,91	35,61	2,18	0,070

Mittel = 0,070

e) Mit Schweinefett. Reibfl. = 0,0096 □M.				
23	261,43	18,80	0,98	0,072
24	501,43	37,08	1,78	0,074
25	501,43	37,20	0,95	0,074

Mittel = 0,073

d) Mit Schweinefett u. Graphit geschmiert.				
26	213,43	12,05	1,61	0,056
27	261,43	14,14	2,18	0,054
28	261,43	14,38	1,96	0,055
29	261,43	17,45	1,80	0,066

Mittel = 0,058

e) Mit Del geschmiert.				
30	261,43	19,84	1,67	0,075
31	501,43	30,63	1,25	0,068
32	501,43	29,87	1,70	0,060
33	501,43	35,04	1,48	0,069

Mittel = 0,068

f) Mit Bergtheer. (Goudron minéral.)				
34	261,43	16,54	1,08	0,06
35	261,43	14,90	2,20	0,057
36	501,34	31,72	1,60	0,063

Mittel = 0,061

g) Mit Wagenschmiere. (Cambouis.)				
37	501,43	47,94	0,96	0,095
38	501,43	59,58	1,42	0,095

Mittel = 0,095

h) Bloss fettige Oberfl.				
39	501,43	69,58	0,99	0,138
40	501,43	67,81	1,03	0,135

Mittel = 0,136

41. Vers.-N. Guajacholz.
Reibungsfläche = 0,0273 □M.

Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q}$ = μ .
	Kilogr.	Kilogr.	Meter.	

a) Mit Talg.				
41	997,98	73,85	0,95	0,074

b) Mit Del.				
42	997,98	73,51	0,99	0,073
43	997,98	83,78	1,26	0,083
44	997,98	73,53	1,43	0,073

Mittel = 0,076

c) Bloss fettige Oberfl.				
45	493,98	63,33	0,80	0,128
46	493,98	64,83	0,58	0,131
47	493,98	49,63	2,03	0,100
48	493,98	62,59	2,21	0,126

Mittel = 0,121

42. Vers.-Reihe. Wilder Birn-
baum (=).

Reibungsfläche = 0,0328 □M.

a) Ohne Schmiere.				
49	211,04	88,84	2,17	0,421
50	211,04	100,04	2,50	0,471
51	439,04	192,26	1,79	0,437
52	439,90	183,43	2,00	0,417

Mittel = 0,436

b) Mit Talg geschm.				
53	505,23	24,54	1,46	0,050
54	505,23	41,12	1,62	0,080
55	505,23	36,12	1,80	0,071

Mittel = 0,067

c) Mit Schweinefett.				
56	505,23	27,10	1,37	0,053
57	505,23	35,06	1,83	0,069
58	505,23	42,30	1,71	0,083

Mittel = 0,068

d) Bloss fettige Oberfl.				
59	505,23	81,44	0,96	0,160
60	505,23	95,03	1,28	0,188
61	505,23	85,62	1,72	0,170

Mittel = 0,173

43. Vers.-N. Starkes gegerb-
tes Rindsleder, flachliegend.
Reibungsfläche = 0,0386 □M.

Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q}$ = μ .
	Kilogr.	Kilogr.	Meter.	

a) Ohne Schmiere.				
62	213,57	123,67	1,53	0,579
63	501,57	274,79	langf.	0,540

Mittel = 0,559

b) Mit Wasser benetzt.				
64	131,95	53,79	2,70	0,407
65	131,95	45,18	2,64	0,342
66	131,95	45,11	1,98	0,342
67	505,57	184,59	3,87	0,369

Mittel = 0,365

c) Mit Talg geschmiert.				
68	505,15	74,00	1,38	0,146
69	505,15	78,16	1,18	0,154
70	505,15	87,25	2,16	0,172
71	505,15	82,97	2,76	0,164

Mittel = 0,159

d) Mit Del geschmiert.				
72	135,34	16,91	langf.	0,124
73	135,34	19,28	2,58	0,142
74	505,15	63,87	langf.	0,126
75	505,15	71,61	1,40	0,141

Mittel = 0,133

e) Bloss fettige Oberfl.				
76	505,15	117,92	1,42	0,233
77	217,15	49,27	1,42	0,226

Mittel = 0,229

44. Vers.-N. Gegerbtes Rinds-
leder, auf der hohen Kante.
Reibungsfläche = 0,0042 □M.

a) Mit Wasser benetzt.				
78	136,50	33,47	2,03	0,245
79	136,50	34,32	2,64	0,245
80	270,30	61,51	1,82	0,226

Mittel = 0,238

Fortsetzung der 44. Verf.-Reihe.

Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q}$ = μ .
	Kiloogr.	Kiloogr.	Meter.	
b) Mit Del geschmiert.				
81	217,15	28,71	1,98	0,132
82	500,31	63,88	langf.	0,127
83	500,31	73,52	1,33	0,146
Mittel = 0,135				

45. Verf.-Reihe. Gußeisen.
Reibungsfläche = 0,036 □M.

a) Ohne Schmiere.				
84	224,94	29,24	1,94	0,130
85	224,94	27,56	2,50	0,122
86	494,74	95,74	1,98	0,193
87	494,74	71,27	3,10	0,144
88	500,93	75,29	langf.	0,150
89	2000,74	309,11	0,99	0,154
90	2000,74	355,27	1,06	0,177
91	2000,74	323,26	1,77	0,161
Mittel = 0,152				

b) Mit Wasser benetzt.				
92	500,74	141,61	1,71	0,282
93	500,74	147,18	2,22	0,293
94	998,74	331,79	langf.	0,332
95	998,74	335,21	1,38	0,335
Mittel = 0,314				

c) Mit Seife geschmiert.				
96	494,74	86,69	langf.	0,175
97	494,74	104,77	1,73	0,211
98	494,74	101,78	2,16	0,205
Mittel = 0,197				

d) Mit Talg geschmiert.				
99	224,94	22,61	langf.	0,100
100	224,94	22,85	1,39	0,101
101	500,31	46,78	langf.	0,093
102	500,31	51,98	1,88	0,103
103	500,31	53,42	1,97	0,106
104	1004,31	95,81	1,28	0,095
105	1004,31	110,34	0,94	0,109
106	1004,31	110,04	1,92	0,109
107	2804,74	269,09	langf.	0,096
108	502,45	46,78	"	0,093
Mittel = 0,100				

Fortsetzung der 45. Verf.-Reihe.

Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q}$ = μ .
	Kiloogr.	Kiloogr.	Meter.	
e) Mit Schweinefett.				
109	500,31	38,37	1,38	0,076
110	500,31	36,02	1,44	0,071
111	500,31	32,72	1,71	0,065
112	500,31	32,89	1,70	0,066
113	500,31	38,91	1,44	0,077
114	500,31	32,44	1,68	0,064
115	500,31	32,97	1,66	0,065
116	500,31	32,44	1,68	0,064
117	500,31	36,57	2,17	0,073
118	500,31	33,07	2,22	0,066
119	500,31	38,85	2,08	0,077
Mittel = 0,070				

f) Mit Del geschmiert.				
120	224,93	15,78	2,01	0,070
121	224,93	14,07	2,71	0,063
122	224,93	15,60	2,74	0,069
123	2804,74	161,59	1,44	0,058
124	2804,74	174,54	1,64	0,062
Mittel = 0,064				

g) Bloß fettige Oberfl.				
Reib.fl. = 0,0036 □M.				
125	224,93	30,57	1,77	0,136
126	224,93	32,70	2,20	0,145
127	224,93	34,25	2,16	0,152
Mittel = 0,144				

h) Schweinefett und Graphit.				
Reib.fl. = 0,0052 □M.				
128	508,45	26,43	1,70	0,052
129	508,45	29,29	1,73	0,057
Mittel = 0,055				

46. Verf.-Reihe. Gußeisen.
Mit Schweinefett geschmiert.
Reibungsfläche = 0,036 □M.

a) Bei gleichf. Bewegung.				
130	500,31	33,92	1,050	0,068
131	500,31	33,92	1,020	0,068
132	500,31	35,82	0,532	0,071
133	500,31	35,82	0,940	0,071
134	500,31	35,82	0,830	0,071
135	500,31	37,72	1,170	0,075
Mittel = 0,070				

Fortsetzung der 46. Verf.-Reihe.

Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q}$ = μ .
	Kiloogr.	Kiloogr.	Meter.	
b) Bei verzögerter Bew.				
136	500,31	36,70	—	0,073
137	500,31	36,22	—	0,072
138	500,31	38,75	—	0,077
139	500,31	32,00	—	0,064
140	500,31	34,07	—	0,068
141	500,31	37,31	—	0,074
Mittel = 0,071				

47. Verf.-R. Schmiedeeisen.
Reibungsfläche = 0,0319 □M.

a) Ohne Schmiere.				
142	217,77	38,55	1,35	0,179
143	217,77	40,99	2,24	0,188
144	505,77	111,84	2,08	0,221
145	499,28	89,86	0,80	0,180
146	499,28	92,78	1,44	0,185
147	499,28	101,66	1,16	0,203
148	499,28	91,17	2,08	0,182
149	1003,28	183,59	langf.	0,182
150	1003,28	208,53	1,05	0,207
151	1003,28	207,24	1,78	0,207
152	2005,28	365,99	langf.	0,182
153	2005,28	416,14	0,97	0,207
Mittel = 0,194				

b) Mit Talg geschmiert.				
Reib.fl. = 0,0062 □M.				
154	131,85	13,43	0,96	0,101
155	131,85	15,02	1,66	0,121
156	131,85	11,99	1,97	0,091
157	213,66	24,51	langf.	0,114
158	213,66	19,38	1,84	0,090
159	213,66	23,46	1,56	0,109
160	213,66	27,42	1,99	0,128
Reib.fl. = 0,0319 □M.				
161	499,96	56,81	langf.	0,114
162	499,96	45,03	2,17	0,090
163	499,96	57,63	1,82	0,115
164	2803,77	230,01	0,59	0,082
165	2803,77	229,86	1,76	0,082
Mittel = 0,103				

Fortsetzung der 47. Vers.-Reihe.

Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q}$ = μ .
	Kilogr.	Kilogr.	Meter.	
c) Mit Schweinefett geschmiert.				
Reib. fl. = 0,0319 □M.				
166	499,96	35,10	1,45	0,072
167	2803,77	200,03	1,09	0,071
168	2803,77	241,35	1,42	0,086
Mittel = 0,076				
d) Mit Olivenöl geschm.				
Reib. fl. = 0,0319 □M.				
169	601,28	45,27	1,63	0,075
170	601,28	41,73	2,10	0,069
171	601,28	46,78	langf.	0,077
172	1201,28	82,82	1,44	0,069
173	1201,28	79,83	1,50	0,066
174	1201,28	84,24	1,47	0,070
175	1201,28	76,31	1,60	0,063
176	1201,28	82,03	1,76	0,068
Mittel = 0,066				
Reibungsfläche linear.				
177	195,18	27,02	1,60	0,139
178	195,18	28,93	1,44	0,148
179	399,18	52,26	0,96	0,131
180	399,18	50,96	1,10	0,128
Mittel = 0,138				
e) Mit Wagenschmiere.				
Reib. fl. = 0,0062 □M.				
181	501,76	59,34	2,17	0,118
182	501,76	69,04	1,48	0,137
Reib. fl. = 0,0319 □M.				
183	1999,79	236,79	1,54	0,118
Mittel = 0,124				

48. Vers.-Reihe. Stahl.

Reibungsfläche = 0,0336 □M.

a) Ohne Schmiere.				
184	220,80	43,04	0,96	0,194
185	220,80	45,40	2,19	0,205
186	502,61	107,78	2,52	0,214
187	508,80	99,94	1,55	0,196
Mittel = 0,202				

Fortsetzung der 48. Vers.-Reihe.

Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q}$ = μ .
	Kilogr.	Kilogr.	Meter.	
b) Mit Talg.				
188	220,80	22,61	langf.	124
189	220,80	22,26	1,17	0,101
190	220,80	28,64	1,57	0,129
191	2800,61	253,39	1,12	0,090
192	2800,61	232,69	1,57	0,083
Mittel = 0,105				
c) Mit Schweinefett.				
193	2800,61	222,80	1,35	0,080
194	2800,61	232,69	1,57	0,083
Mittel = 0,081				
d) Mit Del geschmiert.				
195	220,80	19,18	2,17	0,086
196	2800,61	202,41	1,46	0,072
Mittel = 0,079				
e) Bloß fettige Oberfl.				
197	220,80	27,44	1,18	0,124
198	220,80	21,11	2,18	0,095
199	2800,61	32,04	langf.	0,114
200	2800,61	274,09	1,30	0,096
Mittel = 0,109				

49. Vers.-Reihe. Messing.

a) Ohne Schmiere.

Reib. fl. = 0,0285 □M.				
201	213,35	45,06	2,22	0,211
Reib. fl. = 0,0072 □M.				
202	215,86	36,79	1,45	0,165
203	215,86	37,37	1,40	0,177
204	215,86	45,45	2,21	0,210
205	503,86	92,39	langf.	0,184
Mittel = 0,189				

b) Mit Talg geschmiert.

Reib. fl. = 0,0072 □M.				
206	503,86	33,40	1,16	0,066
207	503,86	30,60	1,68	0,061
208	503,86	30,41	1,73	0,060

Fortsetzung der 49. Vers.-Reihe.

Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q}$ = μ .
	Kilogr.	Kilogr.	Meter.	
Reib. fl. = 0,0290 □M.				
209	1005,25	92,38	langf.	0,091
210	1005,25	65,69	1,70	0,065
211	1005,25	91,49	1,89	0,091
Mittel = 0,072				
c) Mit Schweinefett.				
Reib. fl. = 0,0072 □M.				
212	503,86	32,56	1,09	0,064
213	503,86	30,09	1,70	0,060
214	503,86	40,04	1,73	0,079
Mittel = 0,068				
d) Mit Del geschmiert.				
Reib. fl. = 0,0290 □M.				
215	1005,55	55,67	1,75	0,055
216	1005,55	79,43	2,03	0,079
217	1005,55	66,20	2,18	0,066
Mittel = 0,066				
e) Mit Wagenschmiere.				
Reib. fl. = 0,0072 □M.				
218	503,86	69,59	langf.	0,138
219	503,86	63,06	1,34	0,125
220	503,86	69,65	1,46	0,138
Mittel = 0,134				
f) Bloß fettige Oberfl.				
Reib. fl. = 0,0290 □M.				
221	1005,55	109,25	1,70	0,109
222	1005,55	117,74	2,08	0,117
Mittel = 0,113				

50. Vers.-Reihe. Bronze.

Reibungsfläche = 0,0344 □M.

a) Ohne Schmiere.

223	226,44	46,79	langf.	0,206
224	226,44	52,73	1,81	0,233
225	226,44	49,60	1,97	0,219
226	508,25	115,82	2,24	0,227
227	508,25	101,89	langf.	0,200
Mittel = 0,217				

Fortsetzung der 50. Vers.-Reihe.

Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q}$ = μ .
	Kilogr.	Kilogr.	Meter.	
b) Mit Talg geschmiert.				
228	599,19	54,32	1,83	0,090
229	599,19	53,40	2,14	0,089
230	599,19	46,78	langf.	0,080
231	599,19	47,25	1,38	0,080
232	599,19	52,96	1,71	0,088
233	2399,19	179,07	1,68	0,075
234	226,44	22,61	langf.	0,099
Mittel = 0,086				

Fortsetzung der 50. Vers.-Reihe.

Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q}$ = μ .
	Kilogr.	Kilogr.	Meter.	
c) Mit Olivenöl.				
235	599,19	46,78	langf.	0,078
236	599,19	46,78	"	0,078
237	599,19	46,78	"	0,078
238	2002,25	140,44	1,57	0,070
239	2002,25	164,47	1,68	0,082
Mittel = 0,077				
d) Mit fettiger Oberfl.				
240	2002,25	184,38	1,10	0,092
241	2002,25	190,62	1,32	0,095
242	1007,19	108,49	langf.	0,107
Mittel = 0,098				

51. Vers.-R. Hanf in Streunen.

Die Fäden senkrecht gegen die Bewegung.

Reibungsfläche = 0,0067 \square M.

Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q}$ = μ .
	Kilogr.	Kilogr.	Meter.	
a) Mit Talg geschmiert.				
243	214,08	37,89	1,37	0,176
244	214,08	43,70	1,74	0,204
245	214,08	43,24	2,18	0,202
Mittel = 0,194				
b) Mit Del geschmiert.				
246	214,08	30,97	1,87	0,144
247	214,08	34,98	2,17	0,163
Mittel = 0,153				

Bemerkungen des Autors zu diesen Versuchen. Bei dem Gleiten des Weißbuchenholzes auf Gußeisen, ohne Schmiere, zeigte sich wieder eine Abnutzung der Berührungsfächen, indem die Holzleisten sich nach wiederholten Operationen geschwärzt hatten, und das Ansehen einer metallischen Politur darboten. Da sich indessen die Reibung von der Geschwindigkeit wie von der Größe der Berührungsfäche als ganz unabhängig zeigte, so hält sich Morin für berechtigt, die von Coulomb aufgestellte Theorie, welche sich auf die Voraussetzung einer solchen Abhängigkeit gründet, als irrig zu verwerfen.

Die mit Schmiere aus Talg, Schweinefett und Del gemachten Versuche der 40sten Versuchsreihe geben fast genau übereinstimmende Werthe der Reibung; woraus hervorgeht, daß diese drei Substanzen unter übrigens gleichen Umständen mit demselben Vortheil anzuwenden sind. Eine Zusammensetzung aus vier Theilen Schweinefett und einem Theile Graphit scheint nach den Versuchen Nr. 26 — 29 einige Vortheile darzubieten; allein die Fettigkeit, welche die Oberfläche nach dem Abwischen dieser Schmiere noch behielt, war nicht größer als bei den zuerst genannten Schmieren. — Der bei den Versuchen Nr. 34, 35 und 36 gebrauchte Bergtheer (bitume malthe ou goudron minéral) wird zu Bechelbroun, im Departement des Niederrheins, gewonnen, und dort schon seit langer Zeit unter dem Namen Asphaltschmiere (graisse d'asphalt) zum Schmieren der Wagenachsen gebraucht. Es ist eine schlüpfrige Substanz von röthlichbrauner Farbe, dem dicken Melassensyrup ähnlich. Die Wagenschmiere (cambouis) bei den Versuchen Nr. 37 und 38 war von den Wagenachsen nach längerem Gebrauche entnommen. Durch Schmelzen von fremden Körpern gesäubert, nahm diese Substanz nach dem Erkalten eine so große Konsistenz an, daß letztere der größten Klebrigkeit gleich gesetzt werden kann, welche die Schmiere nach langem Gebrauche annehmen kann.

Auch beim Guajac- und dem wilden Birnbaumholze stellt sich die Reibung mit Talg und

mit Schweinefett ziemlich eben so groß heraus, wie vorhin beim Weißbuchenholz, und wie sie früher für andere Hölzer unter denselben Umständen gefunden wurde.

Die Ergebnisse der 43ten und 44ten Versuchreihe finden Anwendung auf Pumpenkolben, die aus einer Lederpackung bestehen, und sich in gußeisernen Stiefeln bewegen, und es ergibt sich aus der Vergleichung der gefundenen Mittelwerthe, daß es von Vortheil ist, das hiezu anzuzwendende Leder vorher mit Fett zu tränken. Uebrigens ist die Reibung des Leders, sowohl mit Wasser benetzt als mit Del getränkt, stets gleich groß, dasselbe mag flachliegend oder hochkantig auf Gußeisen gleiten. Ein gleiches Ergebnis hat sich bei der Reibung des Leders auf Eichensholz herausgestellt, und Morin ist daher geneigt, dies als ein allgemeines Gesetz anzunehmen.

Wegen des vielfältigen Gebrauches, den man gegenwärtig im Maschinenwesen von dem Gußeisen macht, hat Herr Morin eine große Anzahl von Versuchen über die Reibung dieser Substanz angestellt, deren Resultate er mit Rücksicht auf die verschiedenen Nebenumstände einer ausführlichen Betrachtung unterwirft. Nachstehendes enthält die Hauptergebnisse derselben.

Der Abnutzung, welche das Gußeisen erleidet, wenn es trocken auf Gußeisen reibt, ist schon früher (Seite 31) Erwähnung geschehen, so wie auch, daß durch ein Benetzen mit Wasser diese Abnutzung befördert und die Reibung verdoppelt wird, wovon man sich durch einen Blick auf die unter a und b aufgeführten Versuche der 45ten Versuchreihe sogleich überzeugt. Herr Morin tadelt es daher als ein verkehrtes Verfahren, wenn in manchen Werkstätten auf die sich bewegenden Maschinentheile, anstatt sie gehörig in Schmiere zu erhalten, bloß ein Wasserstrahl geleitet wird, in der Meinung, daß dadurch die reibenden Flächen schlüpfriger würden. Dies erklärt er als ein Verfahren, welches durchaus zu verwerfen sei. Auch die trockene Seife ist in dem vorliegenden Falle keine vortheilhafte Schmiere, weil sie die Reibung nach Ausweis der Versuche Nr. 96, 97 und 98 um etwas vergrößert, statt sie zu vermindern.

Die in der Tabelle unter d aufgeführten Versuche über die Reibung des Gußeisens mit Talg wurden im Winter, theils bei einer mittleren Temperatur von $+18,6^{\circ}$, theils bei $+1,5^{\circ}$ Celsius angestellt, und ihre Uebereinstimmung giebt zu erkennen, daß wenigstens innerhalb dieser Grenzen die Temperatur keinen wahrnehmbaren Einfluß auf die Größe der Reibung hat. Bei größeren Kältegraden würde ein solcher Einfluß schon deshalb nicht ausbleiben, weil der Talg sich bedeutend erhärtet; allein für die Praxis kann dies unberücksichtigt bleiben, da bei einer beständigen Bewegung die reibenden Flächen sich hinreichend erwärmen, um den Talg fortwährend weich zu erhalten. — Aus einer Vergleichung der Versuche d und e scheint hervorzugehen, daß der Talg nicht so vortheilhaft ist, als das Schweinefett, weil erstere Schmiere die Reibung nur von 0,152 auf 0,100, letztere aber auf 0,070 vermindert. Indessen bemerkt Morin, daß dies ohne Zweifel nur von der größeren Consistenz des Talges bei der stattgehabten Temperatur herrühre, und daß bei lange anhaltender Bewegung, wo die Temperatur der reibenden Theile sich auf 20 bis 25 Grad erhöht, der Talg weicher werden, eine dem Schweinefett analoge Consistenz annehmen, und dann als Schmiermittel auch dieselbe Wirkung hervorbringen müsse, wie das Schweinefett.

Obgleich die Beobachtung bei einer beschleunigten Bewegung das bequemste Mittel ist, die

Unabhängigkeit der Reibung von der Geschwindigkeit auf eine überzeugende Weise darzuthun, so hat Morin dennoch geglaubt, in Bezug auf die Reibung des mit Schweinesfett geschmierten Gußeisens noch besondere Versuche mit gleichförmiger und mit verzögerter Bewegung anstellen zu müssen, deren Resultate die 46ste Versuchsreihe ausmachen. Die Mittelwerthe der unter a und b enthaltenen Reibungscoefficienten stimmen mit dem Mittel der unter c aufgeführten Resultate der vorhergehenden Versuchsreihe so genau überein, daß man die Unabhängigkeit der Reibung von der Geschwindigkeit nunmehr als ein allgemeines Gesetz ohne alle Ausnahme betrachten kann.

Um die bei einer verzögerten Bewegung angestellten Versuche auf eine möglichst einfache Weise zu berechnen, bestimmt Morin zuvörderst die Geschwindigkeiten, welche der Schlitten in zwei bekannten Puncten seines Laufes hatte. Zu diesem Behuf zieht er an den correspondirenden Puncten der Bewegungscurve gerade Berührungslinien, und die trigonometrischen Tangenten der Winkel, welche diese Linien mit den Ordinaten der Curve einschließen, geben offenbar die gesuchten Geschwindigkeiten*). Die erwähnten Berührungslinien lassen sich mit Hülfe des Brennpunctes der Parabel, oder auch mit hinreichender Genauigkeit bloß nach dem Augenmaße vermittelt eines Lineales leicht ziehen, und da die Abscissen der Berührungspuncte jedesmal die correspondirenden Wege sind, so hat man alle erforderlichen Elemente, um die Versuche danach zu berechnen. Es sei nämlich:

P, das Gewicht des absteigenden Kastens, während die Bewegung sich verzögert;

T, die Spannung des Seiles während der Bewegung, welche Spannung den Ergebnissen der Versuche gemäß als constant vorausgesetzt wird;

q = 6,854 Kilogr., das Gewicht der Rolle, ihrer Axc u.;

r = 0,111 Meter, der mittlere Halbmesser der Rolle, mit Einschluß der halben Seildicke;

$\frac{\Sigma r^2 \cdot dm}{r^2} = 0,51$, wo $\Sigma r^2 \cdot dm$ das Trägheitsmoment der Rolle, ihrer Axc und der mit ihr

verbundenen Scheibe bedeutet;

e und e', die vom Schlitten durchlaufenen Wege, wenn seine Geschwindigkeiten bezüglich = v und v' geworden sind;

ρ = 0,0093 Meter, der Halbmesser der Axc der Rolle, und

f = 0,164, das Verhältniß der Axcreibung zum Druck.

Nach dem Princip der lebendigen Kräfte hat man nun, wenn man von dem Einflusse abstrahirt, den die Bewegung des absteigenden Kastens auf den Druck der Axc ausübt, was wegen der geringen Abmessungen ohne merklichen Fehler zulässig ist,

$$\left(\frac{P}{2g} + \frac{\Sigma r^2 dm}{r^2} \right) (v^2 - v'^2) = 2(e' - e) \left[T - P + 0,85 \cdot \frac{f\rho}{r} (T + P + q) + 0,032 \cdot T \right].$$

*) Denn der Ausdruck für die Geschwindigkeit in irgend einem Augenblick der Bewegung ist $\frac{de}{dt}$, wenn t die Zeit bedeutet, während welcher der Schlitten den Weg e zurücklegt. Da aber beim Auftragen der Bewegungscurven die Wege e zu Abscissen und die Zeiten t zu Ordinaten genommen werden, so ist auch $\frac{de}{dt}$ die Tangente des Winkels, den die gerade Berührungslinie der Curve mit der Ordinate einschließt.

In dieser Gleichung ist $0,032 \cdot T$ der von der Steifigkeit des Seiles herrührende Widerstand (conf. Seite 75); der Druck der Nre auf das Zapfenlager ist aber $= \sqrt{(P+q)^2 + T^2}$, wofür nach dem früher angeführten Lehrsatz von Poncelet der Näherungswert $0,85 \cdot (P+q+T)$ gesetzt ist. — Aus vorstehender Gleichung ergibt sich nach Substitution der obigen Zahlenwerthe:

$$T = 0,958 \cdot \left(\frac{P}{2g} + 0,51\right) \cdot \frac{v^2 - v'^2}{2(e' - e)} + 0,946 \cdot P - 0,011 \cdot q,$$

und da außerdem $\frac{Q}{2g}(v^2 - v'^2) = 2F(e' - e) - 2T(e' - e)$ ist,

so erhält man durch die Verbindung dieser beiden Gleichungen, indem man T eliminiert,

$$F = \frac{v^2 - v'^2}{2(e' - e)} \left[\frac{Q}{2g} + 0,958 \left(\frac{P}{2g} + 0,51\right) \right] + 0,946 \cdot P - 0,011 \cdot q.$$

Dies ist die Formel, nach welcher Morin die mit verzögerter Bewegung angestellten Versuche berechnet hat, von welchen die Resultate in der 46sten Versuchsreihe unter b zusammengestellt sind.

In Bezug auf die Versuche über die Reibung der übrigen Metalle auf Gußeisen bemerkt Morin bloß, daß ohne Anwendung von Schmiere jedesmal eine Abnutzung statt fand, indem sich ein feiner, metallischer Staub bildete, und daß überdies beim Schmiedeeisen und dem Stahle die reibenden Leisten kleine Längensrisse erhielten, die bei jenem Metall etwas stärker waren als bei diesem. Endlich soll Talg, Schweinefett und Olivenöl bei den Metallen dieselbe Verminderung der Reibung bewirken, was jedoch nach einer Vergleichung der gefundenen Mittelwerthe nicht als hinreichend begründet erscheint, obgleich die Unterschiede nicht sehr groß sind.

Tafel VI. Versuche über die Reibung der Bewegung verschiedener Substanzen auf Schmiedeeisen, mit geschmierten Berührungsf lächen.

52. Vers.-R. Eichenholz (=). Reibungsfläche = 0,0323 □M.					53. Vers.-Reihe. Guajacholz. Reibungsfl. = 0,0723 □M.					54. Vers.-Reihe. Gußeisen. Reibungsfl. = 0,0319 □M.				
Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q}$ = μ .	Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q}$ = μ .	Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q}$ = μ .
	Kilogr.	Kilogr.	Meter.			Kilogr.	Kilogr.	Meter.			Kilogr.	Kilogr.	Meter.	
a) Mit Talg.					a) Mit Del.					a) Mit Talg.				
1	503,68	52,19	1,33	0,103	7	502,25	38,29	1,78	0,076	12	499,96	46,79	langf.	0,098
2	503,68	46,32	2,15	0,092	8	502,25	34,79	2,23	0,069	13	499,96	50,05	1,73	0,100
3	503,68	50,74	2,49	0,100	Mittel = 0,072					14	499,96	48,48	1,80	0,098
Mittel = 0,098					b) Bloß fettige Oberfl.					15	499,96	52,04	2,15	0,104
b) Bloß fettige Oberfl.					9	502,25	80,99	langf.	0,161	16	499,96	45,73	2,21	0,091
4	503,68	77,27	1,92	0,155	10	502,25	84,34	1,70	0,165	Mittel = 0,098				
5	503,68	84,79	2,20	0,168	11	502,25	86,94	2,13	0,173					
6	503,68	63,55	0,78	0,126	Mittel = 0,166									
Mittel = 0,149														

Fortsetzung der 54. Vers.-Reihe.

Nr.	Q. Kilogr.	F. Kilogr.	Geschw. nach 3 Met. Meter.	$\frac{F}{Q}$ = μ .
17	b) Mit Schweinefett. 2000,00	116,46	1,98	0,058
18	e) Mit Olivenöl. 449,96	30,16	1,70	0,060
19	449,96	32,78	2,19	0,065
20	2000,00	131,07	1,90	0,065
Mittel = 0,063				
21	d) Mit Wagenschmiere. 2000,00	314,42	1,66	0,155
22	e) Bloß fettige Oberfl. 499,96	67,11	1,14	0,135
23	499,96	75,92	1,94	0,151
Mittel = 0,143				

55. Vers.-Reihe. Schmiedeeisen.
Reibungsfl., wenn nicht linear,
= 0,0319 □M.

24	a) Ohne Schmiere. 333,66	41,05	2,03	0,123
25	333,66	52,00	1,58	0,156
26	505,76	69,59	langf.	0,137
Mittel = 0,138				
27	b) Mit Talg. 505,76	36,48	1,49	0,070
28	505,76	44,25	1,76	0,087
29	505,76	43,75	2,07	0,086
30	505,76	44,10	2,17	0,086
Mittel = 0,082				
31	Reibungsfl. linear. 333,66	36,63	1,14	0,109
32	213,66	25,60	2,16	0,119
Mittel = 0,114				

Fortsetzung der 55. Vers.-Reihe.

Nr.	Q. Kilogr.	F. Kilogr.	Geschw. nach 3 Met. Meter.	$\frac{F}{Q}$ = μ .
33	c) Mit Schweinefett. 505,76	32,16	1,20	0,063
34	505,76	44,97	1,57	0,088
35	505,76	47,86	1,80	0,094
Mittel = 0,081				
36	d) Mit Del. 505,76	38,75	1,76	0,076
37	505,76	35,26	2,15	0,069
38	505,76	33,86	2,08	0,067
Mittel = 0,071				
39	Reibungsfl. linear. 213,66	32,36	1,78	0,151
40	333,66	46,79	langf.	0,140
41	333,66	47,87	1,76	0,143
Mittel = 0,145				
42	e) Bloß fettige Oberfl. 223,75	39,76	1,10	0,177

56. Vers.-Reihe. Stahl.
Reibungsfläche = 0,0336 □M.

43	a) Mit Talg. 502,61	45,48	1,14	0,090
44	502,61	42,48	1,96	0,084
45	502,61	47,14	1,83	0,093
46	502,61	52,25	2,19	0,105
Mittel = 0,093				
47	b) Mit Schweinefett. 502,61	32,91	1,63	0,066
48	502,61	42,90	1,95	0,085
49	502,61	38,68	2,05	0,076
Mittel = 0,076				

57. Vers.-Reihe. Bronze.
Reibungsfl. = 0,0344 □M.

Nr.	Q. Kilogr.	F. Kilogr.	Geschw. nach 3 Met. Meter.	$\frac{F}{Q}$ = μ .
50	a) Ohne Schmiere. 502,44	85,34	1,92	0,169
51	502,44	84,56	1,97	0,168
52	502,44	72,26	2,62	0,145
53	502,44	91,76	2,16	0,182
Mittel = 0,166				
54	b) Mit Talg. 502,44	47,98	1,80	0,095
55	502,44	48,13	2,18	0,095
56	2002,25	149,39	langf.	0,074
57	2002,25	152,52	1,58	0,076
58	2002,25	127,19	1,72	0,063
59	2002,25	182,39	1,71	0,091
60	2002,25	148,79	1,95	0,074
Mittel = 0,081				
61	c) Mit Schweinefett und Graphit. 2002,25	161,01	1,90	0,080
62	2002,25	198,05	1,80	0,098
Mittel = 0,089				
63	d) Mit Del. 502,44	34,06	2,17	0,068
64	502,44	31,17	2,26	0,062
65	502,44	43,83	2,23	0,087
66	2002,25	198,04	2,06	0,094
Mittel = 0,077				
67	e) Bloß fettige Oberfl. 502,44	82,20	1,40	0,163
68	502,44	85,66	1,95	0,170
Mittel = 0,166				

Bei den vorstehenden Versuchen fand eine Abnutzung der Metalle statt, so oft dieselben trocken, ohne Schmiere, über die eisernen Bahnschienen fortgleiteten. Diese Abnutzung war besonders beim Schmiedeeisen sehr auffallend, indem nicht bloß ein starkes Einkrazen, sondern auch ein Zerreißen der Metallfasern stattfand, wie dies bereits Seite 31 näher angegeben ist.

Wenn bei den Versuchen mit Schmiere die Berührungsfläche linear, oder auf eine abge-

rundete Kante reducirt wurde, so vergrößerte sich die Reibung beträchtlich, weil in diesem Falle die Schmiere sogleich seitwärts herausgedrückt wurde, und die Metalle in unmittelbare Berührung kamen.

Dasselbe zeigte sich auch bei anderen Berührungsflächen, wenn im Anfang der Versuche die Belastung des Schlittens Zeit genug hatte, die über die Bahnschienen verbreitete Delschmiere am vorderen und hinteren Rande der reibenden Leisten herauszudrücken. War nämlich das bewegende Gewicht nicht bedeutend größer, als es zur Ueberwindung der Reibung der Ruhe nöthig gewesen wäre, so setzte sich der Schlitten nur langsam in Bewegung, seine anfänglich unmerkliche Geschwindigkeit nahm allmählig zu, nach Maßgabe, wie beim Fortrücken der vom Del befreite Theil der Berührungsfläche geringer wurde, und wenn die reibenden Leisten um einen beträchtlichen Theil ihrer Länge vorgerückt waren, nahm auch die Geschwindigkeit stärker zu, und die Bewegung wurde von jetzt an eine gleichförmig beschleunigte. Jenen ersten Theil des Laufes, während welchem eine so langsame Bewegung stattfand, fand Morin stets kürzer als die Länge der reibenden Leisten, und um so kürzer, je kleiner diese Länge war. Daher zeigte sich denn auch in dem Fall einer linearen Reibungsfläche gleich von Anfang an eine beschleunigte Bewegung, obgleich sich wegen des Auspressens der Schmiere sogar eine Vergrößerung der Reibung ergab.

Die eben beschriebenen Umstände wiederholten sich auf gleiche Weise bei allen Metallen, deren Reibungsflächen mit Olivenöl geschmiert waren, und selbst beim Gleiten der Hölzer über Metallflächen, wenn gleich in einem geringeren Grade. Dagegen war jene Erscheinung fast niemals zu bemerken, sobald Talg oder Schweinefett als Schmiermittel gebraucht wurde. Herr Morin führt diesen Gegenstand noch weiter aus, und hebt dabei hervor, wie nöthig es zur Erlangung sicherer Resultate sei, den Schlitten einen hinreichend großen Weg durchlaufen zu lassen, und wie wenig in dieser Beziehung die von Coulomb, besonders aber die von G. Kennie angestellten Versuche befriedigen können, da bei letztern der ganze Lauf des reibenden Körpers kaum $4\frac{1}{2}$ Zoll engl. betrug.

Tafel VII. Versuche über die Reibung der Bewegung verschiedener Substanzen auf Bronze, mit geschmierten Berührungsflächen.

58. Verf.-Reihe. Guajacholz. Reibungsfl. = 0,0273 □M.					Fortsetzung der 58. Verf.-Reihe.					Fortsetzung der 58. Verf.-Reihe.				
Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q}$ = μ .	Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q}$ = μ .	Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q}$ = μ .
	Kiloar.	Kiloar.	Meter.			Kiloar.	Kiloar.	Meter.			Kiloar.	Kiloar.	Meter.	
a) Mit Talg.					b) Mit Olivenöl.					c) Bloß fettige Oberfl.				
1	502,25	36,66	1,03	0,073	4	502,25	24,35	1,55	0,048	7	502,25	71,01	0,98	0,141
2	502,25	42,37	1,27	0,083	5	502,25	25,33	1,84	0,054	8	502,25	74,25	0,89	0,147
3	502,25	45,66	1,90	0,090	6	502,25	29,11	2,16	0,058	9	502,25	75,43	2,18	0,150
Mittel = 0,082					Mittel = 0,053					Mittel = 0,146				

59. Verf.-Reihe. Rindsleder,
flachliegend.

Reibungsfl. = 0,0386 □ M.

Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q}$ = μ .
	Kiloogr.	Kiloogr.	Meter.	
a) Mit Talg.				
10	217,55	46,79	langf.	0,215
11	217,55	54,19	1,75	0,249
12	217,55	56,71	2,72	0,260
Mittel = 0,241				
b) Mit Del.				
13	217,55	43,87	2,17	0,201
14	217,55	40,93	2,28	0,188
15	217,55	40,24	3,05	0,185
Mittel = 0,191				
c) Das Leder bloß fettig, die Bronze mit Wasser benetzt.				
16	217,55	55,50	1,69	0,255
17	217,55	69,42	2,12	0,319
Mittel = 0,287				

60. Verf.-Reihe. Rindsleder,
auf der hohen Kante.

Reibungsfl. = 0,0042 □ M.

Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q}$ = μ .
	Kiloogr.	Kiloogr.	Meter.	
a) Mit Talg.				
18	136,90	16,32	1,48	0,120
19	136,90	18,25	1,23	0,133
20	218,31	35,26	1,58	0,161
Mittel = 0,138				
b) Mit Del.				
21	136,90	16,32	1,49	0,120
22	136,90	18,25	1,23	0,133
23	136,90	17,74	2,18	0,130
24	136,90	21,67	2,03	0,158
Mittel = 0,135				
c) Leder bloß fettig, Bronze in Wasser benetzt.				
25	136,90	29,62	1,23	0,217
26	136,90	34,11	1,90	0,249
27	136,90	36,68	1,63	0,267
Mittel = 0,244				

61. Verf.-Reihe. Gußeisen.

Reibungsfl. = 0,036 □ M.

Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q}$ = μ .
	Kiloogr.	Kiloogr.	Meter.	
a) Ohne Schmiere.				
28	1004,6	147,02	1,34	0,146
29	1004,6	149,62	1,95	0,148
Mittel = 0,147				
b) Mit Talg geschmiert.				
30	1004,6	89,00	1,30	0,088
31	1004,6	79,62	1,73	0,079
32	1004,6	103,03	1,99	0,092
33	2000,6	165,24	1,67	0,082
34	2000,6	172,42	1,99	0,086
Mittel = 0,085				
c) Mit Schweinefett.				
35	509,41	31,76	—	0,062
36	509,41	35,57	—	0,069
37	509,41	41,81	—	0,082
38	1498,76	102,05	—	0,067
39	1498,76	94,84	—	0,063
40	1498,76	96,39	—	0,064
41	1498,76	131,11	—	0,087
Mittel = 0,070				
d) Mit Olivenöl.				
42	1004,6	60,28	1,99	0,060
43	1004,6	83,35	1,49	0,083
44	1004,6	65,60	2,19	0,065
45	2000,6	117,78	2,04	0,059
Mittel = 0,067				
e) Bloß fettige Oberfl.				
46	1004,6	132,95	1,58	0,132
47	1004,6	132,32	2,21	0,132
Mittel = 0,132				
62. Verf.-Reihe. Schmiedeeisen. Reibungsfl. = 0,0319 □ M.				
a) Ohne Schmiere.				
48	505,75	71,73	1,40	0,141
49	505,75	85,48	2,18	0,169
50	505,75	92,29	2,68	0,182
51	505,75	100,05	2,71	0,197
Mittel = 0,172				

Fortsetzung der 62. Verf.-Reihe.

Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q}$ = μ .
	Kiloogr.	Kiloogr.	Meter.	
b) Mit Talg geschmiert				
52	505,75	46,79	langf.	0,092
53	505,75	56,48	1,14	0,111
54	505,75	57,75	1,48	0,114
55	505,75	54,88	1,70	0,108
56	505,75	53,90	1,94	0,106
57	2803,57	240,02	1,89	0,086
Mittel = 0,103				
c) Mit Schweinefett.				
58	505,75	44,19	1,91	0,087
59	2803,75	176,15	2,17	0,063
Mittel = 0,075				
d) Mit Olivenöl.				
60	505,75	40,51	1,88	0,080
61	505,75	34,70	2,12	0,068
62	505,75	40,11	2,03	0,079
Mittel = 0,078				
e) Mit Wagenschmiere.				
63	1999,57	306,59	1,24	0,153
64	1999,57	332,86	1,57	0,166
65	1999,57	376,06	1,72	0,187
Mittel = 0,168				
f) Bloß fettige Oberfl.				
66	505,75	75,29	langf.	0,148
67	505,75	85,62	1,10	0,169
68	505,75	82,38	1,28	0,162
Mittel = 0,160				

63. Verf.-Reihe. Stahl.

Reibungsfl. = 0,0336 □ M.

Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q}$ = μ .
	Kiloogr.	Kiloogr.	Meter.	
a) Ohne Schmiere.				
69	1002,87	147,42	1,68	0,147
70	1002,87	137,64	1,73	0,137
71	1002,87	173,74	1,92	0,173
Mittel = 0,152				

Fortsetzung der 63. Vers.-Reihe.					Fortsetzung der 63. Vers.-Reihe.					64. Vers.-Reihe. Bronze. Reibungsfl. = 0,0336 □ R.				
Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q}$ = μ .	Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q}$ = μ .	Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q}$ = μ .
	Kilogr.	Kilogr.	Meter.			Kilogr.	Kilogr.	Meter.			Kilogr.	Kilogr.	Meter.	
b) Mit Talg geschmiert.					d) Mit Del.					a) Ohne Schmiere.				
72	1002,87	52,06	1,44	0,052	79	1002,87	50,11	1,87	0,050	87	503,67	95,93	1,14	0,190
73	1002,87	61,21	1,98	0,061	80	1002,87	45,32	2,18	0,045	88	503,67	107,41	1,30	0,213
74	1002,87	62,70	1,64	0,062	81	1002,87	54,54	2,07	0,054	Mittel = 0,201				
75	1002,87	50,11	1,87	0,050	82	1002,87	58,63	2,02	0,058	b) Mit Del geschmiert.				
Mittel = 0,056					83	1002,87	59,94	2,16	0,059	89	503,48	30,82	2,15	0,061
e) Mit Schweinefett und Graphit.					Mittel = 0,053					90	503,48	26,21	2,54	0,052
76	1002,87	68,44	1,91	0,068	e) Mit Wagenschmiere.					91	503,48	30,36	2,64	0,060
77	1002,87	70,57	2,22	0,070	84	1002,87	105,57	1,29	* 0,105	Mittel = 0,058				
78	1002,87	62,45	2,14	0,062	85	1002,87	178,88	1,54	0,178	c) Bloß fettige Oberfl.				
Mittel = 0,067					86	1002,87	162,18	1,78	0,161	92	503,48	58,38	1,48	0,115
					Mittel, nach Ausschluß von Nr. 84 = 0,170					93	503,48	75,37	1,75	0,149
										94	503,48	69,83	1,80	0,138
										Mittel = 0,134				

Nach den Resultaten dieser Tabelle ergibt sich, daß beim Gleiten des Gußeisens auf Bronze, ohne Schmiere, die Reibung merklich geringer ist, als für den umgekehrten Fall, wo Bronze auf Gußeisen gleitet. Morin schreibt dies der größeren Weichheit der Bronze zu, in Folge von welcher sich im letzteren Falle eine größere Menge von Metallstaub bildete, als im ersteren. Dieser Unterschied hörte jedoch auf, sobald Schmieren in Anwendung kamen, indem alsdann die Reibung einerlei Größe behielt, sei es, daß das eine, oder daß das andere der beiden Metalle bewegt wurde.

Beim Schmiedeeisen und beim Stahle soll dagegen die Reibung auf Bronze, ohne Schmiere, eben so groß sein, als umgekehrt für Bronze auf den erstgenannten Metallen. Uebrigens fand bei allen Metallen, ohne Schmiere, wieder Abnutzung statt; am stärksten bei Bronze auf Bronze, daher denn auch für diesen Fall die Reibung größer ist, als für Gußeisen, Schmiedeeisen oder Stahl auf Bronze.

Den mit einem * bezeichneten Reibungscoefficienten des Versuchs Nr. 84 scheint Morin von der Berechnung des Mittelwerthes ausgeschlossen zu haben, da letzterer sonst nicht richtig sein würde. In der That weicht jener Coefficient auch zu bedeutend von den beiden andern ab, um mit letzteren gleiche Gültigkeit zu haben, worüber sich der Autor indeß nicht weiter ausspricht.

Tafel VIII. Versuche über die Reibung der Ruhe für verschiedene Körper, mit geschmierten Berührungsflächen.

Vers. Reihe.	Reibende Körper.	Reibungsfläche. <input type="checkbox"/> Met.	Art der Schmiere.	Belastung.		Reibung.		F Q = μ . Mittel.	Dauer der Ruhezeit.
				Q. Kilogr.	F. Kilogr.	Q. Kilogr.	F. Kilogr.		
A) Auf Eichenholz.									
65	Eichenholz (=)	0,126	Trockne Seife	491,91	212,91	0,431	} 0,444	20 Minuten.	
	Desgl.	"	Talg	1032,00	472,38	0,457			
	Desgl.	"	Blos fettig	798,10	130,91	—	} 0,164	desgl.	
	Desgl.	"	Blos fettig	791,90	251,99	0,320			
	Desgl.	"	Blos fettig	1199,90	468,59	0,391	} 0,356	4 bis 5 Min. 20 Minuten.	
66	Eichenholz (+)	0,088	Talg	493,15	125,21	—		0,254	desgl.
	Desgl.	"	Blos fettig	493,15	155,09	—	0,314	"	
67	Eichenhirnholz (L) ...	0,059	Dhne Schmiere	431,50	117,08	—	0,271	"	
68	Buchenholz (=)	0,034	Schweinefett	240,80	79,61	—	0,330	"	
	Desgl.	"	Blos fettig	189,49	56,80	—	0,300	"	
69	Ulmenholz (=)	0,1243	Schweinefett	489,04	137,99	—	0,277	"	
	Desgl.	"	Blos fettig	791,65	331,79	—	0,420	"	
	Desgl.	"	Trockne Seife	971,85	400,19	—	0,411	"	
	Desgl.	"	Talg	971,85	137,99	—	0,142	"	
70	Hanfstreichen (+) ...	—	Geschmiert und mit Wasser benetzt	140,06	121,81	—	0,869	"	
				186,31	122,77	0,658	} 0,649	"	
71	Schmiedeeisen (=) ...	0,052	Geschmiert und mit Wasser benetzt	312,31	166,31	0,532			
				315,51	216,61	0,686			
	Desgl.	"	Talg	675,51	481,64	0,712	} 0,108	18 Stunden. 45 Minuten.	
72	Gusseisen (=)	0,048	Geschmiert und mit Wasser benetzt	2001,51	217,79	—			
				316,48	189,29	0,598	} 0,646	} 0,101	
				676,48	470,24	0,695			
	Desgl.	"	Talg	502,67	46,79	0,093	} 0,102	20 — 30 Min.	
	Desgl.	"	Talg	1996,48	217,79	0,109			
	Desgl.	"	Olivöl	1038,48	115,19	0,111	} 0,103	4 — 5 Min.	
	Desgl.	"	Olivöl	122,43	11,50	0,094			
	Desgl.	"	Schweinefett	1000,48	103,79	—	} 0,095	20 Minuten. desgl.	
	Kupfer (=)	0,0131	Talg	111,84	11,21	0,100			
				303,84	28,31	0,090	} 0,376	einige Sek. 4 — 5 Min.	
B) Auf Ulmenholz.									
73	Eichenholz (=)	0,088	Dhne Schmiere	200,00	69,35	0,346	} 0,376	desgl.	
				201,26	80,99	0,404			
	Desgl.	"	Talg	795,07	297,59	0,377	} 0,178	30 Minuten. 20 Minuten.	
	Desgl.	"	Talg	995,91	177,89	—			
74	Ulmenholz (=)	0,0097	Trockne Seife	1002,54	217,79	—	0,217	desgl.	

Verf.- Reihe.	Reibende Körper.	Rei- bungsf- fläche. □ Met.	A r t der Schmiere.	Vela- stung.		Rei- bung. F.	F Q = μ.	D a u e r der Ruhezeit.
				Q. Kiloar.	Kiloar.			
75	C) Auf Gußeisen. Weißbuchenholz (=) ..	linear	Talg	131,62	16,91	0,128	0,131	15 bis 20 Min.
				261,43	34,01			
76	Desgl.	"	Schweinesfett	501,43	68,21	—	0,136	desgl.
				501,43	68,21			
76	Ulmenholz (=)	0,1243	Blos fettig	1000,11	98,09	—	0,098	20 Min.
77	Rindsleder (flachl.)....	0,0386	Geschmiert und mit Wasser benezt	131,25	80,99	—	0,621	20 Min.
				135,34	16,91			
77	Desgl.	"	Olivenöl	505,15	63,89	—	0,126	20 Min.
				505,15	63,89			
78	Rindsleder (hochkant.)	0,0042	Das Leder fettig, das Ei- fen m. Wasser benezt	217,15	58,19	—	0,267	desgl.
				136,50	80,99			
78	Desgl.	"	Geschmiert und mit Wasser benezt	270,30	172,19	—	0,615	15 — 20 Min.
				270,30	172,19			
79	Gußeisen	0,036	Ohne Schmiere	500,93	75,29	0,153	0,162	10 — 15 Min.
				2000,79	343,19			
79	Desgl.	"	Talg	224,93	22,81	0,101	0,097	desgl.
				2804,74	269,09			
80	Desgl.	0,0052	Ohne Schmiere	508,45	46,78	0,092	0,192	"
				508,45	46,78			
80	Schmiedeeisen (=) ...	0,0319	Ohne Schmiere	505,77	99,99	0,197	0,192	"
				1003,28	187,00			
80	Desgl.	"	Talg	499,96	51,11	0,102	0,101	15 Min.
				2803,77	285,00			
80	Desgl.	linear	Desgl.	131,85	15,96	0,121	0,117	1 — 2 Min.
				213,66	24,51			
80	Desgl.	0,0319	Olivenöl	601,28	69,59	0,115	0,113	desgl.
				1201,28	134,19			
80	Desgl.	linear	Desgl.	131,85	15,96	0,121	0,118	"
				195,18	23,12			
81	Stahl	0,0336	Talg	399,18	48,77	0,122	0,108	30 Min.
				220,80	22,61			
81	Desgl.	"	Talg	2800,61	320,39	0,114	0,103	20 Min.
				2800,61	320,39			
82	Messing	0,029	Olivenöl	1005,25	103,79	—	0,103	20 Min.
83	Bronze	0,0344	Talgschmiere	226,44	22,61	0,099	0,106	desgl.
				502,44	56,81			
84	D) Auf Schmiedeeisen. Gußeisen	0,0319	Talg	2000,00	200,68	—	0,100	20 Min.
				2000,00	200,68			
85	Desgl.	"	Ohne Schmiere	505,76	69,59	—	0,137	desgl.
				505,76	69,59			
85	Desgl.	"	Talg	505,76	58,19	—	0,115	"
				505,76	58,19			
86	Bronze	0,0344	Olivenöl	502,44	80,99	0,161	0,164	"
				2002,25	297,59			
86	Desgl.	"	Blos fettig	502,44	92,39	0,184	0,172	"
				502,44	92,39			
86	Desgl.	"	Blos fettig	502,44	86,79	—	0,172	"
				502,44	86,79			

Herr Morin kommt hier noch einmal auf die Vergleichung seiner Versuche mit den von Coulomb angestellten zurück, indem er hervorhebt, daß nach vorstehender Tabelle die Reibung von Eichen auf Eichenholz, mit trockner Seife abgerieben, gleich 0,444 des Drucks gefunden wurde, während Coulomb fast denselben Werth, nämlich = 0,440, für ganz trockne Berührungsflächen angiebt (vergl. S. 51). Sodann erklärt er die Angabe Coulomb's, daß, wenn die Berührungsflächen mit Talg geschmiert sind, die Reibung erst nach mehreren Tagen ihr Maximum erreichen soll, für irrig; denn eine solche Zunahme dieses Widerstandes während mehrerer Tage, wenn sie wirklich stattgefunden, könne nur davon herrühren, daß durch seitliches Austreiben der Talgschmiere oder durch Einsaugen derselben in das Holz die Berührungsflächen auf den Zustand der bloßen Fettigkeit reducirt wurden. Als Beleg führt Morin an, daß für bloß fettige Berührungsflächen die Reibung des Eichenholzes nach einer Ruhezeit von 20 Minuten 0,39 des Drucks betrug, während sie für vollständig mit Talg geschmierte Flächen nach einer mehrtägigen Ruhezeit = 0,38 gefunden wurde.

Nachdem das Schmiedeeisen, besonders aber das Gußeisen, einige Zeit mit dem besten Eichenholze in Berührung gewesen war, wurde letzteres schwarz, duntensfarbig, was nach Morin von einer chemischen Wechselwirkung herrühren soll, in Folge welcher sich ein gallapfelsaures Eisenoxydul (gallate de fer) bildet. Das Schmiedeeisen zeigte dabei Spuren von Drydation, während das Gußeisen von jenem Drydul an manchen Stellen geschwärzt war.

Uebrigens scheint die Reibung der Ruhe für alle Metalle auf geschmierten Hölzern ein bestimmtes Maximum zu erreichen, welches genau mit derjenigen Reibung übereinstimmt, die früher für den Zustand der Bewegung gefunden wurde, wenn die Berührungsflächen bloß fettig waren. Diese Erscheinung, welche sich eben so für Holz auf Metall zeigte, erklärt Morin wieder daraus, daß die Schmiere selbst nach einer kurzen Dauer des Contactes seitwärts heraustritt, und die Berührungsflächen daher nur noch bloß fettig bleiben. Dieser letztere Zustand kann demnach als die gemeinschaftliche Grenze betrachtet werden, welche die Reibung der Ruhe bei allen Schmieren nicht überschreitet, und nach welcher das Maximum der Reibung für jeden besondern Fall zu berechnen ist.

Abgesehen hiervon, schließt Morin aus einer Vergleichung der in vorstehender Tabelle enthaltenen Resultate mit den der vorhergehenden Versuche, daß die Reibung der Metalle auf einander, sowohl trocken, als mit Talg geschmiert, oder mit bloß fettigen Flächen, nach einer längeren Ruhezeit eben so groß ist, wie für den Zustand der Bewegung. Auch soll dieser Widerstand von der Größe der Berührungsfläche, den Fall ausgenommen, wo dieselbe linear ist, ganz unabhängig sein, so daß durchaus kein Grund vorhanden sei, die Adhäsion mit in Rechnung zu bringen, wie dies von Coulomb geschehen ist. Doch setzt Morin hinzu, diese Folgerung könne nur für Maschinen gelten, welche die Wirkung großer Kräfte zu übertragen und Pressungen zu erleiden haben, wie sie bei den von ihm angestellten Versuchen annähernd stattfanden. Keinesweges aber mache er Anspruch darauf, jenes Gesetz der Unabhängigkeit der Reibung von der Größe der Berührungsfläche auch auf sehr geringe, mit der eigenthümlichen Cohäsion der Schmiere vergleichbare Pressungen auszu dehnen, wie sie etwa in den Mechanismen der Taschenuhren vorkommen.

Tafel IX. Versuche über die Reibung verschiedener Substanzen auf Kalkstein für den Zustand der Bewegung.

Anmerk. Der bei den folgenden Versuchen gebrauchte weiche Kalkstein ist der von Jaumont, ein rogensteinartiger Kalkstein (dit la grande oolithe), der unterhalb der Mergelschicht gefunden wird, welche die Ebene von Davre bedeckt. Seine Farbe ist gelblich und sein Korn ziemlich gleichartig. Specifisches Gewicht = 2,174. — Der harte Kalkstein von Brouck ist ein Muschelkalk von der Formation unmittelbar oberhalb des bunten Sandsteins und unterhalb des gestreiften Mergels; der härteste Kalkstein des Departements, von lichtgrauer Farbe. Specifisches Gewicht = 3,080.

87. Vers.-Reihe. Weicher Kalkstein auf weichem Kalksteine. Trocken.

Nr.	Q. Kilogr.	F. Kilogr.	Geschw. nach 3 Met. Meter.	F Q = μ.
Reibfl. = 0,0800 □ M.				
1	142,39	90,18	2,10	0,633
2	142,39	85,06	2,31	0,604
3	572,20	329,86	2,42	0,576
4	578,08	317,78	2,70	0,549
5	578,08	317,78	2,70	0,549
Reibfl. = 0,0464 □ M.				
6	140,36	95,02	2,59	0,676
7	140,36	94,31	2,64	0,671
8	570,17	386,29	1,85	0,677
9	570,17	355,43	2,74	0,623
10	570,17	336,11	2,93	0,589
Reibungsfl. linear.				
11	135,30	93,09	1,60	0,688
12	135,30	85,70	2,08	0,633
13	135,30	89,82	2,85	0,633
14	271,11	178,55	1,65	0,658
15	271,11	188,75	1,21	0,696
16	271,11	191,91	2,47	0,709
Mittel = 0,637				

88. Vers.-Reihe. Harter Kalkstein auf weichem Kalksteine. Trocken.

Nr.	Q. Kilogr.	F. Kilogr.	Geschw. nach 3 Met. Meter.	F Q = μ.
Reibfl. = 0,04 □ M.				
17	143,56	95,92	2,07	0,668
18	143,56	100,57	2,55	0,700
19	143,56	96,05	2,55	0,669

Fortsetzung der 88. Vers.-Reihe.

Nr.	Q. Kilogr.	F. Kilogr.	Geschw. nach 3 Met. Meter.	F Q = μ.
20	303,37	170,83	2,41	0,560
21	303,37	203,99	2,67	0,672
22	603,37	435,93	2,16	0,722
23	603,37	405,20	2,50	0,671
Mittel = 0,666				

89. Vers.-Reihe. Ziegelstein auf weichem Kalkstein. Trocken.

Nr.	Q. Kilogr.	F. Kilogr.	Geschw. nach 3 Met. Meter.	F Q = μ.
Reibfl. = 0,0506 □ M.				
24	133,45	83,14	1,53	0,623
25	133,45	87,66	2,52	0,656
26	133,45	88,02	2,50	0,659
27	401,26	262,28	1,43	0,653
28	401,26	249,83	2,54	0,622
29	401,26	258,51	2,40	0,644
30	401,26	271,16	2,54	0,675
31	401,26	252,54	2,81	0,629
Mittel = 0,645				

90. Vers.-Reihe. Eichenhirnholz auf weichem Kalkstein. Trocken.

Nr.	Q. Kilogr.	F. Kilogr.	Geschw. nach 3 Met. Meter.	F Q = μ.
Reibfl. = 0,0636 □ M.				
32	129,16	48,52	3,19	0,383
33	129,16	49,24	3,17	0,381
34	129,16	38,83	3,72	0,300
35	129,16	56,89	3,06	0,436
36	600,97	234,24	3,27	0,389

Fortsetzung der 90. Vers.-Reihe.

Nr.	Q. Kilogr.	F. Kilogr.	Geschw. nach 3 Met. Meter.	F Q = μ.
37	600,97	210,29	3,33	0,349
38	600,97	218,75	3,57	0,364
39	600,97	240,49	3,41	0,400
Mittel = 0,375				

91. Vers.-Reihe. Schmiedeeisen auf weichem Kalkstein. Trocken.

Nr.	Q. Kilogr.	F. Kilogr.	Geschw. nach 3 Met. Meter.	F Q = μ.
Reibgsfl. = 0,0439 □ M.				
40	139,31	86,77	1,17	0,622
41	139,31	83,62	2,67	0,600
42	139,31	85,44	2,59	0,613
43	401,12	290,72	1,79	0,724
44	401,12	300,55	1,56	0,749
45	401,12	309,42	2,26	0,771
46	401,12	312,94	2,20	0,780
Mittel = 0,694				

92. Vers.-R. Harter Kalkstein auf hartem Kalksteine. Trocken.

Nr.	Q. Kilogr.	F. Kilogr.	Geschw. nach 3 Met. Meter.	F Q = μ.
Reibgsfl. = 0,0872 □ M.				
47	151,98	61,08	3,43	0,402
48	151,98	62,98	3,36	0,413
49	605,79	182,26	2,61	0,301
50	605,79	185,64	2,56	0,306
51	605,79	188,21	3,27	0,310
52	605,79	200,06	3,17	0,332
53	605,79	211,48	3,21	0,349
54	605,79	237,42	2,89	0,392

Fortsetzung der 92. Vers.-Reihe.

Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q}$ = „.
	Kiloogr.	Kiloogr.	Meter.	
Reibgesf. = 0,0400 □ M.				
55	603,37	264,95	2,81	0,437
56	603,37	296,35	2,68	0,491
57	603,37	284,69	2,81	0,470
Reibungsf. linear.				
58	136,19	43,36	4,08	0,319
59	136,19	53,76	3,46	0,394
60	410,00	153,52	3,21	0,374
61	410,00	142,14	2,36	0,347
Mittel = 0,376				

93. Vers.-R. Weicher Kalkstein
auf hartem Kalksteine.
Trocken.

Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q}$ = „.
	Kiloogr.	Kiloogr.	Meter.	
Reibgesf. = 0,0464 □ M.				
62	140,36	97,36	1,22	0,692
63	140,36	96,46	2,55	0,687
64	140,36	95,72	2,58	0,682
65	140,36	89,71	3,38	0,639
66	570,17	375,88	1,84	0,659
67	570,17	377,24	1,98	0,661
68	570,17	326,62	3,01	0,573
69	570,17	331,52	2,97	0,581
Mittel = 0,647				

94. Vers.-Reihe. Ziegelstein auf
hartem Kalksteine.
Trocken.

Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q}$ = „.
	Kiloogr.	Kiloogr.	Meter.	
Reibgesf. = 0,0506 □ M.				
70	133,45	75,54	2,07	0,566
71	133,45	78,75	2,90	0,590
72	401,26	229,21	1,60	0,571
73	401,26	253,72	2,13	0,632
74	401,26	231,42	2,50	0,576
75	401,26	258,51	2,40	0,644
76	401,26	243,20	2,64	0,606
Mittel = 0,598				

95. Vers.-Reihe. Eichenhirnholz
auf hartem Kalksteine.
Trocken.

Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 Met.	$\frac{F}{Q}$ = „.
	Kiloogr.	Kiloogr.	Meter.	
Reibgesf. = 0,0636 □ M.				
77	129,16	42,64	2,88	0,330
78	129,16	41,35	3,09	0,320
79	129,16	40,34	3,33	0,312
80	129,16	40,34	3,33	0,312
81	600,97	264,76	2,59	0,440
82	600,97	277,60	2,44	0,461
83	600,97	271,40	2,84	0,451
84	600,97	254,39	3,01	0,423
Mittel = 0,381				

96. Vers.-Reihe. Schmiedeeisen
auf hartem Kalksteine.
Reibungsfläche = 0,0439 □ M.

Nr.	Q.	F.	Geschw. nach 3 M.	$\frac{F}{Q}$ = „.
	Kiloogr.	Kiloogr.	Meter.	
a) Trocken.				
85	139,31	31,75	2,15	0,227
86	139,31	31,75	2,15	0,227
87	139,31	36,65	2,50	0,263
88	139,31	32,98	2,70	0,236
89	401,12	97,68	2,93	0,243
90	401,12	89,62	3,06	0,223
Mittel = 0,236				
b) Mit Wasser benetzt.				
91	139,31	41,60	2,77	0,299
92	401,12	114,54	2,97	0,285
93	401,12	127,96	3,06	0,318
94	401,12	111,38	3,45	0,277
Mittel = 0,295				

Es läßt sich schon im Voraus erwarten, daß beim Gleiten der Steine auf einander eine beträchtliche Abreibung an den Berührungsflächen stattfinden muß, was bei den vorstehenden Versuchen auch wirklich der Fall gewesen ist. Diese Abreibung zeigte sich am stärksten bei dem weichen Kalkstein von Saumont durch Bildung einer beträchtlichen Menge Kalkpulvers, welches jedoch auf die Gesetze der Reibung nicht den mindesten Einfluß zu haben schien. An manchen Stellen der reibenden Fläche bemerkte man nach vollbrachtem Lauf des Schlittens braune Streifen von ziemlich glänzender Politur, die eine so harte Kruste bildeten, daß sie vom Stahle kaum geritzt werden konnten. Durch Abschaben verwandelte sich diese Kruste in ein Pulver, welches seine braune Farbe verlor, und ganz so ausah wie das übrige Kalkpulver.

Bei den Versuchen Nr. 11 bis 16, wo die reibende Fläche auf eine abgerundete Kante reducirt war, zeigte sich die Abreibung noch stärker, indem hier nach Vollendung der genannten sechs Versuche die Kanten abgeschliffen waren, und im Ganzen eine Berührungsfläche von

0,0168 □M. erhalten hatten. Da nun dessenungeachtet die Reibung als unabhängig von der Größe der Berührungsfäche gefunden wurde, so schließt Morin, daß dieses Gesetz selbst auf den Fall Anwendung finde, wo jene Fläche sich während der Bewegung ändert.

Das Eichenholz erlitt beim Gleiten über Kalkstein eine ähnliche Aenderung seiner Reibungsfäche, wie sie früher beim Gleiten von Holz auf Holz beobachtet wurde, jedoch in viel geringerem Grade. Schmiedeeisen streifte sich beim Gleiten auf Kalkstein, dessen Oberfläche auch etwas geändert wurde, ohne daß dadurch Unregelmäßigkeiten in den Resultaten entstanden. Sobald man aber den Stein mit Wasser benetzte, nahm auch die Abnutzung des Eisens, und damit der Reibungswiderstand, beträchtlich zu, was einer bekannten Erfahrung in Bezug auf das Schleifen eiserner Werkzeuge auf Schleifsteinen vollkommen entspricht.

Tafel X. Versuche über die Reibung verschiedener Körper für den Zustand der Ruhe.

Anmerk. Die bei den folgenden Versuchen gebrauchten Kalksteine sind dieselben, welche in der Anmerkung zur vorigen Tabelle beschrieben sind. Der Ziegelstein war aus einem sehr gleichartigen Thon gestrichen und gut gebrannt, von rother Farbe, ohne Spuren von Verglasung.

97. Vers.-Reihe. Gußeisen auf Gußeisen.
Mit Schweinefett geschmiert.

Nr.	Q. Kilogr.	F. Kilogr.	Dauer der Verüh- rung.	F Q = μ.
Reib. fl. = 0,0052 □M.				
1	504,42	58,19	2-3''	0,115
2	504,42	58,19	7'	0,115
3	504,42	52,19	1-2''	0,103
4	504,42	52,19	7'	0,103
5	1002,42	98,09	8-10'	0,098
6	1002,42	103,79	3-4''	0,103
7	1002,42	103,79	3-4'	0,103
8	1488,42	160,79	1''	0,108
9	1488,42	160,79	9'	0,108
10	1488,42	155,09	2-3''	0,104
11	1488,42	155,09	6'	0,104
12	990,42	103,79	3-4''	0,104
13	990,42	103,79	6'	0,104
14	504,42	52,49	2-3''	0,104
15	504,42	52,49	5'	0,104
Reib. fl. = 0,0360 □M.				
16	502,76	52,49	3-4''	0,104
17	502,76	52,49	8-10'	0,104

Fortsetzung der 97. Vers.-Reihe.

Nr.	Q. Kilogr.	F. Kilogr.	Dauer der Verüh- rung.	F Q = μ.
18	502,76	46,78	5-6''	0,093
19	502,76	46,78	8-10'	0,093
20	1000,76	103,79	5-6''	0,103
21	1000,76	103,79	14'	0,103
22	1000,76	98,09	5-6''	0,098
23	1000,76	98,09	6'	0,098
24	1504,76	149,39	2-3''	0,100
25	1504,76	149,39	8'	0,100
26	1504,76	137,99	3-4''	0,092
27	1504,76	137,99	5'	0,092
Mittel = 0,100				

98. Vers.-Reihe. Weißbuchenholz auf Gußeisen.
Mit Schweinefett geschmiert.

Nr.	Q. Kilogr.	F. Kilogr.	Dauer der Verüh- rung.	F Q = μ.
Reib. fl. = 0,0336 □M.				
28	125,11	10,77	10'	0,086
29	125,11	10,77	1''	0,086
30	206,72	24,07	2'	0,116
31	206,72	24,07	7-8''	0,116
32	206,72	16,47	5'	0,080

Fortsetzung der 98. Vers.-Reihe.

Nr.	Q. Kilogr.	F. Kilogr.	Dauer der Verüh- rung.	F Q = μ.
33	206,72	16,47	4-5''	0,080
34	500,72	56,37	7'	0,112
35	500,72	44,97	3-4''	0,089
36	500,72	62,07	13'	0,124
37	500,72	39,27	4'	0,078
38	500,72	39,27	8-10''	0,078
39	1004,72	638,87	4-5''	0,060
40	1004,72	109,37	11'	0,108
41	1004,72	69,59	1''	0,069
42	1004,72	98,09	5'	0,097
43	1004,72	80,99	1-2''	0,080
44	1004,72	103,79	8-9'	0,103
45	1004,72	80,99	5'	0,080
46	1004,72	120,88	13'	0,120
47	1504,72	103,79	3-4''	0,069
48	1504,72	105,19	8-9''	0,070
49	1504,72	280,49	19 St.	0,186
Mittel = 0,095				

99. Verf. Reihe. Eichen auf
Eichenholz (L).
Ohne Schmiere.

Nr.	Q. Kilogr.	F. Kilogr.	Dauer der Verüh- rung.	F Q = μ.
Reib.fl. = 0,0636 □ M.				
50	195,93	83,84	5-6''	0,427
51	195,93	83,84	10'	0,427
52	195,93	71,39	1'	0,364
53	315,93	160,79	6'	0,509
54	315,93	137,99	30''	0,436
55	315,93	155,09	8-10'	0,498
56	399,93	183,79	8-10'	0,459
57	501,93	251,99	10'	0,502
58	501,93	194,99	5-6''	0,388
59	999,93	367,39	15'	0,367
60	999,93	400,19	10'	0,400
Mittel = 0,434				

100. Verf. Reihe. Weicher Kalk-
stein auf weichem Kalksteine.
Trocken.

Nr.	Q. Kilogr.	F. Kilogr.	Dauer der Verüh- rung.	F Q = μ.
Reib.fl. = 0,0800 □ M.				
61	142,39	103,79	15'	0,728
62	150,02	108,49	15'	0,723
63	572,20	430,59	15'	0,752
64	578,08	422,99	5-6''	0,731
65	578,08	434,39	5-6''	0,751
Reib.fl. = 0,0464 □ M.				
66	140,36	103,79	2'	0,739
67	570,17	445,79	10'	0,781
68	570,17	445,79	1'	0,781
Reibungsfl. linear.				
69	135,30	103,79	2'	0,774
70	273,11	200,68	5-6''	0,740
Mittel = 0,740				

101. Verf. Reihe. Harter Kalk-
stein auf weichem Kalksteine.
Trocken.

Nr.	Q. Kilogr.	F. Kilogr.	Dauer der Verüh- rung.	F Q = μ.
Reib.fl. = 0,04 □ M.				
71	143,56	108,49	5-6''	0,755
72	303,37	223,49	10'	0,736
73	603,37	457,19	15'	0,757
Mittel = 0,749				

102. Verf. Reihe. Ziegelstein
auf weichem Kalksteine.
Trocken.

Nr.	Q. Kilogr.	F. Kilogr.	Dauer der Verüh- rung.	F Q = μ.
Reib.fl. = 0,0506 □ M.				
74	130,75	83,84	5-6''	0,641
75	133,45	92,59	10'	0,692
76	260,56	172,29	15'	0,661
77	260,56	160,79	4'	0,617
78	392,79	251,99	15'	0,642
79	392,56	246,26	10'	0,627
80	401,26	286,19	5'	0,713
Mittel = 0,665				

103. Verf. Reihe. Eichenhirnholz
auf weichem Kalksteine.
Trocken.

Nr.	Q. Kilogr.	F. Kilogr.	Dauer der Verüh- rung.	F Q = μ.
Reib.fl. = 0,0636 □ M.				
81	129,16	80,99	3-4''	0,628
82	129,16	80,99	10'	0,628
83	402,97	251,99	15'	0,625
84	504,97	286,19	15'	0,566
85	504,97	331,79	15'	0,657
86	600,97	400,19	15'	0,665
Mittel = 0,628				

104. Verf. Reihe. Schmiedeeisen
auf weichem Kalksteine.
Trocken.

Nr.	Q. Kilogr.	F. Kilogr.	Dauer der Verüh- rung.	F Q = μ.
Reib.fl. = 0,0439 □ M.				
87	139,31	69,59	10'	0,499
88	218,42	83,84	15'	0,383
89	398,42	200,68	5-6''	0,503
90	398,42	223,49	10'	0,561
Mittel = 0,486				

105. Verf. Reihe. Harter Kalk-
stein auf hartem Kalksteine.
Trocken.

Nr.	Q. Kilogr.	F. Kilogr.	Dauer der Verüh- rung.	F Q = μ.
Reib.fl. = 0,0872 □ M.				
91	121,25	115,19	10'	0,757
92	605,79	367,39	2'	0,606

Fortsetzung der 105. Verf. Reihe.

Nr.	Q. Kilogr.	F. Kilogr.	Dauer der Verüh- rung.	F Q = μ.
Reib.fl. = 0,0400 □ M.				
93	143,56	103,79	5-6''	0,723
94	603,37	422,99	10'	0,701
Reibungsfl. linear.				
95	136,19	103,79	15'	0,762
96	410,00	274,79	2'	0,670
Mittel = 0,704				

106. Verf. Reihe. Weicher Kalk-
stein auf hartem Kalksteine.
Trocken.

Nr.	Q. Kilogr.	F. Kilogr.	Dauer der Verüh- rung.	F Q = μ.
Reib.fl. = 0,0464 □ M.				
97	140,36	103,79	2-3''	0,739
98	222,17	160,79	5'	0,723
99	570,17	445,79	10'	0,781
Mittel = 0,748				

107. Verf. Reihe. Ziegelstein
auf hartem Kalksteine.
Trocken.

Nr.	Q. Kilogr.	F. Kilogr.	Dauer der Verüh- rung.	F Q = μ.
Reib.fl. = 0,0506 □ M.				
100	135,45	92,39	5'	0,692
101	401,26	263,39	5'	0,656
Mittel = 0,674				

108. Verf. Reihe. Schmiedeeisen
auf hartem Kalksteine.
Trocken.

Nr.	Q. Kilogr.	F. Kilogr.	Dauer der Verüh- rung.	F Q = μ.
Reib.fl. = 0,0439 □ M.				
102	139,31	46,78	4-5''	0,335
103	401,12	160,79	10'	0,400
104	809,12	407,79	15'	0,539
Mittel = 0,425				

109. Verf.-Reihe. Eichenholz auf hartem Kalksteine.
Trocken.

Nr.	Q. Kiloar.	F. Kiloar.	Dauer der Berüh- rung.	$\frac{F}{Q}$ = "
Reib.fl. = 0,0636 □M.				
105	129,16	69,59	5'	0,538
106	129,16	80,99	3-4''	0,719
107	129,16	80,99	10'	0,719
108	129,16	75,29	5'	0,583
109	600,97	377,39	15'	0,627
110	600,97	411,59	15'	0,684
111	600,97	377,39	15'	0,627
Mittel = 0,643				

110. Verf.-Reihe. Weicher Kalk-
stein auf weichem Kalksteine.
Mit Mörtel *).

Nr.	Q. Kiloar.	F. Kiloar.	Dauer der Berüh- rung.	$\frac{F}{Q}$ = "
Reib.fl. = 0,0800 □M.				
112	147,67	115,17	10'	0,780
113	229,48	183,59	10'	0,800
114	355,48	263,39	15'	0,740
115	355,48	275,79	10'	0,773
116	355,48	251,99	10'	0,709
117	529,48	445,79	15'	0,841
Reib.fl. = 0,0464 □M.				
118	140,36	108,49	10'	0,772
119	222,17	172,19	10'	0,775
120	222,17	172,19	10'	0,775

Fortsetzung der 110. Verf.-Reihe.

Nr.	Q. Kiloar.	F. Kiloar.	Dauer der Berüh- rung.	$\frac{F}{Q}$ = "
Reib.fl. = 0,0152 □M.				
121	354,17	257,69	30'	0,727
122	528,17	365,99	15'	0,792
123	528,17	411,59	10'	0,779
124	530,17	365,99	15'	0,690
125	702,17	525,59	15'	0,748
126	145,02	115,19	10'	0,794
127	226,83	137,99	10'	0,608
128	358,83	217,79	10'	0,607
129	526,83	331,79	15'	0,629
Mittel = 0,741				

Obgleich die Reibung des Gußeisens und des Weißbuchenholzes schon Gegenstand früherer Versuche des Herrn Morin gewesen ist, so hat letzterer doch geglaubt, diese genannten Substanzen noch einer besondern Prüfung unterwerfen zu müssen, weil dieselben gegenwärtig zu verschiedenen der Reibung unterworfenen Maschinentheilen, und namentlich zu den Rämmen und Zähnen der Räderwerke benutzt werden.

Die Resultate der 93ten Versuchs-Reihe ergeben, daß die Reibung der Metalle für den Zustand der Ruhe nach einer sehr kurzen Zeit, welche eine bis zwei Sekunden nicht übersteigt, ihren größten Werth annimmt, so wie auch, daß der Reibungscoefficient, wenn das Gußeisen mit Schweinesfett geschmiert ist, mit demjenigen übereinstimmt, der sich nach Tafel VIII. für Talgschmiere ergeben hat. Weniger Regelmäßigkeit findet dagegen in den Resultaten der nächstfolgenden Versuchsreihe statt, indem hier, nach Herrn Morin, die Porosität und Compressibilität des Holzes der Schmiere gestattet, sich auf eine ungleichmäßige Weise zu vertheilen. Eine Vergleichung der in der 98ten Verf.-Reihe zusammengestellten Ergebnisse zeigt, daß die Reibung des Weißbuchenholzes mit der Dauer der Ruhezeit sehr langsam wächst, und daß es also eine geraume Zeit erfordert, bis die Schmiere zwischen den Berührungsflächen ganz herausgedrückt ist, die Flächen also den Zustand bloßer Fettigkeit angenommen haben, bei welchem die Reibung zu ihrem Maximum gelangt.

Das Gesetz der Unabhängigkeit der Reibung von der Größe der Berührungsflächen findet auch bei den Steinen Anwendung. Weiche und harte Kalksteine geben einerlei Reibung, sie

*) Dieser Mörtel bestand aus einem Theile Kalk von Valliere bei Metz, 3 Theilen gestebten Flußsand und einem Fünftel Wasser.

mögen einzeln für sich oder auf einander versucht werden. Eine Zwischenlage von Mörtel scheint keine Aenderung in dem Betrage dieses Widerstandes zu bedingen. Ebenso giebt Eichenholz auf weichem Kalksteine dieselbe Reibung wie auf hartem Kalksteine; ein Gleiches gilt vom Schmiedeeisen und von den Ziegelsteinen, wobei ebenfalls die Größe der Berührungsfläche ohne Einfluß ist.

Nachdem nun in dem Vorhergehenden die Morinschen Versuche so vollständig, wie es für die Beurtheilung derselben erforderlich schien, dargelegt worden sind, sollen noch die daraus gezogenen Endresultate, auf welche es bei der praktischen Anwendung hauptsächlich ankommt, in nachstehender Tabelle übersichtlich zusammengestellt werden. Vorher muß ich mir aber, um Mißverständnissen vorzubeugen, die Bemerkung erlauben, daß in den von Morin mitgetheilten Formeln und Zahlen mehrere Druckfehler stehen geblieben sind, die zu berichtigen ich mich verpflichtet fühle. Dergleichen Berichtigungen habe ich indessen nur da eintreten lassen, wo über das Obwalten eines Fehlers durchaus kein Zweifel stattfand, wie eine Vergleichung der vorhergehenden zehn Tabellen mit dem französischen Originale leicht ergibt.

Uebrigens hat sich Herr Morin durch die vorliegende, sehr mühsame und werthvolle Arbeit den gegründetsten Anspruch auf den Dank aller Techniker erworben. Nur durch Versuche, welche mit Hilfe eines solchen theoretischen Apparates, wie er Herrn Morin zu Gebote steht, angeordnet, und mit einer so seltenen Sorgfalt und Umsicht durchgeführt sind, kann Kunst und Wissenschaft wirksam gefördert werden. In dieser Beziehung scheinen die Versuche des Herrn Morin ganz geeignet, den Ausspruch seines berühmten Landsmannes und militärischen Vorgesetzten zu bewahrheiten: *La pratique ne saura marcher vers la véritable perfection sans le flambeau de la théorie.*

Tafel XI. Zusammenstellung der Reibungscoefficienten nach den vorstehend mitgetheilten Versuchen von Morin.

Anmerk. Wie bisher bedeutet das Zeichen (=), daß die Holzfasern beim Gleiten parallel, und (+) daß die horizontal liegenden Fasern des gleitenden Körpers auf der Richtung der Bewegung senkrecht waren; (L) bedeutet, daß sich Hirnholz über Langholz nach der Richtung der Fasern bewegte.

Laufende Nr.	Reibende Körper.	Schmiere.	Reibungscoefficient		Laufende Nr.	Reibende Körper.	Schmiere.	Reibungscoefficient	
			für die Bewegung.	für die Ruhe.				für die Bewegung.	für die Ruhe.
A. Versuche vom Jahr 1831.									
Auf Eichenholz.									
1	Eichenholz . . (=)	Trocken . . .	0,478	0,604	8	Wilder Birnb. (=)	Trocken . . .	0,372	0,440
2	desgl. . . . (+)	„	0,314	0,531	9	Ebereschenholz (=)	„	0,400	0,547
3	Ulmenholz . . (=)	„	0,432	0,694	10	Schmiedeeisen (=)	„	0,609	—
4	desgl. (+)	„	0,450	0,570	11	Messing . . . (=)	„	0,617	—
5	Eichenholz . . (=)	„	0,400	0,503	12	Schwarz zugericht.	„	0,265	0,740
6	Kiefernholz . . (=)	„	0,356	0,516	13	Rindsleder,	„	0,515	0,593
7	Rothbuchenh. (=)	„	0,360	0,533	14	flach . . . (=)	„	0,335	0,433
						hochkantig (=)	„		

Laufende Nr.	Reibende Körper.	Schmiere.	Reibungscoefficient		Laufende Nr.	Reibende Körper.	Schmiere.	Reibungscoefficient	
			für die Bewegung.	für die Ruhe.				für die Bewegung.	für die Ruhe.
15	Rindsleder, hochkantig . . . (=)	Vollständig mit Wasser getränkt	0,290	0,793	51	b) Auf Ulmenholz. Ulmenholz . . . (=)	Blos fettig . .	0,140	—
16	Eichenholz . . (+)	desgl.	0,248	0,710	52	desgl.	Trockne Seife	0,140	0,217
17	Hanfgurte . . (=)	Trocken	0,517	0,642	53	Eichenholz . . (=)	Trocken	0,247	0,376
18	Hanfgeflechte aus dünnen Seilen (=)	desgl.	0,318	0,463	54	desgl.	Trockne Seife.	0,136	—
19	Altes Hanfseil (=)	"	0,523	0,795	55	"	Talg	0,073	0,178
B. Versuche vom Jahr 1832.					56	"	Schweinefett . .	0,066	—
a) Auf Eichenholz.					57	"	Blos fettig . .	0,137	—
20	Eichenholz . . (=)	Trockne Seife	0,164	0,444	58	Gusseisen . . (=)	Trocken	0,193	—
21	desgl.	Talg	0,075	0,164	59	desgl.	Olivenöl	0,066	—
22	"	Schweinefett . .	0,067	—	60	"	Talg	0,077	—
23	"	Blos fettig . .	0,108	0,356	61	"	Blos fettig . .	0,115	—
24	Eichenholz . . (+)	Trocken	0,336	—	62	"	Schweinefett u. Graphit . .	0,092	—
25	desgl.	Talg	0,083	0,254	63	"	Blos fettig . .	0,137	—
26	"	Schweinefett . .	0,072	—	64	Schmiedeeisen (=)	Trocken	0,252	—
27	"	Blos fettig . .	0,143	0,314	65	desgl.	Talg	0,078	—
28	Eichenbirnholz (L)	Trocken	0,192	0,271	66	"	Schweinefett . .	0,078	—
29	Rothbuchenb. (=)	Talg	0,055	—	67	"	Olivenöl	0,055	—
30	desgl.	Blos fettig . .	0,148	—	68	"	Blos fettig . .	0,138	—
31	"	Schweinefett . .	—	0,330	c) Auf Gusseisen.				
32	"	Blos fettig . .	—	0,300	69	Eichenholz . . (=)	Trocken	0,372	—
33	Ulmenholz . . (=)	Trockne Seife	0,137	0,411	70	desgl.	Blos fettig . .	0,168	—
34	desgl.	Talg	0,072	0,142	71	"	Talg	0,080	—
35	"	Schweinefett . .	0,056	0,277	72	Ulmenholz . . (=)	"	0,066	—
36	"	Blos fettig . .	0,119	0,420	73	desgl.	Blos fettig . .	0,135	0,098
37	Rindsled., flach(=)	Trocken	0,293	—	74	Weißbuchenb. (=)	Trocken	0,394	—
38	Schmiedeeisen (=)	Wasser	0,256	0,649	75	desgl.	Talg	0,070	0,131
39	desgl.	Trockne Seife.	0,214	—	76	"	Schweinefett . .	0,073	0,136
40	"	Talg	0,085	0,108	77	"	Schweinefett u. Graphit . .	0,058	—
41	Gusseisen . . . (=)	Trocken	0,490	—	78	"	Olivenöl	0,068	—
42	desgl.	Trockne Seife.	0,189	—	79	"	Bergtheer . . .	0,061	—
43	"	Wasser	0,218	0,646	80	"	Wagenschmiere	0,095	—
44	"	Talg	0,078	0,101	81	"	Blos fettig . .	0,136	—
45	"	Schweinefett . .	0,075	0,103	82	Gvajacholz . . .	Talg	0,074	—
46	"	Olivenöl	0,081	0,102	83	desgl.	Olivenöl	0,076	—
47	"	Blos fettig . .	0,107	—	84	"	Blos fettig . .	0,121	—
48	Kupfer (=)	Talg	0,069	0,095	85	Wilder Birnb. (=)	Trocken	0,436	—
49	desgl.	Blos fettig . .	0,100	—	86	desgl.	Talg	0,067	—
50	Hanfstreunen. (+)	Wasser	0,332	0,869	87	"	Schweinefett . .	0,068	—

Laufende Nr.	Reibende Körper.	Schmiere.	Reibungs- coefficient.		Laufende Nr.	Reibende Körper.	Schmiere.	Reibungs- coefficient.	
			für die Bewer- gung.	für die Ruhe.				für die Bewer- gung.	für die Ruhe.
88	Wildes Birnb. (=)	Blos fettig . .	0,173	—	125	Bronze	Olivnöl	0,077	—
89	Starles gegerbtes Rindsleder, flach	Trocken	0,559	—	126	"	Blos fettig . .	0,098	—
90	desgl.	Wasser	0,365	0,621	127	Hanfströhnen (+)	Talg	0,194	—
91	"	Talg	0,159	—	128	desgl.	Olivnöl	0,153	—
92	"	Olivnöl	0,133	0,122	d) Auf Schmiedeeisen.				
93	"	Blos fettig . .	0,229	—	129	Eichenholz . . (=)	Talg	0,098	—
94	"	Geschmiert u. m. Wasser benetzt	—	0,267	130	desgl.	Blos fettig . .	0,149	—
95	desgl., hochkantig.	Wasser	0,238	0,615	131	Guajacholz	Olivnöl	0,072	—
96	desgl.	Olivnöl	0,135	0,127	132	desgl.	Blos fettig . .	0,166	—
97	Gusseisen	Trocken	0,152	0,162	133	Gusseisen	Talg	0,098	0,100
98	desgl.	Wasser	0,314	—	134	desgl.	Schweinefett . .	0,058	0,100
99	"	Trockne Seife	0,197	—	135	"	Olivnöl	0,063	—
100	"	Talg	0,100	0,097	136	"	Wagenschmiere	0,155	—
101	"	Schweinefett . .	0,070	—	137	"	Blos fettig . .	0,143	—
102	"	Schweinefett u. Graphit	0,055	—	138	Schmiedeeisen . .	Trocken	0,138	0,137
103	"	Olivnöl	0,064	—	139	desgl.	Talg	0,082	0,115
104	"	Blos fettig . .	0,144	—	140	" (linear)	"	0,114	—
105	Schmiedeeisen . .	Trocken	0,194	0,192	141	"	Schweinefett . .	0,081	—
106	desgl.	Talg	0,103	0,101	142	"	Olivnöl	0,071	—
107	" (linear)	"	—	0,117	143	" (linear)	"	0,145	—
108	"	Schweinefett . .	0,076	—	144	"	Blos fettig . .	0,177	—
109	"	Olivnöl	0,066	0,113	145	Stahl	Talg	0,093	—
110	" (linear)	"	0,138	0,118	146	"	Schweinefett . .	0,076	—
111	"	Wagenschmiere	0,124	—	147	Bronze	Trocken	0,166	—
112	Stahl	Trocken	0,202	—	148	desgl.	Talg	0,081	—
113	desgl.	Talg	0,105	0,108	149	"	Schweinefett u. Graphit	0,089	—
114	"	Schweinefett . .	0,081	—	150	"	Olivnöl	0,077	0,164
115	"	Olivnöl	0,079	—	151	"	Blos fettig . .	0,166	0,172
116	"	Blos fettig . .	0,109	—	e) Auf Bronze.				
117	Messing	Trocken	0,189	—	152	Guajacholz	Talg	0,082	—
118	desgl.	Talg	0,072	—	153	desgl.	Olivnöl	0,053	—
119	"	Schweinefett . .	0,068	—	154	"	Blos fettig . .	0,146	—
120	"	Olivnöl	0,066	0,103	155	Rindsleder, flach .	Talg	0,241	—
121	"	Wagenschmiere	0,134	—	156	desgl.	Olivnöl	0,191	—
122	"	Blos fettig . .	0,113	—	157	"	das Leder fettig, die Bronze mit Wasser benetzt	0,287	—
123	Bronze	Trocken	0,217	—	158	Rindsleder, hochl.	Talg	0,138	—
124	desgl.	Talg	0,086	0,106	159	desgl.	Olivnöl	0,135	—

Laufende Nr.	Reibende Körper.	Schmiere.	Reibungscoefficient		Laufende Nr.	Reibende Körper.	Schmiere.	Reibungscoefficient	
			für die Bewegung.	für die Ruhe.				für die Bewegung.	für die Ruhe.
160	Rindsleder, hochf.	das Leder fettig, die Bronze mit Wasser benetzt	0,244	—	C. Versuche vom Jahr 1833.				
161	Gusseisen	Trocken	0,147	—					
162	desgl.	Talg	0,085	—	180	Weicher Kalkstein	Trocken	0,637	0,740
163	"	Schweinefett	0,070	—	181	desgl.	Mörtel	—	0,741
164	"	Olivenöl	0,067	—	182	Harter Kalkstein .	Trocken	0,666	0,749
165	"	Blos fettig	0,132	—	183	Ziegelstein	desgl.	0,645	0,665
166	Schmiedeeisen	Trocken	0,172	—	184	Eichenhirnholz (L)	"	0,375	0,628
167	desgl.	Talg	0,103	—	185	Schmiedeeisen	"	0,694	0,486
168	"	Schweinefett	0,075	—	b) Auf hartem Kalkstein.				
169	"	Olivenöl	0,078	—	186	Harter Kalkstein .	Trocken	0,376	0,704
170	"	Wagenschmiere	0,168	—	187	Weicher Kalkstein	desgl.	0,647	0,748
171	"	Blos fettig	0,160	—	188	Ziegelstein	"	0,598	0,674
172	Stahl	Trocken	0,152	—	189	Eichenhirnholz (L)	"	0,381	0,643
173	desgl.	Talg	0,056	—	190	Schmiedeeisen	"	0,236	0,425
174	"	Schweinefett u. Graphit	0,067	—	191	desgl.	Wasser	0,295	—
175	"	Olivenöl	0,053	—	c) Auf Gusseisen.				
176	"	Wagenschmiere	0,170	—	192	Gusseisen	Schweinefett	—	0,100
177	Bronze	Trocken	0,201	—	193	Weißbuchen	desgl.	—	0,095
178	desgl.	Olivenöl	0,058	—	d) Auf Eichenholz.				
179	"	Blos fettig	0,134	—	194	Eichenhirnholz (L)	Trocken	—	0,434

III.

Zusammenstellung

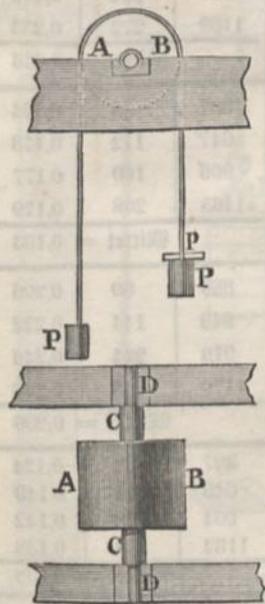
der

Versuche über die drehende Reibung.

Versuche von Musschenbroek.

Die von Musschenbroek über die gleitende Reibung angestellten Versuche, welche in dem vorhergehenden Abschnitte mitgetheilt worden sind, bezogen sich nur auf Hölzer mit ebenen Flächen, welche geradelinig über einander fortbewegt wurden. Die Reibung der Metalle untersuchte er dagegen bei einer drehenden Bewegung, und in sofern gehören die darauf Bezug habenden Versuche in den gegenwärtigen Abschnitt.

Zu diesen Versuchen bediente sich Musschenbroek eines sehr genau gearbeiteten Instrumentes, von ihm Tribometer genannt, welches nach nebenstehender Skizze in Folgendem besteht:



AB ist eine hölzerne Walze oder Trommel von 4 Zoll Durchmesser, durch welche eine Ase DCCD aus gut raffinirtem Stahle gesteckt und gehörig befestigt ist. Diese Ase hat an jedem Ende einen dünnen Zapfen D von $\frac{1}{4}$ Zoll, und einen dicken Zapfen C von $\frac{1}{2}$ Zoll Durchmesser, um beobachten zu können, ob die Reibung für Zapfen von verschiedener Dicke dieselbe bleibt oder nicht. Das ganze Instrument wog 3 Pfund. — Bei den Versuchen wurden die genannten Zapfen in passende Lager aus verschiedenen Substanzen gelegt, um die Trommel AB wurde eine Schnur geschlungen, und an den herabhängenden Enden der Letzteren gleich große Gewichte P, P befestigt, um durch den Druck auf die Zapfenlager beliebig steigern zu können. Sodann wurde das an dem einen Ende der Schnur herabhängende Gewicht P durch ein aufgelegtes Uebergewicht p beschwert, welches so lange vergrößert wurde, bis das Instrument sich eben zu drehen anfing. Bei den nachstehend mitgetheilten Versuchen kamen nur die dünnen Zapfen D, D in Anwendung, deren Durchmesser sich zu dem der Trommel wie 1 : 16 verhalten.

Um nun nach diesen Versuchen den Coefficienten μ der drehenden oder Zapfenreibung zu berechnen, sei $W = 3$ Pfd. das Gewicht des beschriebenen Instrumentes, dann ist $Q = 2P + W + p$

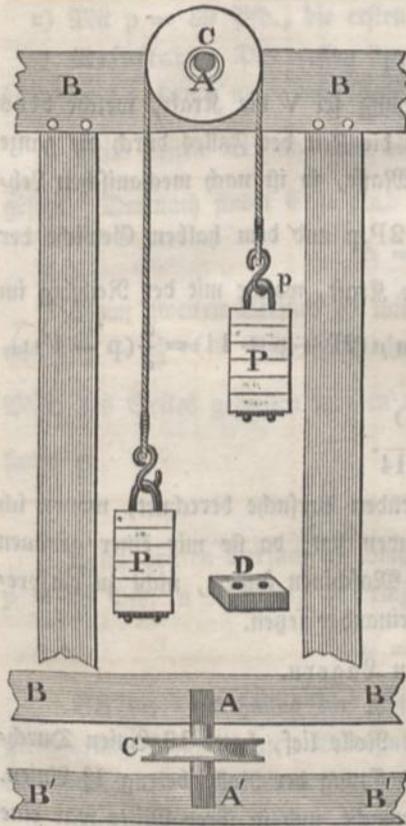
der Druck auf die Zapfenlager, und $F = \mu Q$ die davon erzeugte Reibung im Umfang der Zapfen. Die Kraft, welche mit dieser Reibung in Bezug auf drehende Bewegung im Gleichgewichte steht, ist das auf der einen Seite zugelegte Uebergewicht p , und da nach dem angegebenen Verhältnisse der Durchmesser der Hebelarm von p sechszehnmal so groß ist als der von F , so ergibt sich $F = 16 \cdot p$. Ist hiernach F bestimmt, so findet man durch Division mit $Q = 2P + W + p$ den Reibungscoefficienten μ , wie aus folgender Tabelle näher erhellen.

Tafel I. Musschenbroek's Versuche über die drehende Reibung stählerner Zapfen in Lagern aus verschiedenen Substanzen.

Substanz der Zapfenlager.	P. Pfund.	Ohne Schmiere.				Mit Olivenöl geschmiert.			
		p. Quentch.	Q. Quentch.	F. Quentch.	$\frac{F}{Q} = \mu$.	p. Quentch.	Q. Quentch.	F. Quentch.	$\frac{F}{Q} = \mu$.
Nr. 1. Guajacholz.	0	10	394	160	* 0,406	6	390	96	0,246
	1	12	652	192	0,293	10	650	160	0,246
	2	14	910	224	0,246	14	910	224	0,246
	3	20	1172	320	0,273	21	1173	336	0,286
				Mittel = 0,271				Mittel = 0,256	
Nr. 2. Gehärteter Stahl.	0	6	390	96	0,246	4	388	64	0,165
	1	11	651	176	0,270	10	650	160	0,246
	2	17	913	272	0,298	14	910	224	0,246
	3	21	1173	336	0,287	17	1169	272	0,233
				Mittel = 0,275				Mittel = 0,223	
Nr. 3. Kupfer.	0	4	388	64	0,165	3	387	48	0,124
	1	8	648	128	0,198	7	647	112	0,173
	2	12	908	192	0,211	10	906	160	0,177
	3	15	1167	240	0,206	13	1165	208	0,179
				Mittel = 0,195				Mittel = 0,163	
Nr. 4. Zinn.	0	6	390	96	0,246	5	389	80	0,206
	1	11	651	176	0,270	9	649	144	0,222
	2	18	914	288	0,315	14	910	224	0,246
	3	22	1174	352	0,300	18	1170	288	0,246
				Mittel = 0,283				Mittel = 0,230	
Nr. 5. Blei.	0	4	388	64	0,165	3	387	48	0,124
	1	7	647	112	0,173	6	646	96	0,149
	2	8	904	128	0,142	8	904	128	0,142
	3	10	1162	160	0,138	10	1162	160	0,138
				Mittel = 0,154				Mittel = 0,138	
Nr. 6. Messing.	0	4	388	64	0,165	3	387	48	0,124
	1	6	646	96	0,149	5½	645½	88	0,136
	2	8	904	128	0,142	7½	903½	120	0,133
	3	10	1162	160	0,138	9½	1161½	152	0,131
				Mittel = 0,148				Mittel = 0,131	

Nach diesen Versuchen, schließt Musschenbroek, ist die Reibung der stählernen Ase am geringsten auf Messing; sie wird progressiv größer auf Blei, Kupfer, Guajac, Stahl, und ist am größten auf Zinn. Dies gilt jedoch nur für den Fall, daß keine Schmiere gebraucht wird. Werden dagegen die Zapfen und Lager mit Olivenöl geschmiert, so ändert sich die obige Reihenfolge, indem sich jetzt die Reibung auf Guajacholz am größten ergibt, wie durch Betrachtung der vorstehenden Tabelle leicht erhellet. — Was indessen die von Musschenbroek aufgestellte Meinung betrifft, daß nämlich die Reibung dem Drucke nicht proportional sein, sondern in einem höheren Verhältnisse wachsen soll, so scheint dazu kein zureichender Grund vorzuliegen; denn wollte man die vorstehend mitgetheilten Versuche in dieser Beziehung auch als entscheidend ansehen, was sie wegen der geringen Pressungen, die dabei in Anwendung kamen, nicht wohl sein können, so würde doch ein Größerwerden der Reibung bei höheren Pressungen allgemeyn keinesweges durch sie constatirt. Man würde mit demselben Rechte die Folgerung ableiten können, daß die Reibung bis zu einem gewissen Grade der Pressung zunimmt, darüber hinaus aber constant bleibt oder wieder kleiner wird; obwohl auch diese Folgerung in den Ergebnissen späterer Versuche keine Bestätigung findet.

Versuche von Coulomb.



Vorrichtung zu diesen Versuchen. Eine gut centrirte Rolle C von 1 Fuß Durchmesser wird mittelst einer durchgesteckten Ase von zwei hölzernen Balken BB, B' B', etwa 10 Fuß über dem Fußboden erhoben, getragen, und an den herabhängenden Enden des Seiles, welches in der Rinne dieser Rolle liegt, sind die Gewichte P, P aufgehängt. Letztere bestehen aus übereinander gelegten, parallelpipedischen Gußstücken D, von denen jedes etwa 50 Pfd. wiegt. Die beiden Enden der Ase AA' sind vierkantig bearbeitet, damit sie in den Vertiefungen der Balken B, B' unbeweglich festliegen; dagegen ist der mittlere Theil der Ase genau rund abgedreht, und über diesen runden Theil läuft die Rolle mit einer sehr genau ausgearbeiteten runden Oeffnung, welche röhrenförmig durch ihre Mitte geht.

Außer dem Gewichte, welches zur Biegung des Seiles erforderlich war, wurde noch ein Uebergewicht p aufgelegt, um auf der einen Seite der Rolle eine fallende Bewegung des größeren Gewichtes $P + p$ zu bewirken, und nachdem man demselben eine unmerkliche Bewegung mitgetheilt hatte, beobachtete man die Zeit in halben Sekunden, welche dieses Gewicht gebrauchte, um sowohl die erste, als

auch die zweite Hälfte der ganzen, sechs Fuß betragenden, Fallhöhe zu durchlaufen. — Auf diese Weise ließ man bei jedem Versuche zuerst das Gewicht auf einer Seite, und dann das auf der andern Seite der Rolle sich herabbewegen, und von beiden Ergebnissen wurde das arithmetische Mittel genommen.

Diese Versuche beziehen sich daher nur auf die drehende Reibung während der Bewegung, nicht aber für den Ruhestand.

Berechnung der Versuche. Um aus den so angestellten Versuchen den Reibungscoefficienten zu berechnen, müssen die Fälle, wo die Bewegung gleichförmig war, von denjenigen unterschieden werden, wo eine gleichförmig beschleunigte Bewegung stattfand.

Bezeichnet demnach d den Durchmesser der Rolle und δ den der Ase, so ist für den ersteren Fall p die Kraft, welche mit der Zapfenreibung während der gleichförmigen Bewegung im Gleichgewichte war, und indem man dieselbe auf den Umfang der Ase reducirt, erhält man die gleichgestellte Kraft $= \frac{d}{\delta} \cdot p$. Das Gewicht der Rolle betrug 14 Pfd.; daher ist der Druck auf die Ase $= 2P + p + 14$ Pfd., und wenn μ den Reibungscoefficienten bedeutet, so hat man

$$\mu(2P + p + 14) = \frac{d}{\delta} p;$$

$$\text{also I.) } \mu = \frac{\frac{d}{\delta} p}{2P + p + 14}.$$

Für den Fall einer gleichförmig beschleunigten Bewegung sei V die Kraft, welche bloß zur Ueberwindung der Trägheit der Massen erforderlich ist, t die Zeit des Falles durch die ganze Höhe von $h = 6$ Fuß und M das Gewicht der bewegten Masse, so ist nach mechanischen Lehren $V = \frac{hM}{gt^2}$; worin M aus der Summe der Gewichte $2P, p$ und dem halben Gewicht der Rolle besteht, so daß also $M = 2P + p + 7$ Pfd. ist. Die Kraft, welche mit der Reibung im Gleichgewichte war, ist nun bekanntlich $= p - V$; daher hat man $\mu(2P + p + 14) = \frac{d}{\delta}(p - V)$;

$$\text{also II.) } \mu = \frac{\frac{d}{\delta}(p - V)}{2P + p + 14}.$$

Nach diesen beiden Formeln hat Coulomb die folgenden Versuche berechnet, wovon ich die Resultate ganz so wiedergebe, wie sie der Autor gefunden hat, da sie mir einer genauen Theorie der Zapfenreibung, besonders wie sich dieselbe bei Maschinen äußert, nicht zu entsprechen scheinen. Ich werde später meine Ansicht hierüber auseinander setzen.

I. Eiserne Aren in kupfernen Lagern.

(Ohne Schmiere.)

Der runde Theil der eisernen Ase, über welchen die Rolle lief, hatte 19 Linien Durchmesser, und der Spielraum der Ase in der röhrenförmigen Oeffnung der Rolle betrug $1\frac{3}{4}$ Linien. Die Rolle von 12 Zoll Durchmesser war aus Guajacholz gemacht, und in ihrer Mitte war eine

aus Kupfer gefertigte Buchse eingefest; das Ganze wog, wie bereits angegeben, 14 Pfd. Bevor die eigentlichen Versuche anfangen, suchte man durch viele Hin- und Herdrehungen der Rolle die größtmögliche Politur der Axe und der Buchse hervorzubringen.

1ster Versuch. Das um die Rolle gelegte Seil hatte 3 Linien Umfang, und an jedem Ende desselben hing ein Gewicht $P = 103$ Pfd. Ein Uebergewicht $p = 6$ Pfd. erzeugte eine langsame und unregelmäßige Bewegung.

2ter Versuch. Das umgelegte Seil, welches aus sechs Fäden gedreht war, hatte circa 4 Linien Durchmesser, und an jedem Ende desselben war $P = 200$ Pfd. aufgehängt.

a) Zur Hervorbringung einer langsamen und unregelmäßigen Bewegung war $p = 10\frac{1}{2}$ Pfd. erforderlich.

b) Bei einer Ueberwucht von $p = 13\frac{1}{2}$ Pfd. wurden die ersten 3 Fuß in 12, und die drei folgenden in 6 halben Sekunden durchlaufen.

3ter Versuch. Dasselbe Seil war an jedem Ende mit $P = 400$ Pfd. belastet, und es erforderte:

a) ein Uebergewicht von $p = 21$ Pfd., um eine langsame und anhaltende Bewegung zu erzeugen.

b) Mit $p = 28$ Pfd. wurden die ersten 3 Fuß in 11, die drei letzten in 5 halben Sekunden durchlaufen.

c) Mit $p = 39$ Pfd., die ersten 3 Fuß in 6, die folgenden 3 Fuß in 3 halben Sekunden.

Resultate. Den ersten Versuch und die Operationen a) der beiden folgenden Versuche berechnet Coulomb unter dem Gesichtspunkt einer gleichförmigen Bewegung, also nach der Formel I.

Beim ersten Versuch wird die Steifigkeit des Seiles unberücksichtigt gelassen und $\frac{d}{\delta} = 7$ gesetzt. Demnach findet Coulomb

$$\mu = \frac{7 \cdot 6}{206 + 6 + 14} = \frac{1}{5,4}$$

Beim zweiten Versuch a) wird für die Steifigkeit des Seiles $1\frac{1}{2}$ Pfd. in Abzug, also p mit $10\frac{1}{2} - 1\frac{1}{2} = 9$ Pfd. in Rechnung gebracht; und da der Durchmesser der Rolle bis zur Mitte des Seiles gemessen werden muß, so setzt Coulomb den Quotienten $\frac{d}{\delta} = 7,2$. Demnach findet er

$$\mu = \frac{7,2 \cdot 9}{400 + 10,5 + 14} = \frac{1}{6,5}$$

Beim dritten Versuch a) kommt 3 Pfd. für die Steifigkeit des Seiles in Abzug, also ist $p = 18$ Pfd. in Rechnung zu bringen. Daher

$$\mu = \frac{7,2 \cdot 18}{800 + 21 + 14} = \frac{1}{6,4}$$

Bei der Berechnung der Resultate nach Formel II, also unter dem Gesichtspunkt einer gleichförmig beschleunigten Bewegung, bringt Coulomb die Beschleunigung g mit 15 Fuß in Rechnung, und findet dann folgende Ergebnisse:

Beim zweiten Versuch b) ist $V = 2$ Pfd.; also die Kraft, welche mit den Widerständen

im Gleichgewichte war, $p - V = 11\frac{1}{2}$ Pfd., anstatt daß diese Kraft bei der vorhergehenden Operation a), wo eine unmerkliche Geschwindigkeit Statt gefunden hatte, $= 10\frac{1}{2}$ Pfd. war.

Beim dritten Versuch b) und c) ist $V = 5,2$ und $V = 16,9$ bezüglich; also die entsprechenden, mit den Widerständen im Gleichgewicht befindlichen Kräfte respective $p - V = 22,8$ Pfd. und $p - V = 22,1$ Pfd., während eine unmerkliche Bewegung den Widerstand $= 21$ Pfd. gegeben hatte. — Hieraus schließt Coulomb, daß die Geschwindigkeit nur auf eine sehr unmerkliche Weise auf die Größe der Reibung einwirke.

Wenn man von den drei Ergebnissen des dritten Versuchs das Mittel nimmt, so ergibt sich der vereinte Widerstand der Reibung und der Steifigkeit des Seiles $= 22$ Pfd., woraus sich der Reibungscoefficient $\mu = \frac{1}{6,1}$ findet.

Coulomb bediente sich nun noch eines alten, sehr biegsamen Seiles, von welchem er die Steifigkeit durch vorher angestellte Versuche genau kannte, und fand dann mit derselben eisernen Ase, für Belastungen bis zu 2000 Pfd., die Reibung jedesmal $= \frac{1}{6,3} = \frac{3}{19}$, welche Zahl er als ein sehr wahrscheinliches Mittel angiebt.

II. Eisernen Aren in kupfernen Lagern.

(Mit reinem Talg geschmiert.)

Der Apparat war derselbe, wie bei den vorigen Versuchen; Folgendes sind die Ergebnisse:
4ter Versuch. Das um die Rolle gelegte Seil hatte 2 Linien Umfang und war sehr biegsam, so daß die Steifigkeit $= 0$ gesetzt werden kann. Jedes Ende desselben war mit $P = 100$ Pfd. belastet.

- a) Zur Erzeugung einer continuirlichen langsamen Bewegung war $p = 2,5$ Pfd. erforderlich.
- b) Mit $p = 6$ Pfd. wurden die ersten 3 Fuß in 7, die folgenden in 3 halben Sekunden durchlaufen.

5ter Versuch. Das Seil sechsdrähtig, 4 Linien Durchmesser; Steifigkeit desselben $= 1\frac{1}{2}$ Pfd. An jedem Ende belastet mit $P = 200$ Pfd.

- a) $p = 6,5$ Pfd. erzeugte eine langsame continuirliche Bewegung.
- b) $p = 10$ Pfd., die erste Hälfte in 7, die zweite in 3 halben Sekunden.

6ter Versuch. Dasselbe Seil wie vorhin, an jedem Ende mit $P = 400$ Pfd. belastet; Steifigkeit demgemäß $= 3$ Pfd.

- a) $p = 13$ Pfd.; Bewegung langsam und anhaltend.
- b) $p = 18$ Pfd.; die erste Hälfte in 11, die zweite in 4 halben Sekunden.
- c) $p = 24$ Pfd.; die erste Hälfte in 6, die zweite in 4 halben Sekunden.

Resultate. Die Operationen a), unter dem Gesichtspunkt einer gleichförmigen Bewegung aufgefaßt, liefern nach Coulomb's Berechnung, der Formel I. gemäß, folgende Ergebnisse:

$$\mu = \frac{7 \cdot 2,5}{200 + 2,5 + 14} = \frac{1}{12,4};$$

$$\mu = \frac{7,2 \cdot 5}{400 + 6,5 + 14} = \frac{1}{11,6};$$

$$\mu = \frac{7,2 \cdot 10}{800 + 13 + 14} = \frac{1}{11,5}.$$

Für die vier andern Operationen der obigen Versuche findet Coulomb, unter Voraussetzung einer stattgehabten gleichförmig beschleunigten Bewegung, nach der Reihe: $V = 3,4$; $V = 3,7$; $V = 5,9$; $V = 13,2$ Pfd.; also die Widerstände:

$p - V = 2,6$ Pfd.; anstatt 2,5 Pfd. im Fall einer langsamen, gleichförmigen Bewegung;
 $p - V = 6,3$ Pfd.; anstatt 6,5 Pfd. im ersten Falle;
 $p - V = 12,1$ Pfd.;
 $p - V = 10,8$ Pfd.;) anstatt 13 Pfd. im ersten Falle.

Demgemäß setzt nun Coulomb das Verhältniß der Reibung zum Druck im Mittel $= \frac{1}{11,5}$ $= \frac{2}{23}$, und bemerkt dabei, daß nach früheren Versuchen die gleitende Reibung von Kupfer auf Eisen unter denselben Umständen $= \frac{1}{11}$ gefunden wurde, so daß also diese Versuche sich gegenseitig entsprächen. Auch sei bei Vergleichung der so eben gefundenen Resultate ein geringer Einfluß der Geschwindigkeit auf den Betrag der Reibung nicht zu verkennen, in der Art nämlich, daß eine Vergrößerung der Geschwindigkeit eine Verminderung der Reibung nach sich ziehe; in dessen gelte dies einmal nur für Talg, nicht aber für weichere Schmieren, wie die Wagenschmiere, das Del, welches die folgenden Versuche zeigen werden; dann aber könne man von dieser geringen Aenderung der Reibung, die im günstigsten Falle kaum $\frac{1}{2}$ betragen habe, um so mehr abstrahiren, als bei Maschinen die Geschwindigkeit stets gleichförmig und selten viel größer sei, als sie bei den sub a) mitgetheilten Versuchen statt gefunden habe.

III. Eiserne Aren in kupfernen Buchsen.

(Mit Wagenschmiere (vieux-oing) geschmiert.)

7ter Versuch. a) Das über die Rolle laufende Seil hatte 2 Linien Umfang; Steifigkeit $= 0$; an jedem Ende mit $P = 50$ Pfd. belastet. $p = 2,5$ Pfd. erzeugte eine langsame gleichförmige Bewegung.

8ter Versuch. a) Dasselbe biegsame Seil, an jedem Ende mit $P = 100$ Pfd. belastet. $p = 3,7$ Pfd. erzeugte eine langsame gleichförmige Bewegung.

9ter Versuch. a) Dasselbe Seil, an jedem Ende mit $P = 150$ Pfd. belastet. $p = 5,7$ Pfd. brachte dieselbe Bewegung hervor.

10ter Versuch. Das umlaufende Seil sechsdrähtig, 4 Linien Durchmesser; auf jeder Seite mit $P = 100$ Pfd. belastet; Steifigkeit $= 0,7$ Pfd.

a) $p = 4,3$ Pfd.; Bewegung langsam und gleichförmig.

b) $p = 9$ Pfd.; die ersten 3 Fuß der Fallhöhe in 6, die drei folgenden in 3 halben Sekunden.

11ter Versuch. Dasselbe Seil, an jedem Ende mit $P = 200$ Pfd. belastet; demgemäß die Steifigkeit $= 1\frac{1}{2}$ Pfd.

a) $p = 8,5$ Pfd.; Bewegung langsam und ungewiß.

b) $p = 14$ Pfd.; die erste Hälfte in 8, die zweite in 4 halben Sekunden.

c) $p = 20$ Pfd.; der ganze Fallraum von 6 Fuß in 7 halben Sekunden.

12ter Versuch. Dasselbe Seil, auf jeder Seite mit $P = 400$ Pfd. belastet, demnach die Steifigkeit $= 3$ Pfd.

- a) $p = 17$ Pfd.; Bewegung langsam und ungewiß.
 b) $p = 22$ Pfd.; die erste Hälfte in 11, die zweite in 5 halben Sekunden.
 c) $p = 28$ Pfd.; " " " " 8, " " " 3 " " "

Resultate. Die Operationen a), unter dem Gesichtspunct einer gleichförmigen Bewegung betrachtet, liefern nach Coulomb:

$$7\text{ter Vers. a) } \mu = \frac{7 \cdot 2,5}{100 + 2,5 + 14} = \frac{1}{6,7}$$

$$8\text{ter } " " \mu = \frac{7 \cdot 3,7}{200 + 3,7 + 14} = \frac{1}{8,3}$$

$$9\text{ter } " " \mu = \frac{7 \cdot 5,7}{300 + 5,7 + 14} = \frac{1}{8,0}$$

$$10\text{ter } " " \mu = \frac{7,2 \cdot 3,6}{200 + 4,3 + 14} = \frac{1}{8,4}$$

$$11\text{ter } " " \mu = \frac{7,2 \cdot 7}{400 + 8,5 + 14} = \frac{1}{8,4}$$

$$12\text{ter } " " \mu = \frac{7,2 \cdot 14}{800 + 17 + 14} = \frac{1}{8,2}$$

Mit Weglassung des 7ten Versuches kann hiernach $\mu = \frac{1}{8,15} = \frac{4}{33}$ gesetzt werden.

Die übrigen Versuche, in Bezug auf eine gleichförmig beschleunigte Bewegung berechnet, liefern nach Coulomb folgende Resultate:

10ter Vers. b) $V = 4,3$ Pfd.; $p - V = 4,7$ Pfd., anstatt 4,3 Pfd. für a.

11ter " b) $V = 4,7$ " $p - V = 9,3$ " } " 8,5 " " "

c) $V = 12,2$ " $p - V = 7,8$ " } " 8,5 " " "

12ter " b) $V = 4,1$ " $p - V = 17,9$ " } " 17 " " "

c) $V = 11,1$ " $p - V = 16,9$ " } " 17 " " "

Aus dieser Vergleichung schließt Coulomb, daß man für die practische Anwendung die Reibung als von der Geschwindigkeit unabhängig ansehen könne. Zugleich bemerkt er noch, daß die Wagenschmiere die Reibung viel weniger vermindere als der Talg, und daß bei ersterer die Reibung constant sei, sowohl unter allen Graden der Pressung, als auch für alle Grade der Geschwindigkeit.

IV. Eiserne Axen in kupfernen Buchsen.

(Unter verschiedenen andern Umständen.)

13ter Versuch. Wenn die bei den vorigen Versuchen gebrauchte Wagenschmiere abgewischt wurde, so daß die Berührungsflächen nur vermöge des in die Poren des Metalles eingebrungenen Fettes noch geschmeidig blieben, so fand Coulomb die Reibung unter Pressungen von 100 bis 1000 und 1200 Pfd. stets constant, und zwar $\mu = \frac{1}{8}$.

14ter Versuch. Wurden hierauf die fettigen Berührungsflächen mit Olivenöl bestrichen, so fand er das Verhältniß der Reibung zum Druck = 1 : 8 und selbst noch etwas größer, aber niemals über 1 : $7\frac{1}{2}$, welches mit den früheren Versuchen übereinstimmt.

15ter Versuch. Um den Einfluß, den die spätere Klebrigkeit der Schmiere auf den Betrag der Reibung äußert, kennen zu lernen, hat Coulomb noch besondere Versuche angestellt, und zwar mit einer eisernen Are, über welche eine Rolle mit kupferner Buchse lief, die seit drei Monaten ohne Erneuerung der Talgsmiere zum Heben großer Lasten von mehr als 5 Centner gedient hatte. Sowohl die Are als die Buchse waren geschmeidig anzufühlen, ohne jedoch Festigkeit an den Fingern zurück zu lassen. Unter diesen Umständen fand Coulomb das Verhältniß der Reibung zum Druck durchschnittlich = $1:7\frac{1}{2}$.

Ueber die Reibung von hölzernen Aren in ebenfalls hölzernen Buchsen hat Coulomb noch Versuche angestellt, die er aber nicht speciell beschreibt. Die Resultate, welche er bloß angiebt, sind folgende:

V. Aren aus Steineichen in Buchsen von Guajacholz.

16ter Versuch. Mit Talg geschmiert fand sich das Verhältniß der Reibung zum Druck durchschnittlich = $1:26$.

17ter Versuch. Nachdem der Talg abgewischt war, und die Berührungsflächen bloß vermöge des in die Poren des Holzes gedrungenen Talges fühlbar fettig blieben, wurde jenes Verhältniß = $1:17$ gefunden.

VI. Aren aus Steineichen in Buchsen von Ulmenholz.

Hierbei zeigte sich die Reibung am geringsten, nämlich:

18ter Versuch. Mit Talg geschmiert ergab sich die Reibung = $\frac{1}{33}$ des Drucks.

19ter Versuch. Für bloß fettige Oberflächen, nachdem der Talg war abgewischt worden, wurde die Reibung = $\frac{1}{20}$ des Drucks gefunden.

VII. Aren aus Buchsbaum in Buchsen von Guajacholz.

20ster Versuch. Mit Talg geschmiert betrug die Reibung = $\frac{1}{23}$ des Drucks.

21ster Versuch. Für bloß fettige Oberflächen nach Wegnahme des früher gebrauchten Talges = $\frac{1}{14}$ des Drucks.

VIII. Aren von Buchsbaum in Buchsen von Ulmenholz.

22ster Versuch. Mit Talg geschmiert betrug die Reibung = $\frac{1}{26}$ des Drucks.

23ster Versuch. Für bloß fettige Oberfläche, nach Wegnahme der Talgsmiere, = $\frac{1}{20}$.

IX. Aren von Eisen in hölzernen Buchsen.

Bei diesen Versuchen haben sich Resultate ergeben, denjenigen ähnlich, welche früher für die gleitende Reibung des Eisens und des Kupfers auf einer hölzernen Unterlagsbohle gefunden wurden.

Wenn nämlich die sich reibenden Körper noch neu aus der Bearbeitung kamen, so war die Reibung anfänglich beträchtlich größer als später, und nahm dabei mit der Geschwindigkeit zu. Bei einer eisernen Are in einer Buchse aus Guajacholz, ohne Schmiere, entstand z. B. eine langsame, gleichförmige Bewegung, wenn das bewegende Gewicht $\frac{1}{20}$ bis $\frac{1}{15}$ der Pressung betrug. War hingegen letzteres = $\frac{1}{12}$ der Pressung, so wurde der sechsfüßige Fallraum in weniger als 5 Secunden durchlaufen. Nachdem aber die Are und die Buchse durch mehrere Operationen auf einander gut polirt waren, hörte jeder Einfluß der Geschwindigkeit auf die Größe der Reibung auf, und man fand dieselbe dann unter allen Graden der Geschwindigkeit unveränderlich = $\frac{1}{20}$.

Diesen Werth behielt sie auch dann noch bei, wenn die Berührungsflächen mit Talg geschmiert waren, und nur beim jedesmaligen Auffrischen der Talgschmiere schien sich die Reibung mit einer Zunahme der Geschwindigkeit etwas zu vermindern; jedoch war diese Aenderung zu gering, um in der Praxis berücksichtigt zu werden.

Coulomb führt noch Versuche an, die er mit mehreren Aren aus Steineichenholz in Guajachosen angestellt hat, welche auf den Schiffen während einer Seefahrt von 6 Monaten ohne Erneuerung der ursprünglichen Talgschmiere im Gebrauch gewesen waren. Durch den Einfluß der Witterung war die Schmiere angetrocknet; die Aren fühlten sich zwar noch geschmeidig an, ließen aber keine Fettigkeit an den Fingern zurück. Das Verhältniß der Reibung zum Druck wurde zwischen 1:16 bis 1:13 gefunden, so daß man das Verhältniß 1:14½ als Mittelwerth annehmen kann.

Tafel II. Zusammenstellung der Reibungscoefficienten nach den von Coulomb über die drehende Reibung angestellten Versuchen.

Lau- fende Nr.	Reibende Körper.	Art der Schmiere.	Reibungs- coefficient μ .
1	Aren aus Eisen in Pfannen aus Kupfer	Trocken	$\frac{1}{6} = 0,151$
2	" " " " " " " "	Reiner Talg	$\frac{2}{23} = 0,087$
3	" " " " " " " "	Wagenschmiere	$\frac{1}{8,3} = 0,121$
4	" " " " " " " "	Wlos fettig, nach Wegnahme der Wagenschmiere . . .	$\frac{1}{8} = 0,125$
5	" " " " " " " "	Olivenöl.	$\frac{1}{8} = 0,125$
6	" " " " " " " "	Drei Monat alte, angetrock- nete Wagenschmiere . . .	$\frac{2}{15} = 0,133$
7	Aren aus Steineichen in Pfannen aus Guajacholz	Talg	$\frac{1}{26} = 0,040$
8	" " " " " " " "	Wlos fettig, nach Wegnahme des Talges.	$\frac{1}{17} = 0,060$
9	" " " " " " " "	Sechs Monat alte, angetrock- nete Talgschmiere	$\frac{2}{29} = 0,070$
10	" " " " " " " "	Frischer Talg	$\frac{1}{33} = 0,030$
11	" " " " " " " "	Wlos fettig	$\frac{1}{20} = 0,050$
12	Aren aus Buchsbaum in Pfannen aus Guajacholz	Talg	$\frac{1}{23} = 0,044$
13	" " " " " " " "	Wlos fettig	$\frac{1}{14} = 0,071$
14	" " " " " " " "	Talg	$\frac{1}{29} = 0,035$
15	" " " " " " " "	Wlos fettig	$\frac{1}{20} = 0,050$
16	Aren aus Eisen in Pfannen aus Guajacholz	Trocken	$\frac{1}{20} = 0,050$
17	" " " " " " " "	Talg	$\frac{1}{20} = 0,050$

Versuche von George Kennie.

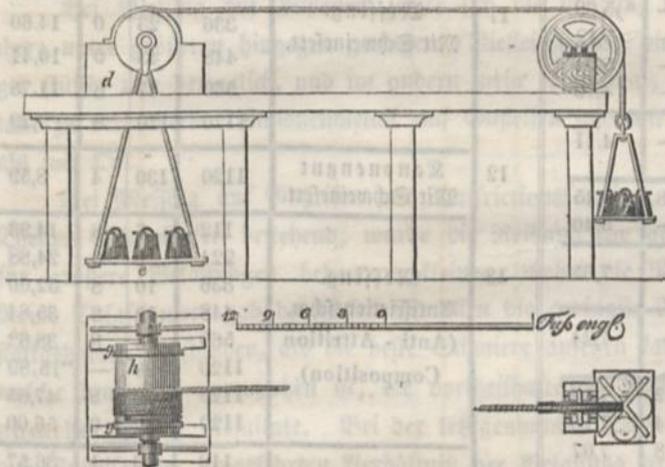
Der zu diesen Versuchen gebrauchte Apparat wird von Kennie mit folgenden Worten beschrieben:

Der Apparat war sowohl für Messing als für Eisen construirt. Die Zapfen waren genau abgedreht und die Hängeschlinge lose aufgehängt. Der ganze durchlaufene Raum betrug nicht über $4\frac{1}{2}$ Zoll. Die Schnur war eine der besten Schiebfenster-Schnüre (sashline) und die Rolle sehr beweglich. Die Steifigkeit der Ersteren und die Reibung der Letzteren wurde durch vorher angestellte Versuche mit verschiedenen Gewichten angeblich genau ermittelt. — Der Block war aus Gußeisen genau gehohlet und die Are hatte darin freien Spielraum, so daß keine Klemmung stattfinden konnte. Der durchlaufene Raum wurde durch Zeichen angedeutet, welche an der Are und dem Blocke angebracht waren, und die Zeit durch eine Sekundenuhr gemessen.

Eine Aenderung, welche später mit dem Apparate vorgenommen wurde, bestand darin,

daß man eine, in dem Blocke arbeitende, gußeiserne Walze einsetzte und dieselbe mit der Schnur mehreremale umwickelte, so daß das bewegende Gewicht einen Raum von 21 Fuß ungehindert durchlaufen konnte.

In nebenstehender Skizze sind:



- d) gußeiserne Blöcke;
- e) eine unbewegliche Waagschale;
- f) eine bewegliche Schale;
- g, g) die reibende Fläche;
- h) die cylinderförmige Walze aus Gußeisen.

Letztere hat 6 Zoll im Durchmesser und liegt an beiden Enden in passenden Lagern. Sie ist mit zwei vorstehenden Kränzen von $\frac{1}{8}$ Zoll Höhe versehen und um ihren Mantel ist ein $\frac{3}{8}$ Zoll dickes Seil geschlungen. Die reibende Fläche enthält $12\frac{1}{2}$ Quadrat Zoll Inhalt. Mit dem zuletzt beschriebenen Apparate sind namentlich die in Tafel IV. zusammengestellten Versuche gemacht worden.

20	10	10	10	10	10	10	10	10	10
20	10	10	10	10	10	10	10	10	10
20	10	10	10	10	10	10	10	10	10
20	10	10	10	10	10	10	10	10	10
20	10	10	10	10	10	10	10	10	10
20	10	10	10	10	10	10	10	10	10
20	10	10	10	10	10	10	10	10	10
20	10	10	10	10	10	10	10	10	10
20	10	10	10	10	10	10	10	10	10
20	10	10	10	10	10	10	10	10	10

*) Nach einer Angabe von 12 Stunden. — **) Nach einer Angabe von 11 Stunden.

Tafel III. Versuche über die drehende Reibung metallener Aren in gußeisernen Pfannen, mit und ohne Schmiere.

Anmerk. Bei diesen Versuchen durchlief das bewegende Gewicht einen Raum von $4\frac{1}{2}$ Zoll in 90 Sekunden.

Nr. des Versuchs.	Reibende Körper auf Gußeisen.	Druck der Are		Bewegendes Gewicht		Verhältniß nach dem Autor.	
		Q.	P.	Q.	P.	$\frac{Q}{P}$	
		Vfd. engl.	Vfd. unz.	Vfd.	unz.		
1	Kanongut. Ohne Schmiere.	112	16	—	7,00		
		224	30	—	7,46		
		336	44	—	7,63		
		448	60	12	7,37		
		560	112	—	5,00		
		672	134	—	5,01		
		784	154	—	*)5,09		
		896	175	—	5,12		
2	Messing. Ohne Schmiere.	1120	272	—	4,11		
3	Gußeisen. Ohne Schmiere.	1120	173	8	6,45		
		1232	228	—	5,40		
4	Gußeisen. Mit Graphit.	1232	161	—	7,65		
5	Kanongut. Mit Graphit.	1232	170	—	7,24		
6	Messing. Mit Graphit.	112	14	12	7,59		
		224	31	4	7,16		
		336	47	8	7,07		
		448	65	8	6,83		
		560	84	—	6,66		
7	Kanongut. Mit Del geschmiert.	1232	218	8	5,63		
8	Messing. Mit Del geschmiert.	56	1	8	37,33		
		112	3	8	32,00		
		224	7	—	32,00		
		336	16	8	20,36		
		448	24	8	18,28		
		560	29	4	19,14		
		1120	193	8	5,78		
9	Gußeisen. Mit Del geschmiert.	1120	131	1	8,54		
		1232	140	0	8,80		
10	Gußeisen. Mit Schweinefett.	1120	117	4	9,55		
11	Messing. Mit Schweinefett.	56	1	10	34,46		
		112	3	1	36,57		
		224	7	8	29,86		
		336	23	0	14,60		
		448	43	0	10,41		
		560	47	8	11,78		
12	Kanongut Mit Schweinefett.	1120	120	8	9,29		
13	Messing. Antifriktionschm. (Anti - Attrition Composition).	112	7	8	14,93		
		224	9	0	24,88		
		336	10	8	32,00		
		448	12	8	35,84		
		560	14	8	38,62		
		1120	190	—	**)5,89		
14	Messing. Mit Talgschmiere.	112	3	1	36,57		
		224	5	12	38,95		
		336	8	5	40,42		
		448	11	1	40,49		
		560	13	12	40,72		
15	Messing. Mit weicher Seife.	56	2	2	26,35		
		112	3	8	32,00		
		224	6	0	37,33		
		336	9	8	35,36		
		448	12	12	35,13		
		560	14	12	37,96		
16	Messing. Mit weicher Seife und Graphit.	56	5	8	10,18		
		112	9	3	12,19		
		224	12	1	18,56		
		336	14	4	23,57		
		448	19	8	22,97		
		560	23	8	23,82		

*) Nach einer Ruhezeit von 12 Stunden. — **) Nach einer Ruhezeit von 41 Stunden.

Kennie fügt diesen Versuchen folgende Bemerkungen bei:

a) In Bezug auf die Versuche ohne Schmiere. Wenn Kanonengut ohne Schmiere mit Gewichten von 1 bis zu 10 Centner belastet ist, so variiert die Reibung nahe im Verhältniß von $\frac{1}{7,63}$ bis $\frac{1}{4,70}$ der Pressung. Die Länge der Zeit (Ruhezeit?) hat keinen merklichen Einfluß auf den Betrag der Reibung. Bei den Versuchen mit Messing zeigte sich die Reibung größer; bei Gußeisen wurde sie dagegen geringer. Die Reibung nahm noch mehr ab, wenn Graphit zwischen die Berührungsflächen der drei genannten Metalle gebracht wurde.

b) In Bezug auf die Versuche mit Schmiere. Bei Kanonengut auf Gußeisen, mit Del geschmiert, betrug die Reibung für eine Belastung von 10 Centnern etwa $\frac{1}{5,63}$ der Pressung. Sie fiel auf $\frac{1}{37,33}$, wenn die Belastung verringert wurde; aber bei einer Vergrößerung derselben nahm sie wieder zu. Gußeisen auf Gußeisen unter ähnlichen Umständen zeigt eine geringere Reibung.

Bei Messing auf Gußeisen zeigte sich die Reibung unter kleineren Belastungen beträchtlicher; unter größeren hingegen geringer. Vielleicht, daß die Schmiere in dem einen Falle weniger flüssig und beweglich, und im andern mehr fähig war, die unmittelbare Berührung der Metalle zu verhindern. Kanonenmetall auf Gußeisen gab mit Schweinesfett eine geringere Reibung als mit Del.

Bei Messing auf Gußeisen mit Antifrictionschmiere, aus einem Theile Graphit und vier Theilen Schweinesfett bestehend, wurde die Reibung für geringere Belastungen größer; hingegen für größere Belastungen bedeutend kleiner, wobei die Resultate sehr unregelmäßig ausfielen. Reine Talgschmiere gab bei diesen Metallen die geringste Reibung, so daß man diese, unter den stattgehabten Umständen, als die beste Schmiere ansehen kann. Nächst diesem gab weiche Seife, welche dem Del vorzuziehen ist, die vortheilhaftesten, weiche Seife mit Graphit hingegen die nachtheiligsten Resultate. Bei der letztgenannten Schmiere wurde die Reibung von Messing auf Gußeisen im umgekehrten Verhältniß der Belastung geringer.

Im Allgemeinen kann man schließen, daß die Verminderung der Reibung durch Schmieren nach den aufliegenden Gewichten und nach der Natur der Schmiermittel verschieden ist; je geringer jene sind, desto feiner und flüssiger sollten diese sein, und umgekehrt.

10	10	—	11	8	20	12
20	8	—	11	8	20	12
30	6	—	11	8	20	12
40	7	—	11	—	18	10
50	7	—	11	—	18	10
60	7	—	11	—	18	10
. . .						
80	22	—	16	8	272	10
90	21	—	21	8	272	10
100	21	—	21	8	272	10
110	21	—	21	8	272	10

...
...
...

Tafel IV. Versuche über den Einfluss der Geschwindigkeit auf die Reibung.

Lau- fende Nr.	Belastung des Cylinders Q.		Erforderliches Gewicht zur Bewegung P.		Zeit zum Durch- laufen der Fall- höhe von 21 Fuß.		Verhält- niß nach dem Autor. Q P	Bemerkungen.
	Pfund.	Unzen.	Pfund.	Unzen.	Erste Hälfte. Sekund.	Ganze Höhe. Sekund.		
a) Versuche ohne Schmiere.								
1	348	8	112	—	—	—	3,11	} Vier Versuche mit abnehmendem Gewicht; } Bewegung sehr unfsär. Es trat Abreibung ein. Dieselbe nahm zu, mit Hemmung der Be- } wegung.
2	300	—	112	—	—	5	2,67	
3	280	—	114	—	—	7	2,45	
4	280	—	114	—	—	7	2,45	
5	280	—	228	—	—	4½	1,22	
6	224	8	112	—	—	6	2,00	
7	224	8	112	—	—	4½	2,00	
8	174	8	58	—	—	4	3,00	
9	174	8	58	—	—	4	3,00	
10	174	8	116	—	—	2	1,50	
11	174	8	116	—	—	2	1,50	
12	160	8	56	—	—	7	2,86	
13	160	8	56	—	—	8	2,86	
14	66	8	28	—	—	8	2,37	
15	62	8	22	—	—	4	2,84	
16	62	8	22	—	—	4	2,84	
17	62	8	44	—	—	2½	1,42	
18	62	8	44	—	—	2½	1,42	
19	62	8	44	—	—	2½	1,42	
b) Versuche mit Oelschmiere.								
20	62	8	7	—	—	12	8,92	} Wegen der zu großen Geschwindigkeit } wurde die Belastung um 21½ Pfund, } also bis auf ¼ Etr., vergrößert. } Diese vermehrte Belastung erzeugte eine } regelmäßige Geschwindigkeit.
21	62	8	7	—	—	17½	8,92	
22	62	8	7	—	11	22	8,92	
23	62	8	7	—	9	18	8,92	
24	62	8	7	—	8	16	8,92	
25	62	8	7	—	8	16	8,92	
26	62	8	7	—	8½	17	8,92	
27	62	8	14	—	3	5	4,46	
28	62	8	14	—	3	5	4,46	
29	62	8	14	—	3	5	4,46	
30	84	—	14	—	3½	7	6,00	
31	84	—	14	—	3½	7	6,00	
32	84	—	14	—	3½	7	6,00	
c) Versuche mit Talg.								
33	272	8	42	—	14	28	6,48	
34	272	8	42	—	6½	13	6,48	
35	272	8	42	—	6½	13	6,48	
36	272	8	42	—	7½	14	6,48	

Bemerz

Bemerkungen des Autors. Die Unregelmäßigkeit des Widerstandes in den ersten sieben Versuchen entstand aus einer ungleichmäßigen Berührung und der davon herrührenden Abreibung. Hatte der Cylinder sich gehörig eingeschliffen und seine Belastung war vermindert worden, so hörte jene Unregelmäßigkeit auf, besonders, wenn Del oder Talg angewendet wurde. Die Ergebnisse dieser Versuche zeigen, daß die Reibung durch Zunahme der Geschwindigkeit nicht vergrößert wurde. Die Fallzeit für die ganze Höhe von 21 Fuß war doppelt so groß als für die halbe Höhe. Auch wurden diese Versuche noch ferner erläutert (jedoch nicht so genügend) durch eine Maschine, welche der des Herrn Roberts einigermaßen ähnlich war. Die Rolle war vom Cylinder weit genug entfernt, um den Spannungswinkel der darüber laufenden Schnur unmerklich zu machen.

Tafel V. Nachträgliche Versuche, über die Reibung an der Are des eisernen Cylinders, da, wo die unbewegliche Schale mit der Belastung aufgehängt ist. Dieser Widerstand muß bei den vorhergehenden drei Versuchsreihen (Tafel IV.) in Abzug gebracht werden.

Belastung an jedem Ende.	Ganze Belastung.	Erforderliches Gewicht zur Ueberwindung der Reibung in den Aufhängepunkten.
56 Pfund.	112 Pfund.	4 Pfund 8 Unzen.
112 "	224 "	6 " — "
168 "	336 "	11 " 4 "
224 "	448 "	14 " — "

Bemerkung des Autors. Die Abzüge wegen der Reibung der Hängeschlinge an den vortretenden Aren des Cylinders verhalten sich, nach Ausweis der Zahlen in der zweiten und dritten Spalte, nahe wie die Belastungen, und sind auch auf die meisten Fälle der in Taf. III. zusammengestellten Versuche anwendbar. — So weit der Autor.

Allgemeine Bemerkungen über die Kennie'schen Versuche.

Ich habe diese Versuche mit den daraus gezogenen Folgerungen ganz so, wie sie von dem Autor in den Philosophical Transactions bekannt gemacht sind, wiedergegeben; nicht etwa, um sie als zweckmäßige Anhaltspunkte zur Berechnung der Widerstände in den Maschinen hinzustellen, denn dazu sind sie meiner Meinung nach keinesweges geeignet, sondern vielmehr nur deshalb, weil ich, wegen Unzulänglichkeit der Angaben, nicht im Stande war, genauere Resultate daraus zu entwickeln. Was ich an diesen Versuchen auszufetzen finde, besteht hauptsächlich in Folgendem:

1) Scheint mir der auf S. 125 dargestellte Apparat, womit die Versuche angestellt sind, nicht zweckmäßig und einfach genug construirt zu sein. Apparate, die zu physikalischen Versuchen dienen sollen, müßten so wenig als möglich complicirt, und so eingerichtet sein, daß alle fremdartigen Einflüsse, die nicht zum eigentlichen Gegenstande des Versuchs gehören, möglichst ausgeschlossen blieben, indem es offenbar die Unsicherheit der Resultate in demselben Maße vergrößern muß, je mehr dieselben, wegen allerhand Nebenumständen, geändert werden müssen, um

ße auf ihren wahren Bestand zu reduciren. Diese practische Regel scheint aber Kennie bei der Anordnung seines Apparates wenig oder gar nicht vor Augen gehabt zu haben. Denn, nicht genug, daß er das Seil, welches zur Drehung des Cylinders dient, horizontal über eine Rolle leitet, wodurch er deren Zapfenreibung und die Steifigkeit des Seils ganz unnöthigerweise mit ins Spiel bringt, führt er auch noch ein zweites Nebenhinderniß herbei, indem er die Belastung des Cylinders an besondere, aus dessen Endflächen vortretende, Zapfen mittelst Desen aufhängt. Beide Nebenhindernisse hätten aber durch Anwendung eines dem Coulombschen ähnlichen Apparates sehr wohl vermieden werden können.

2) War indessen die Vorrichtung, womit Herr Kennie seine Versuche anstellte, vielleicht schon vorhanden, und wollte er durch deren Anwendung die, allerdings nicht unbeträchtlichen, Kosten zur Erbauung einer besondern Maschine sparen, so mußten wenigstens die unvermeidlichen Nebenhindernisse, da sie nach der Belastung verschieden sind, für jeden einzelnen Versuch aufs Genaueste ausgemittelt, und bei der Berechnung der Reibungscoefficienten in Abzug gebracht werden. Die in Tafel V. aufgeführten nachträglichen Versuche sollen zwar die Reibung der Aufhängeösen an den Axen des Cylinders für verschiedene Belastungen kennen lehren; allein abgesehen davon, daß sie dies nur sehr unvollständig und oberflächlich thun, fehlt auch dabei die genaue Angabe der Art und Weise, wie dieselben in Rechnung zu bringen sind, um aus den vorhergehenden Versuchen, namentlich aus den Hauptversuchen Tafel III., für die Praxis brauchbare Resultate zu erhalten. Die zugefügte Bemerkung, daß die Abzüge wegen der Reibung der Hänsgeschlinge auch auf die meisten Fälle der eben erwähnten Versuche anwendbar seien, ist wahrlich nicht geeignet, über diesen fraglichen Punkt ein helles Licht zu verbreiten, sondern bewirkt wohl eher noch das Gegentheil davon.

3) In Betreff der von Kennie in der Zusammenstellung Tafel III. angegebenen Verhältnißzahlen, welche den Betrag der Reibung als aliquoten Theil der Belastung ausdrücken sollen, ist zuvörderst zu bemerken, daß der Autor sie durch eine einfache Division des bewegenden Gewichtes P in die Belastung Q des Cylinders gefunden hat, aber ohne vorher die oben erwähnten Abzüge wegen der Nebenhindernisse gemacht zu haben. Jene Verhältnißzahlen würden demnach höchstens nur den Bruttobetrag der gesuchten Reibung geben, wenn sonst die Methode ihrer Berechnung auf richtigen Prinzipien beruhte. Aber auch dies ist nicht einmal der Fall; denn es liegt dabei die Voraussetzung zum Grunde, daß der Cylinder bloß von der Kraft Q gegen sein Lager gepreßt wird, während diese Pressung doch in der That $= \sqrt{Q^2 + P^2}$ ist, da die Kräfte Q und P rechtwinklig zu einander sind. Demnach würde der Bruttobetrag der Reibung sich

durch die Formel $\frac{\sqrt{Q^2 + P^2}}{P} = \sqrt{\left(\frac{Q}{P}\right)^2 + 1}$ ergeben, statt daß der Autor ihn nach der

Formel $\frac{Q}{P}$ berechnet. Die Reduction der in der Tabelle angegebenen Verhältnißzahlen wäre nun leicht dadurch zu bewirken, daß man aus den um 1 vergrößerten Quadraten derselben die Quadratwurzeln nähme; indessen habe ich diese Reduction unterlassen, weil man dadurch der Wahrheit doch nur um ein Geringes näher gerückt wäre, da die Nebenhindernisse zu überwiegend sind.

4) Die Versuche Tafel IV. sind in der Absicht angestellt, den Einfluß der Geschwindigkeit auf den Betrag der Reibung zu erforschen, und der Autor glaubt sich zu der Folgerung berechtigt, daß ein Zunehmen der Geschwindigkeit keine Vergrößerung der Reibung zur Folge habe. — In Hinsicht der dritten Versuchsreihe (c), die mit Talgschmiere angestellt wurde, mag dieser Schluß gegründet sein; dagegen geben die mit Oelschmiere angestellten Versuche (b) ganz entgegengesetzte Resultate. Denn nach den eigenen Angaben des Autors beträgt die Reibung bei einer mittlern Geschwindigkeit von $1\frac{1}{4}$ Fuß in der Sekunde = $\frac{1}{8,92}$

$$\text{bei } 3 \text{ „ Geschwindigkeit} = \frac{1}{6,00}$$

$$\text{und bei } 4\frac{1}{2} \text{ „ „} = \frac{1}{4,46} \text{ der Pressung,}$$

so daß sie also im letzteren Falle gerade doppelt so groß als im ersteren war. Wie nun der Autor, ungeachtet solcher Abweichungen, zu dem allgemeinen Schlusse kömmt, daß die Reibung von der Geschwindigkeit unabhängig sei, ist schwer zu begreifen, weshalb schon Herr Adam Burg, der die Rennieschen Versuche im 17ten Bande der Jahrbücher des polytechnischen Instituts in Wien mittheilt, sein Bedauern ausdrückt, daß die Angaben bei diesen, sonst so schätzenswerthen Versuchen, so wenig bestimmt und wissenschaftlich sind, und so viel zu errathen übrig lassen.

5) Aus den nachträglichen Versuchen Tafel V. ergibt sich der Betrag der Reibhindernisse im Mittel = $\frac{1}{30}$ der Belastung, und da dieselben, nach des Autors ausdrücklicher Angabe, bei den vorhergehenden Versuchen Tafel IV. in Abzug zu bringen sind, so will ich die letzteren einer neuen Berechnung unterwerfen, und dabei diejenigen Correctionen anbringen, wozu die angegebenen Bestimmungsstücke hinreichen.

Die ohne Schmiere angestellten neunzehn Versuche (a) lasse ich unberücksichtigt, da der Autor selbst, wegen der anfänglich stattgehabten ungleichmäßigen Berührung, und der davon herrührenden Abreibung, ihnen wenig Zuverlässigkeit beizulegen scheint. Sie mögen daher nur in sofern von Nutzen gewesen sein, als sie dazu gedient haben, dem Cylinder und dessen Lager den möglichsten Grad der Politur zu geben.

Dagegen geben die Versuche (b), mit Oelschmiere angestellt, zu folgenden Berechnungen Anlaß: Bei den sieben ersten Versuchen, von Nr. 20 bis 26, fand nach der Angabe eine gleichförmige Bewegung statt von durchschnittlich $1\frac{1}{4}$ Fuß in der Sekunde. — Die Belastung des Cylinders war jedesmal = $62\frac{1}{2}$ Pfd. und das bewegende Gewicht = 7 Pfd., wonach sich der Druck auf das Lager des Cylinders = $\sqrt{62,5^2 + 7^2} = 62,89$ Pfund ergibt. Die Reibhindernisse

$$= \frac{1}{30} \text{ der Belastung in Rechnung gebracht, giebt für die stattgehabte Belastung } \frac{62,5}{30} = 2,1 \text{ Pfd.};$$

daher ist die Kraft, welche, nach der Ase des Seiles wirksam, mit der Reibung des Cylinders im Gleichgewichte war, gleich $7 - 2,1 = 4,9$ Pfd. Diese Kraft, mit Rücksicht auf die $\frac{3}{8}$ Zoll betragende Seilstärke auf den Umfang des Cylinders reducirt, liefert die äquivalente Kraft

$= \frac{4,9 \cdot 3,188}{3} = 5,21$ Pfd., und wenn man damit in den vorhin berechneten Druck dividirt, erhält man die Verhältnißzahl $\frac{62,89}{5,21} = 12,07$, so daß also die fragliche Reibung $\frac{1}{12,07}$ der Pressung betragen würde.

Bei den drei letzten Versuchen, Nr. 30, 31 und 32, wurde die ganze Fallhöhe von 21 Fuß mit ebenfalls gleichförmiger Bewegung in 7 Sekunden durchlaufen; daher die Geschwindigkeit = 3 Fuß in der Sekunde. — Die Belastung des Cylinders war durchgängig = 84 Pfd., das bewegende Gewicht = 14 Pfd., also die Pressung auf das Lager $\sqrt{84^2 + 14^2} = 85,16$ Pfund. Die Nebenhindernisse mit $\frac{84}{30} = 2,8$ Pfd. in Abzug gebracht, giebt $14 - 2,8 = 11,2$ Pfund Kraft nach der Richtung der Seilaxe, und $\frac{11,2 \cdot 3,188}{3} = 11,90$ Pfund für die auf den Cylindermantel reducirte äquivalente Kraft; daher die Verhältnißzahl $= \frac{85,16}{11,90} = 7,16$, oder der Betrag der Reibung $= \frac{1}{7,16}$ der Pressung.

Bei den drei übrigen Versuchen, Nr. 27, 28 und 29, wurde die halbe Fallhöhe in 3, die ganze aber in 5 Sekunden durchlaufen, wonach also die mittlere Geschwindigkeit $4\frac{1}{2}$ Fuß betragen hat. Da sich jene Zeiten nahe wie 1 : $\sqrt{2}$, oder wie die Quadratwurzeln aus den durchlaufenen Räumen verhalten, so kann die stattgehabte Bewegung als eine gleichförmig beschleunigte angesehen werden. Unter dieser Voraussetzung erhält man die zur Ueberwindung der Trägheit erforderliche Kraft nach der Formel

$$V = \frac{hM}{gt^2}$$

wenn man darin, nach engl. Maaß und Gewicht, folgende Zahlenwerthe setzt: $h = 21$ Fuß, $g = 16$ Fuß, $t = 5$ Sekunden, M gleich der Summe aus dem halben Gewicht (40 Pfd.) des Cylinders, der auf ihren Umfang reducirten Masse (5 Pfd.) der Rolle und dem bewegenden Gewichte (14 Pfd.), also $M = 59$ Pfd. Demgemäß ergibt sich $V = 3,1$ Pfd. circa, und indem man hierzu noch die Nebenhindernisse mit $\frac{62,5}{30} = 2,1$ Pfd. rechnet, erhält man im Ganzen 5,2 Pfd., welche von dem, auf den Umfang des Cylinders reducirten bewegenden Gewichte ($\frac{14 \cdot 3,188}{3} = 14,87$ Pfd.) abgezogen, den reinen Betrag der Reibung $= 14,87 - 5,2 = 9,67$ Pfd. liefert. Nun ist der Druck auf das Cylinderlager $= \sqrt{62,5^2 + 14^2} = 64,05$ Pfund und daher dessen Verhältniß zur Reibung $= \frac{64,05}{9,67} = 6,62$, oder der Betrag der Reibung $= \frac{1}{6,62}$ der Pressung.

Unterwirft man die Versuche (c), welche mit Talgschmiere angestellt wurden, einer ähnlichen Berechnung, so kommt man auf folgende Ergebnisse: Die Bewegung war jedesmal gleichförmig und die Geschwindigkeit varirte von $\frac{3}{4}$ bis $1\frac{1}{2}$ Fuß in der Sekunde. Die Belastung betrug durchgängig $272\frac{1}{2}$ Pfd., das bewegende Gewicht = 42 Pfd., wonach sich der Druck auf das Cylinderlager $= \sqrt{272,5^2 + 42^2} = 275,72$ Pfd. und die Nebenhindernisse $= \frac{272,5}{30} = 9,08$

Pfund ergeben. Daher ist die mit der Reibung im Gleichgewicht befindliche Kraft nach der Richtung der Seilare = $42 - 9,08 = 32,92$ Pfund auf den Cylindermantel reducirt = $\frac{32,92 \cdot 3,188}{3}$ = $34,98$ Pfd.; mithin die Verhältnißzahl = $\frac{275,72}{34,98} = 7,88$, oder der Betrag der Reibung = $\frac{1}{7,88}$ der Pressung.

Die so eben berechneten Verhältnißzahlen können keinesweges als genau angesehen werden, da zu viele Nebenumstände, welche der Autor nicht angegeben hatte, errathen werden mußten. Ich habe mich diesen Berechnungen nur deshalb unterzogen, weil Herr Adam Burg a. a. D. die Vermuthung aufstellt, daß die Widersprüche, worin unser englischer Autor mit sich selbst gerieth, indem er die Reibung allgemein als unabhängig von der Geschwindigkeit erklärt, vielleicht von dem Einfluß der Nebenhindernisse herrühren möchten. Daß diese Vermuthung nicht gegründet ist, ersieht man aus der Vergleichung der corrigirten Verhältnißzahlen sogleich, und war auch wohl mit ziemlicher Gewißheit vorher zu sehen. Indessen mag meine Berechnung wenigstens dazu dienen, daß sie einigermaßen herausstellt, bis zu welchem Betrage die vom Autor außer Acht gelassenen Nebenhindernisse auf die Endresultate einwirken, und um in dieser Beziehung die Uebersicht zu erleichtern, habe ich die vorhin gefundenen corrigirten Verhältnißzahlen mit den von Rennie angegebenen nachstehend zusammengestellt.

Tafel VI. Reibung von Gußeisen auf Gußeisen.

Schmiere.	Mittlere Geschwindigkeit in der Sekunde.	Verhältniß der Reibung zum Druck = 1		Differenz zwischen den zu großen Angaben des Autors und den corrigirten Verhältnißzahlen.
		Nach dem Autor.	Corrigirt.	
Del	1,25	$\frac{1}{8,92}$	$\frac{1}{12,07}$	35 bis 36 Procent.
desgl. . . .	3,00	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{7,16}$	19 " 20 "
desgl. . . .	4,20	$\frac{1}{4,46}$	$\frac{1}{6,62}$	48 " 49 "
Talg	$\frac{1}{2}$ bis $1\frac{1}{2}$	$\frac{1}{6,48}$	$\frac{1}{7,88}$	21 " 22 "

Es erhellet hieraus, wie ganz anders die meisten der in Tafel III. angegebenen Verhältnißzahlen höchst wahrscheinlich hätten ausfallen müssen, wenn Herr Rennie bei ihrer Berechnung auf alle Nebenumstände gehörig Rücksicht genommen hätte, und überhaupt wissenschaftlicher zu Werke gegangen wäre. Im Interesse der Wissenschaft wäre es wünschenswerth, daß auch in England sich Männer vom Fach fänden, welche diese Versuche einer gründlichen Kritik unterwürfen; vielleicht daß der Autor sich dadurch zu einer berichtigenden Revision seiner Arbeit veranlaßt sähe, wodurch er sich unstreitig ein nicht geringes Verdienst um die Maschinenlehre erwerben würde.

Neue Theorie der drehenden Reibung.

Wer sich viel mit der Anfertigung von Maschinenberechnungen beschäftigt, und dabei die Coulombschen Versuchszahlen über die Zapfenreibung zum Grunde gelegt hat, wird unstreitig die Bemerkung gemacht haben, daß die als Resultat einer solchen Berechnung erhaltene bewegendende Kraft in der Regel viel größer ist, als sie für die wirkliche Bewegung der Maschine erfahrungsmäßig nur zu sein braucht. — So giebt der verstorbene Geheime Oberbaurath Nothe, im ersten Hest seiner Beiträge zur Maschinenkunde, S. 30, den Erfahrungsatz, daß bei einer Wasserförderungsmaschine, die nur einigermaßen gut gebaut und construirt ist, die dabei vorkommenden Nebenhindernisse aufs Höchste $\frac{1}{4}$ der Nutzlast, und bei einer gut construirt und gut ausgeführten Maschine noch viel weniger betragen, womit auch die Angaben anderer Practiker, die gleiches Zutrauen verdienen, im Wesentlichen übereinstimmen. Nun aber findet man in demselben Hest der Notheschen Beiträge eine vollständige Berechnung einer Wasserförderungsmaschine mitgetheilt, wonach sich folgendes herausstellt: die Maschine hebt in jeder Minute 400 Kubikfuß Wasser auf eine Höhe von 60 Fuß, also ist das reine Kraftmoment in der Sekunde gleich $\frac{400 \cdot 66 \cdot 60}{60} = 26400$. Nach der angeführten Berechnung ist aber, mit Berücksichtigung sämmtlicher Nebenhindernisse, im Umfang des Wasserrades eine bewegendende Kraft = 6098,25 Pfd. erforderlich, und da sich das Rad mit 6 Fuß Geschwindigkeit umdreht, so entspricht dieser Kraft ein Moment = 36590; so daß also die Nebenhindernisse ein Kraftmoment = 10190, oder beinahe gleich der halben Nutzlast consumiren, welches das doppelte der ersten Angabe beträgt.

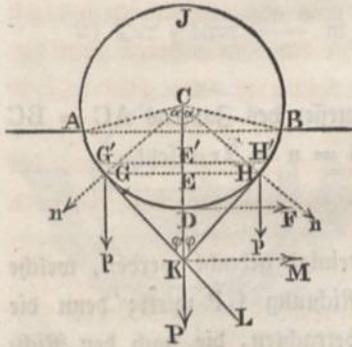
Bei unseren gewöhnlichen Mahlmühlen rechnet man im nachtheiligsten Falle für die Reibung der Maschinentheile gegen $\frac{1}{3}$ der Kraft *); nach verschiedenen Versuchen, die Rennie mittheilt**), betrug die Reibung bei einem doppelten Handelskrahne (purchased crane) = $\frac{1}{7,62}$, und bei einem andern Krahne derselben Art sogar nur $\frac{1}{5}$ der angehängten Last. Eine statische Berechnung solcher Maschinen mit Zugrundelegung der Coulombschen Versuchszahlen bringt das gegen weit über das doppelte heraus, und dergleichen Fälle könnte ich hier noch mehrere anführen, wenn es nicht eine, von den meisten wissenschaftlichen Technikern längst anerkannte Thatsache wäre, daß die Coulombschen Versuche über drehende Reibung zu große Coefficienten geben.

Fragt man nun nach dem Grund dieser, nicht in Abrede zu stellenden Thatsache, die um so auffallender erscheint, weil man nach der gewöhnlichen Art vom Kleinen auf das Große zu schließen eher das Gegentheil zu vermuthen geneigt ist, so kann derselbe meines Erachtens nur darin gesucht werden, daß bei den Coulombschen Versuchen gewisse Voraussetzungen gemacht worden sind, die auf das Verhalten der Reibung in den Maschinen allgemein nicht Anwendung finden. — Eine solche unstatthafte Voraussetzung besteht aber hauptsächlich darin, daß bei dem

*) Egen, Untersuchungen über den Effect einiger in Rheinland-Westphalen bestehenden Wasserwerke Berlin 1831.

**) Repertory of patent inventions etc. Vol. III. London 1830. p. 554.

§. 117 beschriebenen Apparate, mit welchem Coulomb seine Versuche anstellte, die eiserne Ase in ihrem Lager ringsum einen Spielraum von $1\frac{1}{4}$ Linien hatte, so daß also zwischen beiden nur eine lineare Berührung Statt haben konnte, während hingegen bei allen gut konstruirten Maschinen das Zapfenlager und die darin sich drehende Ase durchaus einerlei Durchmesser haben, und demnach eine Berührung in allen Punkten der reibenden Flächen statt findet. Daß nun dieser Umstand den Werth der Reibung wesentlich ändert, hat schon Poisson*) bemerkt, obgleich er nicht angiebt, wie dieselbe im Fall einer Berührung in allen Punkten zu berechnen ist. Wir werden sogleich sehen, daß im letzteren Falle die Reibung nur etwa $\frac{7}{11}$ so groß ist, als wenn, wie bei den Coulombschen Versuchen, bloß eine lineare Berührung vorausgesetzt wird.



Es stelle ABJ den cylinderförmigen Zapfen, C dessen Ase und ADB die Berührung seiner Mantelfläche mit dem Zapfenlager vor. Wir setzen voraus, daß der Bogen ADB kleiner sei, als der halbe Umfang des Zapfens, und daß die Kraft P, welche den Zapfen nach der Richtung CP gegen sein Lager preßt, den Mittelpunktswinkel ACB halbirt.

Wollte man nun die Kraft P ganz als Normaldruck auf das Lager im Punkte D vereinigt annehmen, wie dies bisher allgemein gelehrt wurde, so würde man offenbar von einer unrichtigen Voraussetzung ausgehen, da alle Punkte der Berührungsfläche ADB an jener Pressung gleichen Antheil haben. Das Richtige ist unstreitig, sich die Kraft P in eben so viele gleiche und parallele Kräfte p zerlegt zu denken, als Berührungspunkte in ADB enthalten sind, dergestalt, daß jeder dieser Punkte nach einer, mit CP parallelen Richtung denselben Druck zu erleiden hat.

Dies vorausgesetzt, ziehe man die Sehne GH parallel mit AB, setze $DE = x$, $EG = EH = y$, den Bogen GDH = s, und den gegebenen Berührungsbogen ADB = a, so ist der obigen Vorstellung gemäß die Summe der parallelen Pressungen auf GDH = $\frac{s}{a} \cdot P$. Denkt man sich nun $G'H'$ in dem unendlich kleinen Abstände $EE' = dx$ parallel mit GH gezogen, so ist $GG' = HH' = ds$, und die parallelen Pressungen auf diese beiden Bogenelemente drücken sich aus durch

$$p = \frac{ds}{a} \cdot P.$$

Um nun die hiervon erzeugte Reibung berechnen zu können, muß man wie bei der schiefen Ebene den Druck n suchen, den die Kraft p in G und H normal auf das Zapfenlager ausübt. Zieht man zu dem Ende an diesen beiden Punkten die Berührungslinien GK und HK, welche sich im Punkte K der Geraden CP schneiden, und bezeichnet mit φ den Winkel, den sie mit letzterer bilden, so erhält man $n = p \cdot \sin. \varphi$. Bekanntlich ist aber $\sin. \varphi = \frac{dy}{ds}$; und wenn man außerdem den für p zugehörigen Werth setzt, entsteht

$$n = \frac{dy}{a} \cdot P.$$

*) Traité de Mécanique etc. T. I. §. 132.

Bezeichnet nun μ den Coefficienten der gleitenden Reibung, wie er nach den im vorigen Abschnitt mitgetheilten Versuchen für die Materie des Zapfens und des Lagers mit Rücksicht auf die Art der Schmiere gefunden wurde, so ist die aus dem obigen Normaldruck in den Punkten G und H entstehende Reibung $f = \mu n$; also für beide Punkte

$$2f = 2\mu n = 2 \cdot \frac{dy}{a} \cdot \mu P;$$

und für alle Punkte des Bogens GDH ist die Reibung

$$F = 2 \cdot \int \frac{dy}{a} \cdot \mu P.$$

Dieses Integral von $y = 0$ bis $y = \frac{1}{2} AB$ genommen, liefert für die gesammte Reibung auf der Berührungsfläche ADB des Zapfenlagers den Ausdruck

$$F = \frac{AB}{a} \cdot \mu P;$$

oder, wenn man den Mittelpunktswinkel $ACB = 2\alpha$, den Halbmesser des Zapfens $AC = BC = r$; folglich die Sehne $AB = 2r \cdot \sin. \alpha$ und den Bogen $ADB = a = 2r\alpha$ setzt,

$$F = \frac{\sin. \alpha}{\alpha} \cdot \mu P.$$

Dieser Widerstand kann im Punkte D als eine Kraft vereinigt gedacht werden, welche nach der Richtung der Tangente DF, mithin senkrecht auf der Richtung CP wirkt; denn die Reibungswiderstände f der Punkte G und H sind als Kräfte zu betrachten, die nach den Richtungen der an jenen Punkten gezogenen Tangenten GL und HK der Drehung entgegen wirken. Nimmt man daher in dem Durchschnittspunkte K dieser beiden gleich großen Kräfte ihre gemeinschaftliche Mittelkraft, so halbirt deren Richtung KM den zwischen jenen enthaltenen Winkel HKL, und steht folglich senkrecht auf CP. — Die Größe der fraglichen Mittelkraft ergibt sich leicht gleich

$$2f \cdot \text{Cos. HKM} = 2 \cdot \frac{dy}{a} \cdot \mu P \cdot \sin. \varphi,$$

und indem man dieselbe auf den Punkt D reducirt, erhält man die gleichgeltende Kraft nach der Richtung DF gleich $2 \cdot \frac{dy}{a} \cdot \mu P \cdot \frac{CK \cdot \sin. \varphi}{CD}$, welcher Ausdruck sich, weil $CK \cdot \sin. \varphi = CH = CD$ ist, auf $2 \cdot \frac{dy}{a} \cdot \mu P$ reducirt. Eine solche, nach der Richtung der Tangente DF wirkende Kraft geben aber die Reibungswiderstände je zweier Punkte, die sich wie G und H in gleichen Entfernungen von der Mittellinie CP befinden; daher ist die Summe aller nach DF wirkenden Kräfte $= 2 \int \frac{dy}{a} \cdot \mu P$, welcher Ausdruck, wie man sieht, den vorigen Werth von F liefert.

Eine nähere Betrachtung der vorhin gefundenen Formel

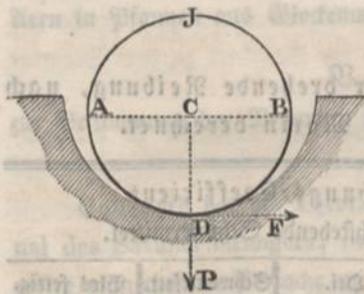
$$I. F = \frac{\sin. \alpha}{\alpha} \cdot \mu P$$

gibt noch zu folgenden Bemerkungen Anlaß:

- 1) Die drehende Reibung steht im directen Verhältniß der Sehne und im umgekehrten Verhältniß

hältniß der Länge des Berührungsbogens im Zapfenlager, und ist daher stets kleiner, als die gleitende Reibung unter übrigens gleichen Umständen. Dieses Resultat findet Bestätigung in den Angaben der erfahrensten Techniker. Unter anderen giebt Langsdorf*) an, daß der Coefficient der Zapfenreibung ohne Schmiere caet. par. um den vierten, mit Schmiere aber wenigstens um den fünfzehnten Theil geringer ist, als für die gleitende Reibung. Selbst die Erfahrungen Coulomb's stimmen mit dem obigen Resultat überein, obgleich er zu dessen Erklärung andere Gründe beibringt; namentlich soll, seiner Meinung nach, bei der Rotationsbewegung deshalb eine geringere Reibung stattfinden, weil die ineinandergreifenden Unebenheiten der beiden Berührungsf lächen sich leichter von einander befreien und außer Contact treten, als bei einer gleitenden Bewegung**).

2) Der Factor $\frac{\sin. \alpha}{\alpha}$ ist für jeden angebbaren Werth von α ein ächter Bruch, der aber



nach bekannten Lehren seinen größten Werth = 1 erreicht, wenn $\alpha = 0$ wird, oder wenn, wie in nebenstehender Figur, die Berührung zwischen dem Zapfen ADBJ und seinem Lager nur allein im Punkte D stattfindet. — In diesem Falle erlangt offenbar auch die Reibung ihren größten Werth, nämlich

$$\text{II. } F = \mu P,$$

weil hier der ganze Druck P sich im Punkte D als eine einzige Kraft vereinigt. Es erhellet nun leicht, daß diese Voraussetzung mit derjenigen zusammenrückt, die bei den Coulombschen Versuchen zum Grunde gelegt hat.

3) Es liegt in der Natur der Sache, daß der größte, für α zulässige Werth nur = $\frac{1}{2}\pi$ sein kann, welches der Voraussetzung entspricht, daß der Zapfen mit seiner halben Mantelfläche in der Höhlung des Lagers liegt und dieses in allen Punkten gleichmäßig berührt. Für diesen Fall, der in der That bei allen genau konstruirten Maschinen zutrifft, ergibt sich der kleinste Werth der Reibung; nämlich

$$\text{III. } F = \frac{2}{\pi} \cdot \mu P = \frac{7}{11} \cdot \mu P,$$

wenn für π der Näherungswerth = $\frac{22}{7}$ gesetzt wird. Sobald also eine Berührung des Zapfens mit allen Punkten des halbcylindrischen Lagers stattfindet, so beträgt die Reibung nur $\frac{7}{11}$ von derjenigen, die Coulomb unter der Voraussetzung einer bloß linearen Berührung gefunden hat. Dieses Resultat scheint es nun auch genügend zu erklären, weshalb man die Reibung in den Maschinen jedesmal fast um das Doppelte zu groß berechnet, sobald man die Coulombschen Versuchszahlen dabei zum Grunde legt.

Die in dem Vorhergehenden entwickelte Theorie scheint, wenn anders die Erfahrung sie bestätigen sollte, nicht ganz ungeeignet, eine bestimmte Beziehung zwischen der gleitenden und dre-

*) Ausführliches System der Maschinenkunde etc. Heidelberg 1826 — 28.

**) Vergl. Théorie des machines simples etc. pag. 142.

henden Reibung festzustellen. Genaue Versuche über die letztere Art der Reibung bleiben um so mehr noch ein sehr gefühltes Bedürfnis, als weder die früher von Musschenbroek und Coulomb, noch die in neuerer Zeit von Rennie angestellten Versuche für den gegenwärtigen Zustand der Mechanik von sonderlichem Werthe sind. Herr Morin hat uns Hoffnung gegeben, die in dieser Beziehung allerdings noch vorhandene große Lücke durch seine erfolgreichen Bemühungen demnächst ausgefüllt zu sehen. Inzwischen dürfte es, bis uns die Resultate der versprochenen Versuche vorliegen, nicht überflüssig sein, nach obiger Theorie aus den von Morin über die gleitende Reibung angestellten Versuchen die entsprechenden Coefficienten der drehenden Reibung zu berechnen, und dieselben für den practischen Gebrauch einstweilen in nachstehender Tabelle zusammen zu stellen. Diese Coefficienten sind dadurch gefunden, daß man die in Tafel XI S. 111 zusammengestellten Zahlen nach der Reihe mit $\frac{7}{11}$ multiplicirt hat. Dabei sind jedoch nur solche Zahlen ausgewählt worden, welche vorzugsweise auf die zu Zapfen und Lagern gebräuchlichen Metalle Anwendung finden.

Tafel VII. Zusammenstellung der Coefficienten für drehende Reibung, nach vorstehender Theorie aus den Versuchen von Morin berechnet.

Nr.	Reibende Körper.	Reibungs-Coefficient für nachstehende Schmiermittel.			
		Talg.	Del.	Schweinefett.	Wos fettig.
1	Schmiedeeisen auf Eichenholz	0,054	—	—	—
2	Gusseisen " "	0,050	0,052	0,048	0,068
3	Kupfer " "	0,044	—	—	0,064
4	Schmiedeeisen auf Ulmenholz	0,050	0,035	0,048	0,088
5	Gusseisen " "	0,049	0,042	—	0,073
6	Schmiedeeisen auf Guajacholz	—	0,046	—	0,106
7	Gusseisen " "	0,047	0,048	—	0,077
8	Bronze " "	0,052	0,034	—	0,093
9	Schmiedeeisen auf Gusseisen	0,065	0,042	0,048	0,074
10	Gusseisen " "	0,064	0,041	0,045	0,092
11	Stahl " "	0,067	0,050	0,052	0,069
12	Messing " "	0,046	0,042	0,043	0,072
13	Bronze " "	0,055	0,049	—	0,063
14	Schmiedeeisen auf Schmiedeeisen	0,052	0,045	0,052	0,112
15	Stahl " "	0,059	—	0,048	—
16	Bronze " "	0,052	0,049	—	0,105
17	Schmiedeeisen auf Bronze	0,066	0,049	0,048	0,102
18	Stahl " "	0,035	0,034	—	—
19	Bronze " "	—	0,037	—	0,085

Es darf hier nicht unbemerkt bleiben, daß selbst diese Coefficienten, obgleich geringer als die von Coulomb gefundenen, dessen ungeachtet für die praktische Anwendung noch zu groß sein

dürften. Denn bei den Morin'schen Versuchen, aus welchen die obigen Zahlen berechnet worden sind, waren die Metallflächen bloß mit der Schlichtfeile und mit Del abgerieben, keineswegs aber vollkommen glatt geschliffen, wie dies im Maschinenwesen mit sorgfältig bearbeiteten Zapfen und Lagern geschieht. Diese werden nicht bloß bis zur möglichsten Glätte abgeschmirgelt, sondern sie erhalten durch die anhaltende Bewegung sehr bald einen solchen Grad von Politur, wie sie kaum durch mechanische Bearbeitung herzustellen ist. Als ein Beweis, wie weit auf diese Weise die Reibung vermindert werden kann, dienen die Versuche von Wood*) über die Reibung an den Axen der schon längere Zeit im Gebrauch gewesenen Eisenbahnwagen. Bei diesen Wagen hatten sich die eisernen Axen schon so glatt gelaufen, daß die Reibung derselben in messingenen Pfannen, mit dem feinsten Knochenfett (neat's foot oil) geschmiert, gleich 0,0194, in gußeisernen Pfannen aber, bei Anwendung derselben Schmiere, gleich 0,0179 gefunden wurde, während der Herr Director Egen**) bei einem neu gebauten Wagen die Reibung der eisernen Axen in Pfannen aus Glockenmetall zu $\frac{1}{28} = 0,036$ der Belastung findet.

Versuche von Coulomb,

zur Bestimmung der Reibung, die ein Körper erleidet, der sich auf der Spitze einer unbeweglichen senkrechten Spindel dreht.

Coulomb hat die Theorie der Reibung verticaler Spindeln und Pfannen bereits im Journal des Savants étrangers, volume IX., p. 234 seq. abgehandelt, allein da die in diesem Memoire mitgetheilten Versuche weder zahlreich, noch genau genug sind, um seiner Theorie die erforderliche Ausdehnung und Gewißheit zu geben, so nimmt er später diesen Gegenstand wieder auf, und behandelt ihn in einer trefflichen Abhandlung***), aus der ich folgende Hauptergebnisse entnehme:

Gewöhnlich hängt man die Bussolen-Nadeln und überhaupt die Körper, welche sich auf einer verticalen Spindel drehen sollen, mittelst eines Hütchens aus Achat, oder aus einer andern sehr harten Substanz, auf. Die Spindeln sind aus gehärtetem, am häufigsten aus federhartem Stahle gemacht; das Hütchen hat in seiner Höhlung eine konische Form, oben durch eine kleine Kugelcalotte begrenzt, von welcher der Krümmungshalbmesser sehr klein ist. Die Spitze der konischen Spindel, welche das Hütchen trägt, bildet an ihrem obern Ende eine kleine, convex gekrümmte, Oberfläche, deren Krümmungshalbmesser noch kleiner als der des Hütchens sein muß. Allein ungeachtet aller Sorgfalt des Künstlers bei der Anfertigung der Hütchen, fand Coulomb durch genaue Versuche deren Krümmung sehr unregelmäßig, und das Reibungsmoment eines solchen Hütchens war häufig fünf- bis sechsmal größer als das Moment der Reibung einer in ihrem Grunde ebenen und sehr polirten Pfanne, welche sich auf derselben Spindel drehte. Daher schienen ihm die Versuche mit gewöhnlichen Hütchen nicht geeignet, um durch sie die Gesetze

*) A practical Treatise on Rail-roads etc. by Nicholas Wood. New Edition; London 1831. p. 227 und 228.

**) Verhandlungen des Vereins zur Beförderung des Gewerbfleißes in Preußen vom Jahr 1835. S. 148.

***) Théorie des Machines simples etc. p. 187 seq.

der Reibung zu bestimmen; vielmehr erdachte er sich zu diesem Zwecke eine Art von Versuchen, die alle jene Elemente, von welchen das genaue Maß fehlt, so viel als möglich entfernt hielten.

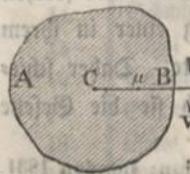
Anstatt also den Körper mittelst eines Hütchens auf die verticale Spindel zu hängen, ließ Coulomb denselben mit einer sehr polirten Ebene auf der abgerundeten Spitze dieser Spindel ruhen, indem er, um das Abgleiten des Körpers zu verhindern, dafür sorgte, daß dessen Schwerpunkt gegen den Aufhängepunkt möglichst tief zu liegen kam. Hierauf theilte er dem Körper eine Umdrehungsbewegung mit, beobachtete dann sehr genau mittelst einer Sekundenuhr die Zeit, in welcher der Körper die ersten vier oder fünf Umläufe machte, um daraus die Anfangsgeschwindigkeit herzuleiten, und endlich zählte er noch die Anzahl sämtlicher Umläufe, die der Körper machte, bis er zur Ruhe kam.

Man begreift, daß bei dieser Art von Bewegung die Geschwindigkeit des Körpers zugleich von der Reibung und von dem Widerstande der Luft verzögert wird. Allein bei einer gewissen Gestalt des Körpers, z. B. wenn eine Glasglocke von 5 bis 6 Quentchen (gros) Gewicht sich auf der Spindelspitze dreht, kann man den Widerstand der Luft im Vergleich zu dem Moment der Reibung vernachlässigen.

Um indessen auch in dieser Beziehung mehr Gewißheit über die Resultate zu erhalten, wurde ein Theil der Versuche im luftleeren Raume angestellt, indem eine aus Messingdrath gebildete Gabel akhb (s. die Abbildung S. 143) oben mit einer ebenen Fläche, oder besser mit einem concaven Linsenglase d, von 2 bis 3 Linien Krümmungshalbmesser versehen, und unten mit zwei metallenen Gewichten a und b beschwert, unter der Glocke einer Luftpumpe auf die Spitze der Spindel dg aufgehängt wurde. Vermittelst eines metallenen, an seinem untern Ende hakenförmig gebogenen Drathes, der luftdicht durch den Hals der Kampane ging, und darin drehbar war, ertheilte man der Gabel eine drehende Bewegung.

Indessen bemerkt Coulomb, daß diese Vorrichtung für fast alle Fälle, wo man nicht den Einfluß der Geschwindigkeit will kennen lernen, unnütz sei; denn wenn man sich nur mit einer sehr langsamen Bewegung begnügt, so daß etwa die Gabel, deren beide Arme 2 Zoll Abstand von einander haben, ihren ersten Umlauf in 7 bis 8 Sekunden macht, und wenn außerdem die an der Gabel hängenden Gewichte a und b etwas über 5 bis 6 Quentchen wiegen, so ist die Reibung beträchtlich genug gegen den Widerstand der Luft, um letzteren unberücksichtigt zu lassen. Es ist dann hinreichend, die Gabel mit einer großen Glocke zu bedecken, um einen etwanigen Luftstrom abzuhalten.

Theorie dieses Widerstandes. Es sei AB die horizontale Basis eines Körpers, der sich um eine verticale Axe C dreht und v sei die Geschwindigkeit eines Punktes, dessen Abstand von der Drehaxe Ca = a gegeben ist.



Ist nun F die verzögernde Kraft im Punkte a, Q die auf diesen Punkt reducirte Masse des Körpers in Gewichtseinheiten ausgedrückt, g die Beschleunigung der Schwere, und setzt man $2g \cdot \frac{F}{Q} = \varphi$, so findet die bekannte Differenzialgleichung statt

$$\varphi = - \frac{dv}{dt},$$

wo φ die beschleunigende Kraft bedeutet, welche auf die Einheit der Masse wirkt.

Substituirt man für φ seinen Werth, so entsteht:

$$2g \frac{F}{Q} = - \frac{dv}{dt},$$

$$\text{also } F = - \frac{dv}{dt} \cdot \frac{Q}{2g}.$$

Das Moment dieser Kraft in Bezug auf die Drehaxe C ist aber $= Fa$; oder wenn man diese Größe mit M bezeichnet:

$$M = - \frac{dv}{dt} \cdot \frac{aQ}{2g}.$$

Bezeichnet dx den Weg, den der Punkt a in der Zeit dt durchläuft, so ist bekanntlich $dx = v \cdot dt$, und indem man mittelst dieser Gleichung die Größe dt aus der vorigen eliminirt, so verwandelt sie sich in folgende:

$$M \cdot dx = - v \cdot dv \cdot \frac{aQ}{2g}.$$

Diese Gleichung in Bezug auf x und v integrirt liefert, wenn c die Anfangsgeschwindigkeit bezeichnet,

$$Mx = \frac{1}{2}(c^2 - v^2) \frac{aQ}{2g},$$

wobei also die Größen M und Q als constant betrachtet wurden. Was letztere betrifft, so ist sie zwar nicht unmittelbar gegeben, kann aber leicht aus dem Momente der Trägheit des bewegten Körpers gefunden werden. Ist nämlich m , die in dem Volumen des Körpers vertheilte Masse, auf dieselbe Art wie Q ausgedrückt, und repräsentirt dm irgend ein Elementartheilchen dieser Masse, in dem Abstände r von der Drehaxe, so hat man die Gleichung

$$a^2 Q = r^2 \cdot dm,$$

welches Integral auf die ganze Ausdehnung des Körpers erstreckt werden muß. Man erhält hieraus $aQ = \frac{1}{a} \int r^2 \cdot dm$, und dies in die obige Gleichung gesetzt, giebt

$$Mx = \frac{c^2 - v^2}{4ag} \int r^2 \cdot dm;$$

$$\text{also } M = \frac{c^2 - v^2}{4gx} \cdot \int \frac{r^2 \cdot dm}{a}.$$

Betrachtet man nun die Bewegung bis zu dem Augenblick, wo der Körper zur Ruhe kommt, und bezeichnet mit s den bis zu diesem Zeitpunkte durchlaufenen Weg, so hat man

$$M = \frac{c^2}{4gs} \int \frac{r^2 \cdot dm}{a},$$

eine Gleichung, worin der Factor $\int \frac{r^2 \cdot dm}{a}$ eine constante Größe ist, dafern man einen bestimmten Körper von unveränderlicher Form auf der Spitze einer Spindel sich drehen läßt. Und da unter übrigens gleichen Umständen das Moment M des Widerstandes, welcher die Bewegung

verzögert, ebenfalls constant ist, so muß auch $\frac{c^2}{4gs}$ für jeden Grad der ursprünglichen Geschwindigkeit c constant sein.

Versuche auf Grund dieser Theorie. Um den Widerstand der Luft, der offenbar mit zur Verzögerung der Bewegung beiträgt, möglichst zu beseitigen, bediente sich Coulomb einer gläsernen Glocke von 4 Zoll Durchmesser, 5 Zoll Höhe und 5 Unzen schwer, die er auf der abgerundeten Spitze einer verticalen Spindel sich drehen ließ. Nachdem er derselben nach einander verschiedene Grade der Geschwindigkeit mitgetheilt, beobachtete er sehr genau die Zeit, welche sie zu ihrer ersten Umdrehung gebrauchte, und leitete daraus die Anfangsgeschwindigkeit her; nächstdem zählte er sämtliche Umdrehungen, welche die Glocke bis zu dem Augenblick machte, da sie zur Ruhe kam.

1ster Versuch. Die Glocke machte einen Umlauf in 4 Sekunden, und 34,1 Umläufe bis zum Stillstande.

2ter Versuch. Der erste Umlauf geschah in $6\frac{1}{4}$ Sekunden, und es wurden 14,1 Umläufe bis zum Stillstande gemacht.

3ter Versuch. Ein Umlauf in 11 Sekunden; 4,6 Umläufe bis zum Stillstande.

Resultate. Um diese Versuche nach der vorigen Theorie bequem berechnen zu können, soll zuvor die Endformel $M = \frac{c^2}{4gs} \int \frac{r^2 \cdot dm}{a}$ auf eine bequemere Gestalt gebracht werden. Zu dem Ende sei t die Zeit, in welcher der erste Umlauf geschieht, und n die Anzahl sämtlicher Umläufe, dann ist $c = \frac{2a\pi}{t}$, $s = 2a\pi \cdot n$, und dies in die obige Formel gesetzt, reducirt dieselbe auf folgende:

$$M = \frac{1}{nt^2} \cdot \frac{\pi}{2g} \int r^2 \cdot dm.$$

Sofern nun das Widerstandsmoment M constant sein soll, muß auch $\frac{1}{nt^2}$ eine constante Größe sein, und um dies auch a posteriori darzuthun, berechnet Coulomb aus den drei obigen Versuchen folgende Werthe dieser Größe:

Im 1sten Versuch war $t = 4$ Sek., $n = 34,1$; daher $\frac{1}{nt^2} = \frac{1}{546}$.

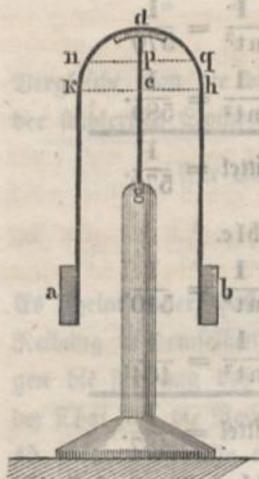
» 2ten » » $t = 6,25$ » $n = 14,1$; » $\frac{1}{nt^2} = \frac{1}{551}$.

» 3ten » » $t = 11$ » $n = 4,6$; » $\frac{1}{nt^2} = \frac{1}{557}$.

Es erhellet also aus diesen Resultaten, daß die fragliche Größe $\frac{1}{nt^2}$ in der That für alle Grade der anfänglichen Geschwindigkeit constant ist, und daß daher das Moment der Reibung nur eine Function der Pressung sein kann.

Coulomb hat diese Versuche im luftleeren Raume unter der Glocke einer Luftpumpe wiederholt, und dieselben Resultate gefunden, so daß also der Widerstand der Luft im Verhältniß zu dem Reibungsmomente gleich Null zu achten ist.

Versuche mit verschiedenen andern Substanzen. Ein Messingdrath von 9 Zoll Länge wurde, nach beistehender Figur, gabelförmig gebogen, so daß die parallelen Arme ak, bh, welche die Fortsetzungen des Halbkreises kdh bildeten, einen Abstand = 2 Zoll von einander hatten. An den unteren Enden a und b dieser verticalen Arme, deren Länge sehr nahe 3 Zoll betrug, wurden zwei Metallstückchen und oben im Scheitel d des Halbkreises eine kleine, sehr polirte Fläche mittelst Wachs befestigt, um als Auflager oder Hütchen zu dienen. Letzteres bestand aus verschiedenen Substanzen: Granat, Achat, Bergkrystall, Glas oder Stahl, von welchen die Reibung untersucht werden sollte, während das obere Ende der Spindel gd aus gehärtetem Stahle bestand, mehr oder minder zugespitzt, abgerundet, oder stumpf, je nach der Natur des Hütchens und der Pressung. Bei den zunächst folgenden Versuchen bildete die stählerne Spitze, durch eine Lupe besehen, einen Winkel von 18 bis 20 Graden; die Metallstückchen a und b wogen einzeln 2 Quentchen (Gros) und die ganze Gabel 1½ Quentchen.



I. Hütchen aus polirtem Granat.

1) Die Gabel machte den ersten Umlauf in $t = 12$ Sek. und kam nach $n = 7$ Umläufen zur Ruhe, wonach sich ergibt $\frac{1}{nt^2} = \frac{1}{1008}$.

2) $t = 23$ Sek., $n = 2$ Umläufe, also $\frac{1}{nt^2} = \frac{1}{1050}$.

$$\text{Mittel} = \frac{1}{1029}$$

II. Hütchen aus polirtem Achat.

1) $t = 9$ Sekunden; $n = 10,5$ Umläufe..... $\frac{1}{nt^2} = \frac{1}{851}$.

2) $t = 15$ Sekunden; $n = 3,75$ Umläufe..... $\frac{1}{nt^2} = \frac{1}{841}$.

$$\text{Mittel} = \frac{1}{847}$$

III. Hütchen aus polirtem Bergkrystall.

1) $t = 13$ Sekunden; $n = 4\frac{1}{2}$ Umläufe..... $\frac{1}{nt^2} = \frac{1}{781}$.

2) $t = 14\frac{1}{2}$ Sekunden; $n = 3\frac{3}{4}$ Umläufe..... $\frac{1}{nt^2} = \frac{1}{787}$.

$$\text{Mittel} = \frac{1}{784}$$

IV. Hütchen aus polirtem Glase.

1) $t = 8\frac{3}{4}$ Sekunden, $n = 7\frac{1}{2}$ Umläufe; also $\frac{1}{nt^2} = \frac{1}{570}$.

2) $t = 4\frac{1}{4}$ Sekunden, $n = 2\frac{9}{10}$ Umläufe; also $\frac{1}{nt^2} = \frac{1}{589}$.

Mittel = $\frac{1}{579}$.

V. Hütchen aus polirtem, gehärtetem Stahle.

1) $t = 17$ Sekunden, $n = 1\frac{3}{4}$ Umläufe; also $\frac{1}{nt^2} = \frac{1}{510}$.

2) $t = 8$ Sekunden, $n = 7\frac{1}{4}$ Umläufe; also $\frac{1}{nt^2} = \frac{1}{464}$.

Mittel = $\frac{1}{487}$.

Hiernach ist das Moment der Reibung für Hütchen aus Granat, Achat, Bergkrystall, Glas und gehärtetem Stahle nach der Reihe den Zahlen $\frac{1}{1029}$, $\frac{1}{847}$, $\frac{1}{784}$, $\frac{1}{579}$ und $\frac{1}{487}$ unter übrigens gleichen Umständen proportional, so daß, wenn man das Reibungsmoment für Granat = 1 setzt, man für die übrigen Substanzen folgende Zahlenwerthe erhält:

Reibungsmoment für Hütchen aus Granat....	= 1,000
" " " " " Achat.....	= 1,214
" " " " " Bergkrystall =	1,313
" " " " " Glas.....	= 1,777
" " " " " Stahl.....	= 2,257.

Einfluß der größeren oder geringeren Spizigkeit der Spindel auf den Betrag der Reibung. Um diesen Einfluß zu untersuchen, ließ Coulomb das konisch geformte Oberende der stählernen Spindel successive mehr oder minder zuspitzen, um zu sehen, welchen Einfluß diese Aenderung der Gestalt auf den Betrag der Reibung äußerte. Von diesen Versuchen giebt er nur folgende numerische Resultate.

Bei derselben Belastung und überhaupt unter denselben Umständen, wie bei den vorigen Versuchen, findet er den Werth der Größe $\frac{1}{nt^2}$ für eine konische Spitze von 45 Graden:

bei einem Granathütchen.....	= $\frac{1}{2500}$;
" " Achathütchen	= $\frac{1}{2100}$;
" " Glashütchen	= $\frac{1}{1400}$;
" " Hütchen aus gehärtetem und vollkommen polirtem Stahle =	$\frac{1}{2000}$.

Desgleichen für eine konische Spitze, welche, durch die Lupe besehen, einen Winkel höchstens von 6 bis 7 Graden bildete, fand Coulomb bei derselben Belastung wie vorhin die folgenden Ergebnisse:

Bei

Bei einem Achathütchen.....	$\frac{1}{nt^2} = \frac{1}{800}$
„ „ Glashütchen.....	„ = $\frac{1}{450}$
„ „ Hütchen aus gehärtetem und polirtem Stahle „	= $\frac{1}{230}$.

Vergleicht man die bisher angeführten Versuche mit Achathütchen für verschiedene Zuspitzungen der stählernen Spindel mit einander, so findet man:

Für eine konische Spitze von 45 Graden	$\frac{1}{nt^2} = \frac{1}{2100}$
„ „ „ „ „ 15 „ „	= $\frac{1}{1200}$
„ „ „ „ „ 6 „ „	= $\frac{1}{800}$.

Es scheint daher, daß für Granat, Achat und Glas, bei einer Pressung von $5\frac{1}{2}$ Quentchen, die Reibung in demselben Maasse zunimmt, als das obere Ende der Spindel spitzer wird; wogegen die Reibung des polirten Stahlhütchens in einem viel größeren Verhältnisse zunimmt. In der That sind die Reibungsmomente des Achates und des Stahles auf einer konischen Spitze von 45 Graden beinahe einander gleich, nämlich für jene Substanz proportional $\frac{1}{2100}$ und für diese proportional $\frac{1}{2000}$. Auf einer konischen Spitze von 6 bis 7 Graden sind dagegen die Reibungsmomente beider Substanzen bezüglich den Zahlenwerthen $\frac{1}{500}$ und $\frac{1}{330}$ proportional.

Coulomb bemerkt noch, daß die eben gefundenen Resultate sich nicht auf alle Grade der Pressung anwenden lassen; denn wenn die Pressung der Hütchen auf die konische Spindel Spitze z. B. unter 100 Grains beträgt, so gewährt es erfahrungsmäßig wenig Vortheil, diesen Spitzen einen Winkel von mehr als 18 bis 20 Graden zu geben. Diese Bemerkung ist von Wichtigkeit für das Aufhängen der Boussolen-Nadeln, die von Hütchen getragen werden müssen, deren konischer Winkel nicht sehr stumpf sein darf, weil sich sonst der Mittelpunkt der Bewegung leicht ändern und in Folge dessen die magnetische Richtung ungenau werden könnte. Für das Aufhängen solcher Magnetnadeln ist bei dem geringen Gewicht derselben eine konische Zuspitzung der Spindel unter 18 Graden stets am angemessensten.

Einfluß der Pressung auf den Betrag der Reibung. In dem oberen Halbkreise der Gabel bei d wurde eine kleine, sehr polirte Glascheibe befestigt, die man auf einer konischen Stahlspitze von 45 Graden sich drehen ließ. Die untern Enden der Gabelarme wurden successiv mit verschiedenen Gewichten a und b beschwert. Folgendes sind die Ergebnisse dieser Versuche.

VI. Versuch.

Das Gewicht der Gabel betrug durchgängig $1\frac{1}{2}$ Gros, jedes der Metallstückchen a und b wog 2 Gros, also die Pressung auf die Spindel = $5\frac{1}{2}$ Gros.

- 1) Ein Umlauf in $t = 24$ Sekunden, $n = 2$ Umläufe bis zur Ruhe; also $\frac{1}{nt^2} = \frac{1}{1152}$.
- 2) „ „ „ $t = 14$ „ „ $n = 5\frac{3}{4}$ „ „ „ „ „ „ = $\frac{1}{1137}$.
- 3) „ „ „ $t = 10$ „ „ $n = 11\frac{3}{4}$ „ „ „ „ „ „ = $\frac{1}{1175}$.

Mittel = $\frac{1}{1151}$.

VII. Versuch.

Das Gewicht der beiden Metallstückchen a und b beträgt zusammengenommen $15\frac{1}{2}$ Gros, also die ganze Pressung der Spindel = $16\frac{2}{3}$ Gros.

1) Ein Umlauf in $t = 9$ Sekunden, $n = 10\frac{1}{4}$ Umläufe bis zur Ruhe; also $\frac{1}{nt^2} = \frac{1}{830}$.

2) " " " $t = 13$ " $n = 4\frac{3}{4}$ " " " " " " " " = $\frac{1}{802}$.

Mittel = $\frac{1}{816}$.

VIII. Versuch.

Die Gabel wurde mit 4 Metallstückchen, welche zusammen $30\frac{2}{3}$ Gros wogen, belastet; also die Pressung auf die Spindel = 32 Gros.

1) Ein Umlauf in $t = 11$ Sekunden, $n = 5\frac{3}{8}$ Umläufe bis zur Ruhe; also $\frac{1}{nt^2} = \frac{1}{650}$.

2) " " " $t = 22$ " $n = 1\frac{9}{10}$ " " " " " " " " = $\frac{1}{663}$.

Mittel = $\frac{1}{657}$.

IX. Versuch.

Reibung des Granats auf der Spindel. Nachdem an die Stelle der oben erwähnten Glascheibe eine andere aus polirtem Granat gesetzt war, fand Coulomb, ohne specielle Angaben, folgende Zahlenwerthe:

1) Pressung auf die Spindel = $5\frac{1}{2}$ Gros; $\frac{1}{nt^2} = \frac{1}{2400}$

2) " " " " " = $16\frac{1}{3}$ " " " " " " = $\frac{1}{1550}$.

Resultate der Versuche mit Glas (VI, VII und VIII). Wir haben früher gesehen, daß das Moment der Reibung sich durch die Formel ausdrückt:

$$M = \frac{1}{nt^2} \cdot \frac{\pi}{2g} \int r^2 \cdot dm.$$

Bei den vorhergehenden drei Versuchsreihen ist die Größe $\int r^2 \cdot dm$ aus zwei Theilen zusammengesetzt, nämlich aus dem Trägheitsmoment der Gabel und aus dem der daran befestigten Gewichte a und b, welche letztere sich in einem Abstände = 12 Linien von der Rotationsaxe befinden.

Die Gabel wog durchgängig $1\frac{1}{3}$ Gros; der Halbkreis kdh (s. die Fig. S. 143) hat sehr nahe 3 Zoll und jeder der beiden Arme hb und ka ebenfalls 3 Zoll Länge; daher wiegt der Halbkreis für sich allein $\frac{2}{3}$ Gros, und die beiden Arme zusammen $\frac{8}{9}$ Gros, welche letztere Masse denselben Abstand von der Axe haben, wie die daran befestigten Gewichte a und b, so daß sich also deren Trägheitsmomente leicht finden lassen.

Um nun auch das Trägheitsmoment des Halbkreises kdh zu erhalten, sei dessen Radius dc (= ch = ck) = a; für den beliebigen Punkt q seien die Coordinaten dp = x, pq = y, und das Bogenstück dq = s, dann ist beim Kreise $y^2 \cdot ds = ay \cdot dx = adx \sqrt{2ax - x^2}$ und

$$2/y^2 \cdot ds = 2a/dx \sqrt{2ax - x^2}$$

drückt das Trägheitsmoment aus für den ganzen Bogen ndq. Integriert man, so entsteht

$$2 \int y^2 \cdot ds = a(x - a) \sqrt{2ax - x^2} + 2a^3 \cdot \text{Arc tg} \sqrt{\frac{x}{2a - x}};$$

welches Integral zwischen den Grenzen $x = 0$ und $x = a$ genommen, für das Moment der Trägheit des Halbkreises kdh den Ausdruck liefert:

$$2 \int_0^a y^2 \cdot ds = \frac{1}{2} a^3 \pi = \frac{1}{2} a^2 \cdot a \pi.$$

Nun repräsentirt $a\pi$ das Gewicht des Halbkreises kdh = $\frac{4}{3}$ Gros; daher ist dessen Moment $\frac{1}{2} a^2 \cdot kdh = \frac{2}{3}$. Hierzu das Trägheitsmoment der beiden Arme mit $a^2 \cdot \frac{8}{9}$ Gros = $\frac{8}{9}$ addirt, giebt das Moment der ganzen Gabel $\frac{2}{3} + \frac{8}{9} = 1,111$. Dieser Zahlenwerth muß nun in jedem der drei Versuche zu dem Moment der beiden Gewichte a, b addirt werden, um das Trägheitsmoment $\int r^2 \cdot dm$ der gesammten bewegten Masse zu erhalten. Nun war aber

in VI) die Summe der Gewichte der Metallstückchen a und $b = 4$ Gros;

also erhält man..... $\int r^2 \cdot dm = 5,111$;

in VII) die Summe der beiden angehängten Gewichte = $15\frac{1}{2}$ Gros; also $\int r^2 \cdot dm = 16,444$;

in VIII) die Summe der beiden Gewichte a und $b = 30\frac{1}{2}$ Gros; also .. $\int r^2 \cdot dm = 31,778$.

Substituirt man diese Zahlenwerthe, so wie auch die vorhin gefundenen Werthe von $\frac{1}{nt^2}$ in die Formel

$$M = \frac{1}{nt^2} \cdot \frac{\pi}{2g} \int r^2 \cdot dm,$$

so erhält man folgende Ausdrücke:

nach dem sechsten Versuch $M = \frac{5,111}{1151} \cdot \frac{\pi}{2g}$;

» » siebenten » $M = \frac{16,444}{816} \cdot \frac{\pi}{2g}$;

» » achten » $M = \frac{31,778}{657} \cdot \frac{\pi}{2g}$.

Da es nun darauf ankommt, zu ermitteln, wie sich das Moment der Reibung zur Pressung auf die Spindel verhält, so setzt Coulomb ersteres der m ten Potenz der letzteren proportional, und vergleicht demgemäß den 6ten Versuch mit dem 7ten und 8ten durch folgende Proportionen:

$$(5,333\dots)^m : (16,667\dots)^m = \frac{5,111}{1151} : \frac{16,444}{816}$$

$$(5,333\dots)^m : (32,000)^m = \frac{5,111}{1151} : \frac{31,778}{657}.$$

Aus der ersteren Proportion zieht Coulomb $m = 1,328$,

» » zweiten » » » $m = 1,333$;

und als Mittel von beiden findet er..... $m = 1,33 = \frac{4}{3}$;

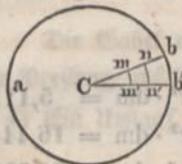
so daß also das Reibungsmoment der Potenz $\frac{4}{3}$ der Pressung proportional wäre.

Coulomb bemerkt noch hierzu, daß jedesmal, wenn die Spindel oben in einer konischen Spitze von mehr als 20 Graden endigte, das Moment der Reibung sich wie die $\frac{4}{3}$ te Potenz der Pressung verhielt, und daß dieses Resultat auch für Achat, Granat und Glas in derselben Art stattfindet. Betrug hingegen der Winkel der konischen Spitze nur 7 bis 8 Grade, dann fielen die Resultate so unregelmäßig aus, daß man keine Schlüsse daraus ziehen konnte; jedoch fand

er das Reibungsmoment fast niemals einer geringeren Potenz als der 2ten der Pressung proportional.

Waren die Spindeln vielen Versuchen unter starken Belastungen unterworfen gewesen, und man bediente sich hierauf derselben zu neuen Versuchen mit geringeren Belastungen, so fand sich das Reibungsmoment beinahe der Pressung proportional, was mit der Theorie, wie wir es gleich sehen werden, übereinstimmt.

Anwendung der Theorie auf die Resultate der vorhergehenden Versuche.



In nebenstehender Figur stelle ab den horizontalen Querschnitt einer Spindel vor, von welcher ein Körper, der sich um den Mittelpunkt C dreht, getragen wird. Ist die Berührungsfläche zwischen dem Körper und der Spindel, welche von dem Kreise ab repräsentirt wird, eine Ebene, so ist klar, daß jeder Punkt m denselben Druck erleidet, wie jeder andere Punkt der Berührungsebene, und daß also der Druck auf jedem Punkte in demselben Verhältnisse größer wird, wie die Totalpressung auf die Spindel. Da nun die früheren Versuche gezeigt haben, daß die gleitende Reibung jedesmal der Pressung proportional ist, so wird, wenn man die Pressung des beliebigen Punktes m mit p und den Reibungscoefficienten mit μ bezeichnet, die Reibung im Punkte m durch μp ausgedrückt werden. Multiplicirt man die in jedem Punkte statthabende Pressung p mit dem Inhalte des Berührungskreises ab, so erhält man den Gesamtdruck P auf dieselbe, und zwar ist, wenn r den Halbmesser Cb bezeichnet,

$$P = r^2 \pi \cdot p.$$

Das Moment der Reibung für ein elementares Flächentheilchen mm'n'n wird demnach ausgedrückt durch $\mu p \cdot mm'n'n \cdot Cm$. Setzt man $Cm = x$, $mn = dx$, $bb' = ds$, so ist $mm' = \frac{x ds}{r}$, und $mm'n'n = \frac{x \cdot ds \cdot dx}{r}$; daher das Moment der Reibung für dieses Flächenelement $= \mu p \frac{x^2 \cdot ds \cdot dx}{r}$, woraus man durch Integration das Reibungsmoment der ganzen Kreisfläche

$$M = \frac{2}{3} \cdot \mu p r^3 \pi$$

findet. Nun war aber der gesammte Druck auf die Kreisfläche $P = r^2 \pi p$, daher erhält man das fragliche Moment

$$M = \frac{2}{3} \mu P \cdot r.$$

Ist also die Berührungsfläche eben, so wird das Reibungsmoment jedesmal dem Druck auf dieselbe proportional sein, ein Resultat, welches mit den vorigen Versuchen übereinstimmt. Denn jedesmal, wenn die Spitze einer Spindel unter starken Pressungen abgenutzt und glatt geworden war, fand man für geringe Belastungen das Moment der Reibung der Pressung proportional.

Wenn man, anstatt das Reibungsmoment für eine unveränderliche Berührungsfläche zu bestimmen, die Voraussetzung macht, daß das oberste Ende der Spindel sich durch Abnutzung und durch die Compressibilität seiner Theilchen abplatten lasse, und man sucht für verschiedene Belastungen den Halbmesser der so entstandenen Berührungsfläche der Bedingung gemäß, daß die Pressung auf jeden Punkt der Cohärenz desselben gleich sei, so erhält man aus der Gleichung

$P = r^2 \pi p$, $r = \sqrt{\frac{P}{\pi p}}$. Indem man nun diesen Werth an die Stelle von r in den Ausdruck

$\frac{2}{3}\mu Pr$ substituirt, ergibt sich das Moment der Reibung $= \frac{2}{3} \sqrt{\frac{\pi}{p}} \cdot P^{\frac{3}{2}}$. Läßt man also die gesammte Pressung P variiren, und setzt den Halbmesser des Abplattungskreises so voraus, daß der Druck p auf jeden Punkt dieses Kreises constant und gleich der Cohärenz desselben sei, dann ist das Moment der Reibung der $\frac{3}{2}$ ten Potenz der Belastung proportional. Dies findet statt, wenn bei einem Versuche, wo man zuerst ein sehr leichtes Gewicht auf die Spitze einer sehr feinen Spindel bringt, die Punkte der konischen Endigung allmählig abbrechen, bis sich ein Berührungskreis gebildet hat, der sich nun nicht mehr ändert, da die Cohärenz der verschiedenen Punkte desselben, den Pressungen, welche sie erleiden, gleich geworden ist. Die Anzahl der Berührungspunkte wird dann nothwendig der jedesmaligen Belastung, und das Moment der Reibung einer solchen Spindel, deren Belastung man allmählig vergrößert hat, wird der $\frac{3}{2}$ ten Potenz des Druckes proportional sein. — In der That bestätigen dies die Versuche; denn jedesmal, wenn man sehr spitze und sehr steif gehärtete Spindeln anwendete, vergrößerte sich das Moment der Reibung in einem größeren Verhältnisse als die $\frac{3}{2}$ te Potenz der Pressung, welches letztere für stumpfkönische Spindeln durch Versuche gefunden wurde.

Giebt man den oberen Spitzen der Spindeln die Form eines stumpfen Winkels, so daß man sie als Kegel oder auch als Umdrehungskörper betrachten kann, und setzt man dieselben überdies als vollkommen elastisch voraus, dann werden sie sich durch eine darauf gebrachte Belastung nur so weit abplätten, als die Elasticität zuläßt, und es werden alle Punkte der entstandenen Berührungsfläche nicht einerlei Druck erleiden, wie wir dies vorhin vorausgesetzt haben; sondern die Pressungen in den verschiedenen Punkten können jedesmal dem Grade der erlittenen Zusammendrückung proportional gesetzt werden.

Es sei demnach BDb die erzeugende Curve des Spindelgipfels und DC die zugehörige Umdrehungsaxe. Wird dieser Gipfel von dem als vollkommen hart vorausgesetzten Körper Aa gepreßt, so erleidet er eine Abplattung nach einer Kreisebene Bb , die der untere Theil der Figur im Grundrisse darstellt.

Da nun die Compression eines jeden Punktes der Größe seiner Ortsveränderung proportional gesetzt werden kann, so wird die Pressung des Punktes D von DC , die Pressung in M von Mm repräsentirt, und die Pressung in b wird gleich Null sein. Bezeichnet man daher Mm durch y , so kann die Pressung in M durch ky ausgedrückt werden, wenn k einen constanten Coefficienten bezeichnet, entsprechend der elastischen Widerstandsfähigkeit des Umdrehungskörpers BDb . Man setze $Cm = x$, $mn = dx$, $Ch = r$, $hb' = ds$, so erhält man für die gesammte Pressung P , welche der Kreis Bb erleidet, den Ausdruck

$$P = \int ky \cdot mn \cdot mn' = \int \frac{k}{r} \sqrt{y} \cdot dx \cdot ds.$$

Da nun die Reibung dem Druck in jedem Punkte proportional ist, so ergibt sich, wenn μ den Reibkoeffizienten, σ die Cohärenz des Körpers BDb bezeichnet, und ρ den Radius des Berührungskreises Bb bedeutet, daß die Reibung R durch den Ausdruck

Reibungscoefficienten bezeichnet, die Summe der Reibungsmomente aller Punkte des Berührungskreises $= \frac{\mu k}{r} \int y \cdot x^2 \cdot dx \cdot ds$.

Behufs der Integration dieser beiden Ausdrücke muß für y der durch die Gestalt des oberen Spindelendes gegebene Werth gesetzt werden. Nehmen wir diese Gestalt, wie in den Versuchen VI, VII und VIII, als kegelförmig an, und setzen $Ob = r$, $CD = a \cdot r$, so ist $y = a(r - x)$; daher die Summe der Pressungen

$$P = \frac{ak}{r} \int x(r - x) dx \cdot ds;$$

und die Summe der Reibungsmomente

$$M = \frac{\mu ak}{r} \int x^2(r - x) dx \cdot ds.$$

Diese beiden Integrale, für den ganzen Berührungskreis genommen, liefern folgende Ausdrücke:

$$P = \frac{1}{2} ak r^2 \pi,$$

$$M = \frac{1}{8} \mu ak r^3 \pi,$$

und wenn man aus der ersten Gleichung den Werth von r in die zweite setzt, so ergibt sich das Reibungsmoment

$$M = \frac{1}{4} \mu \sqrt{\frac{3}{ak\pi}} \cdot P^{\frac{4}{3}}.$$

Wenn also ein harter Körper sich auf einer konischen Spitze dreht, die vermöge ihrer Elasticität zwar eine Zusammendrückung erleidet jedoch ohne sich abzunutzen, und dadurch eine bleibende Abplattung zu erhalten, so ist das Reibungsmoment der $\frac{4}{3}$ ten Potenz der Belastung proportional, ein theoretisches Ergebnis, welches mit dem durch die Versuche VI, VII und VIII gefundenen, vollkommen übereinstimmt.

Coulomb hat diese interessanten theoretischen Untersuchungen im 9ten Bande des Journal des Savants étrangers noch weiter ausgedehnt, und gefunden, daß das Moment der Reibung für eine Spindel von der Form eines Conoides, dessen erzeugende Curve BDb die Verticale DC zur Axe und D zum converen Scheitelpunkt hat, und wenn dabei nur eine sehr geringe Compression vorausgesetzt wird, der $\frac{4}{3}$ ten Potenz der Belastung proportional ist. Betrachtet man nämlich die erzeugende Curve BDb als eine Parabel vom Parameter a , so findet man das Moment

der Reibung $= \frac{5}{18} \mu \sqrt{\frac{2a}{\pi k}} \cdot P^{\frac{4}{3}}$, und bei einer sehr geringen Compression läßt sich immer das abgeplattete Bogenelement näherungsweise als zu einer osculirenden Parabel gehörig ansehen, so daß also das Reibungsmoment der Potenz $P^{\frac{4}{3}}$ proportional gesetzt werden kann.

Unser Autor schließt diese Abhandlung mit folgender Recapitulation:

- 1) Die Reibung eines Körpers, der sich auf einer verticalen Spindel dreht, ist unabhängig von der Geschwindigkeit und nur eine Function der Pressung.
- 2) Die Reibung des Granates ist am geringsten; dann folgen der Ordnung nach Achat, Bergkrystall, Glas und Stahl, bei welchem letzteren die größte Reibung statt findet. Jedoch haben die Versuche gezeigt, daß dieselbe beim polirten Glase weniger unregelmäßig ist.

IV.

Experimentelle und theoretische Untersuchungen über die wälzende Reibung.

Die wälzende oder rollende Reibung ist von den Physikern früher fast gar nicht weiter beachtet worden, als daß man ihr Vorhandensein beim Fortrollen belasteter Cylinder auf einer horizontalen Ebene anerkannt, und ihren Betrag im Verhältniß zur gleitenden Reibung als sehr gering geschätzt hat. Directe Versuche zur Bestimmung der Größe des fraglichen Widerstandes an sich sind meines Wissens, abgesehen von den Versuchen über den Widerstand der Fuhrwerke auf Straßen und Eisenbahnen, die einer späteren Mittheilung vorbehalten bleiben, nur sehr vereinzelt vorhanden, und in so geringer Anzahl, daß sich daraus etwas Allgemeingültiges in Bezug auf das Verhalten des fraglichen Widerstandes unter verschiedenen Umständen nicht schließen läßt.

Daher darf es dem auch nicht Wunder nehmen, wenn über diesen Gegenstand noch gar sehr verschiedene Ansichten stattfinden, so daß an eine sichere Bestimmung a priori für gegebene Bedingungen bis jetzt noch nicht zu denken ist. — Als ein Beleg hiezu mag hier nur erwähnt werden, daß einige Schriftsteller die wälzende Reibung der Pressung proportional setzen, während sie nach Andern in einem höheren Verhältnisse, nach Tredegold namentlich wie die 3te Potenz der Pressung zunehmen soll; daß ferner Coulomb auf Grund seiner Versuche die wälzende Reibung nach dem umgekehrten Verhältniß des Durchmessers der Walzen schätzt, während sich dieselbe, andern Angaben zufolge, umgekehrt wie die Quadratwurzel aus dem Durchmesser verhalten soll, und dergl. m.

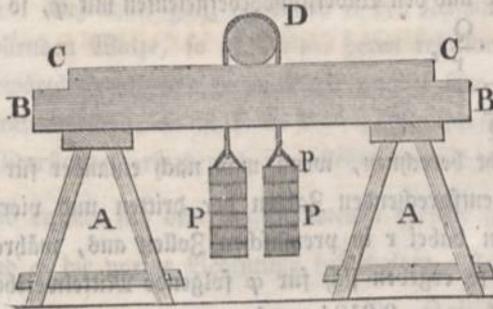
Man sieht demnach, daß das Schwankende und Unbestimmte, welches dem Phänomen der Reibung im Allgemeinen anhaftet, und welches schon früher als eine charakteristische Eigenthümlichkeit dieses Phänomens hervorgehoben wurde, hier in einem noch höheren Grade sich geltend macht. Diese Unbestimmtheit liegt aber meines Erachtens nicht allein in dem Mangel einer hinreichenden Anzahl von Versuchen, die allerdings höchst wünschenswerth bleiben, ja zur Erlangung der erforderlichen Coefficienten ganz unumgänglich nöthig sind, sondern nicht minder in dem Umstande, daß es dem fraglichen Gegenstande an einer theoretischen Basis fehlt, da die Angaben über die Art und Weise, wie die Hauptbestimmungstücke — Druck und Durchmesser — bei der Berechnung der wälzenden Reibung auftreten, noch so sehr von einander abweichen.

Mit Rücksicht hierauf möge es daher nicht als überflüssig erscheinen, wenn ich, nach Mittheilung dessen, was auf dem Wege des Experiments bisher geleistet worden, etwas länger bei der theoretischen Untersuchung der wälzenden Reibung verweile, um so mehr, da dieser Gegenstand in der That complicirter ist, als er auf den ersten Blick sich darstellt.

Versuche über die wälzende Reibung.

Die ersten Erfahrungen über diese Art des Widerstandes verdanken wir Coulomb, der bei Gelegenheit seiner bekannten Versuche über die Steifigkeit der Seile auch einige Versuche

über die wälzende Reibung anstellte*). Er bediente sich dazu einer Vorrichtung, die aus zwei starken, sechs Fuß hohen Böden A,A bestand, auf welche zwei vierkantige Holzstücke BB mit



einem angemessenen Zwischenraume parallel neben einander gelegt wurden. Auf diese Unterlagshölzer befestigte man zwei Schienen CC aus Eichenholz, die vorher mit dem Schlichthobel gut geebnet und mit einem Stück Seehundsfell möglichst polirt worden waren. Die Kanten dieser Schienen hatte man etwas abgerundet, und die Oberflächen derselben wurden so

genau als möglich horizontal gerichtet. Ferner ließ Coulomb zwei Cylinder aus Guajacholz von resp. zwei und sechs Zoll Durchmesser, und außerdem noch mehrere andere aus Ulmenholz von zwei bis zwölf Zoll Durchmesser, alle sehr genau rund gedreht, anfertigen. Diese Cylinder, D, wurden nach einander auf jene eichenen Schienen gelegt, in rechtwinkliger Lage ihrer Axe zu den Kanten der letzteren, und nachdem man um dieselben ein dünnes, sehr biegsames Seil von etwa zwei Linien Umfang geschlungen, wurden an den zwischen den Unterlagen herabhängenden Enden desselben gleiche Gewichte P,P aufgehängt, um jede verlangte Pressung hervorbringen zu können. Hierauf vermehrte man das Gewicht auf der einen Seite so lange, bis das Uebergewicht p hinreichte, den Widerstand zu überwinden, und den Cylinder, nachdem er etwas angestoßen worden, in einer fortdauernd langsamen Bewegung zu erhalten.

Die Ergebnisse dieser Versuche sind in folgender Tabelle enthalten:

Material der Walzen.	Belastung der Cylinder, mit Einschluß ihres eigenen Gewichtes.	Uebergewicht p zur Hervorbringung einer kontinuierlichen langsamen Bewegung,	
		bei einem Durchmesser von 6 Zoll.	bei einem Durchmesser von 2 Zoll.
Guajacholz.	100 Pfund franz.	0,6 Pfund franz.	1,6 Pfund franz.
desgl.	500 " "	3,0 " "	9,4 " "
desgl.	1000 " "	6,0 " "	18,0 " "
		bei einem Durchmesser von 12 Zoll.	
Ulmenholz	1000 Pfund franz.	5 Pfund franz.	10 Pfund franz.

Coulomb schließt aus diesen Versuchen, daß bei der rollenden Bewegung cylinderförmiger Walzen auf horizontalen Unterlagen der Widerstand sich direct wie die Pressung und umgekehrt wie die Halbmesser der Walzen verhalte. Dabei bemerkt er noch, daß der Widerstand bei Walzen aus Ulmenholz um etwa $\frac{2}{3}$ größer sei, als bei Guajacwalzen; daß unter den kleinen Pressungen der Widerstand etwas größer zu sein scheine, als er sich nach dem obigen Gesetze ergeben würde, und endlich, daß das Schmieren der Oberfläche keine bemerkbare Verminderung des Widerstandes hervorbringe.

*) Théorie des machines simples etc. p. 126. seq.

Nehmen wir nun das obige Gesetz als richtig an, und bezeichnen den Halbmesser der Walzen mit r , die gesammte Pressung derselben auf die eichenen Schienen mit Q , die zur Ueberwältigung des Widerstandes erforderliche Kraft mit F und den Widerstandscoefficienten mit φ , so ist:

$$F = \varphi \cdot \frac{Q}{r},$$

woraus sich ergibt: $\varphi = \frac{rF}{Q}.$

Hiernach lassen sich die Werthe von φ leicht berechnen, wenn man nach einander für Q die Zahlen der zweiten Spalte, für F aber die entsprechenden Zahlen der dritten und vierten Spalte der obigen Tabelle substituirt. Drückt man dabei r in preussischen Zollen aus, während die Gewichte Q und F beliebig anzunehmen sind, so ergeben sich für φ folgende Mittelwerthe:

Für Walzen aus Guajacholz $\varphi = 0,0184 = \frac{1}{54};$

» » » Almenholz $\varphi = 0,0311 = \frac{1}{32};$

Rondelet führt in seinem Werke über die Baukunst folgende Erfahrungen an*):

- 1) Ein viereckiger Quaderstein von 1080 Pfund Gewicht erforderte zur Fortbewegung auf einer horizontalen, rauh gemeißelten Fläche desselben Steins, mittelst zwischen gelegter Walzen von 3 Zoll Durchmesser, eine Kraft von 34 Pfund.
- 2) Ließen die Walzen auf hölzernen Bahnen, so reichten 28 Pfund Kraft zur Fortschaffung desselben Steines hin. Und wenn außerdem
- 3) die Grundfläche des Quadersteins mit hölzernen Bohlenstücken verkleidet wurde, so daß die Walzen zwischen zwei Holzflächen liefen, so waren nur noch 22 Pfund Kraft zu seiner Fortbewegung erforderlich.

Um diese Versuche einer ähnlichen Berechnung wie die Coulomb'schen zu unterwerfen, seien φ und φ' die Widerstandscoefficienten für die Bewegung der dreizölligen Walzen auf der Stein- und auf der Holzfläche, dann hat man nach den obigen Versuchen:

$$F = \varphi \cdot \frac{Q}{r}; \quad F = \frac{\varphi + \varphi'}{2} \cdot \frac{Q}{r} \quad \text{und} \quad F = \varphi' \cdot \frac{Q}{r}.$$

Setzt man hierin nach einander für F die Werthe 34, 28 und 22, für Q den Werth 1080 und für $r = 1\frac{1}{2}$ franz. Zoll den entsprechenden Werth = 1,553 in preuß. Zollen, so ergibt sich nach den obigen Formeln:

$$\varphi = 0,0489; \quad \varphi + \varphi' = 0,0805; \quad \varphi' = 0,0307.$$

Hiernach würde der Widerstandscoefficient für hölzerne Walzen auf einer rauh gemeißelten Steinfläche..... = 0,05 = $\frac{1}{20};$
und für dieselben Walzen auf einer Holzfläche..... = 0,0307 = $\frac{1}{33}$
anzunehmen sein.

Noch theilt Rondelet (a. a. D. pag. 348) folgende Versuche mit:

Eine rundgearbeitete Walze aus feinförnigem Kalkstein (Pierre de liais), $4\frac{1}{4}$ Zoll im Durchmesser, $6\frac{1}{4}$ Pfund = 100 Unzen wiegend, wurde auf eine geneigte Ebene desselben Materials gelegt, und durch eine parallel mit der Ebene wirkende Kraft aufwärts gerollt. Bei einer Neigung

*) *Traité théorique et pratique de l'Art de Bâtir.* Paris 1830. T. IV. pag. 345.

der Steinfläche von etwa 30 Graden fand sich die bewegende Kraft = 3 Pfund 4½ Unzen = 52½ Unzen; bei einer Neigung von 60 Graden aber = 5 Pfund 8 Unzen = 88 Unzen.

Bezeichnet ganz allgemein α den Neigungswinkel der Steinfläche, Q das Gewicht der darauf rollenden Walze, so ist $Q \sin \alpha$ deren relatives Gewicht, welches parallel mit der schiefen Ebene abwärts strebt; und wenn P die an der Ase der Walze nach entgegengesetzter Richtung wirkende Kraft vorstellt, so ist $F = P - Q \sin \alpha$ derjenige Theil dieser Kraft, der zur Ueberwindung des Widerstandes erforderlich ist. Letzterer muß nach dem normalen Drucke $Q \cos \alpha$ geschätzt werden,

und ergibt sich dem angenommenen Gesetze gemäß durch die Formel $F = \varphi \cdot \frac{Q \cos \alpha}{r}$, wenn r und φ die vorige Bedeutung beibehalten. Für den Zustand des Gleichgewichtes hat man daher:

$$P - Q \sin \alpha = \varphi \cdot \frac{Q \cos \alpha}{r};$$

mithin
$$\varphi = \frac{r(P - Q \sin \alpha)}{Q \cdot \cos \alpha}$$

In diesem Ausdrucke ist nun $Q = 100$ Unzen; $r = 2\frac{1}{8}$ franz. Zoll = 2,2 preuß. Zoll, und demgemäß findet man:

für $\alpha = 30^\circ$ und $P = 52,25$ Unzen..... $\varphi = 0,0572$
 „ $\alpha = 60^\circ$ „ $P = 88$ „ $\varphi = 0,0616$

der Widerstandscoefficient ist daher im Mittel..... $\varphi = 0,0594 = \frac{1}{17}$,
 und zwar für Walzen aus Kalkstein, die auf einer Fläche desselben Gesteins rollen.

Nach Langsdorf*) kann bei der wälzenden Reibung, gleichgültig ob die Flächen trocken oder geschmiert sind, der Widerstandscoefficient bei einer zwölfzölligen Walze zu $\frac{1}{20}$ der gleitenden Reibung trockener Flächen angenommen werden. Bei einer sechszölligen Walze soll sie beiläufig $\frac{1}{10}$ betragen.

Um ganz allgemein die wälzende Reibung von der gleitenden abhängig zu machen, und jene aus dieser berechnen zu können, stellt Langsdorf die Gleichung auf:

$$F = \frac{d+1}{1,8(d^2+1)} \cdot R,$$

in welcher R die gleitende Reibung für trockne Flächen und d den Durchmesser der Walzen in preuß. Zollen bedeuten. Es scheint nicht, daß sich diese Formel als mit der Erfahrung übereinstimmend erwiesen hat, da sie meines Wissens von den Practikern wenig oder gar nicht benutzt worden ist. Auch muß

bemerkt werden, daß der in der Formel auftretende Factor $\frac{d+1}{d^2+1}$ vermöge seiner Zusammensetzung ein Maximum gestattet, welches für $d = \sqrt{2} - 1 = 0,414$ Zoll stattfindet. Für diesen Werth von d ist nemlich $F = 0,67 \cdot R$, während alle Durchmesser von $\frac{1}{2}$ Zoll an abwärts stets geringere Widerstände ergeben, was durchaus nicht wahrscheinlich ist.

Neuere Versuche über die wälzende Reibung sind von dem Ingénieur des Ponts et Chaussées Dupuit in Frankreich angestellt worden**), jedoch nur in geringer Anzahl, und hauptsächlich in

*) Ausführliches System der Maschinen-Kunde etc. Bd. I. S. 120.
 **) Dupuit, Essai et Expériences sur le Tirage des voitures et sur le frottement de seconde espèce. Paris 1837. pag. 63. Seqq.

der Absicht, um dadurch das Gesetz zu beweisen, daß der genannte Widerstand sich direct wie die normale Pressung und umgekehrt wie die Quadratwurzel aus dem Durchmesser der Walzen verhält, von der Geschwindigkeit der Bewegung und von der Länge der Berührungslinie aber unabhängig ist.

Die bei diesen Versuchen beobachtete Methode besteht in Folgendem: Es wurde eine gerade, horizontale Bahn vorgerichtet, die an ihren beiden Enden durch kleine schiefe Ebenen von gleichen Höhen begrenzt war. Die Winkel zwischen letzteren und der horizontalen Bahn waren durch Kreisbogen von hinreichend großen Halbmessern abgerundet. Läßt man nun von dem Gipfel der einen schiefen Ebene einen Cylinder frei herabrollen, so ist klar, daß derselbe vermöge der erlangten Geschwindigkeit über die horizontale Bahn fort- und die andere schiefe Ebene hinauflaufen wird. Hat er diese bis zu einer gewissen Höhe erstiegen, wobei seine Bewegung allmählig verloren geht, so muß er offenbar wieder zurücklaufen; und auf diese Weise wird der Cylinder so lange hin und zurück laufen, bis seine durch den Fall erlangte Bewegung zuletzt gänzlich vernichtet ist.

Es sei h die Höhe, von welcher der Cylinder auf der ersten schiefen Ebene herabläuft, h' die von demselben auf der zweiten schiefen Ebene erstiegene Höhe, a die Länge der horizontalen Bahn zwischen den Fußpunkten der beiden schiefen Ebenen, und b, b' seien die horizontalen Projectionen der auf letzteren durchlaufenen Wege. Bezeichnet nun f den Widerstand der wälzenden Reibung auf horizontaler Bahn für die Einheit des Gewichts, so ist der Widerstand für einen Cylinder vom Gewichte Q , wenn derselbe diesem Gewichte proportional angenommen wird, $F = fQ$. Nach mechanischen Lehren ergibt sich dann die Geschwindigkeit v , welche der Cylinder durch den Fall von der ersten schiefen Ebene erlangt, durch die Gleichung:

$$v^2 = \frac{2}{3} \cdot 4g(h - bf).$$

Da nun beim Uebergange von der schiefen Ebene auf die horizontale Bahn kein Verlust an Geschwindigkeit stattfindet, so drückt v auch die Anfangsgeschwindigkeit für die horizontale Bewegung des Cylinders aus, und die Geschwindigkeit c , mit welcher derselbe am Fuße der zweiten schiefen Ebene ankommt, bestimmt sich demnach mittelst der Gleichung:

$$c^2 = v^2 - \frac{2}{3} \cdot 4gfa = \frac{2}{3} \cdot 4g[h - f(b + a)].$$

Für die aufwärts steigende Bewegung auf der zweiten schiefen Ebene, welche mit der Geschwindigkeit c beginnt, und, gleichförmig verzögert, bis zur Höhe h' fortbauert, wo der Cylinder seine Bewegung verliert, hat man die Gleichung:

$$c^2 = \frac{2}{3} \cdot 4g(h' + f \cdot b'),$$

welcher Ausdruck, mit dem vorigen verglichen,

$$f = \frac{h - h'}{a + b + b'} = \frac{h - h'}{s}$$

liefert, wenn man die ganze horizontale Bewegung des Cylinders $a + b + b' = s$ setzt.

Herr Dupuit leitet die Größe des Widerstandes durch andere Betrachtungen her, und findet dafür den Ausdruck $f = \frac{h}{s}$, der offenbar nur dann stattfinden kann, wenn der von der einen schiefen Ebene herabrollende Cylinder schon auf der horizontalen Bahn zur Ruhe kommt,

ohne die zweite schiefe Ebene zu erreichen. Ob dies bei den Versuchen der Fall war, wird nicht näher angegeben, sondern bloß erwähnt, daß man die Cylinder jedesmal in beiden Richtungen sich habe bewegen lassen, indem man sie das eine Mal von der ersten, das andere Mal von der zweiten schiefen Ebene frei herabrollen ließ. Von den durchlaufenen Räumen wurde dann das Mittel genommen, um auf diese Weise die etwaigen Ungenauigkeiten in der Horizontalität der Bahn auszugleichen.

Nachstehende Tabelle enthält die nach dieser Methode gefundenen Resultate, ganz so, wie sie Herr Dupuit, S. 66 der angeführten Schrift, mittheilt.

Material der Cylinder und der Bahn.	Durchmesser der Cylinder d. mètres.	\sqrt{d}	Durchlaufene Räume s. mètres.	Widerstände für die Durchmesser d. $f = \frac{0,05}{s}$	Widerstand für 1 mètre Durchmesser. $e = f\sqrt{d}$.
Hölzerne Cylinder auf einer Holzbahn.	0,0625	0,250	8,43	0,00593	0,00148
	0,0435	0,208	6,49	0,00785	0,00163
	0,0312	0,177	6,10	0,00836	0,00143
	0,0225	0,150	5,06	0,00990	0,00148
	0,0162	0,127	3,83	0,01305	0,00166
	0,0127	0,113	3,72	0,01344	0,00152
	0,0075	0,086	2,50	0,02000	0,00172
	0,0060	0,077	2,22	0,02252	0,00173
Mittel =					0,00159
Eiserne Cylinder auf einer Holzbahn. (Das Holz war naß).	0,0600	0,245	8,36	0,0060	0,00147
	0,0470	0,216	7,65	0,0065	0,00140
	0,0340	0,184	6,37	0,0078	0,00145
	0,0260	0,161	5,29	0,0094	0,00152
	0,0170	0,130	4,42	0,0113	0,00147
	0,0105	0,102	3,72	0,0134	0,00137
	0,0075	0,086	3,20	0,0156	0,00134
Mittel =					0,00143

Das Ergebnis dieser Tabelle würde nun darin bestehen, daß der Ausdruck $f \cdot \sqrt{d}$ für bestimmte Körper constant ist, und nur mit der Beschaffenheit dieser Körper sich ändern kann. Setzt man demnach $f \sqrt{d} = e$, so ist e als ein Erfahrungscoefficient zu betrachten, der sich nach der Tabelle für hölzerne und eiserne Cylinder auf Holzbahnen beziehlich gleich 0,00159 und 0,00143 ergibt, wenn die Durchmesser d in Meter genommen werden. Um diese Zahlen auf preuß. Zolle zu reduciren, muß man sie mit $\sqrt{38,234388} = 6,1834$ multipliciren, wodurch sie sich resp. in 0,00983 und 0,00884 verwandeln.

Aus der Gleichung $f \sqrt{d} = e$ ergibt sich nun der Widerstand für einen Cylinder vom Gewichte = 1, oder

$$f = \frac{e}{\sqrt{d}};$$

und weil für das Gewicht Q der Widerstand $F = f \cdot Q$ war, so hat man nicht ohne die Kenntniss eines andern Gesetzes nicht in der Lage gewesen, sich um Q zu kümmern, sondern man hat sich nur mit $F = Q \cdot \sqrt{\frac{2h}{r}}$ beschäftigt, welche Gleichung das Gesetz ausdrückt, welches Dupuit hypothetisch annimmt, und durch die vorhin mitgetheilten Versuche streng bewiesen zu haben glaubt. Ich muß es dahingestellt sein lassen, in wiefern man das Ergebniss einer so geringen Anzahl von Versuchen für einen strengen Beweis will gelten lassen, kann jedoch die Bemerkung nicht unterdrücken, daß meines Erachtens einer wissenschaftlichen Deduction nur dann das Prädicat eines strengen Beweises zukommt, wenn sie auch zugleich geeignet ist, die innere Ueberzeugung von der Nothwendigkeit des zu Beweisenden zu geben. In der Schrift von Dupuit sieht man sich aber vergebens nach einer wissenschaftlichen Begründung des obigen Gesetzes um; ja man findet nicht einmal eine entfernte Andeutung über die Art und Weise, wie der Verfasser zu dem Resultat gekommen ist, daß die wälzende Reibung sich umgekehrt wie die Quadratwurzel aus dem Durchmesser der Cylinder verhalten soll, ein Resultat, welches noch vielfältigerer Bestätigung bedarf, um als allgemeingültig angenommen werden zu können.

Der Verfasser thut sich viel darauf zu Gute, daß er der erste sei, der jenes Gesetz aufgestellt habe, und warnt zugleich vor einer Verwechslung desselben mit einem andern Prinzip, wonach die Kraft, welche an der Axe eines cylindrischen Rades erforderlich ist, um dasselbe über ein im Wege liegendes festes Hinderniß fortzuheben, sich ebenfalls direct wie das Gewicht und umgekehrt wie die Quadratwurzel aus dem Halbmesser des Rades verhält *). Gleichwohl liegt die Vermuthung sehr nahe, daß es nichts weiter, als dieses längst bekannte Prinzip ist, welches der Verfasser auf das Phänomen der wälzenden Reibung anwendet, obwohl hierbei ganz andere Umstände obwalten, als bei dem Uebersteigen eines festen Hindernisses. Indessen wie dem auch sei, so dürfte doch aus dem bis jetzt Dargelegten klar geworden sein, daß über die Theorie der wälzenden Reibung etwas Positives durchaus nicht feststeht, und daß also hier noch eine große Lücke in der mechanischen Wissenschaft auszufüllen bleibt. Meiner Ansicht nach erscheint es am rathsamsten, sich bis dahin in vorkommenden Fällen an die von Coulomb gefundenen Resultate zu halten, nicht bloß, weil diese Resultate bisher fast von allen wissenschaftlichen Practikern angenommen wurden, und dadurch eine gewisse Sanction erhalten haben, sondern auch deshalb, weil dieselben, wie sogleich gezeigt werden soll, eine Art von theoretischer Erklärung gestatten, die wenigstens Das für sich hat, daß sie geeignet ist, dem Geiste eine gewisse Befriedigung zu gewähren.

*) Es sei h die senkrechte Höhe des festen Hindernisses, P die an der Axe des Rades nach horizontaler Richtung wirkende Kraft, Q das Gewicht und r der Halbmesser des Rades. Man kann das Uebersteigen des Hindernisses als eine Drehung des Rades um die Oberkante desselben betrachten, welche die horizontale Kraft P am Hebelarm $r - h$ hervorzubringen, die verticale Kraft Q am Hebelarm $\sqrt{2rh - h^2}$ aber zu verhindern strebt. Für den Anfang der erwähnten Drehung ist dann $P(r-h) = Q\sqrt{2rh - h^2}$, oder wegen der Kleinheit von h in Vergleich mit r , $Pr = Q \cdot \sqrt{2rh}$; also $P = Q \sqrt{\frac{2h}{r}}$. Diese Größe pflegt man gewöhnlich die Kraft des Rades zur Uebersteigung des Hindernisses h zu nennen.

Theoretische Untersuchungen über die wälzende Reibung.

In dem Vorhergehenden haben wir den Widerstand, der sich bei der rollenden Bewegung eines Cylinders oder irgend eines andern Umdrehungskörpers auf einer horizontalen Ebene bemerklich macht, einen Reibungswiderstand genannt, obgleich er in der Wirklichkeit keine eigentliche Reibung ist. Denn diese findet ihrer Natur nach nur dann Statt, wenn zwei Körper so übereinander fortbewegt werden, daß die Punkte derselben, welche allmählig mit einander in Berührung treten, um sich sogleich wieder zu verlassen, Linien beschreiben, die ganz in der Oberfläche des einen oder andern Körpers liegen. Bei der rollenden Bewegung hingegen entfernen sich die außer Contact tretenden Punkte der Körper in Curven, deren erste Elemente auf den Oberflächen derselben normal sind, und daher muß der hierbei statthabende Widerstand offenbar aus einem andern Gesichtspunkte als dem der eigentlichen Reibung betrachtet werden, wenn gleich wir dafür der Kürze wegen, und um nicht neue Benennungen einzuführen, die Bezeichnung „wälzende Reibung“ beibehalten wollen.

Man kann sich vorläufig einen ziemlich deutlichen Begriff von der Wirkung dieses Widerstandes machen, wenn man sich vorstellt, daß ein gerades vielkantiges Prisma, dessen Querschnitt normal auf den Längenkanten ein reguläres Polygon ist, ohne zu gleiten auf einer horizontalen Ebene fortgerollt werden soll. Das Prisma wird nämlich jedesmal, wenn es die Ebene mit einer seiner Seitenflächen berührt, im stabilen Gleichgewicht bleiben wollen, und es wird eine Kraft von bestimmter Größe erforderlich sein, den Körper durch fortwährendes Umkanten in einer rollenden Bewegung zu erhalten. Wenigstens scheint dies die Vorstellung zu sein, die man festhalten muß, um sich die Resultate der vorhin angeführten Coulombschen Versuche theoretisch zu erklären.

Stellt man sich nämlich die Ebene, auf welcher ein Cylinder fortgerollt werden soll, als aus lauter kleinen Erhabenheiten und Vertiefungen bestehend vor, und nimmt man an, daß der Cylinder beim Fortwälzen sich jedesmal zwischen den Erhabenheiten festlegt, so ist klar, daß er durch die bewegende Kraft immer aufs Neue aus der Vertiefung, worin er liegt, wieder herausgehoben werden muß. Bestehen aber die Cylinder aus Holz, wie bei den Coulombschen Versuchen, so kann man sich die Oberflächen derselben, vermöge der Structur des Holzes, auch rippenförmig gebildet denken, indem nämlich die an sich harten und in einem hohen Grade inkompressibeln Längen- und Spiegelfasern, deren zellenartige Zwischenräume vermittelst einer weichen, sogenannten Markfasersubstanz ausgefüllt sind, beim Fortrollen der Cylinder als Kanten vortreten. In beiden Fällen wird der Erfolg offenbar derselbe, oder doch beinahe derselbe sein, wie beim Fortrollen eines vielkantigen Prismas über eine glatte Horizontalfäche, und unter dieser Voraussetzung lassen sich die Ergebnisse der Coulombschen Versuche auf folgende Art nachconstruiren.

Man denke sich den Querschnitt des Cylinders D (vergl. die Figur auf S. 153) als ein reguläres Polygon, dessen sehr kleine Seiten = s heißen sollen. Behält man nun die übrige Bezeichnung ganz so bei, wie sie früher angenommen wurde, und bezeichnet außerdem das eigene Gewicht des Cylinders D mit W , so vereinigt sich dasselbe mit den an beiden Seiten aufgehäng-

ten Gewichten P , P zu einer Mittelkraft $Q = 2P + W$, die an der Are des Cylinders vertikal abwärts wirkt. Da nun die wälzende Bewegung des Körpers als eine Drehung betrachtet werden kann, die sich in jedem Augenblick immer um eine neue Seitenkante als Drehaxe wiederholt, so ist für den Anfang einer solchen Drehung der Abstand der widerstehenden Kraft Q von der jedesmaligen Drehaxe gleich $\frac{1}{2}s$. Der Abstand des Uebergewichts p , welches die bewegende Kraft darstellt, von eben jener Are ist aber $= r - \frac{1}{2}s$, und daher ergibt sich die Bedingungsgleichung des Gleichgewichts

$$(r - \frac{1}{2}s)p = \frac{1}{2}sQ.$$

Hieraus findet man

$$p = \frac{1}{2}s \cdot \frac{Q}{r - \frac{1}{2}s},$$

oder, indem man im Nenner $\frac{1}{2}s$ als sehr klein im Vergleich mit r vernachlässigt,

$$p = \frac{1}{2}s \cdot \frac{Q}{r}.$$

Mit Bezug auf die vorhin gemachten Annahmen über die Ursache der wälzenden Reibung bezeichnet s entweder die Entfernung zweier Erhabenheiten der horizontalen Ebene, zwischen welchen der darauf rollende Cylinder sich jedesmal festlegt, oder die Breite der Abplattung, die er unter dem Drucke Q erleidet. Betrachtet man nun diese Größe für dieselbe Materie der sich berührenden Körper und für denselben Grad der Positur ihrer Oberflächen als constant, so folgt unmittelbar aus der obigen Formel die Bestätigung des von Coulomb aufgestellten Gesetzes, daß der Widerstand p sich direct wie die Pressung und umgekehrt wie der Halbmesser des Cylinders verhält. Indessen kann man sich nicht verhehlen, daß die obige Theorie noch manchen Einwendungen ausgesetzt ist, sobald man die Folgerungen, zu welchen sie Anlaß giebt, mit der Erfahrung vergleicht.

Geht man nämlich auf die zum Grunde gelegten Hypothesen zurück, so würde die erste derselben zu der Folgerung berechtigen, daß der Widerstand der wälzenden Reibung nur allein von der Natur der horizontalen Fläche abhängig, und daher für Cylinder aus den verschiedenartigsten Substanzen, die auf derselben horizontalen Ebene fortgerollt werden, unter übrigens gleichen Umständen derselbe sein müßte, während doch im Gegentheil die Coulombschen Versuche den Betrag dieses Widerstandes für Walzen aus Ulmenholz in dem Verhältniß von 54 zu 32 größer ergeben, als für Guajacwalzen. Nach der zweiten Hypothese, diese als Basis der vorigen Theorie angenommen, würde sich dagegen folgern lassen, daß der fragliche Widerstand bloß von der Beschaffenheit der Walzen, und insbesondere von der Lage der Holzfasern an ihrer Oberfläche, abhängig sein könnte; er müßte demnach für Walzen aus einerlei Holzart denselben Werth behalten, sei es, daß man diese Walzen über Eichenholz oder sonst eine harte Holzart nach der Länge der Fibern, oder auch über eine glatte Fläche von Marmor, Gußeisen u. s. w. fortrollen ließe. Die Coulombschen Versuche widersprechen zwar einer solchen Folgerung nicht geradezu; allein sie sind wegen ihrer geringen Anzahl auch nicht geeignet, die Richtigkeit derselben zu bestätigen. Ueberdies darf nicht außer Acht gelassen werden, daß jene Hypothese bloß auf Walzen aus Holz paßt, und es bliebe daher immer noch die Frage, wie es sich denn nun bei andern Substanzen, z. B. bei metallenen Cylindern, verhält, besonders wenn auch noch die elastischen Repulsivkräfte, welche der angenommenen Zusammendrückung der Theile bis zu einem gewissen

Grade widerstreben, mit in Betracht gezogen werden. — In letzterer Beziehung dürfte folgende Annahme am meisten in der Natur der Sache begründet sein, und deshalb die größte Wahrscheinlichkeit für die Richtigkeit der darauf gebauten Theorie darbieten.

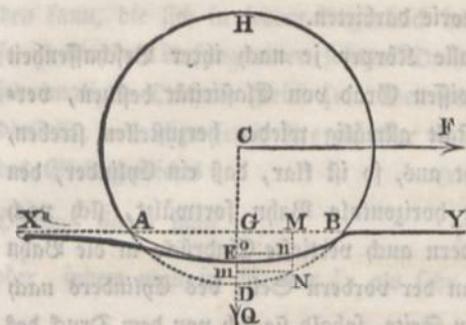
Es ist nämlich eine anerkannte Thatsache, daß alle Körper je nach ihrer Beschaffenheit mehr oder minder compressibel sind, und dabei einen gewissen Grad von Elasticität besitzen, vermöge welcher sie die durch einen Druck veränderte Gestalt allmählig wieder herzustellen streben, sobald jener Druck nachläßt. Geht man von dieser Ansicht aus, so ist klar, daß ein Cylinder, den man unter dem Druck einer gewissen Kraft über eine horizontale Bahn fortwälzt, sich nach Maaßgabe des Druckes nicht bloß etwas abplattent, sondern auch vertiefte Eindrücke in die Bahn machen wird, dergestalt, daß die Theile der letztern an der vordern Seite des Cylinders nach einander niedergedrückt werden, während die an der hintern Seite, sobald sie sich von dem Druck des über sie fortgegangenen Cylinders befreit sehen, allmählig wieder emporsteigen und ihren frühern Ort wieder einzunehmen streben. Der Cylinder ist daher in jedem Augenblick seiner Bewegung eben so zu betrachten, als sollte er unausgesetzt eine Anhöhe hinaufgerollt werden, und es muß hieraus offenbar ein gewisser Widerstand entspringen, dessen Bestimmung eben unsere Aufgabe ist.

Zu dem Ende sei ADBH (s. d. folg. Seite) ein Cylinder vom Halbmesser $CD = r$, der durch eine lothrechte Kraft Q gegen die horizontale Bahn XY gepreßt wird. Ersterer erleide durch diese Pressung die Abplattung DE und letztere die Vertiefung GE , so daß also die Theile der Oberflächen beider Körper, welche früher beziehlich in D und G waren, sich nach dem Maximo ihrer erlittenen Ortsveränderungen in E befinden. Man denke sich den genannten Cylinder durch eine horizontale, an seinem Schwerpunkt wirkende Kraft F nach der Richtung CF fortgewälzt, wobei er wie bereits erwähnt die Theile der Bahn vor sich her niederdrücken muß, so stellt für irgend einen Augenblick der Bewegung EB die krumme Berührungsfläche des Cylinders mit der Bahn vor, während hinterwärts von E bis A die Berührung zwischen beiden Körpern ganz aufgehoben ist, entweder, weil die niedergedrückten Theile wegen mangelnder Elasticität bis zu ihrem früheren Orte überhaupt nicht wieder emporsteigen, oder, weil sie hiezu höchst wahrscheinlich eine längere Zeit gebrauchen, als zu ihrer Niederdrückung erforderlich war. — Alle Punkte der Berührungsfläche EB widerstehen nun der ferneren Zusammendrückung desto stärker, je größer die Ortsveränderungen sind, die sie bereits erlitten haben, und auf diese Weise erscheint die ganze Fläche als der Schauplatz von unendlich vielen Repulsionen, welche, indem sie von E nach B zu allmählig abnehmen, sich in jedem Berührungspunkte paarweise das Gleichgewicht halten.

Betrachtet man diese Repulsivkräfte als von der Elasticität herrührend, so kann man sie den Zusammendrückungen direct proportional setzen, eine Annahme, die Erfahrungen gemäß auch dann noch gültig zu sein scheint, wenn harte cylindrische Körper über eine weiche, sehr wenig elastische Substanz, z. B. über einen thonartigen Boden, fortgewälzt werden*). Wenn man

*) Nach den Versuchen von Corréze und Manès (Ann. des ponts et chaussées, 1832, p. 175) mit zweirädrigen Karren, die über einen aufgelockerten und an der Oberfläche glatt geschlagenen Erdboden fortgezogen wurden, nahm die Tiefe der Geleise, welche von den 9 Centim. breiten Radfelgen gebildet wurden, jedesmal um 2 Millim. zu, so oft man die Belastung des Karrens successive um 250 Kilogr. vergrößerte.

daher annimmt, daß der Punkt M der horizontalen Bahn, und der Punkt N des Cylindermantels nach eingetretener Gleichgewicht zwischen ihren Repulsivkräften beide nach n gekommen sind, so stellen Mn und Nn die in jenen Punkten stattgefundenen Compressionen dar, und die davon herrührenden Repulsivkräfte können der obigen Annahme gemäß beziehlich durch $e \cdot Mn$ und $e' \cdot Nn$ ausgedrückt werden, wenn e und e' constante, von der Beschaffenheit der beiden Körper abhängige Coefficienten bezeichnen. Da nun beide Repulsivkräfte sich im Punkte n das Gleichgewicht halten, so hat man demgemäß:



$$e \cdot Mn = e' \cdot Nn = e' \cdot (MN - Mn)$$

woraus man findet:

$$Mn = \frac{e'}{e+e'} \cdot MN$$

Bezeichnet nun s die Länge des beliebigen Bogenstückes En, b die Länge des Cylinders, oder, falls dieser nicht mit der ganzen Länge ausliegen sollte, die mit seiner Axe parallele Abmessung der horizontalen Bahn, so ist die Repulsivkraft der letzteren gegen ein bei n befindliches Flächenelement des Cylindermantels, welches b zur Länge und das unendlich kleine Bogenelement ds zur Breite hat:

$$e \cdot Mn \cdot b \cdot ds = \frac{ee'}{e+e'} \cdot b \cdot ds \cdot MN$$

Man ziehe die Linie Nm senkrecht auf DG, also parallel mit AB, setze $Dm = x$, $mN = y$ und $DG = h$, so ist $MN = h - x$; und wenn außerdem noch der Factor $\frac{ee'}{e+e'}$, welcher bloß von der physischen Beschaffenheit der auf einander wirkenden Körper abhängig ist, der Kürze wegen mit k bezeichnet wird, so ist dem Obigen gemäß

$$p = kb(h - x) \cdot ds$$

der Ausdruck für die Pressung, welche der Cylinder gegen das bei n befindliche Flächenelement seines Mantels zu erleiden hat.

Nun ist klar, daß alle diese Pressungen eine Mittelkraft geben müssen, welche durch den Schwerpunkt des Cylinders geht; denn die Mittelkraft der beiden Kräfte F und Q , welche diesen Punkt zum Angriffspunkte hat, ist für den Zustand des Gleichgewichtes der vorigen Mittelkraft gleich und entgegengesetzt. Denkt man sich daher die sämtlichen Pressungen, welche der Cylinder gegen den, in jedem Augenblick mit der horizontalen Bahn im Contact begriffenen Theil seines Mantels zu erleiden hat, nach horizontaler und vertikaler Richtung in Seitenkräfte zerlegt, so muß offenbar die Summe aller horizontalen Seitenkräfte gleich F und die Summe aller vertikalen Seitenkräfte gleich Q sein. Sind nun $Do = z$ und $on = y$ die Coordinaten des Punktes n , so ergeben sich für die beiden Seitenkräfte der vorhin bestimmten Kraft p nach den angegebenen Richtungen bezüglich die Ausdrücke:

$$p \cdot \frac{dz}{ds} = kb(h-x) dz,$$

und

$$p \cdot \frac{dy}{ds} = kb(h-x) dy;$$

daher erhält man die beiden Bedingungs-Gleichungen:

$$(1) \quad F = kb \cdot \int_h^0 (h-x) \cdot dz;$$

$$(2) \quad Q = kb \cdot \int_h^0 (h-x) \cdot dy.$$

Um zuvörderst die Abscisse z als Function von x darzustellen, hat man dem Vorhergehenden gemäß:

$$Mn = \frac{e'}{e+e'} \cdot MN = \frac{e'}{e+e'} \cdot (h-x);$$

folglich:

$$z = DG - Mn = \frac{e}{e+e'} \cdot h + \frac{e'}{e+e'} \cdot x,$$

und mithin:

$$dz = \frac{e'}{e+e'} \cdot dx.$$

Mit Rücksicht hierauf liefert die erste der obigen Gleichungen, wenn man die Integration zwischen den Grenzen $x = 0$ bis $x = h$ vollführt,

$$(3) \quad F = \frac{e'k}{2(e+e')} bh^2.$$

Die zweite läßt sich durch Anwendung einer bekannten Reductionsformel in folgende verwandeln:

$$Q = kb(h-x)y + kb \cdot \int y \cdot dx,$$

worin bekanntlich die Größe $\int y \cdot dx$ den Flächeninhalt des halben Kreissegmentes DNm ausdrückt. Nimmt man daher diesen Ausdruck zwischen denselben Grenzen, wie den vorigen, so ergibt sich:

$$(4) \quad Q = kb \times (\text{Fl. } DBG).$$

Um nun die Kraft F unabhängig von h darzustellen, ist noch nöthig, diese Größe zwischen den Gleichungen (3) und (4) zu eliminiren. Da aber in letzterer Gleichung die Fläche DBG nach geometrischen Lehren durch die Formel

$$\frac{1}{2}r^2 \cdot \text{arc. sin.} \frac{1}{r} \sqrt{2rh - h^2} - \frac{1}{2}(r-h) \sqrt{2rh - h^2}$$

bestimmt wird, so übersieht man leicht, daß jene Elimination keinesweges geleistet werden kann. Es scheint demnach nichts Anderes übrig zu bleiben, als eine zweckmäßige Annäherung dadurch herbeizuführen, daß man die Untersuchung auf harte, sehr wenig compressible Körper beschränkt, die also durch den Druck Q nur eine äußerst geringe Aenderung ihrer Gestalt erleiden. Dies vorausgesetzt, kann man die Fläche DBG ohne merklichen Fehler als ein parabolisches Segment berechnen, und demgemäß hat man:

$$BDG = \frac{2}{3} \cdot DG \cdot BG = \frac{2}{3}h \cdot \sqrt{2rh - h^2}$$

oder, weil nach obiger Voraussetzung die Größe h im Verhältniß zum Durchmesser $2r$ höchst unbedeutend ist,

$$\text{Fl. } BDG = \frac{2}{3}h \sqrt{2rh}.$$

Durch Substitution dieses Ausdruckes in die Gleichung (4) findet man nun:

$$(5) \quad Q = \frac{2}{3} k b h \cdot \sqrt{2 r h};$$

und hieraus:

$$h = \frac{1}{2} \sqrt[3]{\frac{9 Q^2}{k^2 b^2 r}}.$$

Setzt man diesen Ausdruck statt h in die Gleichung (3), so erhält man endlich:

$$(6) \quad F = \frac{3 e'}{8(e + e')} \sqrt[3]{\frac{3}{k}} \cdot \sqrt[3]{\frac{Q^4}{b r^2}} = \sqrt[3]{\frac{3 e'^2}{e(e + e')^2} \cdot \frac{Q^4}{b r^2}}.$$

Es darf hier nicht unerwähnt bleiben, daß der verstorbene Ritter von Gerstner bei seinen Untersuchungen über den Widerstand der Fuhrwerke, der aus der Nachgiebigkeit des Bodens gegen die Eindrücke der Räder entspringt*), schon früher auf ein ähnliches Ergebniß gekommen ist. Dieser Gelehrte läßt die Räder über einen weichen Erdboden fortgehen, in welchen sie so tief einsinken, bis der durch die Compression erzeugte Widerstand des Bodens dem Druck der Räder gleich geworden ist. Er denkt sich nun die Reactionen in jedem Punkte des Geleises als vertikale Kräfte, setzt dieselben der m ten Potenz der Zusammendrückung proportional, und bestimmt die Summe ihrer Momente in Bezug auf den tiefsten Punkt des Rades, welche Summe demnächst mit dem Moment der Zugkraft verglichen wird. Ist b die Breite, h die Tiefe des Geleises, f die halbe Sehne von dem eingesunkenen Bogen des Rades, dessen Durchmesser A genannt wird, und bezeichnet W den Widerstand des Bodens für eine Zusammendrückung = 1, dann findet von Gerstner die erforderliche Zugkraft:

$$K = \frac{f \cdot Q}{A(m+1) \left(1 - \frac{m}{3} + \frac{m(m-1)}{2 \cdot 5} - + \dots \right)},$$

und:

$$\frac{f}{A} = \left[\frac{Q}{A^{m+1} \cdot b W \left(1 - \frac{m}{3} + \frac{m \cdot m - 1}{2 \cdot 5} - + \dots \right)} \right]^{\frac{1}{2m+1}}.$$

Setzt man hierin $m = 1$, wie es der bei der vorigen Theorie gemachten Annahme entspricht, so kömmt:

$$K = \frac{3fQ}{4A} = \frac{3Q}{4} \sqrt[3]{\frac{3Q}{2A^2 b W}},$$

ein Resultat, welches nur in den constanten Factoren von dem oben gefundenen abweicht.

Nach dieser Abschweifung, die ich dem *sum cuique* glaubte schuldig zu sein, obgleich ich die hier vorgetragene theoretische Untersuchung bereits vor fünf Jahren, ohne damals etwas von den Arbeiten des Herrn von Gerstner zu wissen, vollendet hatte, kehre ich wieder zu der Gleichung (6) zurück, um daraus diejenigen weiteren Folgerungen zu ziehen, zu welchen sie Anlaß giebt.

*) Franz Ritter von Gerstner, Zwei Abhandlungen über Frachtwägen und Straßen und über die Frage, ob, und in welchen Fällen der Bau schiffbarer Kanäle, Eisenwege oder gemachter Straßen vorzuziehen sei. Prag 1813. S. 11—16.

Die Größe $\frac{3}{8} \sqrt[3]{\frac{3e'^2}{e(e+e')^2}}$, welche in der Formel (6) als Factor auftritt, hängt offenbar nur allein von der physischen Beschaffenheit der sich berührenden Körper, namentlich von der Compressibilität und von der Stärke der damit verbundenen Reaction ihrer Theile ab, und ist daher für bestimmte Körper als ein constanter Coefficient zu betrachten, dessen Werthbestimmung für jeden besondern Fall der Erfahrung anheimfällt. Bezeichnet man ihn im Allgemeinen mit φ , so stellt sich der Widerstand der wälzenden Reibung durch die Formel dar

$$F = \varphi \sqrt[3]{\frac{Q^4}{br^2}} = \varphi \cdot \frac{Q^{\frac{4}{3}}}{b^{\frac{1}{3}} \cdot r^{\frac{2}{3}}}.$$

Aus dieser Formel erhellet nun, daß der genannte Widerstand sich unter übrigens gleichen Umständen direct wie die $\frac{4}{3}$ te Potenz der Belastung verhält, aber der $\frac{2}{3}$ ten Potenz des Radius, so wie der $\frac{1}{3}$ ten Potenz der Bahnbreite umgekehrt proportional ist.

In wiefern dieses Resultat mit der Erfahrung übereinstimmt, kann nur durch neue Versuche, die nicht bloß mit der größten Genauigkeit ausgeführt, sondern bei welchen auch die Beobachtungselemente in möglichst weiten Grenzen abgeändert werden müßten, befriedigend entschieden werden, da die früher mitgetheilten Versuche zu einer solchen Entscheidung weder durch ihre Anzahl noch durch ihren Umfang als geeignet erscheinen. Gleichwohl verdient es bemerkt zu werden, daß selbst die wenigen vorhandenen Erfahrungen der vorhin entwickelten Theorie keinesweges widersprechen, sondern wohl eher noch zu ihrer Bestätigung dienen, in sofern sie von letzterer auf eine sehr befriedigende Weise vermittelt werden. — Wir haben nämlich gesehen, daß Coulomb durch seine Versuche die wälzende Reibung im einfachen Verhältniß zum Druck findet. Dupuit und Andere treten dieser Annahme bei; Tredgold *) dagegen gelangt zu dem Resultat, daß die Pressung mit dem Exponenten $\frac{2}{3}$ behaftet in dem Ausdruck für die Reibung auftreten müsse. Die hier dargelegte Theorie giebt diesen Exponenten = $\frac{4}{3}$; ein Zahlenwerth, der zwischen jenen Angaben, 1 und $1\frac{1}{2}$, ziemlich das Mittel hält.

Eben so verhält es sich in Bezug auf die Art und Weise, wie der Durchmesser oder der Radius eines Cylinders bei der Berechnung der wälzenden Reibung sich geltend macht. Alle Erfahrungen stimmen nämlich mit dem Ergebnis der vorigen Theorie darin überein, daß der genannte Widerstand mit der Vergrößerung der Durchmesser abnimmt, und nur über das Maaß dieser Abnahme weichen die Angaben von unserer Theorie, und zwar nach beiden Seiten hin, ab. In der Formel, welche Dupuit aus seinen Versuchen ableitet, tritt der Durchmesser mit dem Exponenten $\frac{1}{2}$, nach Coulomb, Tredgold und fast allen übrigen Autoritäten dagegen mit dem Exponenten 1 jedesmal im Nenner auf. Unsere Theorie legt dem Durchmesser den Exponenten $\frac{2}{3}$ bei, welche Zahl also wieder zwischen den Grenzen $\frac{1}{2}$ und 1 liegt, und zwar näher an letzterer Grenze, mit welcher die meisten und zuverlässigsten Angaben übereinstimmen.

Es fehlt indessen auch nicht an Erfahrungen, welche die aus unserer Theorie gezogenen Folgerungen direct zu bestätigen scheinen, obgleich sie immer nur als isolirte Facta dastehen.

*) A practical Treatise on Rail-roads and Carriages etc. London 1825. p. 44 seqq.

Unter andern führt Wood in seinem bekannten Werk über Eisenbahnen an *), daß Herr Grimshaw, Besitzer einer Kohlengrube in der Nähe von Sunderland, eine große Anzahl von Versuchen über den Widerstand eiserner Wagenräder auf Schienenbahnen angestellt habe, welche zu dem Ergebniß führten, daß bei einer Belastung von 8522 Pfund der Widerstand der Räder auf den gußeisernen Schienen = 50 Pfund; bei einer Belastung von 2586 Pfund aber nur = 10 Pfund war.

Setzt man die Widerstände der mten Potenz der Belastungen proportional, so verhält sich den obigen Angaben gemäß

$$50 : 10 = (8522)^m : (2586)^m,$$

woraus sich $m = \frac{\log 50 - \log 10}{\log 8522 - \log 2586} = 1,34$ findet.

Diese Zahl ist zwar nur um ein Geringes größer als $\frac{1}{2}$, wie sie die Theorie giebt; allein es läßt sich mit Grund dagegen einwenden, daß eine solche Uebereinstimmung vielleicht nur zufällig ist, und daß überhaupt ein isolirtes Factum nicht hinreicht, um daraus ein allgemeines Gesetz zu folgern. Und in so fern möge denn die Mittheilung jener Versuche blos als eine beiläufige Notiz betrachtet werden, die hier wohl nicht am unrechten Orte Platz findet.

In Bezug auf den Einfluß, den die Länge des Cylinders oder die Breite der Bahn auf die Größe des Widerstandes äußert, liegen übereinstimmende Erfahrungen zu ähnlichen Vergleichen nicht vor. Nach unserer Theorie ergibt sich, daß die wälzende Reibung mit der Vergrößerung jener Breite abnimmt, jedoch nur in einem sehr geringen Verhältnisse; denn da sich der genannte Widerstand umgekehrt wie die Kubikwurzel aus der Bahnbreite verhält, so würde derselbe unter übrigens gleichen Umständen bei einer achtfachen Breite nur auf die Hälfte, bei einer siebenundzwanzigfachen Breite aber erst auf den dritten Theil seines frühern Betrages reducirt, u. s. w. Diesem geringen Einfluß der Bahnbreite ist es ohne Zweifel zuzuschreiben, daß die frühern Experimentatoren in dieser Beziehung keine auffallenden Unterschiede bemerkt haben, um so mehr, als sie ihre Untersuchungen immer nur in sehr enge Grenzen beschränkten. Die meisten betrachten daher den Widerstand der wälzenden Reibung als unabhängig von der Bahnbreite und gründen darauf ihre Berechnungen. Doch verdient bemerkt zu werden, daß, wo sich Abweichungen von dieser Regel durch die Erfahrung herausgestellt haben, diese fast jedesmal zu Gunsten unserer Theorie sprechen. So ergeben namentlich die von dem Grafen v. Rumford in Paris angestellten Versuche über den Widerstand der Fuhrwerke **) übereinstimmend einen entschiedenen Vortheil der breiten Radselgen gegen die schmalen, sowohl auf gepflasterten Straßen, als auch auf Kieschaulseem und Sommerwegen. Auf den erstgenannten Straßen verminderte sich, nach v. Gerstner's Berechnung ***), die Zugkraft in dem Verhältniß 17 : 15, also um $\frac{2}{7}$ ihres frühern Betrages, wenn die Breite der Radselgen verdoppelt, nämlich von zwei Zoll auf vier Zoll vergrößert wurde. Selbst Herr Dupuit, der sonst gerade zu denjenigen gehört, welche

die

*) A practical Treatise on Rail-roads etc. p. 196—197.

**) Aus dem Moniteur vom 25. April 1811 in Gilbert's Annalen der Physik Bd. 38. S. 331.

***) a. a. O. S. 37.

die wälzende Reibung im Allgemeinen als unabhängig von der Bahnbreite erklären, sieht sich doch in mehreren Fällen zu Ausnahmen hiervon genöthigt, welche mit den Erfahrungen Rumford's übereinstimmen. Denn er findet, daß der Widerstand auf einer gleichmäßig rauhen Bahnfläche mit der Breite derselben abnimmt, und zwar bis zu einer gewissen Grenze, der man sich ohne Ende nähert *). Dasselbe ergeben seine Versuche auch für Wagenräder, die auf einer gepflasterten Straße fortgerollt wurden, wo der Widerstand allmählig von 25 bis 16 abnahm, wenn man die Felgenbreite von 5 bis zu 17 Centimeter vergrößerte **).

Obgleich nun aus den hier aufgeführten Thatsachen hervorgehen dürfte, daß die vorhandenen Erfahrungen das Ergebnis der von mir dargelegten Theorie wohl im Allgemeinen bestätigen, so kann dieselbe dessungeachtet noch keinen Anspruch darauf machen, für jeden besondern Fall als fest begründet angesehen zu werden. Ja es ist sogar sehr wahrscheinlich, daß sie in manchen Fällen nicht unbeträchtlich von der Erfahrung abweichen wird, da die ihr zum Grunde liegenden Voraussetzungen, in Betreff der Compressibilität der Theile und der daraus entspringenden Reactionen, nicht überall auf gleiche Weise Anwendung finden können. Umfassende Versuche zur Erledigung dieser Frage bleiben daher noch immer ein dringendes Bedürfnis, und ihnen muß einstweilen die weitere Entscheidung anheimgestellt werden. Inzwischen werden wir bei Mittheilung der nachstehenden Erfahrungen über den Widerstand der Fuhrwerke auf verschiedenen Straßen auf den fraglichen Gegenstand wieder zurück kommen.

*) a. a. D. S. 135.

**) Desgl. S. 43.

V. Erfahrungen

über den

Widerstand der Fuhrwerke auf Straßen von verschiedener Beschaffenheit.

Die nachstehende Zusammenstellung der Versuche und Erfahrungen über den Widerstand, den Fuhrwerke nach Maaßgabe ihrer verschiedenartigen Konstruktion auf Straßen von verschiedener Beschaffenheit erleiden, bildet gewissermaßen den Schluß meiner Abhandlung über die Reibung, die in den Verhandlungen des Gewerbe-Vereins von 1837 und 1838 Aufnahme gefunden hat. Immerhin mag indeß diese kleine Arbeit auch als eine selbstständige betrachtet werden, ohne ihr jedoch ein anderes als nur ein compilatorisches Verdienst beilegen zu wollen. Ich muß sogar vorweg bekennen, daß manche der practischen Bemerkungen, die man bei nachstehender Zusammenstellung der Beobachtungen über das Frachtfuhrwesen eingestreut findet, der gefälligen Mittheilung des Königl. Hofspediteurs, Herrn Moreau Balette, zu verdanken sind.

Bekanntlich hat die Zugkraft bei der Fortbewegung der Wagen zweierlei Widerstände zu überwinden, nämlich die drehende Reibung an den Achsen und die wälzende Reibung am Umfang der Räder, von denen der eine dem Gewichte der auf den Achsen ruhenden Last, der andere aber dieser Last vermehrt um das Gewicht der Räder proportional ist. Wenn man daher in der Praxis den gesammten Widerstand, d. h. die genannten beiden Widerstände zusammen genommen, dem ganzen Gewicht des Wagens mit seiner Ladung proportional setzt, so ist das nach dem Gesagten zwar nicht ganz richtig, kann aber für die praktische Anwendung, wo es sich meist nur um eine annähernde Schätzung handelt, als hinlänglich genau angesehen werden. Auch sind fast alle Versuche, von denen hier die Rede sein wird, unter dieser Voraussetzung angestellt worden, und eine genauere Bestimmung — wenn sonst eine solche als wünschenswerth erscheinen sollte — ist schon deshalb unthunlich, weil dazu die nöthigen Angaben fehlen. Im Allgemeinen mag hier nur bemerkt werden, daß auf gewöhnlichen Straßen die Achsenreibung entschieden das kleinere, auf Eisenbahnen aber das größere Hinderniß ist, und zwar kann man es im letzten Falle etwa dreimal so groß schätzen als die wälzende Reibung am Umfange der Räder.

Drückt man nun die erforderliche Zugkraft zur Fortbewegung eines Wagens durch einen Bruchtheil vom Gewicht des letzteren aus, so liegt dabei die stillschweigende Voraussetzung einer horizontalen Wegstrecke zum Grunde, was daher auch für die folgenden Versuche festzuhalten sein wird. Denn bei dieser ist niemals unterlassen, den für eine geneigte Wegstrecke gefundenen Widerstand auf den Horizont zu reduciren, was gar keine Schwierigkeit hat, da der Widerstands-Coeffizient für die geneigte Bahn sich um den Betrag ihres Gefälles vermehrt oder vermindert, jenachdem das Fuhrwerk auf- oder abwärts bewegt werden soll. Der Einfluß der Neigung kann daher

sosort eliminirt werden, sobald man das dem Versuche unterworfenen Fuhrwerk auf der geneigten Bahn erst aufwärts, gleich darauf aber wieder abwärts oder umgekehrt bewegt, und dann von beiden Ergebnissen das Mittel nimmt. Nach dieser Methode, bei welcher die Kenntniß des Gefälles nicht nöthig ist, sind mehrere der nachfolgenden Versuche ausgeführt worden, während bei den andern die Bahnstrecke nivellirt und das dadurch gefundene Gefälle behufs der Reduction der Zugkraft auf den Horizont in Rechnung gebracht worden ist.

Es folgen nun zunächst mehrere ältere Versuche und Erfahrungen, deren Ergebnisse in verschiedenen Schriften zerstreut angetroffen werden, an welchen sich demnächst zusammenhängende Versuchsreihen, welche zur Erforschung des in Rede befindlichen Widerstandes mit Berücksichtigung aller dabei Einfluß habender Umstände in neuerer Zeit ausgeführt sind, anschließen werden.

A. Zusammenstellung älterer Versuche und Erfahrungen.

I. Versuche von Edgeworth; zuerst bekannt gemacht in den Abhandlungen der Königl. Akademie von Irland im Jahr 1797, dann in einer besondern 1817 zu London erschienenen Schrift: „An Essay on the construction of roads and carriages etc. by Richard Lowell Edgeworth“ zur Öffentlichkeit gebracht.

Nach einigen vorläufigen Betrachtungen untersucht der Autor den Einfluß der Größe des Durchmessers der Räder bei der Uebersteigung eines festen Hindernisses und theilt zwei Versuche mit, welche das bekannte Gesetz bestätigen sollen, daß bei der Uebersteigung der im Wege liegenden Hindernisse, kleiner Steine u. die Zugkraft der Quadratwurzel aus dem Durchmesser der Räder umgekehrt proportional sei, ein Resultat, das jedoch nur näherungsweise gültig ist, wie in der Note zu S. 158. gezeigt wurde. Dieses Resultat auf gewöhnliches Erdreich ausdehnend, was offenbar ganz unstatthaft ist, schließt Edgeworth, daß innerhalb der üblichen Grenzen die Vergrößerung der Radurchmesser keinen großen Nutzen gewähre und beschränkt den Hauptvortheil der hohen Räder auf die Leichtigkeit, mit welcher sie die Achsenreibung überwinden lassen. Gegen diese Ansicht sprechen aber alle Erfahrungen, wie sich weiterhin zeigen wird.

In Bezug auf die Felgenbreite bemerkt Edgeworth, daß nachdem die Parlamentsacte zum Gebrauch der breiten Felgen aufgemuntert habe, indem sie für diese eine größere Belastung der Fuhrwerke als für schmale Felgen nachgegeben, die Fuhrleute sie zwar angenommen hätten, allein in einer convexen Gestalt, so daß das Rad nur das Ansehn einer größeren Breite darbiete, in der Wirklichkeit aber wie ein solches mit schmaler Felge auf die Straße wirke. Er zeigt dann, daß man in dieser Beziehung sagen könne, das breiteste Rad sei das vortheilhafteste für die Straße, wenn es dieselbe in der ganzen Breite gleichmäßig berührt; das schmalste hingegen bis zu einer gewissen Grenze das vortheilhafteste für den Fuhrmann, eine Folgerung die in dieser Allgemeinheit nicht als richtig anerkannt werden kann. Bei dem deutschen Frachtfuhrwesen hat sich eine Felgenbreite von 4 Zoll als die zweckmäßigste für Chausseen und gepflasterte Straßen herausgestellt; denn eine Abweichung von dieser Breite hat erfahrungsmäßig eine entsprechende Verminderung des Effectes zur Folge.

Im übrigen wird nachgewiesen, daß die konischen (gestürzten) Räder, oder die mit zu beiden Seiten abwärts geneigten Achschenkeln, wegen der ungleichmäßigen Geschwindigkeit des Umfanges ein theilweises Gleiten verursachen, wodurch ein vergrößerter Widerstand und eine schnellere Abnutzung

entsteht, und deshalb sollte man nur cylindrische Räder anwenden, was auch anderweitigen Erfahrungen entspricht.*).

Die fraglichen Versuche wurden mit einem Modellwagen angestellt, zum Theil mit cylindrischen, zum Theil mit konischen Rädern, deren Felgenreite 4 Zoll betrug. Das Gewicht des Wagens betrug bei allen Versuchen 60 Pfund, und die Geschwindigkeit, mit welcher derselbe über eine horizontale Bahn von 30 Fuß Länge fortgezogen wurde, 3 Fuß in der Sekunde. Folgendes sind die dabei gefundenen Ergebnisse.

	cylindr. Räder.	konische Räder.
Holzbahn aus gehobelten Tannenbrettern	= $\frac{1}{30}$	$\frac{1}{20}$
Kiesbahn, etwas gewalzt, ähnlich wie d. Weg i. Hydepart während d. Sommers =	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{9,23}$
Dieselbe Bahn, neu aufgearht wie eine neu bekiesete Straße	= $\frac{1}{8,6}$	$\frac{1}{7,5}$
Dieselbe Bahn, neu mit grobem Kiese beschüttet	= $\frac{1}{6,7}$	$\frac{1}{6,7}$

Außerdem hat Edgeworth noch Versuche angestellt, um den Einfluß einer elastischen Aufhängung des Wagens auf die Größe des Widerstandes beim raschen Fahren über eine harte und holperige Bahn kennen zu lernen. Das Ergebnis besteht darin, daß die Zugkraft durch die Elasticität vermindert wird, und zwar desto mehr, je größer die Geschwindigkeit ist. Die Gestalt der Federn soll dabei übrigens ohne sonderlichen Einfluß sein, wosern sie nur die hinreichende Elasticität besitzt. Ich glaube indeß die specielle Mittheilung der Zahlenangaben unterlassen zu dürfen, weil die fraglichen Versuche zu sehr im Kleinen gehalten sind, um als brauchbare Anhaltspunkte für die Praxis dienen zu können.

II. Versuche des Grafen Rumford (Sir Benjamin Thompson); mitgetheilt der physikalischen Klasse des Instituts am 15ten April 1811 und abgedruckt in der Revue britannique vom Jahr 1816 (conf. auch Borgnis, Traité complet de mécanique. T. I. p. 118. und Gilbert's Annalen der Physik, Bd. 38. S. 331.

Zu diesen Versuchen wurde ein in Federn hängender Luruswagen angewendet, dessen Räder dreimal gewechselt wurden, um den Einfluß der Felgenreite auf die Größe des Widerstandes kennen zu lernen. Die Abmessungen dieser Räder, in alt-pariser Maaß ausgedrückt, waren folgende:

	Vorderräder.	Hinterräder.	Felgenreite.
bei der 1ten Versuchsreihe	3 Fuß 4 Zoll	4 Fuß 9,2 Zoll	$4\frac{3}{4}$ Zoll.
= = 2ten	3 = 2,3 =	4 = 8,8 =	$2\frac{1}{4}$ =
= = 3ten	3 = 3,2 =	4 = 8,2 =	4 =

Mit Einschluss der Räder und der im Wagen sitzenden drei Personen betrug das ganze Gewicht des Wagens bei allen drei Versuchsreihen 2121. Die Zugkraft wurde durch ein Federdynamometer gemessen, und die Gangart der vorgespannten Pferde steigerte sich vom kleinen Schritt, bis

*) Schon die früher von Cumming in England angestellten Versuche, welche hier wegen der Unbestimmtheit der Zahlenangaben außer Acht gelassen sind, haben dasselbe Ergebnis geliefert.

zum starken Trabe. Nach den späteren Ermittlungen von Morin kann man die diesen Gangarten entsprechenden Geschwindigkeiten für den kleinen und großen Schritt bezüglich zu 4 und 5 Fuß, für den kurzen und starken Trab zu $7\frac{1}{2}$ und $11\frac{3}{4}$ Fuß Preuß. annehmen.

Beschaffenheit der Straße.	Felgenbreite. Zoll.	Widerstands-Coeffizient bei folgenden Geschwindigkeiten.			
		4 Fuß.	5 Fuß.	$7\frac{1}{2}$ Fuß.	$11\frac{3}{4}$ Fuß.
Auf der gepflasterten großen Straße nach Versailles zwischen der Brücke von Sevres und Passy.	1 $\frac{1}{2}$	$\frac{1}{39,3}$	$\frac{1}{32,1}$	$\frac{1}{19,6}$	$\frac{1}{14,6}$
	2 $\frac{1}{2}$	$\frac{1}{46,1}$	$\frac{1}{36,6}$	$\frac{1}{23,6}$	$\frac{1}{15,7}$
	4	$\frac{1}{50,5}$	$\frac{1}{40,8}$	$\frac{1}{28,1}$	$\frac{1}{17}$
Auf dem Sommerwege dieser Straße, gut im Stande und wenig sandig.	2 $\frac{1}{2}$	$\frac{1}{24,4}$	$\frac{1}{24,4}$	$\frac{1}{23,3}$	$\frac{1}{23,3}$
	4	$\frac{1}{26,2}$	$\frac{1}{26,2}$	$\frac{1}{25,25}$	$\frac{1}{25,25}$
Auf demselben Sommerwege, an einer Stelle die etwas sandig war.	2 $\frac{1}{2}$	$\frac{1}{19,3}$	—	$\frac{1}{17}$	—
	4	$\frac{1}{22,1}$	—	$\frac{1}{20,2}$	—
Desgleichen, auf einer noch sandigeren Strecke	2 $\frac{1}{2}$	$\frac{1}{16,3}$	—	$\frac{1}{11,2}$	—
	4	$\frac{1}{17}$	—	$\frac{1}{17}$	—
Desgleichen an einer äußerst sandigen Stelle.	2 $\frac{1}{2}$	$\frac{1}{11,2}$	—	$\frac{1}{11,2}$	—
	4	$\frac{1}{12,5}$	—	$\frac{1}{12,5}$	—
Auf dem schönen ungepflasterten Wege zwischen St. Cloud und der Versailleser Straße	2 $\frac{1}{2}$	$\frac{1}{23,9}$	—	$\frac{1}{25,25}$	—
	4	$\frac{1}{27,9}$	—	$\frac{1}{25,9}$	—
Auf einer neu befestigten Straßenstrecke zwischen Passy und Auteuil.	2 $\frac{1}{2}$	$\frac{1}{8,5}$	—	—	—
	4	$\frac{1}{9,6}$	—	—	—
Im tiefsten Sande des Boulogner Gehölzes.	2 $\frac{1}{2}$	$\frac{1}{7,86}$	—	—	—
	4	$\frac{1}{8,84}$	—	—	—
Auf der gepflasterten Straße nach Auteuil.	2 $\frac{1}{2}$	$\frac{1}{14,14}$	—	—	—
	4	$\frac{1}{15,15}$	—	—	—

Aus dieser Zusammenstellung ergibt sich zweierlei: einmal, daß der Widerstand auf gepflastertem Wege mit der Geschwindigkeit zunimmt, während er auf ebenen, compressibelen Wegen sehr nahe konstant bleibt; nächst dem aber, daß die breiten Felgen durchgängig einen geringeren Widerstand als die schmalen geben. Die erste Folgerung steht im Einklang mit andern zuverlässigen Erfahrungen und wird namentlich durch die Morin'schen Versuche vollkommen bestätigt. Mit der zweiten Folgerung ist dies nur theilweise, nämlich nur in Bezug auf weiche compressibele Wege der Fall, wogegen auf gepflasterten Straßen breite und schmale Radfelgen ganz gleiche Widerstände ergeben sollen. Herr Morin, der auch diesem Punkte eine besondere Aufmerksamkeit gewidmet hat, glaubt die obige Abweichung durch die abgerundete Form der großen Steine, aus welchen das Pflaster der Straßen in der Umgegend von Paris besteht, und durch die sehr geringe Breite der Radfelgen erklären zu

können, indem die letzteren seitwärts von den Steinen in die Zwischenräume derselben gleiten, die ihnen dann gewissermaßen als Geleise dienen. Anders muß es sich allerdings verhalten, wenn die Räder so breite Felgen haben, daß ein solches Abgleiten nicht vorkommen kann, oder wenn das Pflaster aus kleineren und regelmäßiger bearbeiteten Steinen besteht, die nur geringe Zwischenräume übrig lassen.

III. Versuche von Benjamin Bevan, mitgetheilt im Philosophical Magazine, Vol. VII. p. 286. Dieselben wurden im Monat August 1824 angestellt und die auf verschiedenen Straßen erforderliche Zugkraft in Tausendtheilen der Belastung angegeben. Folgendes sind die gewonnenen Resultate:

Auf losen Sandwegen, durchschnittlich	204 Tausendth.	=	$\frac{1}{5}$	der Last.
= trock. hartem Torfgrunde =	40	=	$\frac{1}{25}$	=
Auf einer Kieschauffee (Turnpike road); mehr oder minder mit Schmutz bedeckt; durchschn.	34 $\frac{1}{2}$	=	$\frac{1}{29}$	=
desgl. frei vom Schmutze =	30 $\frac{1}{2}$	=	$\frac{1}{33}$	=
desgl. neu befiebt =	143	=	$\frac{1}{7}$	=
Auf gewöhnlichem Sommerwege =	106	=	$\frac{1}{9,5}$	=
= hartem festem Lehmwege =	53	=	$\frac{1}{19}$	=

Hiernach sollen 5 Pferde dieselbe Last auf einer guten harten Chauffee mit gleicher Leichtigkeit fortziehen, wie 33 Pferde auf einem losen Sandwege, was allerdings ein auffallendes Verhältniß ist. Nach diesseitigen Erfahrungen würde es sich etwa wie 5 : 25 stellen.

IV. Versuche von J. Macneill; mitgetheilt in Telford's Bericht über den Zustand der Holyheadstraße und über die erforderliche Zugkraft auf verschiedenen andern Straßen. (Siehe Alexander Gordon, histor. pract. Abhandl. über Fortbewegung ohne Thierkraft mittelst Dampfwagen auf gewöhnlichen Straßen. Aus dem Englischen übersezt. Weimar 1833. S. 273 u. f.).

Diese Versuche wurden im Monat März 1830 bei trockener Witterung mit Hülfe des Macneillschen Dynamometers angestellt. Das ganze Gewicht des dazu gebrauchten Wagens — einer gewöhnlichen Diligence (Stage-Coach) mit schmalen Felgen — betrug jedesmal 2360 Pfd., und die Geschwindigkeit seiner Bewegung 2 $\frac{1}{2}$ engl. Meilen pro Stunde, oder nahe 3 $\frac{1}{2}$ Preuß. Fuß in der Secunde.

Piccadillystr. in London; treffl. glattes Pflaster v. Granitquadern; Zugft = 36,5 Pfd.	=	$\frac{1}{64,7}$
Dieselbe Straße; unebenes Pflast, die Steine abgerundet u. klawend,	=	$\frac{1}{51,6}$
Archwaystraße, unlängst durch Legung eines mit Mörtel ausgegossenen Grundes u. durch Beschüttung mit einer 6 Zoll hohen Lage geklopfter Granitsteine von Guernsey reparirt	=	$\frac{1}{38,3}$
Dieselbe Straße, statt des Granits mit Steinen von Hartshill reparirt,	=	$\frac{1}{53,6}$

Wegstrecke von Hochliff bis Straßfurt; aus einer 12 Zoll hohen Kalksteinpackung und Kieselchüttung bestehend,	=	111,7 Pfd.	=	$\frac{1}{21,1}$
Dieselbe Straße mit gepflastertem Grunde und 10—12" hoher Schüttung aus Kalksteinen und Kies	=	80,2 =	=	$\frac{1}{29,4}$
Wegstrecke von Straßfurt nach Dunchurch; 6 Zoll hohe Kalksteine, erst seit einigen Wochen aufgeschüttet,	=	190,7 =	=	$\frac{1}{12,4}$
Dieselbe Straße mit 5—6 Zoll hohen Kalksteinen	=	64,75 =	=	$\frac{1}{36,4}$
Desgleichen mit 3—5 Zoll Granitsteinen von Hartshill auf roh gepackter Grundlage	=	50,33 =	=	$\frac{1}{46,9}$

V. Versuche von Corréze und Manès, aus einer Abhandlung über Straßen und Fahrwe sen in den Annales des ponts et chaussées, 1832. I. p. 172. etc.

Die Versuche fanden im Winter von 1829 — 30 statt, wobei man sich eines kleinen vier rädri gen Wagenmodelles bediente, das auf einer horizontalen mit Geleisen versehenen Bahn über Sandlagen von verschiedener Dicke fortgezogen wurde. Der Wagen hatte eiserne, konisch abgedrehte und gut polirte Achsschenkel von 1,3 und 1,45 Centim. Durchmesser, hölzerne Räder von 20 Centim. Höhe mit eisernen Reifen und kupfernen Buchsen in den Naben, die auf den Achsschenkeln genau paßten. Das Gewicht des Wagens, welches einschließ lich der vier Räder 6 Kilogr. betrug, wurde durch verschiedene Belastungen nach einander von 17,7 bis 54 Kilogr. gesteigert, während die Geleise zuerst 1,8 Centim. und dann 1,3 Centim. hoch mit Sand angefüllt wurden. Als bewegende Kraft diente ein Gewicht, das vermittelst einer, über Rollen geleiteten, seidenen Schnur nach horizon taler Richtung auf den Wagen wirkte.

Ganze Be lastung. Kilogr.	Dicke des Sandes = 1,8 Centim.				Dicke des Sandes = 1,3 Centim.			
	Geschw. v Mtrs.	Zugkraft. Kilogr.	Wider stands Coefficient.	Formel für den Widerstands Coeff.	Geschw. v Mtrs.	Zugkraft. Kilogr.	Wider stands Coeffiz.	Formel für den Widerstands Coeff.
17,7	0,342	2,91	0,164	} 0,157 + 0,0216v	0,417	2,47	0,139	} 0,133 + 0,0144v
	0,481	2,97	0,167					
	0,581	3,05	0,172					
	0,694	3,02	0,171					
34,0	0,417	5,11	0,150	} 0,140 + 0,0247v	0,379	4,21	0,124	} 0,117 + 0,0182v
	0,781	5,41	0,159					
	0,961	5,21	0,153					
54,0	0,368	7,17	0,133	} 0,127 + 0,0177v	0,417	6,07	0,112	} 0,1103 + 0,0042v
	0,481	7,30	0,135					
	0,568	7,44	0,138					
	0,893	7,55	0,140					
Mittel = 0,153 = $\frac{1}{6,54}$				Mittel = 0,127 = $\frac{1}{7,93}$				

Nach Ausweis dieser Tabelle soll auf Sandwegen das Verhältniß der Zugkraft zur Belastung mit der Geschwindigkeit wachsen, was mit Rumford's Versuchen im Widerspruch steht. Ebenso widerspricht es anderweitigen Erfahrungen, daß jenes Verhältniß desto kleiner ausfällt je größer die Belastung ist. Dieses Resultat dürfte jedoch darin seinen natürlichen Erklärungsgrund finden, daß bei den in Rede befindlichen Versuchen unterhalb des Sandes sich eine feste Holzbahn befunden hat, die ein tieferes Einsinken der Räder bei größerer Belastung verhinderte, sodas das Einsinken bei allen Belastungen dasselbe bleiben mußte.

Nachstehende Versuche wurden in der Absicht angestellt, den Einfluß der Elasticität des Wagens auf die Zugkraft zu ermitteln, wenn die Bahn hart und uneben ist. Um den Wagen elastisch zu machen, entfernte man seine beiden Achsen so weit von einander, daß die aufliegenden Langbäume stark federten. Die Geleise wurden mit kleinen Quarz- oder Granitstückchen von etwa 12 Millim. Dike ausgepflastert, um eine rauhe und harte Bahn herzustellen.

Ganze Belastung. Kilogr.	E l a s t i s c h.				N i c h t E l a s t i s c h.			
	Geschw. v Metr.	Zugkraft. Kilogr.	Widerstands- Coeffizient.	Formel für den Widerstands- Coeff.	Geschw. v Metr.	Zugkraft. Kilogr.	Widerstands- Coeffiz.	Formel für den Widerstands- Coeff.
17,7	0,403	0,586	0,0331	} 0,0139+0,0477v	0,435	0,728	0,0411	} 0,0107+0,0699v
	1,000	1,091	0,0616		1,000	1,427	0,0806	
34,0	0,521	1,383	0,0407	} 0,0197+0,0404v	0,532	1,820	0,0535	} 0,0170+0,0687v
	1,250	2,387	0,0702		0,980	2,867	0,0843	
54,0	0,417	2,224	0,0412	} 0,0292+0,0289v	0,641	3,747	0,0694	} 0,0492+0,0315v
	0,454	3,065	0,0567		0,781	3,971	0,0735	
	0,833	2,867	0,0531		0,893	4,307	0,0797	
	1,136	3,347	0,0620		1,250	4,787	0,0886	
Mittel = 0,0523 = $\frac{1}{19,1}$					Mittel = 0,0713 = $\frac{1}{14}$			

Hiernach ist der Vortheil, der beim Befahren einer harten und holperigen Straße aus der Elasticität des Wagens entspringt, desto größer je stärker die Belastung, wogegen dieser Vortheil bei kleinen Ladungen mit der Geschwindigkeit zunehmen, bei schweren Ladungen aber mit der Zunahme der Geschwindigkeit sich vermindern soll. — Immer aber zeigt sich der Widerstand beim elastischen Wagen geringer als beim unelastischen, wengleich er weder in dem einen noch in dem andern Falle der Belastung proportional bleibt. Letzteres steht im Widerspruch mit anderweiten Erfahrungen, was wohl nur eine Folge der zu sehr im Kleinen gehaltenen Versuche sein mag.

Die Verfasser lassen sich noch weiter aus über den Vorzug der elastischen vor den unelastischen, sowie der vierräderigen vor den zweiräderigen Wagen, und bemerken in Bezug auf erstere, daß Wagen mit kleinen Vorderrädern denen mit gleichen Rädern entschieden vorzuziehen seien. Denn in gebirgigen Gegenden erleichtern sie den Pferden das Aufwärtsziehen, weil bei der Bergfahrt der größte Theil der Last sich auf die Hinterräder wirft, welche wegen ihres größeren Durchmessers einen geringeren Widerstand erleiden; bei der Thalfahrt findet dagegen das Umgekehrte statt, was ebenfalls eine Schonung der Pferde bedingt, da die kleinen Vorderräder, auf welche sich jetzt die

größte Last wirkt, durch ihren vermehrten Widerstand hemmend wirken. Auf horizontaler Bahn besteht nach den Verfassern der Vortheil der ungleichen Räder in der schiefen Richtung des Zuges, wodurch der Druck auf die kleinen Vorderräder und mithin der Widerstand derselben vermindert wird. — Außerdem dürfte die Erleichterung des Wendens der Wagen nicht minder zu Gunsten kleiner Vorderräder sprechen; nur ist ein Uebelstand damit verbunden, der nämlich, daß sie mehr Umdrehungen machen müssen als die größeren Hinterräder, und daher einer schnelleren Abnutzung unterworfen sind. Mit Rücksicht darauf versteht man sie bei uns gern mit etwas stärkeren Reifen.

VI. Versuche von Minard, angestellt zu Rochefort im Jahre 1807 und mitgetheilt in den Annales des ponts et chaussées, 1832, II. p. 133.

Zu diesen Versuchen diente ein zweirädriger Karren, welcher leer 881 Kilog., nach der Beladung mit Sand aber 1860 Kilog. wog. Die beiden Räder hatten 1,6 Met. Durchmesser, 7 Centim. Felgenbreite, und der Durchmesser der Achsschenkel betrug 5 Centim. Statt der Pferde wurden 10 bis 12 Menschen vorgespannt, die vermittelst eines Seiles den Karren mit einer Geschwindigkeit von 1 Met. per Sekunde in Bewegung setzten. Zur Messung der Kraft diente ein Federdynamometer, das zwischen dem Zugseile und dem Karren eingesetzt war.

Folgende Tabelle enthält die auf diese Versuche bezüglichen Angaben und Berechnungen, wobei zwei Versuche, die der Autor als unzuverlässig bezeichnet, ausgeschlossen worden sind.

Beschaffenheit der Straße.	Gewicht des Wagens. Kilogr.	Zugkraft auf den Horizont reduc. Kilogr.	Widerstands-Coeffizient.	Bemerkung.
Gartenweg, aus feinem Kieffande mit Erde gemischt; sehr fest und eben.	881	34	0,0386	Allee des öffentl. Gartens zu Rochefort.
	881	30,69	0,0348	
	Mittel = $0,0367 = \frac{1}{27,2}$			
Dichtes Pflaster; die Zwischenräume der Steine mit hart getrockneter Erde ausgefüllt.	881	36,8	0,0418	Theils in der Rue de fonderie, theils in der Rue de vermandois zu Rochefort.
	1860	74,94	0,0403	
	1860	64,66	0,0375	
Mittel = $0,0399 = \frac{1}{25}$				
Pflaster, dessen Oberfläche mit einer 3 bis 4 Centimeter dicken Lage feinen Kieffandes bedeckt war.	881	54,81	0,0622	
	1860	174,94	0,0941	
	1860	136,06	0,0731	
Mittel = $0,0765 = \frac{1}{13,1}$				

Als das wahrscheinlichste Mittel dieser Versuche nimmt Minard den Widerstands-Coeffizienten für den festen Gartenweg = $\frac{1}{27}$, für das dichte Straßenpflaster = $\frac{1}{25}$ und für ein mit Kieffand bedecktes Pflaster = $\frac{1}{14}$ der Last an.

VII. Nachstehende Erfahrungen sind entnommen aus Navier's Considérations sur les principes de la police du roulage et sur les travaux d'entretien des routes, Paris 1835, pag. 109.

Nach den stattgehabten Verbesserungen des Chausséebaues in Frankreich kann bei gewöhnlichen Fuhrwerken das Verhältniß der Zugkraft zur Last folgendermaßen geschätzt werden:

Auf den gewöhnlichen französischen Chausséen durchschnittlich $f = \frac{1}{15}$

Dieser Widerstand schwankt jedoch in sehr weiten Grenzen, je nach der Beschaffenheit der Straße. Auf einer Straße, wo das Material noch nicht gehörig fest geworden, so daß die Räder tiefe Geleise einschneiden, kann man annehmen: $f = \frac{1}{5}$

Auf einer vollkommen fest gefahrenen Straße, deren Oberfläche hart und eben ist, $f = \frac{1}{50}$

Bei den Versuchen, die 1832 auf dem Boulevard du Mont-Parnasse zu Paris bei trockenem Wetter mit zweirädrigen Wagen stattfanden, war die Fahrbahn mit zerschlagenen Steinen chaussirt. Die Felgenbreite der Räder betrug 14 bis 16 Centim. und die Zugkraft schwankte zwischen $\frac{1}{44}$ und $\frac{1}{52}$; Mittelwerth $f = \frac{1}{46}$

Andere Versuche auf einem gut gepflasterten Boulevard zu Paris gaben als äußerste Grenzen $\frac{1}{42}$ und $\frac{1}{66}$, jenachdem die Erde in den Zwischenräumen der Steine mehr oder minder fest war; Mittelwerth $f = \frac{1}{53}$

VIII. Verschiedene andere Angaben über den Widerstand der Fuhrwerke auf gewöhnlichen Straßen. Der Widerstands-Coeffizient, in Theilen der ganzen Belastung ausgedrückt, ist durchgängig mit f bezeichnet.

1. Nach von Gerstner (Mechanik, Bd. I. S. 593) fangen die Frachtwagen auf unseren Chausséen an, von selbst bergab zu laufen, ohne merklich in die Haltketten zu fallen, wenn das Gefälle zwischen $1\frac{1}{2}$ und 2 Zoll auf die Klafter beträgt. Darnach ist im Mittel $f = \frac{1}{40}$

2. Umpfenbach (Theorie des Neubaus, der Herstellung und Unterhaltung der Kunststraßen, Berlin 1830, S. 38), giebt an, daß nach angestellten Beobachtungen das freiwillige Herablaufen der Fuhrwerke auf glatten Chausséen erfolge:

Bei Frachtfuhren, sobald das Gefälle 3 Zoll auf die Ruthe beträgt, also $f = \frac{1}{48}$

Bei gut gebauten Chaisen schon, wenn jenes 2 Zoll auf dieselbe Länge ist, also $f = \frac{1}{72}$

3. Nach Navier (Anmerk. zur neuen Ausg. des Belidor, p. 147) ist die Zugkraft zum Fortziehen eines Wagens auf ebenem festen Boden, oder auf gepflastertem Wege, wenn die Pferde im Schritt gehen $f = \frac{1}{25}$

Bei zunehmender Geschwindigkeit wächst die Zugkraft auf ebenem Boden nicht merklich; beträchtlich aber auf gepflastertem Wege. Bei einem in Federn hängenden Wagen, der im starken Trabe fortbewegt wird, ist die Zugkraft: auf einer Kieschaussée $f = \frac{1}{14}$

auf Sandwegen oder auf einer neuen Beschotterung $f = \frac{1}{8}$

4. Nach Coste und Perdonnet (Mém. sur les chemins à ornières, Paris 1830 p. 44) kann der Widerstand der Fuhrwerke geschätzt werden:
- | | |
|---|--------------------|
| Auf einer gepflasterten Straße | f = $\frac{1}{30}$ |
| auf einer guten macadamisirten Chaussee | = $\frac{1}{35}$ |
| auf einer Eisenbahn | = $\frac{1}{200}$ |
5. Nach Corréze und Manès (Ann. d. P. et ch. 1832, I. p. 173) ist der Widerstand auf einer guten Kieschaussee im Mittel = $\frac{1}{25}$
Die Achsenreibung wird dabei = $\frac{1}{200}$, also $\frac{1}{8}$ des ganzen Widerst. geschätzt.
6. Nach Poncelet (Cours de mécan. indust. 2^{me} part. p. 134)
- | | |
|--|------------------|
| Auf einer mit zerschlagenen Steinen befestigten Straße | = $\frac{1}{8}$ |
| Dieselbe Straße, wenn die Steindecke fester geworden | = $\frac{1}{12}$ |
| Auf einer gepflasterten Straße | = $\frac{1}{20}$ |
| Auf einer dichten, festgestampften Straße | = $\frac{1}{30}$ |
7. Nach Flachot (Traité élémentaire de mécan. indust. p. 57) ist der Widerstand auf einer gewöhnlichen Straße zwischen $\frac{1}{15}$ und $\frac{1}{20}$

Erfahrungen über den Effect der Pferdekkräfte beim Transport von Lasten auf verschiedenen Straßen.

I. Navier in seiner Schrift: Mémoire sur l'établissement d'un chemin de fer de Paris au Havre, Paris 1826, nimmt die Muskelkraft eines guten Pferdes zu 80 Kilogr. an. Ein solches Pferd soll einschließlich des Gewichts vom Wagen fortziehen:

Auf einer Steinchaussee (route en empierrement)	= 1000 Kil.
auf einer gut gepflasterten Straße	= 1600 "
auf einer Eisenbahn (nach neueren Verf. viel zu gering!)	= 8000 = (für Kosten liefern aber man's jauch weißt 1810)

II. Nach Corréze und Manès (a. a. O.) werden in Lothringen schwere vierrädrige Wagen von 1750 Kil. mit 3750 Kil. Ladung durch 5 Pferde fortgezogen, so daß auf jedes Pferd 350 Kilog. des Wagens und 750 Kilog. der Ladung kommen. Demgemäß ist der Totaleffect für die Pferdekraft = 1100 Kil., von welchen nur 68 Prozent als Nutzeffect gelten.

In der Franche-Comté kommen dagegen einspännige elastische Wagen mit leichten Rädern in Anwendung. Das Gewicht eines solchen Fuhrwerks beträgt nicht über 400 Kil., die Ladung 1100—1200 Kil., also die mittlere Totallast = 1550 Kil., wovon der Nutzeffect nahe 74 pCt. beträgt.

Durch diese Erfahrungen widerlegen die genannten Autoren die gewöhnliche Ansicht der Fuhrleute, wonach es für vortheilhaft gehalten wird, starke Wagen mit recht schwerer Ladung anzuwenden und dann desto mehr Pferde vorzuspannen, in der irrigen Meinung, daß unter diesen Umständen das Gewicht der Ladung das des Wagens am meisten übertreffen werde. Nach der Ansicht der

Verfasser sind im Gegentheil leichte, nur mit einem Pferde bespannte, Wagen sowohl im Interesse des Staats wie der Privaten am empfehlungswerthesten, weil sie den doppelten Vortheil einer größeren Schonung der Straßen und der Pferde gewähren.

III. Sehr vielseitige Erfahrungen über den vorliegenden Gegenstand theilt der Ingenieur Schwilgué in den Ann. de P. et Ch. von 1832 mit, wovon folgende Auszüge hier Platz finden mögen:

Erfahrungen über zweiräderige Frachtwagen. Auf der Straße zwischen Havre und Rouen wurde im Jahre 1825 eine nützliche Last von 18724977 Kil. durch 23624 Pferde transportirt, was durchschnittlich pro Pferdekraft 792 Kil. Ladung giebt, ohne das Gewicht des Fuhrwerkes. Dieser Nugffect bleibt sich jedoch nicht in allen Jahreszeiten gleich, sondern ist im Winter geringer als im Sommer. Hiernach die obigen Beobachtungen klassifizirt, so kommt auf die Pferdekraft in der einen Jahreszeit 698, in der andern 853 Kil. Nutzlast, was ein Verhältniß = 9 : 11 giebt. Rechnet man das Gewicht des Wagens hinzu, so ergeben sich die Totallasten für beide Jahreszeiten bezüglich in dem Verhältniß = 5 : 6, nämlich:

für den Winter = 1000 Kil.; für den Sommer = 1200 Kil.

Der Effect der Pferdekraft beim zweiräderigen Fuhrwerke nimmt ab, wenn die Zahl der Vorspannpferde größer wird, wie folgende Beobachtungen nach dem Durchschnitt des ganzen Jahres ersehen lassen:

Zahl der Pferde.	Gewicht des Wagens.	Ladung.	Totallast.	Totallast auf 1 Pferd.
1spännig;	500 Kil.	941 Kil.	1441 Kil.	1441 Kil.
2 "	900 "	1977 "	2877 "	1438 "
3 "	1200 "	2733 "	3933 "	1311 "
4 "	1350 "	3750 "	5100 "	1275 "
5 "	1500 "	3925 "	5425 "	1085 "
6 "	1500 "	3942 "	5442 "	907 "
7 "	1500 "	3978 "	5478 "	783 "
8 "	1500 "	3984 "	5484 "	685 "

Der Grund dieser Abnahme soll nach dem Verfasser einmal darin liegen, daß das hintere Pferd nicht zieht, sondern bloß zur Unterstützung der Last und zum Dirigiren des Fuhrwerkes dient; nächst dem aber in dem französischen Tarif, der die Belastung der Wagen nach Maaßgabe der Felgenbreite beschränkt und daher die Fuhrleute verhindert, die ganze Kraft ihrer Pferde nutzbar zu machen.

Vierräderige Frachtwagen. Hundert vierräderige Wagen der Franche-Comté haben 1825 und 26 auf der Straße nach Havre 96145 Kilog. verfahren; also Nutzlast auf das Pferd = 960 Kil., und nach Hinzurechnung von 340 Kil. für das Gewicht des Wagens pro Pferd = 1300 Kil. Totallast.

Auf der Straße zwischen Rouen und Havre fuhren im demselben Jahre 108 schwere Frachtwagen mit 741 Vorspannpferden, welche 576869 Kil. Nutzlast beförderten. Jeder Wagen durchschnittlich siebenspännig und mit 5341 Kil. beladen; sein eigenes Gewicht betrug 2500 Kil., also Totallast = 7841 Kil. Dies giebt auf jedes Pferd 763 Kil. Nutzlast und 1120 Kil. Totallast.

Im ersten Falle betrug die Nutzlast 74, im zweiten Falle 68 Prozent der Totallast, woraus der Autor einen entschiedenen Vorzug der leichten Franche-Comtés gegen die schweren Frachtwagen herleitet.

Nach den Jahreszeiten geordnet, stellt sich der Effect eines Pferdes beim vierräderigen Fuhrwerke, wie folgt:

Wagen der Franche-Comté,	}	Winter: Nutzlast = 816 Kil.; Totallast = 1156 Kil.
340 Kil. wiegend.		Sommer: " = 971 " " = 1311 "
Schwere Frachtwagen mit 17	}	Winter: Nutzlast = 719 Kil.; Totallast = 1075 Kil.
Centim. breiten Felgen.		Sommer: " = 802 " " = 1158 "

Dieser Unterschied in den Leistungen eines Pferdes nach den Jahreszeiten soll zum Theil von dem Zustande der Straße, zum Theil aber daher rühren, daß die Wagen selbst im Winter feucht sind, und deshalb einen größeren Bruchtheil der ganzen Last ausmachen, welches letztere indeß wohl zu unerheblich sein möchte, um einen bemerkbaren Einfluß auf die Zugkraft ausüben zu können.

Das Maximum der Nutzlast soll im Monat September, das Minimum dagegen im März stattfinden, was auch in unseren Gegenden sich in ganz gleicher Weise herausgestellt hat. Der wahre Grund hiervon liegt darin, daß im September die Kunststraßen noch im guten und festen Zustande sind, auch die Pferde, da sie in diesem Monate weniger von Hitze und Staub zu leiden haben, einen größeren Effect entwickeln können; während dagegen im März, wo die Straßen vom vorher gegangenen Winter her noch durchgeweicht und ausgefahren sind, in der Regel erst die Ausbesserungen durch neue Steinschüttungen zu beginnen pflegen.

Einfluß der Beschaffenheit der Straße. Im Monat Dezember 1827 fuhr ein gewöhnlicher Frachtwagen, dessen zwei Räder 17 Centim. Felgenbreite hatten und der bei einem Totalgewichte = 4800 Kil. mit 6 Pferden bespannt war, in 4 Tagen oder in 32 Stunden wirklicher Arbeitszeit von Rouen nach Paris; und zwar

auf der Chausséestrecke von Rouen bis Magny, 16½ Lieues lang, in 19½ Stunden;
 " " gepflast. Straße = Magny bis Paris 15 " = 12½ "

Die Lieve mit 4000 Meter in Rechnung gebracht, so giebt dies eine Geschwindigkeit von 3385 M. pro Stunde auf der Chaussée und von 4800 M. auf der gepflasterten Straße, während in beiden Fällen die Totallast auf das Pferd 800 Kil. betragen hat. Bei gleichen Transportlasten verhält sich aber der dynamische Effect der Pferde umgekehrt wie die Geschwindigkeit, also im vorliegenden Falle = 4800 : 3385; d. h. der Widerstand der Chaussée zu dem des Pflasters = 7 : 5 nahe, während Navier dieses Verhältniß gleich 8 : 5 gefunden hat.

Im November desselben Jahres legte die Diligence, deren vier Räder 11 Centim. breite Felgen haben, mit einer Totallast = 3500 Kil. und gezogen von 6 Pferden, den obigen Weg in 14 Stunden zurück; nämlich die 16½ Lieues lange Chausséestrecke in 8½ Stunden,
 und das 15 " " Straßenpflaster = 5½ "

Danach ergeben sich die Geschwindigkeiten per Stunde bezüglich gleich 7765 und 10909 Meter, während die von jedem Pferde fortbewegte Last in beiden Fällen = 583 Kil. war; und da die genannten Geschwindigkeiten sich ohngefähr wie 5 : 7 verhalten, so ergibt sich für die Widerstände auf der Chaussée und dem Straßenpflaster dasselbe Verhältniß wie vorhin beim Frachtwagen.

Beschleunigter Transport durch Relais. Die Wagen der Fischhändler, welche die Seefische von Dieppe und Fécamp nach Paris bringen, haben wie gewöhnliche Frachtwagen zwei Räder von 17 Centim. Felgenbreite und wiegen leer 1300 Kil. Ihre Ladung beträgt in der Regel

1500 Kil., wovon aber ein Theil jedesmal hängend unter der Achse angebracht ist, um Seitenschwankungen beim schnellen Fahren zu vermeiden; die Totallast ist daher = 2800 Kil. Sie werden durch 5 Pferde fortgezogen, die von 8 zu 8 Lieues durch Relaispferde abgelöst werden, so daß also die Totallast auf jedes Pferd 560 Kil. beträgt.

Die Chausseestrecke von Fleury bis St. Clair, 8 Lieues lang, wird unter diesen Umständen in 4 Stunden, die gleich lange gepflasterte Strecke von Pontoise bis Paris in 3 Stunden zurückgelegt. Daher verhalten sich die Widerstände auf beiden Strecken wie 4 : 3, was mit den vorigen Angaben einigermaßen stimmt.

Durch Vergleichung des dynamischen Effectes bei der Silberförderung mit dem beim gewöhnlichen Gütertransport findet Schwilgué jenen Effect stets bedeutend geringer als diesen und folgert daraus, daß die Silberförderung gegen den gewöhnlichen Transport entschieden im Nachtheile sei, abgesehen davon, daß die größere Geschwindigkeit auch einen verhältnißmäßig stärkeren Bau der Wagen erfordere. Dieselbe Erfahrung hat man auch in unserem Lande bei der von Herrn Moreau Ballette eingerichteten Silberförderung von Berlin nach Königsberg gemacht, und kann natürlich der erwähnte Nachtheil nur durch erhöhte Frachtpreise ausgeglichen werden.

IV. Vergleicht man die vorstehenden Ergebnisse über die Zugkraft der Pferde mit den in Deutschland hierüber gemachten Beobachtungen, so geben die letzteren fast überall, besonders aber in Preußen, günstigere Resultate. Denn bei dem vortrefflichen Zustande der Chausseen in unserem Staate, dem neben der unausgesetzten Sorgfalt für die Unterhaltung auch die Anwendung harter Steine zu statten kommt, und bei dem zweckmäßigen Bau unserer Frachtwagen, kann man die von jedem Pferde andauernd fortzuschaffende Nutzlast unbedenklich zu 25 bis 30 Centner annehmen. Dies giebt im Durchschnitt $27\frac{1}{2}$ Centner oder nahe 1415 Kilog., und wenn der Antheil vom Gewichte des Wagens auf jede Pferdekraft mit $7\frac{1}{2}$ Centner in Anrechnung kommt, so beträgt die Totallast pro Pferd 35 Centner = 1800 Kilog., ein Effect, dem die Leistungen in der Franche-Comté am nächsten kommen, ohne ihn jedoch ganz zu erreichen.

Eben so günstig stellt sich der Effect bei der vorhin erwähnten Silberförderung, welche die Waaren auf der 77 Meilen langen Linie mit einer Geschwindigkeit von 1 Meile in durchschnittlich $1\frac{1}{4}$ Stunde für einen im Verhältniß zur Postbeförderung billigen Preis fortschafft*). Es kommen hierzu auf gewöhnliche Art gebaute, mit vier Pferden bespannte, Frachtwagen mit eisernen Achsen, 49 Zoll hohen Vorder- und 58 Zoll hohen Hinterrädern von 4 Zoll Felgenbreite, in Anwendung, die unter Anleitung eines, in einem hinten angehängten leichten Kariole sitzenden Conducteurs Tag und Nacht in Bewegung bleiben, wobei wie bei den Posten je von drei zu drei Meilen ein Pferdewechsel stattfindet. Die Tragsfähigkeit der Wagen, deren eignes Gewicht 30 Centner beträgt, ist auf 100 Centner berechnet; jedoch wird die gewöhnliche Belastung nach den Jahreszeiten stets geringer angenommen. Man ladet nämlich im Sommer 80, im Winter aber nur 60 Centner, was also für jedes Pferd eine Nutzlast von bezüglich 20 und 15 Centner (1029 und 772 Kilog.) giebt.

*) In dieser M. Ballette'schen Silberförderung besitzen wir ein Institut, welches von keinem ähnlichen auf dem Continent übertroffen wird. Es hat seine Bedeutung auch schon dadurch bewährt, daß die Sendungen der Seidenwaaren aus Italien und Frankreich nach Rußland, welche früher über Wien oder auf der See befördert wurden, jetzt sämmtlich über Berlin gehen.

Mit Hinzurechnung des Wagens beträgt demnach die Totallast auf die Pferdekraft im Sommer $27\frac{1}{2}$, im Winter $22\frac{1}{2}$ Centner, oder bezüglich 1415 und 1158 Kilog.

Es mag von Interesse sein, den vorstehend mitgetheilten Leistungen der Pferde beim gewöhnlichen Frachtfuhrwerke die Leistung bei in Federn hängenden Wagen gegenüber zu stellen. Ich wähle dazu die großen preussischen Schnellpostwagen, welche von vier Pferden mit einer Geschwindigkeit von 1 Meile in $\frac{3}{4}$ Stunden, einschließlich der Aufenthalte an den Stationen, fortbewegt werden. Die eisernen Achsschenkel dieser Wagen haben an der Wurzel $2\frac{3}{8}$ Zoll, am äußersten Ende 2 Zoll, also im Mittel $2\frac{3}{16}$ Zoll Durchmesser; die Vorderräder sind $3\frac{1}{2}$ Fuß, die Hinterräder 5 Fuß hoch, und ihre Felgenbreite beträgt 3 Zoll. Das eigene Gewicht eines solchen Wagens beträgt 35 Zentner; einschließlich des Schirrmeysters fahren gewöhnlich 9 Personen mit, deren jede 30 Pfund Reisegepäck und 50 Pfd. Überfracht mitnehmen darf. Bei voller Ladung ist daher die Totallast, das durchschnittliche Gewicht eines Menschen zu $1\frac{1}{2}$ Zentner gerechnet, gleich $49\frac{1}{2}$ Zentner, was für jedes Pferd eine Leistung von 12,3 Zentner = 633 Kil. giebt. Nach den Angaben von Schwilgus beträgt dieselbe bei den französischen Diligencen nur 583 Kilogramm.

Daß hohe Wagenräder einen geringern Widerstand verursachen als niedrige Räder, ist zwar theoretisch außer allem Zweifel; um indes einen thatsächlichen Beweis dafür zu geben, theile ich noch folgende Erfahrungen mit, die ich der Güte des Herrn M. Valette verdanke.

Während man einen gewöhnlichen zweispännigen Frachtwagen, dessen Vorderräder 4 Fß 1 Zoll und dessen Hinterräder 4 Fß 10 Zoll Durchmesser haben, beim Befahren des Berliner Straßensplasters bis zu 50 Zentner belastet, kann man auf die hier gebräuchlichen Packhofswagen (Bierspänner), deren Vorder- und Hinterräder nur $2\frac{1}{2}$ u. 3 Fß Durchmesser haben, nicht mehr als 40 Zentner, auf die Güter- oder sogenannten Rollwagen mit Rädern von 1' 11" u. 2' 2" Durchmesser aber nur 30 Ztr. höchstens laden, wenn nicht die Pferde übermäßig angestrengt werden sollen.

Diese Angaben beziehen sich auf Ladungen, die aus harten Körpern bestehen, wie z. B. Steine oder Eisen, gewöhnlich den unteren Raum des Wagens einnehmend. Bei Waaren dagegen, die vermöge ihres größeren Volumens und ihrer Elasticität eine gewisse Federung beim Fahren auf dem Pflaster erzeugen, was namentlich vom Transport großer Wollfäcke gilt, kann man in den vorerwähnten Fällen ohne Ueberlastung der Pferde wenigstens 10 Prozent mehr aufladen; ein Beweis — wenn es eines solchen noch bedarf — wie beträchtlich die Elasticität den Widerstand der Fuhrwerke vermindert.

B. Zusammenstellung der neuern Versuche

über den Widerstand der Fuhrwerke auf verschiedenen Straßen.

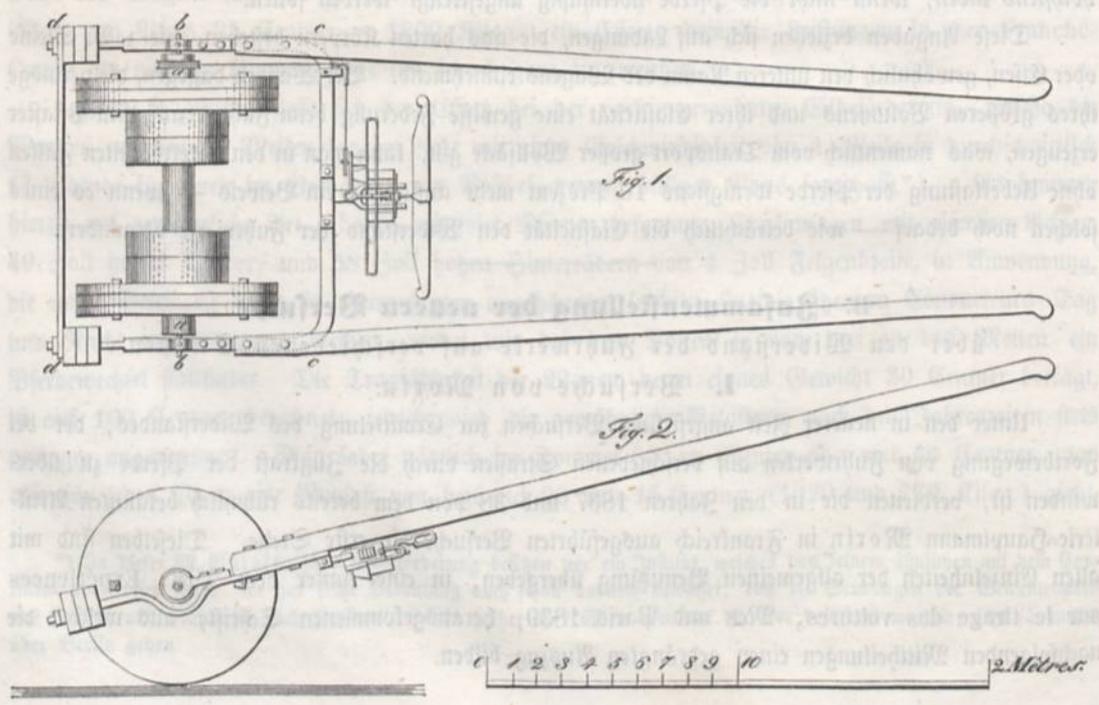
I. Versuche von Morin.

Unter den in neuerer Zeit angestellten Versuchen zur Ermittlung des Widerstandes, der bei Fortbewegung von Fuhrwerken auf verschiedenen Straßen durch die Zugkraft der Pferde zu überwinden ist, verdienen die in den Jahren 1837 und 38 von dem bereits rühmlich bekannten Artillerie-Hauptmann Morin in Frankreich ausgeführten Versuche die erste Stelle. Dieselben sind mit allen Einzelheiten der allgemeinen Benutzung übergeben, in einer unter dem Titel: *Expériences sur le tirage des voitures*, Metz und Paris 1839, herausgekommenen Schrift, aus welcher die nachfolgenden Mittheilungen einen gedrängten Auszug bilden.

Die Versuche wurden theils mit einem besonders dazu konstruirten Apparate, theils aber mit verschiedenen andern Fuhrwerken ausgeführt, deren Beschaffenheit weiterhin angegeben werden wird. Was dagegen jenen Apparat betrifft, so war derselbe, mit Bezug auf die nachstehenden Abbildungen Fig. 1 und 2, folgendermaßen zusammengesetzt:

Eine gußeiserne Welle aa, genau cylindrisch abgedreht, wurde mit mehreren gußeisernen Scheiben, die als Stellvertreter der Wagenräder bis auf einem Durchmesser von 0,787 Meter (= 2½ pr. Fß.) abgedreht waren, und mit voll gegossenen Belastungsrollen versehen. Durch Vermehrung oder Verminderung dieser Scheiben und Rollen konnte man sowohl die Breite der reibenden Fläche (Felgenbreite) als auch den Druck auf den Boden beliebig ändern. Die Verbindung jener Scheiben unter einander geschah durch Schraubenbolzen, mit dem Wellbaume aber durch Schlüssel, so daß sie sich gleichzeitig mit der Welle und den darauf befestigten Belastungsrollen drehen mußten. Die Enden des Wellbaumes aa waren mit kleinen Zapfen bb von 1½ Centim. (= 0,48 pr. Zoll) Durchmesser versehen, vermittelt welchen sie in passenden Lagern des Wagengestelles cc dd liefen. Am vordern Theile dieses Gestelles innerhalb der Gabel war das Dynamometer mit Zeichenstift (conf. S. 70. Taf. II.) angebracht, welches die Zugkraft durch eine stetige Linie auf einem unter dem Stifte fortgehenden Papierstreifen verzeichnete.

Die Pferde wurden an ein bewegliches, mit dem Dynamometer in Verbindung stehendes Ortschaft gespannt, und damit dasjenige, welches zwischen der Gabel ging, keinen Druck auf seinen Rücken oder im entgegengesetzten Sinne erhielt, äquilibrirte man das Gewicht der Gabel durch angemessene Gegengewichte, die am hintern Ende des Gestelles auf den Verlängerungen der Gabelbäume bei dd befestigt wurden. Auf diese Weise entstand ein zweiräderiger Karren, der um seine Achse sich im Gleichgewichte befand.



Betreffend die Versuche mit den verschiedenen Fuhrwerken, welche die Mehrzahl der überhaupt angestellten Versuche ausmachen, so genügte es, an den Vorderwagen einen der dynamometrischen Apparate anzubringen, die entweder, wie vorerwähnt, die Aenderung der Zugkraft durch eine stetige Linie darstellten, oder die mit einem Zähler versehen waren, der die in unendlich kleinen Zeitintervallen ausgeübten Zugkräfte mechanisch integrierte*). Beide Apparate gaben, wie aus den Versuchen hervorging, stets dieselben Resultate.

Um die in Rede befindlichen Versuche in möglichst erschöpfender, und alle influirenden Umstände umfassender Weise zur Ausführung zu bringen, mußte man sich vergegenwärtigen, daß es folgende Umstände sind, die einen regelmäßigen und bemerkbaren Einfluß auf die Größe der Zugkraft sowohl als auf die Zerstörung der Straße ausüben: 1) der Durchmesser der Räder; 2) die Breite der Felgen; 3) die Geschwindigkeit der Bewegung; 4) die Neigung der Zuglinie, und 5) die Art der Aufhängung mit oder ohne Wagenfedern.

In wiefern es dem Autor gelungen ist, den Einfluß dieser fünf verschiedenen Umstände auf eine gleich entscheidende Weise zu ermitteln, wird aus den folgenden Darlegungen hervorgehen; hier bemerke ich nur, daß die in den ersten fünf Tabellen zusammengestellten Zahlenergebnisse bestimmt sind, die gewünschten Antworten auf jene Fragen zu geben. Jedoch habe ich in diesen Tabellen nur die Hauptresultate aufgenommen, mit Weglassung der calculatorischen Zwischenresultate, die man in des Autors Schrift selbst nachsehen mag. An einigen Stellen habe ich zur Berichtigung kleiner Rechenfehler Veranlassung gefunden, wodurch jedoch die vom Autor angegebenen Endresultate nur wenig verändert worden sind. Dies darf nicht Wunder nehmen, da Herr Morin seine Berechnungen, wie er mir versicherte, nicht auf dem Papier, sondern durchgängig mit Hülfe des bekannten Rechenschiebers (Sliding rule) ausgeführt hat.

Noch ist zu bemerken, daß bei den vorliegenden Versuchen die beiden Widerstände, welche von der Reibung an den Achsen und am Umfang der Wagenräder herrühren, von einander getrennt worden sind, um ihre Größe einzeln kennen zu lernen, was jedenfalls sehr zweckmäßig ist. Denn während der erste Widerstand nur von der Konstruktion des Wagens und dessen Belastung abhängig ist, giebt sich in dem zweiten vornehmlich der Einfluß zu erkennen, den die Beschaffenheit der Straße auf die zur Fortbewegung des Wagens erforderliche Zugkraft ausübt.

Um diese Trennung zu bewerkstelligen, wird der Coefficient der Achsenreibung durchgängig = 0,05 angenommen, indem man dafür sorgte, daß während der Versuche die Buchsen der Wagenräder fortwährend gut in Schmiere erhalten wurden. Der Widerstand der wälzenden Reibung wird demnächst erhalten, indem man die zur Ueberwindung der Achsenreibung erforderliche Kraft von der durch das Dynamometer angezeigten gesammten Zugkraft in Abzug bringt.

Die so erhaltenen Ergebnisse werden demnächst, um sie unter einander vergleichen zu können, auf gleiche Belastungen und gleiche Halbmesser der Räder reducirt, wobei Herr Morin das von Coulomb gefundene Gesetz in Anwendung bringt, daß die wälzende Reibung im geraden Verhältniß zur Pressung und im umgekehrten Verhältniß zum Halbmesser steht. — Vermittelt dieses Gesetzes

*) Exemplare solcher Apparate befinden sich in der Sammlung der Königl. Techn. Gewerbe-Deputation. Ihre Beschreibung durch Abbildungen erläutert, enthält die kleine Schrift von Morin: Description des Appareils chronométriques à Style et des Appareils dynamométriques etc. Metz, 1838.

berechnet Morin den zugehörigen Widerstandscoeffizienten, den er stets mit A bezeichnet, für eine Pressung von 1 Kilogramm und für einen Halbmesser von 1 Meter. Zur Unterscheidung werde ich denselben nach der Reduction auf preuß. Maas und Gewicht, d. h. für ein Pfund Druck und für 1 Fuß Halbmesser ausgedrückt, wie früher mit φ bezeichnen.

Die folgende Tabelle enthält nun die Resultate der Versuche, welche Morin über den Einfluß des Durchmessers der Räder auf die Größe des Widerstandes am Umfang derselben angestellt hat. Bei diesen Versuchen ließ man die vorgespannten Pferde im gewöhnlichen Schritt über eine Wegstrecke von 100 bis 500 Meter Länge fortgehen, wobei die Geschwindigkeit durchschnittlich zwischen 1 und $1\frac{1}{2}$, in einzelnen Fällen bis $2\frac{1}{2}$ Meter variierte. Die ermittelten Zugkräfte so wie die Widerstände sind jedesmal, wo die Wegstrecken ein Gefälle hatten, auf den Horizont reducirt worden, was eben so von allen folgenden Versuchen gilt.

Taf. I. Versuche über den Einfluß des Durchmessers der Räder.

Laufende Nr.	Bezeichnung der Straße und des Zustandes derselben.	Durchmesser der		Breite der Felgen. Centim.	Pressung auf den Boden. Kil.	Zugkraft nach horizontaler Richtung. Kil.	Widerstand der		Werthe des Widerst.-Coëff.		Bemerkungen.	
		Vor- der- räder. Met.	Hinter- räder. Met.				Achsen- reibung. Kilogr.	Wälzen- den- Reibung. Kilogr.	A.	φ .		
1. Versuchs-Reihe.												
Mit einem 16pfündigen Belagerungsgeschütz; zweispännig.												
1	Straße von Metz nach Thionville; im guten Zustande der Unterhaltung, etwas feucht; die Steine an der Oberfläche zu Tage liegend.	1,100	1,100	10,8	3865	103,83	10,60	93,23	0,0133	0,0424	Mittel von 7 Versuchen.	
2		1,564	1,564	10	3715	63,00	7,25	55,75	0,0117	0,0373		" 2 "
3		"	"	"	3650	59,25	7,10	52,15	0,0112	0,0357		" 3 "
4		2,050	2,050	"	3990	60,81	5,79	55,02	0,0141	0,0449		" 3 "
5		"	"	"	3925	58,27	5,68	52,59	0,0137	0,0436		" 5 "
2. Versuchs-Reihe.												
Dasselbe Geschütz, vier-spännig												
6	Straße v. Thionville; 4 bis 5 Centim. dick mit neuem Kies beschüttet.	1,100	1,100	10,8	3865	325,27	10,60	314,67	0,0448	0,1427	" 4 "	
7		1,564	1,564	10	3715	237,15	7,25	230,25	0,0485	0,1545	" 3 "	
8		2,050	2,050	"	3990	197,68	5,79	191,89	0,0489	0,1558	" 4 "	
3. Versuchs-Reihe.												
Mit einem 4räd. Mehlswagen; vier-spännig.												
9	Boden des Polygons zu Metz; etwas feuchte Rasendecke.	0,817	1,255	11,3	3373	150,33	11,60	138,73	0,0234	0,0746	" 3 Die Belastung verschieden auf die Achsen vertheilt.	
10		"	"	"	"	159,93	11,80	148,13	0,0249	0,0793		" 3
11		"	"	"	"	203,50	12,90	190,60	0,0280	0,0892		" 3
4. Versuchs-Reihe.												
Mit einem 4räd. Wagen der Messagerie général; 2-spännig, auf 6 Federn ruhend.												
12	Rue Stanislas i. Paris; m. Sandstein v. Fontainebleau gepflastert; i. gut. Stande.	0,840	1,180	8	3145	86,63	9,13	77,50	0,0117	0,0373	" 2 Versuchen.	
13		1,180	1,500	"	3352	64,77	6,81	57,96	0,0115	0,0366	" 2 "	

Herr Morin betrachtet nun die Abweichungen der für den Coefficienten A gefundenen Mittelwerthe von einander als so unbedeutend, daß man davon ganz absehen und die genannten Resultate für jede Versuchsreihe als übereinstimmend ansehen kann. Da nun jene Werthe unter der Voraussetzung gefunden worden sind, daß sich der Widerstand der wälzenden Reibung direct wie die Pressung und umgekehrt wie der Halbmesser verhält, so sieht er dieses Gesetz durch vorstehende Versuche als vollkommen bestätigt an, und zwar nicht bloß für weiche compressibele Terrains, sondern auch für harte gepflasterte und chaussirte Straßen, selbst wenn die letzteren auf eine Dicke von 4 bis 5 Centim. neu bekieset waren.

Bei näherer Erwägung der in der Tabelle enthaltenen Angaben erscheint dieser Schluß indessen als zu rasch und durch die vorstehenden Versuche nicht hinreichend motivirt. Mit größerem Rechte könnte man die Folgerung daraus ziehen, daß der Widerstand in einem höherem Verhältnisse als die Belastung zunimmt, wie dies namentlich aus der Vergleichung des 2ten und 3ten, sowie des 4ten und 5ten Versuchs, die jedesmal mit Rädern von gleichem Durchmesser angestellt wurden, unzweifelhaft hervorgeht. Bei jenen Versuchen waren nämlich die Widerstände für 3715 und 3650 Kil. Belastung bezüglich = 55,75 und = 52,15 Kil.; bei diesen aber für 3990 und 3925 Kil. Belastung bezüglich = 55,02 und = 52,59 Kil. Setzt man nun den Widerstand der x ten Potenz der Belastung proportional, so daß man hat

$$3715^x : 3650^x = 55,75 : 52,15,$$

$$\text{und } 3990^x : 3925^x = 55,02 : 52,59;$$

so findet man aus diesen beiden Proportionen nach einander $x = 3,78$ und $x = 2,75$. Im Durchschnitt würde also hiernach der Widerstand in einem mehr als kubischen Verhältnisse mit der Belastung zunehmen, was freilich allen sonstigen Erfahrungen widerstreitet, die ein so auffallendes Zunehmen des Widerstandes nicht ergeben haben.

Ueberhaupt sind die vorstehenden Versuche wenig geeignet, über den Einfluß der Belastung auf die Größe des Widerstandes den gewünschten Aufschluß zu geben, da zu diesem Ende ein mehrfaches Abändern der Belastung in weiteren Grenzen, als es von Herrn Morin geschehen ist, nöthig gewesen wäre.

Nicht besser verhält es sich leider mit der Ausmittelung des Gesetzes, nach welchem sich der Widerstand an den Umfängen der Räder mit dem Durchmesser derselben ändert. In dieser Beziehung erlauben die Angaben der vorstehenden Tabelle, wenn man sie unbefangen betrachtet, nichts weiter zu schließen, als daß ganz allgemein der Widerstand mit dem Durchmesser der Räder abnimmt; ob dies nun aber nach dem von Coulomb aufgestellten, oder nach irgend einem anderen Gesetze geschieht, das läßt sich aus den Angaben der Tabelle, ohne ihnen Gewalt anzuthun, nicht mit Sicherheit erkennen. Wenn übrigens Herr Morin die in der letzten Spalte enthaltenen Widerstands-Coeffizienten als übereinstimmend genug ansieht, um durch sie das Coulomb'sche Gesetz zu bestätigen, so muß ich bemerken, daß bei einer solchen Uebereinstimmung auch noch viele andere Gesetze durch obige Versuche ihre Bestätigung finden könnten. Legt man z. B. die von mir (S. 165) aufgestellte Formel

$$F = \varphi \sqrt[3]{\frac{Q^4}{br^2}}$$

zu Grunde, um danach die von Morin aufgestellten Versuche zu berechnen, so ergeben sich für den Widerstands-Coeffizienten φ Zahlenwerthe, die nicht weiter von einander abweichen, als die Zahlenwerthe von A in der Tabelle. Es dürfte nicht überflüssig sein, dies für die erste und zweite Versuchsreihe näher darzuthun.

Um die Formel auf diese beiden Versuchsreihen, die mit einem zweirädrigen Fuhrwerke ange stellt worden sind, anzuwenden, verstehen wir unter F die zur Ueberwindung der wälzenden Reibung für beide Räder erforderliche Zugkraft nach Abrechnung aller Nebenhindernisse, unter r den Halb messer der Räder und unter Q den gesammten Druck beider Räder auf den Boden. Die Felgen breite b war bei allen Versuchen dieselbe, und kann daher weggelassen werden, so daß man also für den Widerstand eines Rades die Gleichung hat:

$$\frac{1}{2}F = \varphi \sqrt{\frac{Q^3}{r^2}} = \frac{\varphi}{2r} \sqrt[3]{Q^4 r}$$

woraus sich $\varphi = \frac{Fr^2 \cdot \sqrt[3]{2}}{\sqrt[3]{Q^4 r}}$ findet.

Nach dieser Formel sind die Zahlenwerthe berechnet, welche in nachstehender Tabelle der Ver gleichung wegen mit den von Morin gefundenen Zahlen A zusammengestellt sind.

N ^o	Bezeichnung und Zustand der Straße.	r. Met.	Q. Kilogr.	F. Kilogr.	A.	φ .	
1. Versuchs-Reihe.							
1		0,550	3865	93,23	0,0133	0,00130	
2	Stein-Chaussee von Metz nach Thionville; etwas feucht.	0,782	3715	55,75	0,0117	0,00104	
3		"	3650	52,15	0,0112	0,00099	
4		"	1,025	3990	55,02	0,0141	0,00117
5		"	"	3925	52,59	0,0137	0,00108
				Mittel	0,0128	0,00111	
2. Versuchs-Reihe.							
6		0,550	3865	314,67	0,0448	0,00439	
7	Chaussee von Thionville; 4 bis 5 Centim. dick neu mit Kies beschüttet.	0,782	3715	230,25	0,0485	0,00428	
8		"	1,025	3990	191,89	0,0489	0,00404
				Mittel	0,0474	0,00424	

Man bemerkt auf den ersten Blick, daß die Werthe von φ mindestens dieselbe Regelmäßigkeit darbieten, wie die von A, und daß man folglich das von mir aufgestellte Gesetz mit demselben Rechte wie das Coulomb'sche Gesetz als durch die Morin'schen Versuche bewiesen betrachten könnte. In der That sind aber die Versuche nicht so angeordnet, um daraus in Bezug auf den Einfluß der Belastung und des Radhalbmessers auf den Widerstand der wälzenden Reibung irgend eine Gesetzmäßigkeit folgern zu können, und dieser wichtige Punkt ist demnach vorläufig noch als unerledigt zu betrachten. Es ist recht sehr zu bedauern, daß Herr Morin, der von vielen dazu berufen und

/v

befähigt, und dem durch die liberale Unterstützung von Seiten seiner Regierung eine Gelegenheit geboten war, wie sie so bald nicht wiederkommen dürfte, diesem Punkte nicht die gehörige Aufmerksamkeit gewidmet hat.

Nächst der Belastung und dem Durchmesser der Räder ist die Felgenbreite b dasjenige Element, welches von entschiedenem Einfluß auf den in Rede stehenden Widerstand ist. Diesen Einfluß zu studiren, hat Herr Morin eine große Anzahl von Versuchen ausgeführt, welche in nachstehender Tabelle übersichtlich zusammengestellt sind. Zu diesen Versuchen bediente er sich des früher beschriebenen Apparates mit gußeisernem Wellbaume, den er mit Scheiben von 45 Centim. Stirnbreite, dicht an einander geschoben, belastete, um dadurch eine beliebige Aenderung in der Felgenbreite hervorbringen zu können. Der Apparat wurde durch vorgespannte Pferde im Schritt mit einer Geschwindigkeit von 1 bis 1,5 M. über verschiedene Wegstrecken fortgezogen. Die in der Tabelle enthaltenen Werthe des Widerstands-Coeffizienten A hat Morin natürlich nach der von ihm adoptirten Coulomb'schen Theorie berechnet. Die Reduction dieser Coeffizienten auf preuß. Maaß und Gewicht ist in einer besondern Spalte hinzugefügt.

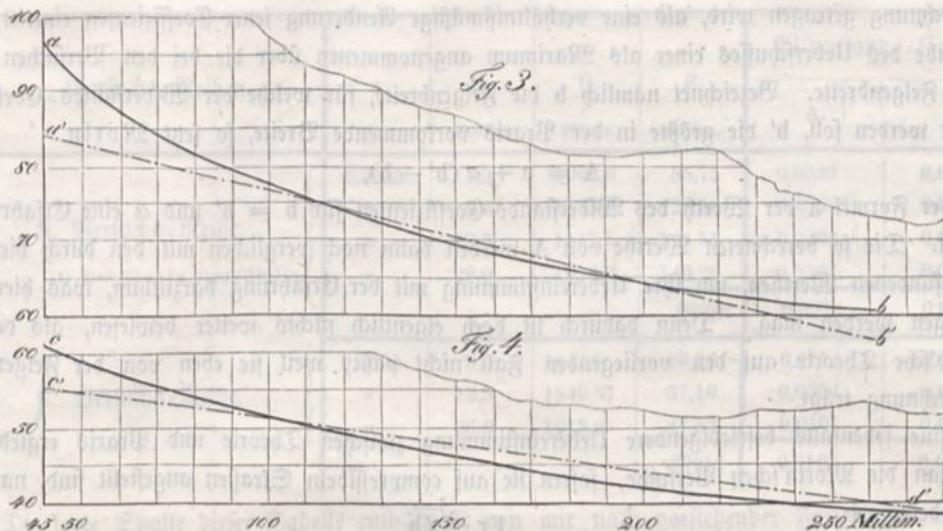
Tab. II. Versuche über den Einfluß der Felgenbreite.

Nr	Bezeichnung und Zustand der Straße.	Durchm. der Räder. Met.	Breite der Felgen. Centim.	Pressung auf den Boden. Kilogr.	Zugkraft auf den Horizont reducirt. Kilogr.	Werthe des Widerst.-Coëff.		Bemerkungen.
						A.	q.	
5. Versuchs-Reihe.		Apparat mit gußeisernem Wellbaume.						Mittel
1	Boden des Exercierhauses der Artillerie- u Genieschule in Metz; mit einem Gemenge a. Sand und Kies, in einer Dicke von 12 bis 15 Centim. neu überschüttet.	0,787	4,5	1045,6	252,75	0,0950	0,3027	v. 4 Versuchen.
2	"	"	9,0	1335,0	267,33	0,0791	0,2552	" 3 "
3	"	"	13,5	1441,1	270,70	0,0741	0,2361	" 5 "
4	"	"	18,5	1380,0	221,33	0,0630	0,2007	" 6 "
5	"	"	22,5	1664,5	259,33	0,0612	0,1950	" 6 "
6. Versuchs-Reihe.		Mit demf. Apparate.						
6	Boden des Polygons zu Metz, vor den Belagerungsbatterien; etwas feuchter Rasen und ein wenig weich.	0,787	4,5	1042,0	159,92	0,0603	0,1921	" 6 "
7	"	"	9,0	1335,0	209,20	0,0616	0,1963	" 5 "
8	"	"	13,5	1447,5	177,56	0,0478	0,1523	" 5 "
9	"	"	28,0	1958,0	204,67	0,0405	0,1290	" 3 "
7. Versuchs-Reihe.		Desgleichen.						
10	Boden des Hofes im Arsenal zu Metz; mit trockenem Rasen bedeckt.	0,787	9,0	1011,8	81,65	0,0318	0,1013	" 2 "
11		"	13,5	1025,7	77,05	0,0298	0,0981	" 2 "
12		"	26,0	1918,6	121,75	0,0246	0,0784	" 2 "
13		"	1,482	7,4 *)	2163,2	112,60	0,0383	0,1220
8. Versuchs-Reihe.		Desgleichen.						
14	Stein-Chaussée, die nach den Batterien des Polygons zu Metz führt; im guten Zustande, aber feucht.	0,787	4,5	1042,0	85,75	0,0323	0,1029	" 2 "
15	"	"	9,0	1335,0	128,50	0,0379 **)	0,1208	" 1 **) v. Morin ausgefchl.
16	"	"	13,5	1447,5	124,55	0,0332	0,1058	" 2 "
17	"	"	28,0	1958,2	149,25	0,0301	0,0959	" 2 "

Nr	Bezeichnung und Zustand der Straße.	Durchm. der Räder. Met.	Breite der Felgen. Centim.	Pressung auf den Boden. Kilogr.	Zugkraft auf den Horizont reduciert. Kilogr.	Werthe des Widerst. Coeff.		Bemerkungen.
						A.	q.	
9. Versuchs-Reihe.		Vierräderiger Artilleriewagen.						
18	Stein-Chaussée am Polygon zu Metz, im mittelmäßigen Zustande; 5 bis 8 Centim. dick mit zähem Mebel bedeckt, der an den Rädern hängen blieb.	{ 1,15 und 1,584 }	7,4	2746,0	198,50	0,0452	0,1440	Mittel v. 2 Versuchen
19			28,0	1958,2	215,00	0,0432	0,1376	" 2 " *) Mit dem Apparate.
10. Versuchs-Reihe.		Apparat mit Wellbaum.						
20	Straße von der Kelle des Forts Velle-Croix zu Metz, im guten Zustande; dicke Steindecke; nur sehr wenig Steine an der Oberfläche zu Tage liegend; trocken mit etwas Staub bedeckt.	0,787	9,0	1011,8	29,14	0,0114	0,0363	" 5 "
21			13,5	1549,57	37,10	0,0094	0,0300	" 8 "
22			26,0	1918,6	47,53	0,0101	0,0322	" 6 "
11. Versuchs-Reihe.		Desgleichen.						
23	Pflaster der Brücke des Arsenal, und der Rampe vor d. Artillerie-Schule, mit Sandstein v. Sierck gepflastert.	0,787	9,0	1011,8	24,8	0,0095	0,0303	" 5 "
24			13,5	1549,6	39,03	0,0100	0,0319	" 6 "
25			26,0	1918,6	40,22	0,0082	0,0261	" 4 "

Aus einer Vergleichung der in dieser Tabelle zusammen gestellten Werthe von A folgert Herr Morin, daß der Widerstand der wälzenden Reibung mit wenigen Ausnahmen abnimmt, wenn die Felgenbreite vergrößert wird. Eine Ausnahme hiervon bilden nur gepflasterte Straßen wie sie in den Städten vorkommen, wo der Widerstand unabhängig von der Breite der Radfelgen ist.

Um die Beziehung zwischen der Felgenbreite und der Größe des Widerstandes anschaulicher zu machen, nimmt Herr Morin eine graphische Darstellung zu Hülfe, indem er die in der Tabelle mitgetheilten Felgenbreiten als Abscissen und die entsprechenden Widerstände als Ordinaten aufträgt. Dadurch entsteht eine Curve, die durch ihren Lauf das Gesetz jener Abhängigkeit darstellt. Für die vorstehenden Versuchsreihen Nr. 5 bis 8, 10 und 11 sind diese Curven ab und cd in nachstehenden Figuren zu sehen. Fig. 3 repräsentirt die Ergebnisse der 5. Versuchsreihe, angestellt auf dem Boden des Exercierhauses zu Metz, der mit einer Lage Kiegsand bedeckt war, und Fig. 4 die Ergebnisse der 6. Versuchsreihe, die auf dem feuchten Rasen des Polygons der Artillerie ausgeführt worden ist.



Diese Figuren zeigen, daß die Ordinaten der Curven sehr stark zunehmen, sobald die zu Abseiffen genommenen Felgenbreiten unter 4,5 Centim. herabstinken. Herr Morin vermuthet daher, daß beide Curven Asymptoten haben, welche auf der Abseiffenare senkrecht stehen, was darauf hinweisen würde, daß für eine zu Null gewordene Felgenbreite der Widerstand unendlich groß ist. Nach der andern Richtung hin scheinen dagegen die Curven, nach Herrn Morin's Dafürhalten, entweder die Abseiffenare, oder eine mit derselben parallele Linie zur Asymptote zu haben, was dann anzeigen würde, daß der Widerstand sich mit der zunehmenden Felgenbreite im ersteren Falle einem verschwindenden, im andern aber, der jedoch wenig Wahrscheinlichkeit für sich hat, einem gewissen constanten Werthe unaufhörlich zu nähern streben. Die Gleichung der in Betracht gezogenen Curven, als Function der Felgenbreite b ausgedrückt, würde demnach von der Form sein:

$$F = \frac{M}{b^n},$$

in welcher M eine, von dem Durchmesser der Räder, von deren Pressung auf den Boden und von der Beschaffenheit des letzteren abhängige Größe, n aber ein constanter Exponent ist, der nur von der Beschaffenheit des Bodens abhängt. Dieses unmittelbar aus den Versuchen hervorgegangene Resultat hat durchaus nichts widersprechendes, scheint vielmehr ganz in der Natur der Sache begründet zu sein. Es stimmt mit der von mir aufgestellten Theorie vollkommen überein, die also hier auf eine sehr befriedigende Weise bestätigt wird.

Herr Morin betrachtet die Ergebnisse seiner Versuche nicht aus diesem Gesichtspunkte. Er scheint sich vor der Folgerung zu fürchten, daß mit $b = 0$ der Widerstand $F = \infty$, mit $b = \infty$ aber $F = 0$ werden soll; und in der Absicht, solchen Consequenzen zu entgehen, mißtraut er den Ergebnissen seiner eigenen Versuche, indem er diejenigen verwirft, die mit der angenommenen Theorie von Coulomb nicht übereinstimmen. In Bezug auf die übrigen begnügt sich der Autor, — indem er die Curven ab und cd durch die geraden Linien $a'b'$, $c'd'$ ausgleicht — empirische Näherungsformeln aufzustellen, welche die Werthe der Widerstands-Coeffizienten für die verschiedenartige Beschaffenheit der versuchten Straßen angeben sollen, und bei welchen von der Felgenbreite nur in so

weit Rechnung getragen wird, als eine verhältnismäßige Aenderung jener Coefficienten eintritt, nach Maaßgabe des Ueberschusses einer als Maximum angenommenen über die bei den Versuchen stattgehabte Felgenbreite. Bezeichnet nämlich b die Felgenbreite, für welche der Widerstands-Coeffizient bestimmt werden soll, b' die größte in der Praxis vorkommende Breite, so setzt Morin

$$A = a + \alpha (b' - b),$$

in welcher Formel a der Werth des Widerstands-Coeffizienten für $b = b'$ und α eine Erfahrungsgröße ist. Die so berechneten Werthe von A werden dann noch verglichen mit den durch die Versuche gefundenen Werthen, um ihre Uebereinstimmung mit der Erfahrung darzuthun, was hier aber übergangen werden mag. Denn dadurch ist doch eigentlich nichts weiter bewiesen, als daß die Coulomb'sche Theorie auf den vorliegenden Fall nicht paßt, weil sie eben von der Felgenbreite keine Rechnung trägt.

Eine jedenfalls befriedigendere Uebereinstimmung zwischen Theorie und Praxis ergibt sich, wenn man die Morin'schen Versuche, sofern sie auf compressibeln Straßen angestellt sind, nach der Formel berechnet:

$$\varphi = \frac{Fr \cdot \sqrt[3]{2b}}{\sqrt[3]{rQ^2}}$$

Um dies zu zeigen, habe ich mir die Mühe nicht verbrießen lassen, die erwähnte Berechnung für die in Tafel II zusammengestellten Versuche, mit Ausnahme zweier Versuchsreihen, durchzuführen. Ausgeschlossen ist nämlich die 9. und 11. Versuchsreihe; jene wegen der zweideutigen Angabe hinsichtlich der Raddurchmesser, und diese, wegen der gepflasterten Straße, bei welcher, was auch Herr Morin ganz richtig bemerkt, die Felgenbreite ohne Einfluß ist.

Nachstehende Tabelle enthält die Ergebnisse der obigen Berechnung:

Nr.	Versuchs-Reihen.	r. Mtr.	b. Centim.	Q. Kilogr.	F. Kilogr.	Widerstands-Coeffiz.	
						A.	φ .
1	5. Versuchs-Reihe.	0,3935	4,5	1045,6	252,75	0,0950	0,0335
2		"	9,0	1335,0	267,33	0,0791	0,0256
3		"	13,5	1441,1	270,70	0,0741	0,0289
4		"	18,5	1380,0	221,33	0,0630	0,0258
5		"	22,5	1664,5	259,33	0,0612	0,0251
					Mittel	0,0745	0,0278
6	6. Versuchs-Reihe.	0,3935	4,5	1042,0	159,92	0,0603	0,0169
7		"	9,0	1335,0	209,20	0,0616	0,0200
8		"	13,5	1447,5	177,56	0,0478	0,0175
9		"	28,0	1958,0	204,67	0,0405	0,0172
					Mittel	0,0520	0,0179
10	7. Versuchs-Reihe.	0,3935	9,0	1011,8	81,65	0,0318	0,0113
11		"	13,5	1025,7	77,05	0,0298	0,0120
12		"	26,0	1918,6	122,75	0,0246	0,0102
					Mittel	0,0287	0,0112

Nr	Versuchs-Reihen.	r. Mtr.	b. Centim.	Q. Kilogr.	F. Kilogr.	Widerstands-Coëffiz.		
						A.	P.	
14	8. Versuchs-Reihe.	0,3935	4,5	1042,0	85,75	0,0323	0,0091	
15		"	9,0	1335,0	128,50	0,0379*)	0,0123	
16		"	13,5	1447,5	124,55	0,0332	0,0123	
17		*) Von Morin ausgeschlossen	"	28,0	1958,2	149,25	0,0301	0,0125
		Mittel					0,0334	0,0116
20	9. Versuchs-Reihe.	0,3935	9,0	1011,8	29,14	0,0114	0,0040	
21		"	13,5	1549,57	37,10	0,0094	0,0034	
22		"	26,0	1918,6	47,53	0,0101	0,0040	
		Mittel					0,0103	0,0038

Die letzte Spalte dieser Tabelle enthält die von mir nach vorstehender Formel, die vorletzte Spalte aber die von Morin auf Grund der Coulomb'schen Theorie berechneten Werthe des Widerstands-Coëffizienten, jene für einen Centimeter Felgenbreite und, wie diese, für 1 Met. Halbmesser der Räder ausgedrückt. Eine Vergleichung der zusammengehörigen Zahlen beider Spalten wird sofort die Richtigkeit des vorhin Gesagten bestätigen, und es liegt darin ein Zeugniß für die Gültigkeit der von mir aufgestellten Theorie, welches um so unverfänglicher ist, als hier die Versuche keinesweges unter dem Einflusse der Theorie, zu deren Bestätigung sie dienen, angestellt worden sind.

Im Allgemeinen folgert Herr Morin aus vorstehenden Versuchen, und darin müssen wir ihm vollständig beipflichten, daß eine Verminderung des Widerstandes mit der zunehmenden Breite der Radfelgen nur auf elastisch-weichen, kompressiblen Straßen stattfindet; wogegen auf harten unelastischen, namentlich aber auf gepflasterten Wegen, der Widerstand von der Felgenbreite ganz unabhängig ist. Dabei macht der Autor mit Recht auch darauf aufmerksam, daß man für gewöhnlich nicht annehmen könne, beim Befahren der Straßen mit breitträdigen Lastwagen werde sich die Last immer auf die ganze Breite der Radfelgen vertheilen. Letztere berühren vielmehr die Oberfläche der Straßen in den meisten Fällen nur mit einem kleinen Theil ihrer Breite, was besonders dann der Fall ist, wenn die Radreifen ihre ursprünglich cylindrische Gestalt durch den längeren Gebrauch verloren und sich nach der Breite conver gelassen haben. Mit Rücksicht hierauf glaubt sich Herr Morin zu dem Schlusse berechtigt, daß es nur für weiche und sehr kompressible Straßen angemessen sei, den Radreifen eine Breite von 15 Centim. und darüber zu geben, wogegen es für gewöhnliche Steinhaustraßen als unnütz erscheine, die Breite von 10 bis 12 Centim. zu überschreiten, was um so mehr für gepflasterte Straßen als Regel gelten könne.

Diese Bemerkung des Autors bezieht sich nicht bloß auf die Größe der erforderlichen Zugkraft, in so fern letztere von der Felgenbreite abhängig ist, sondern sie hat nach seinem Dafürhalten eine gleiche Beziehung auf die Erhaltung der Chausseen, wobei die Belastung der dieselben befahrenden Frachtwagen mit in Betracht kommt. Der Autor glaubt nämlich, daß bei Feststellung des Frachttarifs gewöhnlich angenommene Princip der Proportionalität zwischen der Belastung eines Wagens und der Breite seiner Radfelgen sei für die Erhaltung der Straße mehr nachtheilig als

nüglich, für den öffentlichen Verkehr aber jedenfalls sehr belästigend. Denn die Berechtigung, den Frachtwagen nach Verhältniß seiner Felgenbreite zu belasten, habe in Frankreich dahin geführt, zweirädrige Wagen mit so breiten Felgen anzuwenden, daß man sie kraft der obigen Lizenz mit einer Last befrachten könne, die sonst nur bei vierrädrigen Wagen in Anwendung kam. Da nun trotz der großen Felgenbreite aus den angegebenen Gründen jedes Wagenrad immer nur mit einem Theil seiner Breite die Straße berührt, so konzentrierte sich der ganze Druck des Rades nur auf diesen Theil der Straße und treffe also sehr häufig auf nur einen oder vielleicht auf zwei Steine, die dann unter dem gewaltigen Drucke zermalmt würden. Aus diesem Grunde hält der Autor es für unnütz, bei der Befahrung gewöhnlicher Chaussees eine größere Felgenbreite als etwa 10 bis 12 Centim. ($3\frac{1}{2}$ bis $4\frac{3}{4}$ Zoll Preuß.) zu fordern.

Um den Einfluß der Geschwindigkeit, mit welcher ein Fuhrwerk fortbewegt wird, auf die Größe des Widerstandes am Umfange der Räder zu erforschen, hat Herr Morin eine große Anzahl von Versuchen auf verschiedenen Straßen angestellt. Die folgende Tabelle enthält die hauptsächlichsten Ergebnisse derselben im Auszuge.

Taf. III. Versuche über den Einfluß der Geschwindigkeit.

N ^o	Bezeichnung der Straße und deren Zustand.	Durchmesser der		Breite der Felgen. Centim.	Pressung auf den Boden. Kilogr.	Geschwindigkeit pr. Sec. Mtr.	Zugkraft parallel mit der Straße. Kilogr.	Werthe der Widerstands- Coëffizienten.		Bemerkungen.
		Vorrad. Mtr.	Hinter- räder. Mtr.					A.	q.	
12. Versuchs-Reihe. Apparat mit gußeisernem Wellbaume.										
1	Boden des Polygons zu	0,787	—	4,5	1042,0	1,405	163,75	0,0595	0,1896	Mittel von 4 Vers.
2	Reg; feuchte, etwas	"	—	"	"	2,803	167,83	0,0610	0,1944	" " 3 "
3	weiche Rasendecke.	"	—	9,0	1335,0	1,275	215,25	0,0635	0,2023	" " 2 "
4	"	"	—	"	"	3,380	197,50	0,0582	0,1854	" " 2 "
5	"	"	—	13,5	1447,5	1,353	176,10	0,0469	0,1494	" " 3 "
6	"	"	—	"	"	2,605	172,40	0,0459	0,1462	" " 2 "
13. Versuchs-Reihe. Derselbe Apparat.										
7	Boden des Polygons zu	1,582	—	7,4	2163,0	1,333	187,10	0,0642	0,2046	Mittel von 2 Vers.
8	Reg, auf 16 bis 18 Cent.	"	—	"	"	2,860	193,2	0,0656	0,2090	" " 1 "
9	mit Kies betragen.	"	—	"	"	4,000	212,0	0,0720	0,2294	" " 1 "
14. Versuchs-Reihe. Desgleichen.										
10	Straße der Kehle v. Fert	1,582	—	7,4	2163	1,33	181,5	0,0625	0,1991	Mittel von 3 Vers.
11	Velle-Croix, mit Kies	"	—	"	"	3,115	188,5	0,0646	0,2058	" " 2 "
12	bedeckter Seitenweg.	"	—	"	"	4,59	169,5	0,0582	0,1854	" " 1 "
15. Versuchs-Reihe. Desgleichen.										
13	Straße des Polygons zu	0,787	—	4,5	1042	1,30	85,0	0,0320	0,1019	Mittel von 1 Vers.
14	Reg, feucht, die Stein-	"	—	"	"	2,70	89,8	0,0380	0,1210	" " 1 "
15	decke fest und im guten	"	—	9,0	1335	1,34	124,5	0,0366	0,1166	" " 2 "
16	Zustande.	"	—	"	"	3,10	128,0	0,0378	0,1203	" " 1 "
17	Dieselbe Straße, naß und	"	—	13,5	1447,5	1,37	177,75	0,0473	0,1507	" " 2 "
18	mit Roter bedekt.	"	—	"	"	2,605	172,4	0,0459	0,1462	" " 2 "

Noch Taf. III. Versuche über den Einfluß der Geschwindigkeit.

A ²	Bezeichnung der Straße und deren Zustand.	Durchmesser der		Breite der Felgen. Centim.	Pres- sion auf den Boden. Kilogr. Met.	Ge- schwin- digkeit pr. Sec. Met. Killear.	Werthe der Widerstands- Coëffizienten.		Bemerkungen.	
		Vorder- räder. Met.	Hinter- räder. Met.				A.	q.		
		Mit einem Munitionswagen.								
19	16. Versuch = Reihe. Boden des Polygons zu Weg; durch das Schmelzen des Schnees sehr aufgeweicht.	1,150	1,585	7,2	2681	1,137	338,3	0,0834	0,2657	Mittel von 3 Verf.
20		"	"	"	"	2,15	357,1	0,0862	0,2746	" " 1 "
		Apparat mit gußeisernem Wellbaum.								
21	17. Versuch = Reihe. Fahrweg im Arsenal zu Metz, 10 - 12 Centim. dick neu m. Schutt be- tragen.	0,787	—	26,0	1918,6	1,235	231,25	0,0452	0,1440	Mittel von 2 Verf.
22		"	—	"	"	3,22	198,7	0,0408	0,1299	" " 1 "
		Mit dem Munitionswagen.								
23	18. Versuch = Reihe. Straße v. Thionville; mit Kiesel- steine bedeckt, die an der Oberfläche zu Tage lag. Sehr trocken, we- nig mit Staub bedeckt.	1,150	1,585	7,2	3022	1,50	45,9	0,0101	0,0321	Mittel von 2 Verf.
24		"	"	"	2550	1,658	34,8	0,0101	0,0321	" " 5 "
25		"	"	"	"	2,285	42,5	0,0125	0,0398	" " 2 "
26		"	"	"	2589,4	1,524	36,46	0,0095	0,0302	" " 5 "
27		"	"	"	2651	3,183	59,4	0,0149	0,0474	" " 3 "
		Mit einem 16pfündigen Kanon.								
28	19. Versuch = Reihe. Straße von Nancy, zwi- schen Metz und Mon- signy; mit kleinen Stei- nen an der Oberfläche im vollk. guten Zustand erhalten; sehr trocken, ohne Staub.	1,564	1,564	10,0	3715	1,263	55,73	0,0117	0,0372	Mittel von 3 Verf.
29		"	"	"	"	1,523	55,2	0,0118	0,0375	" " 3 "
30		"	"	"	"	2,447	65,73	0,0139	0,0442	" " 3 "
31		"	"	"	"	3,787	84,67	0,0178	0,0567	" " 3 "
		Mit demselben Kanon.								
32	20. Versuch = Reihe. Pflaster mit Sandstein v. Sierck in der Rue d'As- feld zu Metz.	1,564	1,564	10,0	3715	1,232	37,38	0,0079	0,0251	Mittel von 5 Verf.
33		"	"	"	"	1,553	46,13	0,0097	0,0309	" " 3 "
34		"	"	"	"	2,237	65,9	0,0139	0,0442	" " 3 "
35		"	"	"	"	3,128	94,33	0,0200	0,0637	" " 4 "
		Munitionswagen.								
36	21. Versuch = Reihe. Straße von Thionville; neu beschotterter Metz- beweg; 4 bis 5 Cen- tim. mit Grand bedeckt.	1,150	1,585	7,2	3022	1,42	250,9	0,0544	0,1733	Mittel von 2 Verf.
37		"	"	"	"	2,64	256,3	0,0567	0,1806	" " 1 "
38		"	"	"	"	3,365	251,1	0,0555	0,1768	" " 2 "
39		"	"	"	"	4,00	267,4	0,0590	0,1879	" " 1 "
		Apparat mit Wellbaum.								
40	22. Versuch = Reihe. Pflaster mit Sandstein v. Sierck; Rampe vor der Artillerieschule.	0,787	—	13,5	1549,6	1,197	37,70	0,0095	0,0302	Mittel von 3 Verf.
41		"	—	"	"	2,68	71,35	0,0182	0,0579	" " 2 "
		Munitionswagen.								
42	23. Versuch = Reihe. Sandsteinpflaster in der Rue d'Asfeld zu Metz.	1,150	1,585	7,2	2440,8	1,645	37,25	0,0102	0,0324	Mittel von 2 Verf.
		Giltwagen der Messagerie générale.								
43	24. Versuch = Reihe. Straße von Thionville; Steindecke i. guten Zu- stande; m. Koth bedeckt.	0,880	1,400	11,0	5197,5	1,388	135,00	0,0141	0,0449	Mittel von 4 Verf.
44		"	"	"	2500	2,978	92,543	0,0398	0,1268	" " 8 "

Noch Taf. III. Versuche über den Einfluß der Geschwindigkeit.

N ^o	Bezeichnung der Straße und deren Zustand.	Durchmesser der		Breite der Felgen. Centim.	Pres- sung auf den Boden Atmear. Met	Ge- schwin- digkeit pr. Sec Met	Zugfest parallel mit der Straße.	Werthe der Widerstands- Coëffizienten.		Bemerkung.
		Vorder- Räder. Met.	Hinter- Räder. Met.					A.	q.	
25. Versuchs-Reihe. Mit einem Kaleschwagen.										
45	Straße von Thionville.	0,922	1,300	6,0	1425	1,55	42,65	0,0162	0,0516	Mittel von 2 Verf.
46	Desgl.	"	"	"	"	2,89	49,20	0,0186	0,0592	" " 2 "
47	Desgl.	"	"	"	"	3,62	52,825	0,0150	0,0477	" " 2 "
26. Versuchs-Reihe. Gilwagen der Messagerie générale.										
48	Straße v. Metz n. Nancy,	0,900	1,400	11,0	4597	1,43	128,9	0,0159	0,0506	Mittel von 4 Verf.
49	zw. Jouy u. Montigny;	"	"	"	"	2,353	145,93	0,0180	0,0573	" " 4 "
50	gut erhaltene Chaussee,	"	"	"	"	3,64	161,43	0,0199	0,0634	" " 4 "
51	vom Regen genäßt, mit wenig Schmutz bedeckt.	"	"	"	4402	1,27	98,75	0,0126	0,0401	" " 2 "
52	Dieselbe Straße, etwas feucht.	"	"	"	4532	2,43	103,95	0,0130	0,0414	" " 2 "
53		"	"	"	4597	3,75	119,75	0,0148	0,0471	" " 2 "
27. Versuchs-Reihe. Mit demselben Gilwagen.										
54	Nebenweg an derselben	0,900	1,400	11,0	4402	1,45	162,85	0,0211	0,0672	Mittel von 2 Verf.
55	Chaussee, mit Geleisen von 5—6 Centim.	"	"	"	4597	2,70	181,03	0,0224	0,0713	" " 3 "
56	Derselbe Nebenweg, mit	"	"	"	"	1,35	191,7	0,0236	0,0751	" " 1 "
57	Geleisen v. 10—15 Cm.	"	"	"	"	2,97	222,8	0,0276	0,0879	" " 1 "
28. Versuchs-Reihe. Desgleichen.										
58	Straße von Thionville;	0,900	1,400	11,0	2300	1,525	45,18	0,0106	0,0338	Mittel von 4 Verf.
59	etwas feucht, doch ohne Schmutz; Steindecke	"	"	"	3700	1,50	62,80	0,0091	0,0290	" " 1 "
60	zu Tage liegend.	"	"	"	3830	1,45	67,73	0,0095	0,0303	" " 3 "
29. Versuchs-Reihe. Desgleichen.										
61	Seitenweg ders. Straße;	0,900	1,400	11,0	2300	1,38	185,05	0,0433	0,1380	Mittel von 2 Verf.
62	auf 4 bis 5 Ctm. neu mit Kies betragen.	"	"	"	5165	2,38	452,9	0,0478	0,1523	" " 1 "
63		"	"	"	2300	4,50	197,1	0,0462	0,1472	" " 1 "
30. Versuchs-Reihe. Desgleichen.										
64		0,900	1,400	11,0	4441	1,265	65,55	0,0083	0,0264	Mittel von 2 Verf.
65	Sandsteinstreifer der Rue	"	"	"	4402	1,577	70,6	0,0090	0,0286	" " 3 "
66	d'Asfeld zu Metz.	"	"	"	4597	2,443	86,15	0,0106	0,0337	" " 4 "
67		"	"	"	"	3,558	118,1	0,0146	0,0465	" " 4 "
31. Versuchs-Reihe. Gilwagen, in 6 Federn hängend.										
68	Stanislausstraße zu Pa-	0,84	1,18	8,0	3145	1,345	77,55	0,0118	0,0375	Mittel von 2 Verf.
69	ris, mit Sandstein von	"	"	"	3210	1,654	83,27	0,0244	0,0777	" " 2 "
70	Fontainebleau gepflas-	"	"	"	"	2,335	93,29	0,0135	0,0430	" " 2 "
71	tert, im guten Stande.	"	"	"	"	3,257	110,71	0,0164	0,0522	" " 3 "

Noch **Taf. III.** Versuche über den Einfluß der Geschwindigkeit.

N ^o	Bezeichnung der Straße und deren Zustand.	Durchmesser der Räder.		Breite der Felgen. Centim.	Pres- sion auf den Boden. Kilogr.	Ge- schwin- digkeit pr. Sec. Met.	Zugkraft parallel mit der Straße Kilogr.	Werthe der Widerstands- Coefficienten.		Bemerkungen.
		Vorder- Räder. Met.	Hinter- Räder. Met.					A.	q.	
32. Versuchs-Reihe.										
Derselbe Wagen, nicht in Federn hängend.										
72	Dasselbe Pflaster.....	0,84	1,18	8,0	3210	1,275	87,29	0,0129	0,0410	Mittel von 2 Vers.
73	Desgleichen	"	"	"	3145	1,60	109,04	0,0165	0,0525	" " 1 "
74	Desgleichen	"	"	"	"	2,17	134,52	0,0201	0,0640	" " 2 "
33. Versuchs-Reihe.										
Derselbe Wagen, in 6 Federn hängend.										
75	Dasselbe Pflaster.....	1,18	1,50	8,0	3355,9	1,10	58,00	0,0115	0,0366	Mittel von 2 Vers.
76	Desgleichen	"	"	"	"	1,61	62,00	0,0123	0,0391	" " 1 "
77	Desgleichen	"	"	"	3420	2,50	70,50	0,0133	0,0423	" " 3 "
78	Desgleichen	"	"	"	"	3,185	81,20	0,0153	0,0487	" " 2 "
79	Desgleichen	"	"	"	"	1,15	55,80	0,0105	0,0334	" " 2 "
80	Desgleichen	"	"	"	"	1,625	62,25	0,0117	0,0372	" " 2 "
81	Desgleichen	"	"	"	"	2,405	72,65	0,0137	0,0436	" " 2 "
82	Desgleichen	"	"	"	"	3,28	91,233	0,0171	0,0544	" " 3 "

Herr Morin folgert aus vorstehenden Versuchen, daß bei den nicht in Federn hängenden Wagen, wie die zwei und vierrädrigen Frachtwagen, Laffetten u., der Widerstand am Umfange der Räder, wenn dieselben auf weichen compressiblen Bahnen, auf mehr oder minder feuchten Rasendecken, auf Sandwegen, neu bekiesigten Straßen und Sommerwegen u. fortbewegt werden, von der Geschwindigkeit der Bewegung unabhängig ist. Diese Unabhängigkeit hört dagegen auf, sobald die genannten Fuhrwerke auf festen Straßen mit unebenen Oberflächen fortgehen, wie z. B. auf gepflasterten Straßen, wo in jedem Augenblick Stöße entstehen, die dem Fuhrwerke einen Theil seiner Geschwindigkeit rauben.

Um das Gesetz kennen zu lernen, nach welchem der Widerstand auf den zuletzt genannten Straßen sich mit der Geschwindigkeit ändert, nimmt Herr Morin eine graphische Darstellung zu Hülfe, indem er die Geschwindigkeiten als Abscissen, die zugehörigen Widerstände aber als Ordinaten aufträgt. Da nun die so erhaltenen Punkte sehr nahe in eine gerade Linie zu liegen kommen, so schließt der Autor, daß die Aenderungen des Widerstandes denen der Geschwindigkeit proportional sind. Demgemäß stellt derselbe für den Widerstands-Coeffizienten A die Formel auf:

$$A = \gamma + \delta (v - 1)$$

in welchen γ den Werth jenes Coefficienten für die als Ausgangspunkt genommene Geschwindigkeit von 1 Mtr. pro Sekunde und δ einen konstanten, von der Beschaffenheit des Fuhrwerkes und der Straße abhängigen Faktor bedeutet.

Die obige Formel läßt sich noch etwas einfacher darstellen, wenn man rechts die Klammern auflöst und $\gamma - \delta = \beta$ setzt, wo dann entsteht:

$$A = \beta + \delta v.$$

Die Größe β bedeutet hier den Werth des Widerstands-Coeffizienten für $v = 0$, also für den

Fall, wenn das Fuhrwerk aus dem Zustande der Ruhe langsam in Bewegung gesetzt werden soll. Nachstehende Zusammenstellung läßt die Werthe von A ersehen, wie sie der Autor für die von ihm geprüften Fuhrwerke und Straßen angiebt, wobei der Halbmesser der Räder 1 Meter beträgt. Zur Bequemlichkeit der Leser habe ich dieselben auf preussisches Maaß reducirt, so nämlich, daß die in der letzten Spalte angegebenen Ausdrücke den fraglichen Widerstand für 1 Fuß Halbmesser geben, wenn die Geschwindigkeit v ebenfalls in preussischen Fußsen genommen wird.

Gepprüftes Fuhrwerk.	Bezeichnung der Straße und deren Beschaffenheit.	Werthe des Widerstands-Coëff. A nach den Angaben v. Morin.	Reduction dieser Werthe auf preuß. Maaß und Gewicht.
Artilleriewagen mit vier Rädern.	{ Straße von Metz nach Thionville; trocken und im guten Zustande; mit Kieseldecke an der Oberfläche.	0,0051 + 0,0031 .v.	0,01625 + 0,0031 .v.
Laffete eines 16pfündig. Belagerungsgeschüzes.	{ Straße von Metz nach Nancy, nahe bei Montigny; trocken und im vollk. Zustande; mit kleinen Kieseln unterhalten.	0,0089 + 0,0021 .v.	0,02836 + 0,0021 .v.
Versuchsapparat in Form eines zweirädrigen Karrens.	{ Rampe vor der Artillerieschule zu Metz; mit Sandstein von Sierck gepflastert, im guten Zustande.	0,0025 + 0,0059 .v.	0,00797 + 0,0059 .v.
Laffete eines 16pfündigen Belagerungsgeschüzes.	{ Dasselbe Pflaster in der Rue d'Asfeld zu Metz.	0,0006 + 0,0060 .v.	0,00191 + 0,0060 .v.
Artilleriewagen.....	{ Desgleichen.	0,0012 + 0,0054 .v.	0,00382 + 0,0054 .v.
Wagen der Messagerie générale mit abgesteiften Federn.	{ Pflaster aus Sandstein von Fontainebleau in der Rue Stanislas zu Paris.	0,0013 + 0,0093 .v.	0,00414 + 0,0093 .v.

Äehnliche Folgerungen zieht Herr Morin aus den von ihm angestellten Versuchen mit Wagen, die in Federn hingen. Auch hier zeigte sich der Widerstand auf den längs der Chaussees fortlaufenden Sommerwegen als unabhängig von der Geschwindigkeit, selbst wenn die Geleise 6, 10 bis 15 Centm. Tiefe hatten; und da dies auch dann noch der Fall war, wenn eins der Räder auf der Steindecke der Chaussee lief, so muß es sich um so mehr für alle weichen und sandigen Wege also verhalten. Dagegen haben die Versuche auf Chaussees, bei welchen die Kieseldecke an der Oberfläche zu Tage lag oder doch nur wenig mit Staub bedeckt war, ein Zunehmen des Widerstandes mit der Geschwindigkeit ergeben, wie aus folgender Zusammenstellung hervorgeht:

Eilwagen der Messagerie générale zu Paris.

Straße von Metz nach Thionville, naß und mit Moder bedeckt, Kieseldecke an der Oberfläche.

Nach Morin:

Auf preuß. Maaß reducirt:

$A = 0,00935 + 0,00345 .v;$

$\varphi = 0,02979 + 0,00345 .v.$

Kaleschwagen; auf derselben Straße.

$A = 0,0133 + 0,0019 .v;$

$\varphi = 0,04238 + 0,0019 .v.$

Gilwagen der Messagerie générale auf der Straße von Metz nach Nancy, naß, mit etwas Moder bedeckt, die Kieseldecke an der Oberfläche theilweise sichtbar.

Nach Morin:

Auf preuß. Maß reducirt:

$$A = 0,0134 + 0,0018. v;$$

$$\varphi = 0,04270 + 0,0018. v.$$

Derselbe Wagen auf derselben Straße, fast trocken.

$$A = 0,0112 + 0,0010. v.$$

$$\varphi = 0,03569 + 0,0010. v;$$

Derselbe Wagen auf dem Sandsteinpflaster der Rue d'Asfeld.

$$A = 0,0048 + 0,0028. v;$$

$$\varphi = 0,01529 + 0,0028. v.$$

Wagen der Messag. générale in sechs Federn hängend, Sandsteinpflaster der Rue Stanislas zu Paris.

$$A = 0,0081 + 0,0023. v;$$

$$\varphi = 0,02581 + 0,0023. v.$$

In Bezug auf den Einfluß der elastischen Aufhängung in Federn bemerkt Herr Morin, daß ein solcher auf weichen und kompressiblen Straßen nicht stattfindet und auch auf harten Steinbahnen beim Schrittfahren nur gering sei. Dagegen lassen die Versuche ersehen, daß auf Straßen der zuletzt genannten Art, namentlich aber auf Steinpflaster, das von der Geschwindigkeit abhängige Glied im Ausdrucke von A desto kleiner wird, je elastischer die Aufhängung ist. Dieser Schluß findet besonders in den Versuchen mit dem Wagen der Messagerie générale auf dem pariser Straßenpflaster seine Begründung; denn als die Elasticität der Aufhängung durch das Absteifen der Federn aufgehoben war, ergab sich jenes zweite Glied der Formel gleich 0,0093.v, während dasselbe sich auf 0,0023.v reducirte, sobald man die Wagenfedern frei spielen ließ.

Als das durchschnittliche Ergebnis aller vorhergehenden Versuche, die sowohl über den Einfluß der Felgenbreite als über den der Geschwindigkeit auf die Größe des Widerstandes angestellt worden sind, theilt Herr Morin folgende Zusammenstellung mit. Die darin angegebenen Zahlen geben die Werthe des Widerstands-Coeffizienten A auf verschiedenen Straßen für die Geschwindigkeit von einem Meter per Sek.*) und für die Felgenbreite von 7, 12 und 17 Centm., welche als die äußersten Grenzen der in der Praxis üblichen Breiten anzusehen sind. — Die Reduction dieser Coeffizienten auf dem Halbmesser der Räder = 1 pr. Fuß ist daneben angegeben.

Bezeichnung der Straße.	Felgenbreiten.					
	7 Centim. = 2 $\frac{1}{2}$ Pr.		12 Centim. = 4 $\frac{1}{2}$ Pr.		17 Cent. = 6 $\frac{1}{2}$ Pr.	
	Nach Morin.	Reducirt.	Nach Morin.	Reducirt.	Nach Morin.	Reducirt.
Kilogr.	Pr. Pfd.	Kilogr.	Pr. Pfd.	Kilogr.	Pr. Pfd.	
Feiner Sand mit Kies gemengt, 10—15 Cent. dick.	0,0809	0,2578	0,0738	0,2351	0,0666	0,2122
Feuchte Rasendecke auf weichem Grunde.....	0,0529	0,1686	0,0494	0,1574	0,0458	0,1459
Trockne Rasendecke auf festem Grunde.....	0,0337	0,1074	0,0314	0,1001	0,0292	0,0930
Gebrochener Kiesweg; feucht, wenig befahren....	0,0323	0,1029	0,0320	0,1020	0,0316	0,1007
Ghaussirte Straße, trocken, im guten Zustande.	0,0104	0,0331	0,0101	0,0322	0,0099	0,0315
Gepflast. Straße, mit quarzigem Sandst. v. Sierck	0,0076	0,0242	0,0076	0,0242	0,0076	0,0242
Desgl. mit Sandstein von Fontainebleau.....	0,0104	0,0331	0,0104	0,0331	0,0104	0,0331

*) Die mittlere Geschwindigkeit eines Pferdes im Schritt beträgt ohngefähr 1,4 M. = 4,5 Pr. Fuß pr. Sek.

Herr Morin theilt noch Versuche mit, die er angestellt hat, um den Einfluß der Neigung der Zugkraft gegen die Richtung der Straße auf den Widerstand der Fuhrwerke zu ermitteln, hauptsächlich aber, um die Uebereinstimmung der von ihm aufgestellten Formeln mit der Erfahrung nachzuweisen. Diese Versuche wurden auf horizontalem Boden mit einem 16pfündigen Belagerungsgeschütz angestellt, bei welchem die Einrichtung so getroffen war, daß man die Deichsel des Vorderwagens, in deren Richtung die Zugkraft wirkte, unter verschiedenen Winkeln von 1° 35' bis 13° 30' gegen den Horizont neigen konnte.

Die Vorder- und Hinterräder waren gleich, denn sie hatten 0,782 Mtr. Halbmesser bei 10 Centm. Felgenbreite, und ebenso war die Belastung bei allen Versuchen gleich groß, nämlich: = 3715 Kilogr. Der Halbmesser der Achschenkeln betrug 3,8 Centm., und für die Reibung in der Nabe wird der Coefficient = 0,05 angenommen. Die Versuche geschahen auf dem Boden des Polygons zu Metz, dessen Rasendecke etwas feucht war, indem man das Geschütz mit seinem Stücke eine Länge von 157 Mtr. im Schritt durchlaufen ließ. Folgendes sind die Ergebnisse:

Taf. IV. Versuche über den Einfluß der Neigung der Zugkraft.

Nr	Neigung der Zugkraft gegen den Horizont.		Größe der Zugkraft unter dieser Neigung.	Berechneter Widerstand		Werthe der Widerstands-Coeffiz.		Bemerkungen.
	Gr.	Min.		der Achsenreibung.	der wälzenden Reibung.	A.	q.	
	Gr.	Min.	Kilogr.	Kilogr.	Kilogr.			
1	1	35	175,17	7,25	167,88	0,0356	0,1134	Mittel von 3 Versuchen. Desgleichen. Desgleichen.
2	3	35	175,27	7,20	167,70	0,0354	0,1128	
3	6	30	180,27	7,15	171,62	0,0364	0,1160	
4	8	30	176,00	7,13	167,10	0,0355	0,1131	Desgleichen.
5	11	—	176,75	7,10	167,50	0,0354	0,1128	Mittel von 2 Versuchen. " " 3 "
6	13	30	163,90	7,07	149,25	0,0318	0,1013	
				Mittel =		0,0350	0,1115	

Aus der Uebereinstimmung der Werthe von A, welche für verschiedene Neigungen der Zuglinie gegen den Horizont aus den Versuchen berechnet worden sind, schließt der Autor auf die Richtigkeit der bei der Berechnung zum Grunde gelegten Theorie. Dieselbe giebt ihm ferner noch Anlaß zu der Folgerung, daß die vortheilhafteste Richtung der Zugkraft durch die Formel:

$$\text{Tang. } \alpha = \frac{A + 0,96 \cdot \mu \rho}{r - 0,4 \cdot \mu \rho}$$

bestimmt werde, wenn A der Widerstandscoeffizient der wälzenden, μ der der Achsenreibung, r der Halbmesser des Rades und ρ der der Achschenkeln ist. Bei dem 16pfündigen Geschütz, mit welchem die vorstehenden Versuche gemacht wurden, war $r = 0,782^m$, $\rho = 0,038^m$ und die beiden Coeffizienten werden bezüglich $A = 0,0356$ und $\mu = 0,05$ angenommen. Daraus findet der Autor

$$\text{Tang. } \alpha = 0,0503 = \frac{1}{19,9}$$

Für eine Steinhauflsee wird $A = 0,015$ angenommen, und demgemäß gefunden:

$$\text{Tang. } \alpha = 0,024 = \frac{1}{41,5}$$

welche Neigung als diejenige bezeichnet wird, die in Frankreich beim Transport der Geschütze auf Chausseen üblich sei. Indes macht Herr Morin hierzu die Bemerkung, daß Aenderungen in der Neigung der Zugkraft in der Regel nur einen geringen Einfluß auf die Größe der letzteren haben. Denn der trigonometrische Ausdruck jener Neigung hängt hauptsächlich von dem Werthe des Quotienten $\frac{A}{r}$ ab, und dieser ist innerhalb der Grenzen, die ihn gewöhnlich einschließen, nur klein und kann daher keinen großen Einfluß auf die Zugkraft äußern.

Folgende vergleichende Versuche sind endlich angestellt worden, zur Ermittlung des Einflusses, den die elastische und unelastische Aufhängung der Wagen sowohl auf die Zugkraft als auf die Abnutzung der Straße ausübt. Hierzu bediente sich Morin eines in Federn hängenden Postwagens (Diligence) und eines Artillerie-Wagens gewöhnlicher Art, die er auf einer zu dem Versuch ausgewählten Strecke des Sommerweges der Chaussee von Metz nach Thionville etwa 140 mal hin- und hergehen ließ. Bei diesen beiden Wagen fanden folgende Dimensionsverhältnisse statt:

	Postwagen.	Artilleriewagen.	
Durchmesser der {	Vorderräder	0,900 Mtr.	1,150 Mtr.
	Hinterräder	1,374 =	1,585 =
Mittlerer Durchmesser der Achsfenkeln	0,067 =	0,063 =	
Breite der Radfelgen	0,069 =	0,066 =	

Beide Fuhrwerke waren so beladen, daß sie ganz gleiche Gewichte hatten; jedes von ihnen wog nämlich 3050 Kilogr. Eben so waren die Geschwindigkeiten gleich, welche durchschnittlich 1,4 Mtr. per Sek. betragen. Unter diesen Umständen wurde die erforderliche Zugkraft für den ersten Wagen = 129 Kil., für den zweiten = 105 Kil. gefunden, während die Achsenreibung bei beiden 11,9 Kil. betragen hat. Mithin bleibt für den Widerstand am Umfange der Räder bezüglich 117,1 Kil. und 93,1 Kil. übrig, woraus Morin den Widerstands-Coeffizienten findet:

für den Postwagen $A = 0,0245$ } ausgedrückt für einen Radhalbmesser von 1 Meter.
 = = Artilleriewagen $A = 0,0195$ }

Es geht hieraus hervor, daß der Postwagen einen etwas größeren Widerstand erlitten hatte, als der Artilleriewagen, und außerdem ergab eine genaue Untersuchung der befahrenen Wegstrecken, daß dieselben von jenem Wagen mehr angegriffen worden waren, als von diesem. Inzwischen blieb doch zweifelhaft, inwiefern diese Wirkungen der Elasticität und nicht vielleicht der stattgehabten Verschiedenheit der Raddurchmesser zuzuschreiben sein möchte, da bekanntlich kleinere Räder die Straßen mehr angreifen als große Räder.

Um in dieser Beziehung jeden Zweifel zu beseitigen, wurden die folgenden Versuche angestellt wobei man sich eines und desselben Postwagens bediente, das eine Mal mit abgesteiften, das andere Mal mit elastischen Federn, während alles Uebrige in beiden Fällen gleich war.

Das ganze Gewicht des Wagens betrug nämlich, einschließlic der darin sitzenden Beobachter, 4597 Kilogr. und die Breite der Felgen war = 11 Centm. Der Wagen war mit vier Pferden bespannt und wurde über die 300 Metr. lange Strecke des Sommerweges der vorhin genannten Chaussee durchschnittlich 315 mal fortbewegt, wobei eine Geschwindigkeit von $1\frac{1}{2}$ Mtr. per Sekunde stattfand.

Zur Ueberwindung der Achsenreibung bringt der Autor durchgängig eine Kraft von 12 Kil. in Rechnung, welche von der ganzen Zugkraft, die bei den Versuchen nach horizontaler Richtung erforderlich war, in Abzug kömmt, um den in der Tabelle angegebenen Widerstand der wälzenden Reibung am Umfange der Räder zu erhalten.

Taf. V. Versuche über den Einfluß der Aufhängung.

Beschaffenheit der Straße.	Mit abgesteiften Federn				Mit elastischen Federn				Bemerkungen.
	Zugkraft parallel der Bahn.	Wider- stand der wälzenden Reibung.	Werthe d. Wider- stands-Coeffiz.		Zugkraft parallel der Bahn.	Wider- stand der wälzenden Reibung.	Werthe d. Wider- stands-Coeffiz.		
			A	q.			A.	q.	
	Kilogr.	Kilogr.			Kilogr.	Kilogr.			
Masse Geseife; theilweise mit zähem Kothse er- fällt.	263,7	251,7	0,0326	0,1039	237,0	225,0	0,0292	0,0930	Mittel von je 3 Versuchen.
Trockne Straße; nur in den Geseisen etwas feucht und kothig.	206,4	194,4	0,0252	0,0803	195,2	183,2	0,0234	0,0746	Desgleichen.
Etwas feuchte Straße	212,3	200,3	0,0259	0,0825	200,9	188,9	0,0246	0,0784	Mittel von 6 und 5 Versuchen.
		Mittel	0,0279	0,0889		Mittel	0,0257	0,0820	

Die Ergebnisse dieser mit aller Sorgfalt angestellten Versuche geben nun unzweifelhaft zu erkennen, daß der elastische Wagen unter übrigens gleichen Umständen einen entschieden geringeren Widerstand erlitten hat als der unelastische, und in Uebereinstimmung hiemit fand man, daß im ersten Falle auch eine geringere Abnutzung der Fahrbahn stattgefunden hatte, als im letzten. Damit ist dann, nach der Ansicht des Hrn. Morin, zugleich der Beweis geliefert, daß die entgegengesetzten Resultate der vorhergehenden Versuche mit dem in Federn hängenden Postwagen und dem nicht elastischen Artilleriewagen einzig und allein der beträchtlichen Differenz im Durchmesser der Räder beider Fahrzeuge zugeschrieben werden müsse.

Im Allgemeinen glaubt Herr Morin sich zu schließen berechtigt:

1) daß die in Federn hängenden Wagen, im Trabe gefahren, die Straßen nicht so stark beschädigen als die unelastischen Wagen beim Fahren im Schritt, alle übrigen Umstände gleich gesetzt. Die Chaussée-Verwaltung sollte daher im Interesse der Erhaltung der Straßen jene Art Fuhrwerke durch Gestattung schwereren Ladungen vorzugsweise begünstigen; diese dagegen, sobald sie Trab fahren wollen, gänzlich verbieten, oder sie doch wenigstens allmählich außer Gebrauch zu bringen suchen.

2) Die Zerstörung der Straßen steht mit der Höhe der Räder in einer solchen Beziehung, daß die kleinen Räder eine viel stärkere Abnutzung der Fahrbahn hervorbringen, als die großen. Herr Morin hält es daher dem Interesse des theilhaftigen Publikums wie dem der Verwaltung für gleich zuträglich, auf den Gebrauch möglichst großer Räder bei den Frachtfuhren hinzuwirken, was nach seiner Meinung am besten zu erreichen wäre, wenn für den kleinsten zulässigen Raddurchmesser eine hinlänglich hohe Grenze vorgeschrieben, und zugleich die Ladung so normirt würde, daß sie in einem gewissen Verhältniß mit der Größe des Durchmessers zunehmen dürfe.

Zur weitem Begründung dieser Schlüsse wird noch auf die einspännigen Wagen der Franche comté mit vier Rädern hingewiesen, welche bei 1,1 bis 1,3 Meter (3' 6" bis 4' 2" Preuß.) Durchmesser der Vorderräder in ebenen Gegenden 1000 bis 1100 Kil. und darüber laden, während die mehrspännigen gewöhnlichen Frachtwagen bei nur 0,8 bis höchstens 0,9 Meter (2' 6½" bis 2' 10") Durchmesser auf denselben Straßen nicht mehr als 7 bis 800 Kilog. Ladung auf jedes Pferd fortschaffen. Auch bei der Construction der neuen Artilleriewagen in Frankreich ist der Gebrauch hoher Räder eingeführt, und zwar hat man den Durchmesser derselben beim Feldgeschütz auf 1,482 M. (4' 8½" Pr.), beim Belagerungsgeschütz aber auf 1,562 M. (circa 5' Pr.) festgestellt.

Nachstehende Tabelle enthält die Ergebnisse einiger andern Versuche, welche Morin noch auf mehreren Straßen mit Rücksicht auf deren Beschaffenheit, so wie auf den Bohlenbelag einiger Brücken angestellt hat.

Taf. VI. Versuche über den Widerstand auf verschiedenen Straßen.

Bezeichnung und Zustand der Bahn.	Angewendetes Fahrzeug.	Durch- messer der Räder. Metr.	Breite der Felgen. Centim.	Pressung auf den Boden. Kilogr.	Wider- stand am Umfang der Räder. Kilogr.	Werthe der Widerstands- Coëffizienten		Bemer- kungen.
						A.	q.	
Straße der Kelle des Forts Velle-Croix. Steinbahn i. guten Zustande, genäßt u. mit Schmutz bedeckt; nur wenig Steine an der Ober- fläche sichtbar.....	Apparat mit gußeisernem Wellbaume.	0,787	13,7	1025,7	40,1	0,0155	0,0494	Mittel von 6 Versuch.
	Derselbe Apparat mit Rädern von einem 12pfündig. Feldge- schütz.....	1,482	7,4	2163,2	44,1	0,0150	0,0478	3 "
Dieselbe Straße an einer zer- fahrenen Stelle, wo die Steine bloß lagen; schmutzig.	Desgleichen.	1,482	7,4	2163,2	85,0	0,0289	0,0921	5 "
Bohlenbelag der Hängebrücke nach der Insel Chamblère zu Metz.....	Desgleichen.	1,482	7,4	2163,2	35,2	0,0120	0,0382	2 "
Sommerweg der Straße von Lhionville, 13 Centim. hoch mit nicht gebahntem Schnee bedeckt.....	Vierräderiger Muniz- tionswagen.....	1,15 u. 1,584	7	2681,0	164,4	0,0402	0,1281	4 "
Dieselbe Straße, in der Mitte des Steindammes auf dem gebahnten Schnee.....	Desgleichen.	dito	7	2746,0	145,8	0,0352	0,1122	3 "

Herr Morin beschließt die vorstehenden sehr werthvollen Untersuchungen, durch die er sich ein nicht geringes Verdienst um die mechanischen Wissenschaften erworben hat, mit folgender Zusammenstellung der von ihm gefundenen Ergebnisse. Darin ist das Verhältniß der ganzen Zugkraft zu dem Gesamtgewicht des Wagens jedesmal durch einen Bruch ausgedrückt, dessen Nenner die Last in Pfunden anzeigt, die durch 1 Pfund Kraft fortbewegt werden kann.

Bezeichnung der Straße und deren Z u s t a n d.	Geschüßlafette u. 2rädige Karren. Durchmesser d. Räder = 1,564 Met. Felgenbreite = 10-12 Ctm.	Artillerie- wagen vierrädig; mittlere Höhe der Räder = 1,355 Met. Felgenbreite = 7-7,5 Ctm.	Wagen der Franche comté. Mittlere Höhe der Räder = 1,3 Met. Felgenbreite = 7 Ctm.	Vierräderiger Güterwagen. Mittlere Höhe der Räder = 1,075 Met. Felgenbreite = 15-17 Ctm.	Gilwagen der Messagerie générale. Mittlere Höhe der Räder = 1,15 Met. Felgenbreite = 10-11 Ctm.
Chaussée von Metz nach Nancy zwischen den Dörfern Montigny und Jouy.					
Im guten Zustande; einige Steine an der Oberfläche zu Tage liegend; etwas feucht.	$\frac{1}{56,6}$	$\frac{1}{49,1}$	$\frac{1}{47,1}$	$\frac{1}{39}$	$\frac{1}{41,7}$
Sehr feucht und mit etwas } im Schritt... flüssigem Kotthe bedekt.. } = Trabe....	$\frac{1}{46,7}$	$\frac{1}{40,4}$	$\frac{1}{38,7}$	$\frac{1}{32}$	$\frac{1}{34,7}$
	—	—	—	—	$\frac{1}{28,2}$
Straße der Kehler im Fort Velle-Croix zu Metz, ähnlich der vorigen Straße. Sehr naß, mit flüssigem Kotthe bedekt.....	$\frac{1}{46,8}$	$\frac{1}{39,5}$	$\frac{1}{38}$	$\frac{1}{31,3}$	$\frac{1}{33,7}$
Sehr ausgefahren, mit zähem Kotthe bedekt	$\frac{1}{25,7}$	$\frac{1}{22,3}$	$\frac{1}{21,4}$	$\frac{1}{17,7}$	$\frac{1}{18,9}$
Straße von Metz nach Thionville; im gu- ten Zustande, Steindecke an der Ober- fläche zu Tage liegend.					
Die Fahrbahn im trocknen Zustande.....	$\frac{1}{72,4}$	$\frac{1}{62,8}$	$\frac{1}{60,2}$	$\frac{1}{49,8}$	$\frac{1}{50,9}$
Naß und mit Schmutz bedekt....	Schritt $\frac{1}{54,3}$	$\frac{1}{47,1}$	$\frac{1}{45,2}$	$\frac{1}{37,1}$	$\frac{1}{39,9}$
Straßenpflaster in Metz; Sandstein } von Sierck, im vollkommen guten } Zustande.....	Schritt $\frac{1}{87,1}$	$\frac{1}{75}$	$\frac{1}{72,2}$	$\frac{1}{59,7}$	$\frac{1}{64}$
	Trab.. $\frac{1}{47,4}$	$\frac{1}{44,2}$	—	—	$\frac{1}{56,7}$
Pflaster der Rue Stanislas zu Paris, aus Sandstein von Fontainbleau.....	$\frac{1}{65}$	$\frac{1}{56}$	$\frac{1}{54}$	$\frac{1}{45}$	—
Bohlenbelag der Hängebrücke nach der Insel Chambière zu Metz.....	$\frac{1}{37,3}$	$\frac{1}{49,8}$	$\frac{1}{47,9}$	$\frac{1}{39,6}$	$\frac{1}{42,2}$
Versuch mit einem in Federn hängen- den Kaleschwagen.	Im Schritt; 1,4 Heus per Stunde.	Im Trabe; 2,7 Heus per Stunde.	Im starken Trabe; 3,15 Heus pr. Stunde.	Mittlerer Durchmesser der Räder.	
Auf der Chaussée von Metz nach Thionville	$\frac{1}{33,7}$	$\frac{1}{27,3}$	$\frac{1}{25,8}$	1,41 Met. = 4' 6" Preuß.	
Auf dem pariser Straßenpflaster.....	$\frac{1}{48}$	$\frac{1}{38,4}$	$\frac{1}{36}$	1,15 " = 3' 8 1/2" "	

II. Versuche vom preuß. Wegebaumeister Kossak zu Gösslin.

(Veröffentlicht in einer Schrift: Ermittlung der Zugkraft, welche zur Fortbewegung der Fuhrwerke auf verschiedenen Straßen erforderlich ist. Danzig, 1844.)

Der Apparat zum Messen der Zugkraft bestand aus einer Schnellwage in Gestalt eines ungleicharmigen Hebels, dessen kurzer Arm vermittelst einer senkrechten Stange mit einem Winkelhebel in Verbindung gesetzt war. An dem abwärts gerichteten Schenkel des zuletzt genannten Hebels wirkte die zu messende Zugkraft, während der horizontal liegende Schenkel diese Wirkung auf die Schnellwage übertrug, wo sie durch Gewichte, die an den langen Arm derselben gehängt wurden, ins Gleichgewicht gebracht und somit ihrer Größe nach gemessen wurde. Um die Neigung der Straße gegen den Horizont zu beseitigen, ließ man die von zwei starken Pferden gezogenen Wagen auf derselben Strecke hin- und zurückfahren, und von beiden Ergebnissen wurde dann das Mittel genommen. Auf diese Weise sind die Zahlen entstanden, welche die fünfte Spalte der nachstehenden Tafel enthält, während die Zahlen der nächstfolgenden Spalte, das Verhältniß des gesammten Widerstandes zum Gewicht des Wagens ausdrückend, von mir berechnet und hinzugefügt worden sind. Was die Beschaffenheit der zu den Versuchen ausgewählten Fuhrwerke und Straßen betrifft, so ist darüber das Nöthige in nachstehender Zusammenstellung angegeben.

Zusammenstellung der Kossak'schen Beobachtungen über den Widerstand der Fuhrwerke auf verschiedenen Straßen.

Beschaffenheit des Weges und der Fuhrwerke.	Mittel von Versuchen.	Gewicht des beladenen Wagens. H.	Mittlere Geschwin- digkeit. Fuf.	Zugkraft auf den Horizont reduzirt. H.	Verhältniß des Wider- stands zur Last.	Bemerkung.
I. Steinbahn aus zer Schlagenen Graniten bestehend.						
1) Lastwagen mit konischen Achsen.	6	5904	10,05	147,22	0,0249	Die Achsen und Buchsen v. längeren Gebrauch ganz glatt; mit einer Mischung von Theer und Talg geschmiert.
Mittlerer Durchmesser der Achsenschefel = 1,93".	4	7230	9,52	166,68	0,0230	
Vorderräder 3' 7", Hinterräder 4' Höhe; Breite der Felgen = 2 1/2".	4	8550	7,90	197,49	0,0231	
				Mittel	0,0233 = $\frac{1}{42,9}$	
2) Lastwagen mit cylindrischen Achsen aus Schmiedeeisen von 2,23" Durchmesser. Höhe der Räder und Felgenreite wie beim vorigen Wagen	8	1974	8,96	63,22	0,0366	Die Achsenschefel unter einem Winkel von 2° 19' gegen den Horizont geneigt. Sie waren kurz vor dem Gebrauche neu angefertigt.
	8	3294	8,60	96,93	0,0294	
	8	5934	9,11	173,21	0,0292	
	4	8634	6,91	229,66	0,0266	
	2	10254	5,28	284,70	0,0278	
				Mittel	0,0299 = $\frac{1}{33,4}$	

Beschaffenheit des Weges und der Fuhrwerke.	Mittel von Versuchen.	Gewicht des beladenen Wagens. H.	Mittlere Geschwin- digkeit. Fuf.	Zugkraft auf den Horizont reduzirt. H.	Verhältnis des Wider- stands zur Last.	Bemerkung.
3) Lastwagen mit 5 Zoll breiten Rad- felgen und mit cylindrischen Achsen aus Schmiedeeisen von 2,23" Durch- messer. Höhe der Vorderräder = 3' 4", der Hinterräder = 3' 10".	8	2147	9,78	71,47	0,0333	Die Achsenkel wa- ren glatt gelaufen u. wurden mit Theer und Talg geschmiert.
	6	3306	9,50	98,69	0,0299	
	4	4677	6,72	124,08	0,0265	
	6	6122	7,68	171,97	0,0281	
	4	8810	6,44	220,30	0,0250	
	2	10460	4,93	264,84	0,0253	
					Mittel	0,0280 = $\frac{1}{35,7}$
4) Wagen mit konischen Achsen aus Ei- sen; in 4 Stahlfedern hängend. Mitt- lerer Durchm. d. Achsenkel = 1,7"; Vorderräder = 3' $\frac{1}{4}$ ", Hinterräder = 4' $\frac{1}{4}$ " hoch.	8	1852 ^{*)}	9,24	64,84	0,0350	*) Das nicht auf Fe- dern ruhende Ge- wicht betrug 1040 H.
	8	2700 ^{*)}	9,37	93,47	0,0345	
5) Derselbe Wagen mit abgesteiften Fe- dern.	8	1852	9,51	62,38	0,0336	Die Achsen glatt ge- laufen; mit Theer und Talg geschmiert.
	8	2700	9,33	87,14	0,0322	
II. Straßenpflaster aus run- den Feldsteinen von 3 $\frac{1}{2}$ Zoll im Durchschnitt.						
6) Lastwagen mit konischen Achsen, wie in A ² 1.	8	1910	8,42	67,19	0,0351	
	8	3240	8,61	95,52	0,0294	
	8	4560	8,42	130,71	0,0286	
	4	5904	11,12	178,62	0,0302	
	4	7230	8,78	189,67	0,0262	
	4	8550	7,53	223,43	0,0261	
7) Lastwagen mit cylindrischen Achsen, wie in A ² 2.	8	1974	8,19	70,98	0,0359	
	8	3294	8,91	113,84	0,0345	
	8	5934	8,90	193,30	0,0325	
	4	8634	6,92	255,47	0,0295	
	2	10254	4,21	303,22	0,0296	
8) Dergleichen mit breiten Felgen, wie in A ² 3.	8	2147	9,88	80,58	0,0375	
	8	3306	8,78	106,89	0,0323	
	6	6122	9,57	188,87	0,0308	
	4	8810	6,40	254,01	0,0288	
	2	10460	4,70	288,86	0,0276	

Beschaffenheit des Weges und der Fuhrwerke.	Mittel von Versuchen.	Gewicht des belasteten Wagens. H.	Mittlere Geschwin- digkeit. Fuss.	Zugkraft auf den Horizont reduzirt. H.	Verhältnis des Wider- stands zur Last.	Bemerkung.
9) Lastwagen wie in <i>N^o 1</i> , nur mit gestürzten Rädern. Neigung der untern Seite der Achsen gegen den Horizont = 9° 6'.	8	1913	8,03	66,95	0,0350	
	8	3233	8,00	100,38	0,0310	
	8	5891	8,63	175,90	0,0298	
	4	8531	6,53	248,20	0,0291	
				Mittel	0,0312 = $\frac{1}{32,1}$	
10) Wagen in Federn hängend wie in <i>N^o 4</i> .	8	1852	9,18	78,80	0,0425	Der nicht auf Federn ruhende Theil der Last = 1040 H.
	8	2700	9,20	105,78	0,0391	
				Mittel	0,0408 = $\frac{1}{24,5}$	
11) Derselbe Wagen, mit abgesteiften Federn.	8	1852	9,36	76,27	0,0412	
	8	2700	9,30	96,62	0,0358	
				Mittel	0,0385 = $\frac{1}{26}$	
III. Sommerweg aus einer Mischung von Lehm und Kies zu gleichen Theilen bestehend.						
12) Lastwagen mit konischen Achsen, wie in <i>N^o 1</i> .	8	1910	9,08	77,37	0,0405	
	8	3240	8,69	144,10	0,0445	
	8	4560	9,52	258,44	0,0567	
	2	5904	5,15	353,48	0,0599	
				Mittel	0,0504 = $\frac{1}{19,8}$	
13) Lastwagen mit breiten Felgen, wie in <i>N^o 3</i> .	8	2147	9,48	85,40	0,0397	
	6	3467	8,33	141,04	0,0407	
	8	4677	8,83	233,38	0,0499	
	4	5997	7,23	319,28	0,0352	
				Mittel	0,0414 = $\frac{1}{24,2}$	
14) Lastwagen mit kleinen Rädern von resp. 17½ u. 19½" Höhe, 2" Fel- genbreite, konischen Achsen aus Holz, unten mit Eisen beschlagen; mitt- lerer Durchmesser = 2½ Zoll.	4	755	7,02	76,88	0,1018	Die untere Seite der Achsenfelge lag hor- izontal.
	4	1415	6,48	124,58	0,0880	
	4	2075	7,57	170,22	0,0820	
				Mittel	0,0906 = $\frac{1}{11}$	
IV. Sandweg, aus trockenem feinem Sande bestehend.						
15) Lastwagen mit konischen Achsen, wie in <i>N^o 1</i> .	4	1930	7,02	408,23	0,2115	
	2	3250	4,53	611,20	0,1881	
				Mittel	0,1998 = $\frac{1}{5}$	
16) Desgleichen mit breiten Felgen, wie in <i>N^o 3</i> .	4	1758	7,61	258,30	0,1468	
	4	2418	7,22	348,29	0,1440	
	2	3738	4,44	496,38	0,1328	
				Mittel	0,1412 = $\frac{1}{7,1}$	

Beschaffenheit des Weges und der Fuhrwerke.	Mittel von Versuchen.	Gewicht des belasteten Wagens. H.	Mittlere Geschwin- digkeit. Fuß.	Zugkraft auf den Horizont reducirt. H.	Verhältnis des Wider- stands zur Last.	Bemerkung.
V. Schneebahn; eine Chaussee- strecke 2 bis 3 Zoll dick mit festgefahretem Schnee bedeckt.						
17) Schlitten mit unbeschlagenen Kufen aus Weißbuchenholz von 3" Breite.	4	1470	8,25	55,67	0,0379	Diese Versuche fanden bei einer Tempera- tur von 3° R. unter Null statt.
	4	2560	7,18	89,96	0,0351	
				Mittel	$0,0365 = \frac{1}{27,4}$	
18) Derselbe Schlitten, mit 1/2 Zoll brei- ten Eisenschienen beschlagen,	4	1320	8,44	41,25	0,0312	Desgleichen.
	4	2420	8,56	78,74	0,0325	
				Mittel	$0,0318 = \frac{1}{30,5}$	

Die nachstehenden Folgerungen, welche Herr Kossak aus seinen Versuchen in Bezug auf harte Straßen glaubt herleiten zu können, muß ich mit einigen, theilweise berichtigenden, Anmerkungen begleiten.

a) Konische Achsen sind den cylindrischen bei gleicher Haltbarkeit allemal vorzuziehen, da erstere eine geringere Reibung geben.

Diese Folgerung ist nicht zu bestreiten; sie steht vielmehr mit der Erfahrung im Einklang. Man sieht in ganz Deutschland fast nur konisch gestaltete Achsschenkel im Gebrauch, während cylindrische Achsschenkel höchstens in den Gebirgsgegenden von Böhmen und Schlesien angetroffen werden. Hier werden sie der üblichen schmalen Spur wegen noch beibehalten, um den Wagen zum Gebrauch in anderen Gegenden durch Entfernung der Räder von einander breitspurig machen zu können, was bei konischen Achseln nicht thunlich sein würde.

b) die gestürzten Räder sind ganz zu vermeiden, weil dabei jedesmal eine Reibung zwischen der Nabe und dem Achsenfutter stattfindet.

c) Die Zugkraft wird um so kleiner, je größer die Räder sind, weshalb anzurathen ist, die letztern recht groß zu machen.

Gegen beide Folgerungen ist nichts zu erinnern, da sie mit andern unzweifelhaften Erfahrungen übereinstimmen.

d) Für schwere Lastwagen sind Räder mit breiten Felgen den mit schmalen Felgen vorzuziehen, weil sie eine geringere Zugkraft erfordern. Hierbei wird Bezug genommen auf die vorstehenden Versuche, nach welchen Räder mit 5 Zoll breiten Felgen ungefähr $\frac{1}{2}$ Zugkraft weniger, als solche mit 2 $\frac{1}{2}$ zölligen Felgen erfordert haben.

e) Wagen mit Federn erfordern mehr Zugkraft als ohne Federn, besonders bei langsamer Bewegung. Bei größerer Geschwindigkeit soll der Unterschied mehr und mehr verschwinden.

Dieses Resultat muß als vollkommen irrig erklärt werden, da es im Widerspruche steht mit den Ergebnissen aller vorhergehenden Versuche und Erfahrungen. Dem Herrn Verfasser ist es zwar nicht unbekannt geblieben, daß Edgeworth und Andere das Gegentheil von seinem Resultate gefunden

haben; allein obgleich er das Nähere über die Methode ihrer Beobachtung nicht kennen gelernt hat, so glaubt er doch in der Mangelhaftigkeit derselben einen Grund zu Fehlern vermuthen zu dürfen. Ich glaube mit größerem Rechte der vom Verfasser in Anwendung gebrachten Methode einen solchen Vorwurf machen zu müssen, namentlich wenn man seinen dynamometrischen Apparat, der vieles zu wünschen übrig läßt, mit dem von Morin vergleicht. Außerdem aber muß ich hier an die früher mitgetheilte Erfahrung des Herrn Moreau Valette erinnern, wonach eine Frachtladung von schweren harten Körpern mindestens 10 Prozent mehr Zugkraft erfordert, als ein gleiches Gewichtsquantum federner Wolle. Herr Valette erklärt dies nach meiner Ueberzeugung ganz richtig daraus, daß durch die schwingende Bewegung einer solchen elastischen Masse beim Fahren bald das ein, bald das andere Rad eine hebende Wirkung bekommt, welche den vorgespannten Pferden die Fortbewegung erleichtert.

Ich würde nur noch hinzuzufügen haben, daß auch rein mechanische Gründe der Elasticität das Wort zu reden scheinen. Denn mangelt die letzte einem Wagen gänzlich, sowohl in seiner Construction als in seiner Ladung, so werden die auf einander folgenden Stöße beim Befahren eines unebenen Straßenpflasters sich sofort der ganzen Masse des Wagens mittheilen und derselben einen entsprechenden Theil ihrer lebendigen Kraft rauben, der dann durch die Zugkraft der Pferde jedesmal wieder ersetzt werden muß. Bei einer elastischen Aufhängung des Wagens mit seiner Ladung kann aber jene nachtheilige Mittheilung der Stöße nicht in gleichem Maaße eintreten, da deren Wirkung in der Elasticität der Federn gleichsam erstickt; die lebendige Kraft des auf Federn ruhenden Theils der Last wird also durch die Stöße der Räder um so weniger beeinträchtigt, je größer sie selbst ist woraus dann folgen würde, daß der Vortheil der elastischen Aufhängung bei schneller Bewegung mehr hervortreten muß, als bei einer langsamen Bewegung; ein Resultat, das mit unzweifelhaften Erfahrungen vollkommen übereinstimmt.

III. Versuche der Königl. bayerischen Artillerie.

Die nachstehenden Versuche sind auf Befehl des Generallieutenants Freiherrn von Zoller in Bayern angestellt, und die Ergebnisse derselben in einer als Manuscript lithographirten Schrift: „Resultate dynamometrischer Fahrversuche der Königlich Bayerischen Feldartillerie, 1843 und 1844,“ welche meines Wissens nicht im Buchhandel erschienen, mitgetheilt worden. Es kamen dazu ein sechspfündiges Feldkanon und ein Wurst-Munitionswagen mit den zugehörigen Progen und allen Requisiten in Anwendung, weil an diese Arten von Fahrzeugen die größten Anforderungen gemacht werden müssen.

Die Gewichtsverhältnisse dieser Fahrzeuge im feldmäßig ausgerüsteten Zustande werden in der genannten Schrift folgendermaßen in bayrischen Pfunden angegeben, wobei man die Abmessungen als bekannt vorausgesetzt hat:

Gpfünder Feldkanon.		Wurst-Munitionswagen.	
Leere Proge ohne Räder	512 Pfd.	Leere Proge ohne Räder	512 Pfd.
Munition mit den Verschlägen	413½ "	Munition mit Verschlägen	413½ "
Requisite im Innern und Außern	57½ "	Requisite im Innern und Außern ic.	43½ "
2 beschlagene Progräder	259 "	2 beschlagene Räder	259 "
Zusammen = 1241½ Pfd.		Zusammen = 1227½ Pfd.	

Das ist doch eine Wirkung ähnlich derjenigen, welche durch Federn des Wagens erreicht wird; die Ladung braucht nicht sämmtliche Auf- und Abwärtsbewegung der Räder auf unebener Bahn mitzumachen.

6pfünder Feldkanon.

Wurst-Munitionswagen.

Lafette ohne Räder	551 Pfd.	Leerer Hinterwagen, ohne Räder	808 $\frac{1}{2}$ Pfd.
Ausrüstungsgegenstände	38 "	Requisite im Aeußern und Innern	339 $\frac{3}{4}$ "
Das Kanonenrohr	430 "	Das Schanzzeug	13 $\frac{3}{4}$ "
2 beschlagene Räder	300 "	2 beschlagene Räder	259 "
Zusammen = 1319 Pfd.		Zusammen = 1420 $\frac{3}{4}$ Pfd.	

Auf die hier angegebenen Gewichte wurden die Fahrzeuge gebracht, indem man statt der Munition und der sonstigen Gegenstände im Prozkasten und Munitionswagen entsprechende Bleigewichte hineinlegte. So vollständig ausgerüstet entstanden vierräderige Fahrzeuge, deren Gesamtgewichte für den 6Pfünder zu 2860 und für den Munitionswagen zu 3081 bayr. Pfunden angenommen werden. Da aber beim raschen Fahren die Bedienungsmannschaft mit aufsteigt, so ist für solche Fälle bei manchen der folgenden Versuche noch besonders in Rechnung gebracht: beim ersten Fahrzeug für drei Mann auf der Proze zu 150 Pfd. = 450 Pfd.; beim andern für fünf Mann, wovon 2 auf der Proze und 3 auf dem Hinterwagen sitzen, zusammen 750. Dadurch stellen sich die Gewichte jener Fahrzeuge bezüglich auf 3310 und 3831 bayr. Pfd.

Sämmtliche Fahrzeuge hatten eiserne Achsen mit konischen Schenkeln und metallenen Buchsen, welche nach der in Bayern bestehenden Vorschrift mit ungesalzenem reinen Schweinesfett geschmiert wurden, nachdem die alte Schmiere jedesmal sorgfältig beseitigt worden war. Der Durchmesser der Achsschenkel beträgt bei allen bayr. Artillerie-Fahrzeugen *) 2,50 Zoll rheinisch am Stöße und 1,93 Zoll am dünnern Ende. Die Prozenräder hatten 45 rhein. Zoll Höhe, und ihre Felgenbreite betrug 2 $\frac{3}{4}$ Zoll. Die Höhe der Hinterräder (des Kanons und des Munitionswagens) betrug 55 Zoll und ihre Felgenbreite 2 $\frac{3}{4}$ Zoll. Die Fahrzeuge wurden zum Theil durch vorgespannte Pferde, zum Theil aber durch Menschen mit der Geschwindigkeit des gewöhnlichen Pferdeschrittes fortgezogen, und zur Messung der angewendeten Zugkraft kam das bekannte Federdynamometer von Regnier in Anwendung.

Nachstehende Tabelle enthält die Ergebnisse dieser Versuche.

Beschaffenheit des zu den Versuchen ausgewählten Terrains.	6pfünder Feldkanon			Wurst-Munitionswagen			Bemerkungen.
	Gewicht d. Fahrzeuges.	Zugkraft	Verhältniß zwischen beiden.	Gewicht d. Fahrzeuges.	Zugkraft.	Verhältniß zwischen beiden.	
	bayr. M.	bayr. M.		bayr. M.	bayr. M.		
Feste ebene Landstraße, sehr trocken.	3310	108	1 : 30,65	—	—	—	{ Obere Gartenstraße in München.
Desgleichen; sehr trocken und staubig.	"	103 $\frac{1}{2}$	31,98	3831	112	1 : 34,20	Kasernenstr. daselbst.
Desgleichen, der Boden trocken.	2860	79	36,20	"	111	34,51	Desgl. u. Ludwigstr.
Desgleichen, der Boden ziemlich trocken, der Staub vom Regen des vorhergehenden Tages geballt.	—	—	—	3081	85	36,25	Obere Gartenstraße.

*) Beschreibung des gegenwärtigen Zustandes der europäischen Feldartillerie. Von G. A. Jacobi, Königl. Preuß. Premier-Lieutenant der 7. Artillerie-Brigade. Mainz 1841. Hft. 8. S. 48.

Beschaffenheit des zu den Versuchen ausgewählten Terrains.	Gpfänder Feldkanon.			Wurst-Munitionswagen.			Bemerkungen.
	Ge- wicht d. Fahr- zeuges.	Zug- kraft.	Verhältnis zwischen beiden.	Ge- wicht d. Fahr- zeuges.	Zug- kraft.	Verhältnis zwischen beiden.	
	bayr. M.	bayr. M.		bayr. M.	bayr. M.		
Feste ebene Landstraße; der Boden fest gefroren und holpericht.....	—	—	—	3831	148	1 : 25,88	Kleine Erdschollen auf der Oberfläche ver- ursachen eine holpe- rige Bewegung.
Feste ebene Wiese; der Boden vom Thau befeuchtet.....	3310	147	1 : 22,52	"	153	25,04	
Feldweg auf dieser Wiese.....	"	168	19,70	—	—	—	
Landstraße mit grober noch unbefahrener Kieschüttung.....	"	225	14,71	3831	237	16,16	
Desgleichen, die Kieschüttung etwas zu- sammengefahren.....	"	207	15,99	—	—	—	
Brachacker; steinigtes feuchtes Erdreich..	"	325	10,18	3831	341	11,23	
Frisch gepflügtes Ackerfeld; steinigtes troc- knes Erdreich. Die Versuche längs der Furchen hin.	"	371	8,92	"	388	9,87	Die Räder drangen 3 bis 4" tief in den Boden ein.
Desgl. nasses sehr fettes Erdreich.....	—	—	—	3081	415	7,42	
Desgl. das Erdreich sehr sandig, feucht und ziemlich horizontal.	2860	338	8,46	3081	379½	8,12	Eindrücke der Räder 2 bis 2½" tief.
	3310	433	17,64	3831	495	7,74	
Straßenpflaster, im guten Zustande; die Steine von mittlerer Größe.....	3310	111	29,82	—	—	—	Briennerstraße, Mün- chen
Ehemaliges Brachfeld, jetzt Wiese; nasser sumpfartiger Boden.	2860	200	14,30	3081	268	11,50	
	3310	271	12,21	3831	348	11,02	
Angränzender Brachacker; feuchter zäher Boden.	2860	279	10,25	3081	383	8,04	
	3310	402	8,23	3831	552	6,94	
Feste trockne Landstraße; 3 bis 4° Stei- gung.....	3310	271	12,21	3831	278	13,78	
Feste Landstraße, 5—6° Steigung; gut erhalten, etwas gefroren.....	2860	306	9,35	3081	350	8,80	Die Oberfl. d. Straße im Aufstauen be- griffen.
Landstraße mit 7—8° Steigung; feste steinige Grundlage, mit ziemlich nasser und kothiger Oberfläche.	"	480	5,96	"	528	5,83	
Desgleichen mit 7½° Steigung; gut er- halten, an der Oberfläche gefroren und mit kleinen sandigen Erdschollen be- deckt.	"	427	6,70	"	488	6,31	
	"	549	5,21	"	614	5,02	
Desgl. mit 9° Steigung; feste Grund- lage, die Oberfl. naß und sehr kothig.	"	535	5,34	"	598	5,15	Wolfraathshaus, Berg- straße.
Bergstraße mit 9° Steigung; in sehr gutem Zustande.....	"	423	6,76	"	455	6,77	

Beschaffenheit des zu den Versuchen ausgewählten Terrains.	6½ Pf. 6 L. Felskanon			Burst-Munitionswagen			Bemerkungen.
	Ge- wicht d. Fahr- zeuges. bayr. M.	Zug- kraft bayr. M.	Verhältnis zwischen beiden.	Ge- wicht d. Fahr- zeuges. bayr. M.	Zug- kraft bayr. M.	Verhältnis zwischen beiden.	
Holzweg mit 8—9° Steig. Grundlage fest und steinig, Oberfläche kiefig, mit feinem Sande und nasser Erde gemengt.	2860	511	1 : 5,60	3081	600	1 : 5,13	
Brachacker, horizontal; feuchter lockerer Boden.	2860	271	10,55	3081	309	9,97	Einschneiden der Räder ¼ bis 1" tief.
	3160	327	9,66	3831	448	8,55	
	3310	351	9,40	—	—	—	
Desgl. mit 4° Steigung; desgl.	3085	413½	7,46	3456	530	6,52	Mittel von je zwei ver- schiedenen Angaben.
Desgl. „ 5—6° Steigung; desgl.	„	497½	6,20	„	622½	5,55	
Desgl. „ 7½° Steigung; desgl.	„	582½	4,91	„	720	4,80	
Brachfeld mit 11—12° Steig.; fest und ziemlich trocken.	2860	729	3,92	3081	796	3,87	

Die Folgerungen, welche der Verfasser des lithographirten Manuscriptes aus diesen Versuchen zieht, sind mehr praktischer als dynamischer Natur, da sie sich hauptsächlich darauf beziehen, den der bayerischen Artillerie gemachten Vorwurf einer zu großen Ueberlastung der Pferde zu widerlegen. In dieser Absicht wird namentlich auf den letzten Versuch hingewiesen, wo zur Fortbewegung des Burst-Munitionswagens über ein unter 11 bis 12 Grad ansteigendes Brachfeld eine Zugkraft von 796 bayrischen Pfunden nöthig war, was bei einer Bespannung mit sechs Pferden nur etwa 133 Pfd. auf die Pferdekraft giebt. Ebenso fällt die Vergleichung des bayr. Sechspfünders mit dem franz. Achtpfünder, welche beide sechsspännig gefahren werden, ganz zu Gunsten des ersteren aus, da bei diesem die Belastung auf die Pferdekraft nur 477 bis 552 Pfd., beim franz. Geschütze aber 533 bis 627 Pfd. beträgt, je nachdem die Bedienungsmannschaft neben dem Geschütze marschirt oder auf der Proze sitzt.

In dynamischer Hinsicht verdient bemerkt zu werden, daß beim Befahren weicher kompressibeler Terrains, als: frisch gepflügter Ackerfelder, Wiesen mit sumpfigem Boden und brachliegender Ackerfelder, der Widerstand in einem höhern Verhältniß als die Belastung zunimmt. Die bezüglichlichen Versuche ergaben nämlich übereinstimmend für den Exponenten der Belastungen, welcher den zugehörigen Widerständen entspricht, eine zwischen 1,20 und 1,88 liegende Zahl, was zwar den Ansichten des Herrn Morin direct widerspricht (conf. S. 185), der von mir aufgestellten Theorie aber einigermassen zur Bestätigung dient.

C. Versuche über den Widerstand auf Eisenbahnen.

Bevor der in der Ueberschrift genannte Gegenstand auf rationellem Wege untersucht worden, waren die Angaben über das Verhältniß der Zugkraft auf Eisenbahnen zum ganzen Gewicht der Wagen sehr verschieden, was auch nicht wohl anders sein konnte, da diese Angaben sich meist nur auf einzelne, gelegentlich gemachte Wahrnehmungen stützten. Es variiert jenes Verhältniß nach den Angaben von Flachot zwischen $\frac{1}{150}$ und $\frac{1}{240}$, nach den von Jessop zwischen $\frac{1}{150}$ und $\frac{1}{200}$ und nach

Greenshaw sogar zwischen $\frac{1}{170}$ und $\frac{1}{237}$. Die Beobachtungen von Silvester ergeben die erforderliche Kraft zur Fortbewegung eines $23\frac{1}{4}$ Cwt. *) = 2604 Pfd. engl. schweren Eisenbahnwagens gleich 14 Pfd., für einen $76\frac{1}{2}$ Cwt. = 8540 Pfd. schweren Wagen aber gleich 50 Pfd. Jenes giebt das Verhältniß = $\frac{1}{186}$, dieses = $\frac{1}{171}$. Nach Palmer sind 5 Pfd. Kraft nöthig, um einen 5666 Pfd. wiegenden Wagen auf einer Eisenbahn, die 1 in 196 gegen den Horizont geneigt ist, an Hinablaufen zu verhindern; daraus folgt das Verhältniß der Kraft zur Last = $\frac{1}{238}$ u. s. w.

Es würde zu nichts fruchten, die Aufzählung dieser vereinzeltten Angaben noch durch mehrere andere zu erweitern, da dieselben bei den großen Abweichungen der Praxis keinen Anhalt geben können. Inzwischen haben methodisch angestellte Versuche im Großen uns der Lösung der Frage, den Widerstand auf Eisenbahnen betreffend, bedeutend näher gebracht, und die Mittheilung dieser Versuche ist die Absicht der folgenden Blätter.

Nicolaus Wood, Director der Kohlenbergwerke zu Killingworth in der Grafschaft Durham, war der erste, welcher in England mehrere Reihen von Versuchen zur Ermittlung des fraglichen Widerstandes anstellte und die Resultate derselben in seinem Werke über Schienenwege **) zur Oeffentlichkeit brachte. Nach einer Bemerkung des Professors Johnson in Philadelphia ***) , daß Herr Wood seine Versuche nach einer ungenauen Formel berechnet habe, unterwirft letzterer dieselben einer neuen Berechnung, deren Resultate in der zweiten und dritten Auflage seines Werkes enthalten sind.

Nächstdem hat sich der Ritter de Pambour auf eine eben so ausgezeichnete wie umfassende Weise mit der Untersuchung des in Rede stehenden Gegenstandes beschäftigt. Die dadurch gewonnenen Ergebnisse sind niedergelegt in der allgemein geschätzten Schrift über Dampfwagen und Eisenbahnen, welche 1835 in einer französischen, 1836 in einer englischen Ausgabe †) zum erstenmal erschien. Von letzterer findet man eine deutsche Uebersetzung in Crelles Journal für die Baukunst, Bd. X. und XI., welche hier theilweise benutzt worden ist. — de Pambour machte zuerst darauf aufmerksam, daß bei der großen Schnelligkeit der Eisenbahnwagen der Widerstand der Luft einen wesentlichen Theil des gesammten Widerstandes ausmache, ein Umstand den Wood und andere Beobachter bis dahin ganz außer Acht gelassen hatten. Er bringt diesen Widerstand nicht bloß bei seinen eigenen Versuchen gehörig in Rechnung, sondern berichtigt danach auch die von Wood angestellten, was letzterer in der dritten Ausgabe seines Werkes bestens acceptirt.

Es folgen nun zuerst die Ergebnisse der Woodschen, dann die der Pambourschen Versuche im Auszuge, wobei es dem Leser überlassen bleiben muß, die Einzelheiten in den genannten Werken selbst nachzusehen.

I. Versuche von Nic. Wood.

Die ersten der nachfolgenden Versuche machte Wood in Gemeinschaft mit Georg Stephenson auf dem Killingworth-Schienenweg, anfänglich mit Hülfe eines Federdynamometers, nachher

*) 1 Cwt (Hundredweight) = 112 engl. u. (avoir du pois).

**) A practical Treatise on Rail-roads etc. etc. by Nicholas Wood, 2nd Edit. London 1832. Nach der dritten Auflage ins Deutsche übersetzt von Hermann Köhler, Braunschweig 1839.

***) Journal of the Franklin-Institute, Vol. V. p. 57—69.

†) A practical Treatise on locomotive engines upon railways etc. etc. by the Chev. F. M. G. de Pambour; London: published by John Weale, 1836. Von der französischen Ausgabe erschien im Jahre 1844 eine zweite Auflage, von welcher der Geh. Ober-Baurath, Herr Dr. Crelle, eine vortreffliche Uebersetzung ins Deutsche, bereichert mit werthvollen Zusätzen und Nachträgen, veranstaltet hat (Berlin 1849, bei G. Reimer).

aber mittelst eines besonders dazu konstruirten Dynamometerwagens, eine pendelartige Zeigerwaage mit einem eingetheilten Gradbogen tragend, welcher den Widerstand der angehängten Fahrzeuge an einem feststehenden Index anzeigt. Bei den ferneren Versuchen kam noch eine andere Methode in Anwendung, darin bestehend, daß man die Wagen unter verschiedenen Belastungen auf einer geneigten Eisenbahnstrecke frei herablaufen ließ, und aus der Vergleichung der beobachteten Zeiten mit den darin durchlaufenen Wegen den Widerstand berechnete.

Die auf die eine und andere Art erhaltenen Ergebnisse, welche den summarischen Widerstand der theils leer gehenden, theils belasteten Eisenbahnwagen betreffen, sind in nachstehender Tabelle übersichtlich zusammengestellt.

Taf. I. Versuche über den Widerstand hart gegossener Räder auf gußeisernen Stuhlschienen.

N ^o	Bezeichnung der Wagen.	Durchmesser der		Gesamtes Gewicht d. Wagens. \mathcal{H} .	Summarischer Widerstand. \mathcal{H} .	Verhältniß des Widerstandes zum Gewicht des Wagens.	Bemerkungen.
		Räder Zoll.	Ächsen. Zoll.				
I. Versuche mit dem Dynamometer.							
1	Beladene Kohlenwagen mit hart gegossenen Rädern, 4 Zoll breiten gußeisernen Lagern.....	34	2 $\frac{1}{2}$	8540	39	0,00457	$\frac{1}{219}$
2	Leere Wagen gleicher Art.....	34	2 $\frac{1}{2}$	2604	12,5	0,00480	$\frac{1}{208}$
3	Desgleichen mit 1 $\frac{1}{2}$ " breiten Lagern aus Messing.....	34	2 $\frac{1}{2}$	2604	13,5	0,00518	$\frac{1}{193}$
4	Beladene Wagen mit hart gegossenen Rädern und 4 Zoll breiten gußeisernen Lagern.	34	2 $\frac{1}{2}$	4816	26	0,00540	$\frac{1}{185}$
5		34	2 $\frac{1}{2}$	7056	34	0,00482	$\frac{1}{208}$
6		34	2 $\frac{1}{2}$	8512	40	0,00470	$\frac{1}{213}$
7	Desgl. bei geringerer Geschwindigkeit	34	2 $\frac{1}{2}$	8456	39	0,00461	$\frac{1}{217}$
II. Versuche auf der geneigten Ebene.							
8	Beladene Wagen mit Hartguß-Rädern, Schmiedeeisernen Ächsen und gußeisernen Lagern von 4 Zoll Breite.	35	3	9408	39,35	0,00418	$\frac{1}{239}$
9		"	"	9408	39,35	0,00418	$\frac{1}{239}$
10		"	"	9408	41,46	0,00441	$\frac{1}{226}$
11		"	"	9408	44,19	0,00461	$\frac{1}{212}$
12	Ein leerer Wagen gleicher Art.....	35	3	3472	12,73	0,00366	$\frac{1}{272}$
13	Beladene Wagen derselben Art.....	35	3	9408	41,45	0,00441	$\frac{1}{226}$
14	Desgleichen.....	"	"	9408	44,18	0,00461	$\frac{1}{212}$
15	Leerer Wagen, desgleichen.....	"	"	3472	12,75	0,00367	$\frac{1}{272}$
16	Beladener Wagen wie in N ^o 1.....	34	2 $\frac{1}{2}$	9100	39	0,00429	$\frac{1}{238}$

Killingworthbahn mit gußeisernen Schienen nach dem Patent von Losh u. Stephenson.

Bahn auf der Hetton-Kohlengrube mit gleichen Schienen.

Desgleichen.

Auf der Hettonbahn.

Desgl.

Desgl.

Desgl.

Desgl.

Bahn d. Hettongrube.

Killingworthbahn

Hiernach ist der größte Widerstand = $\frac{1}{153}$, der kleinste = $\frac{1}{272}$ der Last, und als mittlerer Widerstand nimmt Herr Wood $\frac{1}{223}$ oder ohngefähr 10 Pfd. auf die Tonne an.

Die obigen Versuche geben den gesammten Widerstand, welcher sowohl von der drehenden Reibung an den Achsen als von der rollenden Reibung am Umfang der Wagenräder herrührt. Da es aber von Interesse ist, diese beiden Widerstände einzeln kennen zu lernen, so hat Wood noch folgende Versuche angestellt, um die rollende Reibung der Räder für sich allein möglichst genau auszumitteln.

Zu diesem Ende ließ er zwei, durch eine eiserne Achse auf gewöhnliche Art mit einander verbundene Räder, erst für sich allein, nachher aber mit verschiedenen Gewichten beschwert, auf einer geneigten Eisenbahn frei herablaufen. Die Räder hatten $34\frac{1}{2}$ Zoll Durchmesser und waren hart gegossen. Die zu dem Versuch ausgewählte Bahnstrecke war möglichst gerade, so daß die Spurkränze keine Seitenreibungen der Schienen erlitten. Letztere bestanden aus Gußeisen mit $2\frac{1}{2}$ Zoll breiten Oberflächen und waren im besten Zustande. Das Gefälle auf der geneigten Bahn vom höchsten Punkte gemessen betrug auf 100 Fß. Länge 0,9958'; auf 200 Fß. 2,027'; auf 300 Fß. 3,0645'; auf 400 Fß. 3,9853'; und endlich auf 500 Fß. Länge 4,9228'.

Die in nachstehender Zusammenstellung angegebenen Widerstände sind durch Berechnung aus den beobachteten Zeiten hergeleitet, in welchen die Räder verschiedene vorher abgemessene Längen von je 100 Fß. durchliefen.

Taf. II. Versuche über den Widerstand der rollenden Reibung.

Länge des durchlaufenen Weges.	Unbeschwerte Räder und Achse von einem Kohlenwagen 595 u. wiegend.		Unbeschwerte Räder von einem andern Wagen. 656 u.		Die vorigen Räder, dicht an der Achse beschwert. 2059 u.		Dieselben Räder, dicht am Umfange beschwert. 2072 u.		Dieselben Räder, zwischen den Speichen mit Blei ausgegossen. 4480 u.		Mittlere Geschwindigkeit am Ende der durchlaufenen Wege.
	Zeit.	Verhältniß d. Widerst.	Zeit.	Verhältniß d. Widerst.	Zeit.	Verhältniß d. Widerst.	Zeit.	Verhältniß d. Widerst.	Zeit.	Verhältniß d. Widerst.	
Fuß.	Set.		Set.		Set.		Set.		Set.		Fuß.
100	34,2	0,001181	34,14	0,001157	31,2	0,001278	36,3	0,001129	—	—	5,86
200	48,8	0,001377	45,24	0,001350	43,6	0,001255	49,4	0,001015	—	—	8,38
300	59,6	0,001400	60,09	0,001479	53,2	0,001258	57,7	0,001075	—	—	10,41
400	70,2	0,001441	70,59	0,001490	62,1	0,001201	68,4	0,000985	—	—	11,82
500	79,1	0,001441	80,09	0,001559	69,2	0,001183	76,4	0,001000	76,04	0,001130	13,12
Mittel		0,001368		0,001407		0,001235		0,001041		0,001130	

Das Mittel von allen diesen Versuchen ist = 0,001236 oder $\frac{1}{809}$ der ganzen Belastung, und zwar für hart gegossene Räder von $34,5$ Zoll Durchmesser oder $17,25$ Zoll Halbmesser.

Setzt man die rollende Reibung mit Comlomb dem Halbmesser umgekehrt proportional, was bei den geringen Unterschieden in den Abmessungen der Eisenbahnräder unbedenklich statthast ist, so erhält man den Widerstands-Coeffizienten φ für 1 Pfd. Druck und für 1 engl. Fuß Halbmesser gleich 0,001777; oder für preuß. Maß: $\varphi = 0,00161^*) = \frac{1}{622}$.

Herr Wood benutzt nur die Ergebnisse der obigen Versuche, um aus den vorhergehenden den Betrag der Achsenreibung zu berechnen. Die dafür gefundenen Werthe sind aber nicht bloß im Ver-

*) Nach den Angaben des Herrn Professors Weisbach ist der Widerstands-Coeffizient für Gunderäder auf Eisenbahnschienen $\varphi = 0,00148$.

gleich zu andern Erfahrungen über die Achsenreibung zu groß, sondern sie weichen auch bedeutend von einander ab, indem sie zwischen $\frac{1}{10}$ und $\frac{1}{25}$ des aufliegenden Gewichtes variiren. Der Autor glaubt sich deshalb zu der Folgerung berechtigt, daß entweder der Widerstand am Umfange der Räder größer sein müsse, als er ihn für die Berechnung angenommen hat, oder daß in der Konstruktion, sei es der Wagen oder der Achsen, gewisse Mängel stattgefunden haben. — Ersteres ist in That der Fall; denn obgleich die rollende Reibung oben gleich $\frac{1}{809}$ der Belastung gefunden wurde, so bringt Wood dieselbe doch nur $= \frac{1}{1000}$ in Rechnung, weil es, wie er sagt, nicht ganz zu vermeiden gewesen sei, daß sich beim Herablaufen der Wagenräder die Spurfränze seitwärts an den Schienen rieben.

Unstreitig muß man dem beipsichtigen, um so mehr, als schon geringe Unterschiede zwischen dem Durchmesser der Räder dazu Veranlassung geben. Allein dann ist eben so wenig zu bestreiten, daß eine solche Seitenreibung aus ganz gleichen Gründen auch bei den früheren Versuchen zur Ausmittelung des summarischen Widerstandes stattgefunden hat. Wollte man nun deshalb den Coefficienten der rollenden Reibung geringer annehmen, so würde jener vergrößerte Widerstand auf Rechnung der Achsenreibung kommen, und die Resultate müssen sich offenbar minder richtig herausstellen, als wenn gegenheils die erwähnte Seitenreibung der Spurfränze als eine Eigenthümlichkeit des Widerstandes am Umfange der Räder betrachtet wird.

Aus diesen Gründen dürfte es richtiger sein, die rollende Reibung nach dem vorhin gefundenen Mittelwerthe $= 0,001777$ anzunehmen, und wenn man danach die früheren Versuche (Taf. I.) einer neuen Berechnung unterwirft, so stellen sich die Ergebnisse wie folgt:

N ^o	Halbmesser d.		Ganzes Gewicht d. Wagens.	Gewicht, welches auf den Achsen lastet.	Summarischer Widerstand.	Widerstand		Verhältniß der Achsenreibung zum aufliegenden Gewichte.	Bemerkungen.
	Räder.	Achsen.				am Umfang der Räder.	der Achsenreibung.		
	Zoll.	Zoll.	H.	H.	H.	H.	H.	μ	
1	17	1½	8540	7280	39	10,906	28,094	0,04771	Bei dem Verf. waren die messingenen, nur 1½ Zoll breit Pfannen eingeschnitten.
2	"	"	2604	1344	12,5	3,325	8,175	0,07520	
3	"	"	2604	1344	13,5	3,325	9,175	0,08440	
4	"	"	4816	3584	26	6,150	19,850	0,06848	
5	"	"	7056	5824	34	9,011	24,989	0,05305	
6	"	"	8512	7280	40	10,872	29,128	0,04865	
7	"	"	8456	7224	39	10,798	28,202	0,04827	
8	17½	1½	9408	8096	39,35	11,464	27,886	0,04018	Von Wood angeschlossen.
9	"	"	9408	8096	39,35	11,464	27,886	0,04018	
10	"	"	9408	8096	41,46	11,464	29,996	0,04323	
11	"	"	9408	8096	44,19	11,464	32,726	0,04716	
12	"	"	3472	2160	12,73	4,230	8,500	0,04653	
13	"	"	9408	8096	41,45	11,464	29,986	0,04321	
14	"	"	9408	8096	41,18	11,464	32,716	0,04715	Deegleichen.
15	"	"	3472	2160	12,75	4,230	8,520	0,04602	Deegleichen.
16	17	1½	9100	7840	39	11,621	27,379	0,04318	

Eine Vergleichung der in der letzten Spalte dieser Tabelle ausgeworfenen Werthe des Reibungs- Coefficienten giebt allerdings hinsichtlich der Uebereinstimmung ein wenig befriedigendes Resultat, obwohl sie in Hinsicht der Größe geringeren Bedenken unterliegen, als die Wood'schen Angaben. Am meisten weichen die Dynamometerversuche (Nr. 1 bis 7) von einander ab, die überdies sämmtlich größer sind, als die Ergebnisse der Versuche auf der schiefen Ebene (Nr. 8 bis 16). Schließt man von jenen den dritten Versuch aus, weil bei diesem die messingenen Lager ihrer zu geringen Breite wegen ausgefressen und zerstört waren, so geben die übrigen Versuche dieser Gruppe den Mittelwerth $0,05689 = \frac{1}{15}$, während die Versuche der zweiten Gruppe $0,04409 = \frac{1}{23}$ als Mittel ergeben.

Die Abweichung dieser Mittel von einander mag zum Theil darin begründet sein, daß die Widerstände bei den ersten Versuchen, wo der Dynamometerwagen durch Menschenkraft fortgezogen wurde, eben deshalb anders ausfallen mußten, als die nach einer ganz andern Methode, nämlich auf der schiefen Ebene, ausgeführten Versuche. Zum Theil mag aber auch eine verschiedene Beschaffenheit der Wagenachsen, der Pfannen, der angewendeten Schmiere etc. die Ursache jener Abweichung sein, was um so wahrscheinlicher ist, als Wood seine Versuche in den Jahren 1818, 19, 25 und kurz vor Herausgabe der 2. Auflage seines Werkes (1831), also in sehr verschiedenen Zeiten angestellt hat, in Folge dessen es leicht geschehen konnte, daß die Umstände, unter welchen die Versuche in der einen Zeit gemacht wurden, wesentlich verschieden waren von denen, die in der andern Zeit stattfanden.

Wie dem aber auch sein möge, so scheinen doch die unter Nr. 8 bis 16 aufgeführten Versuche mehr Zutrauen als die vorhergehenden zu verdienen, nicht bloß deshalb, weil sie unter sich mehr Uebereinstimmung darbieten, sondern besonders, weil bei ihnen der summarische Widerstand nach derselben Methode gefunden wurde, wie der Widerstand am Umfang der Räder. Demnach würde man für den Coefficienten der Achsenreibung einstweilen $0,044 = \frac{1}{23}$ als den wahrscheinlichsten Werth annehmen können.

Um indessen diesen Punkt noch mehr ins Klare zu bringen, hat Wood noch eine neue Reihe von Versuchen angestellt, deren Ergebnisse aber mit den Vorhergehenden so wenig wie mit andern Erfahrungen zu vereinigen sind. Es wurde dazu dieselbe geneigte Bahnstrecke ausgewählt, auf welcher früher die rollende Reibung war ermittelt worden; auch kamen dieselben Räder dabei in Anwendung, nur mit dem Unterschiede, daß man bald messingene, bald gußeiserne Achslager einsetzen ließ, um den Einfluß dieser verschiedenen Metalle auf den Betrag der Reibung kennen zu lernen. Die Räder hatten $34\frac{1}{2}$ Zoll, die zugehörigen Achsen 2,9 Zoll Durchmesser und die Pfannenlager waren 3 Zoll breit.

Das Endresultat dieser Versuche besteht darin, daß der gesammte Widerstand bei Anwendung der messingenen Lager im Mittel $= \frac{1}{471}$, bei gußeisernen Lagern aber $= \frac{1}{453}$ des ganzen Gewichtes vom Wagen ist. Daraus berechnet Wood, indem er wie früher die rollende Reibung zu $\frac{1}{1000}$ annimmt, den Coefficienten der Achsenreibung gleich $\frac{1}{60}$ der Belastung, während derselbe nach den vorhergehenden Versuchen ohngefähr dreimal so groß gefunden wurde.

Ich habe geglaubt, die Mittheilung aller Einzelheiten dieser Versuche unterlassen zu dürfen, da der Autor selbst kein rechtes Zutrauen für deren Richtigkeit zu hegen scheint. Daß sich die

Widerstände bei den letzten Versuchen so sehr viel geringer als bei den früheren herausstellten, veranlaßten ihn zu der Annahme, es möchten wohl Fehler stattgefunden haben, und namentlich weist er auf die Schwierigkeit der richtigen Beobachtung der Zeiten hin, bei welchen selbst geringe Fehler von einer halben Sekunde schon einen beträchtlichen Einfluß auf die daraus berechneten Resultate haben. — In weitem Verlauf seiner Untersuchung kommt Wood wieder auf die Ergebnisse der früheren Versuche zurück, nach welchen es ihm als angemessen erscheint, für gewöhnliche Kohlenwagen in der Praxis die rollende Reibung = 0,001 des Drucks, den Coefficienten der Achsenreibung aber = 0,05 anzunehmen.

Ich bemerke dazu nur, daß der letzte Zahlenwerth zwar mit den Ergebnissen der Morin'schen Versuche übereinstimmt, nach welchen die Achsenreibung der Fuhrwerke ebenfalls gleich $\frac{1}{20}$ angenommen wird. Allein dagegen ist zu erinnern, daß bei gewöhnlichen Fuhrwerken, wenn sie auch mit eisernen Achsen versehen sind, doch schon deshalb eine größere Reibung als bei Eisenbahnwagen statt findet, weil bei jenen die Achsachsenkel niemals so glatt sind und auch nicht so sorgfältig in Schmiere erhalten werden, als bei diesen. Mit Rücksicht darauf dürfte der nach meiner Berechnung gefundene Reibungscoefficient 0,044 sich mehr für die Praxis eignen.

Außerdem ist nicht außer Acht zu lassen, daß der obige für die rollende Reibung angenommene Zahlenwerth nur auf hart gegossene Räder von $34\frac{1}{2}$ Zoll Durchmesser, die auf gußeisernen Schienen laufen, Anwendung findet. Für Räder von 36 Zoll Durchmesser würde er sich, alles Übrige gleich gesetzt, auf 0,00096 reduciren, und eben so hat die Beschaffenheit der Bahn einen wesentlichen Einfluß auf seine Größe.

II. Versuche von de Pambour.

Diese Versuche fanden im Sommer des Jahre 1834 auf der Liverpoolscher Bahn mit den dort üblichen Wagen statt, wobei man sich zuerst einer Federwage bediente, um die Größe des Widerstandes zu messen. Das Fortziehen der Wagen geschah aber nicht durch Menschen- oder Thierkraft, weil durch deren stoßweise Wirkung zu große Schwankungen des Zeigers entstehen, sondern um letztere zu vermeiden durch einen Dampfwagen, dem ein Zug von zwölf Waggons angehängt war. Das Dynamometer wurde zwischen dem neunten und zehnten Wagen angebracht, so daß es also nur die drei letzten Wagen des Zuges, zusammen 14,27 Tonnen wiegend, fortzuziehen hatte. Die zu dem Versuche ausgewählte Eisenbahnstrecke war ganz wagerecht.

Nachdem die Lokomotive mit dem angehängten Zuge eine Geschwindigkeit von 3 bis 4 engl. Meilen pr. Stunde erlangt hatte, schwankte der Zeiger des Dynamometers zwischen 50 und 170 Pfund, in einzelnen Fällen sogar noch über jene Grenze hinaus bis an das Ende der Scala, so daß man diese Art der Beobachtung als eine sehr unsichere anerkennen mußte.

Um indessen den Versuch nicht ganz verloren zu geben, nimmt de Pambour als mittlere Zugkraft 110 Pfd. an und berechnet daraus den Widerstand auf die Tonne

$$\frac{110}{14,27} = 7,7 \text{ Pfd}; \text{ oder } = \frac{1}{291} \text{ der Last.}$$

Zur Erlangung zuverlässigerer Ergebnisse wurde nunmehr im anderes Verfahren in Anwendung gebracht, darin bestehend, den Wagenzug auf einer geneigten Bahn frei herab, und auf der

am Fuße des Abhanges sich anschließenden beinahe horizontalen Strecke so weit fortlaufen zu lassen, bis er zum Stillstande kommt. Hierbei hat man nur nöthig, die durchlaufene Bahnstrecke genau zu nivelliren, ohne der so unsichern Zeitbeobachtung bedürftig zu sein. Der Widerstandscoefficient erzieht sich nämlich sofort, indem man den Höhenunterschied zwischen dem Anfangs- und dem Endpunkte der Bewegung durch die horizontale Entfernung beider Punkte von einander dividirt (vergl. S. 156). Der Verfasser nimmt statt der letztgenannten Entfernung, d. h. statt der horizontalen Projection des durchlaufenen Weges, die Länge dieses Weges selbst zum Divisor, wodurch natürlich seine Resultate um etwas zu klein ausfallen.*) Der Unterschied ist aber so gering, daß er für die Praxis außer Acht bleiben kann.

Die nach dieser Methode ausgeführten Versuche fanden auf einer der Rampen der Liverpoolscher Bahn in der Nähe von Sutton statt. Die Neigung dieser Rampe wurde bis auf $\frac{1}{10}$ Zoll genau nivellirt und in Entfernungen von je 330 Fuß wurden numerirte Pfähle eingeschlagen. Der Durchmesser der Wagenräder betrug 3 Fß. engl., der der Achsenhälfte $1\frac{3}{4}$ Zoll. Die Zapfenlager bestanden aus Messing und enthielten in ihrem oberen Theile die Schmiere, welche durch eine angebrachte Oeffnung stetig auf die Achsenhälfte floß. In Übrigen wurde weder an den Wagen noch an der Schmiere irgend etwas geändert, sondern alles so gelassen, wie es im täglichen Dienste ist.

Nachstehende Tabelle enthält die gefundenen Ergebnisse:

N ^o der Vers.	Bezeichnung der Wagenzüge.	Gewicht des ganzen Zuges. Tonnen.	Länge der durch- laufen. Bahn. Fuß.	Fall auf dieser Länge. Fuß.	Verhältniß des Widerstan- standes zum ganzen Gewicht	Wider- stand auf die Tonne. u.	Bemerkungen.
1	5 mit Riegeln und 1 mit 10 Personen be- ladene Wagen	31,31	9933	38,55	1 : 258	8,68	
2	Desgleichen, die ersten 5 Wagen leichter..	25,58	9324	38,19	244	9,18	
3	1 einzelner der obigen Wagen.....	4,65	7326	37,16	197	11,37	
4	Desgleichen.....	5,15	6663	36,95	180	12,44	} Das eine Achslager sehr heiß geworden.
5	Desgleichen.....	5,20	7455	37,19	200	11,20	
6	Desgleichen *).....	1,85	6204	36,78	169	13,25	*) Wagen mit Plattform u. offener Gallerie.
7	19 mit Gütern beladene Wagen.....	92,00	10728	38,85	276	8,12	
8	1 Tender der Lokomotive Jupiter **).....	—	5967	36,66	163	13,74	**) Dem Luftdruck eine große Fläche darbietend.
9	Desgleichen " " Atlas.....	5,5	7266	32,88	221	10,01	
10	14 Wagen, mit Gütern beladen.....	61,65	9579	35,32	271	8,27	
11	1 Tender und 10 beladene Wagen.....	48,72	10008	38,58	259	8,65	
12	1 " " 24 " "	110,00	10668	38,82	275	8,15	
13	Lokomotive Fury, 1 Tender u. 17 Lastwagen	94,96	11262	39,10	288	7,78	Widerst. d. Dampfswagens allein = 13,78 u. pr. Ton.
14	" Vulcan, 1 " 20 "	110,14	10911	38,75	282	7,94	Widerst. d. Dampfswagens allein = 14,87 u. pr. Ton.
15	" Leeds, 1 " 7 "	33,52	8175	37,35	219	10,23	Widerst. d. Dampfswagens allein = 15,84 u. pr. Ton.

*) Man sehe Grelle, Journal für die Baukunst, Bd. X S. 202.

Die bedeutenden Abweichungen zwischen den, in den beiden letzten Spalten dieser Tabelle aus-
geworfenen, Widerständen rühren von dem Druck der Luft gegen die Vorderfläche des ersten Wagen
her; denn die nachfolgenden Wagen erfahren von der Luft, nach der Ansicht des Autors, keinen
Widerstand, wenn sonst eine Windstille vorausgesetzt wird, wie es bei den Versuchen der Fall war.
Daraus leitet de Pambour ein Mittel her, den Widerstand der Wagen auf der Bahn mit Aus-
schluß des Luftdruckes zu bestimmen, indem er den durch die Versuche Nr. 3, 4, 5 und 6 ermittelten
Widerstand eines einzelnen Wagens (zu 11,77 Pf. pr. Tonne angenommen) von den Widerständen
der Wagenzüge bei den Versuchen Nr. 1, 2, 7 und 10 in Abzug bringt. Auf gleiche Weise werden
die übrigen Versuche behandelt, wodurch sich die nachstehend zusammengestellten Ergebnisse finden.

Nr des Vers.	Bezeichnung der Wagenzüge.	Ganzer Zug		Erster Wagen		Übriger Theil des Zuges			Verhältnis des Widerstan- des zum Gewicht.
		Gewicht Tonnen.	Widerstand H.	Gewicht Tonnen.	Widerstand H.	Gewicht Tonnen.	Widerstand		
							im Ganzen H.	pro Tonne H.	
1	6 Wagen, beladen	31,31	271,77	6,13	72,15	25,18	199,62	7,92	1 : 283
2	Deegleichen	25,58	234,82	5,12	60,26	20,46	174,56	8,53	263
7	19 beladene Wagen	92,00	747,04	4,84	56,97	87,16	690,07	7,92	283
10	14 " "	61,65	509,85	4,40	51,79	57,25	458,06	8,00	280
11	1 Tender, 10 Lastwag.	48,72	411,43	5,00	50,05	43,72	361,38	8,29	270
12	1 " 24 "	110,00	896,50	5,50	55,55	104,50	791,95	7,58	296
13	1 Lokomot. 18 Wagen	94,96	738,79	8,20	113,00	86,76	625,79	7,21	311
14	1 " 21 "	110,14	874,51	8,54	127,00	101,60	747,51	7,35	305
15	1 " 8 "	33,52	342,91	7,07	112,00	26,45	230,91	8,73	353
Mittel für 1 Wagen				6,09	77,64		Mittel	7,95	1 : 282

Gemäß diesen Versuchen nimmt der Autor den Widerstand der Wagen im Zuge zu 8 Pfd auf die
Tonne an, während der Widerstand des ersten Wagens, der an der Spitze des Zuges geht und
deshalb außer der Reibung nach den Druck der Luft zu bewältigen hat, im Durchschnitt 77,64 Pfd.
auf 6,09 Tonnen oder $12\frac{3}{4}$ Pfd. auf die Tonne beträgt.

Herr de Pambour unterwirft die obigen Versuche in der Zweiten Auflage seines berühmten
Werkes einer neuen Berechnung, wobei er den Luftwiderstand gänzlich ausschließt, die Ergebnisse
also gewissermaßen auf den luftleeren Raum reducirt. Dadurch gelangt er zu einem beträchtlich
geringeren Ergebnisse, als es sich nach der vorigen Tabelle im Mittel herausgestellt hat, nämlich zu
dem, daß der eigentliche Reibungswiderstand 5,76 Pfd. auf die Tonne beträgt, wofür er aber in
runder Zahl 6 Pfd. annimmt. *) Will man nun mittelst dieser Zahl die erforderliche Kraft berechnen,
die der Dampfwagen zur Fortbewegung eines Wagenzuges auf der Eisenbahn entwickeln muß, so
darf nicht außer Acht gelassen werden, daß dabei der Widerstand der Luft nach Maßgabe der
Geschwindigkeit des Zuges besonders in Rechnung zu bringen ist, und zwar nicht bloß mit Rücksicht

*) Nach derselben Methode hat de Pambour die von Wood über die rollende Reibung angestellten Versuche
einer nachträglichen Berechnung unterworfen und dadurch gefunden, daß der genannte Widerstand nicht, wie Wood
angiebt, $\frac{1}{1000}$ der Belastung, sondern $\frac{1}{2}$ dieser Angabe beträgt, während $\frac{1}{2}$ auf den Luftwiderstand kommen. Conf. Moni-
teur industr. Novbr. 1843 No. 773. und Dingler's polytechn. Journal, Bd. XCI. S. 471.

auf die Wirkung gegen die Vorderfläche des größten Wagens, sondern auch gegen die sich drehenden Räder, Speichen und Achsen, welche bei ihrer schnellen Bewegung den Widerstand jenes Mediums nicht minder zu erleiden haben.

Man sieht leicht sein, daß die auf solche Weise auszuführenden Berechnungen sehr complizirt ausfallen müssen, weshalb der Autor schlägt, die summarische Reibung mit 7 Pfd engl. für die Tonne, außerdem aber bloß den Druck der Luft gegen die Vorderfläche des Wagenzuges in Rechnung zu bringen. Zur Bestimmung des letzten Widerstandes giebt er folgende, aus den Beobachtungen von Borda, Dubuat und L'hibault hergeleitete, Formel:

$$Q = 0,002687 \cdot SV^2,$$

welche den Widerstand Q in Pfunden liefert, wenn die Vorderfläche S in Quadratrufen, die Geschwindigkeit V aber in Meilen für die Stunde, alles nach englischem Maaße und Gewicht, genommen wird. Die Größe von S kann nach de Pambour für den größten Eisenbahnwagen zu 70, für gewöhnliche Personenwagen zu 60 bis 64 Quadratrufß gerechnet werden.

Noch gedenkt den Verfasser einiger Versuche, die er durch Herrn Doctray auf der Darlington-Eisenbahn hat anstellen lassen, um zu ermitteln, welchen Einfluß die Anbringung einer elastischen Unterstüzung der Eisenbahnwagen durch Federn auf den gesammten Widerstand hat. Zu diesem Ende kam ein Wagen mit Federn in Anwendung, dessen Widerstand gleich $8\frac{1}{2}$ Pfd. pr. Tonne gefunden wurde. Als darauf die Federn durch untergeschlagene Keile abgesteift waren, fand man den Widerstand gleich $8\frac{3}{4}$ Pfd. pro Tonne, so daß sich also ein geringer Vortheil auf Seiten der elastischen Unterstüzung herausstellte. Ein größerer Unterschied war auch wohl bei der Bewegung der Wagen auf einer glatten Eisenbahn nicht füglich zu erwarten.

Die vorstehend mitgetheilten Beobachtungen, so werthvoll sie an und für sich auch sind, können gleichwohl auf den gegenwärtigen Zustand des Eisenbahnwesens nur noch eine sehr beschränkte Anwendung finden. Denn seit der Zeit, wo dieselben gemacht wurden, sind so wesentliche Aenderungen eingetreten, nicht bloß in Bezug auf Maaßverhältnisse und Wahl der Materialien, Schmiermittel u. für die der Reibung unterworfenen Theile, sondern auch überhaupt in Bezug auf die inzwischen eingeführten Verbesserungen im Bau der Eisenbahnen und der Transportmittel, daß die gegenwärtig stattfindenden Verhältnisse von denen der früheren Zeit durchaus verschieden sind. Neue Versuche sind daher in praktischer wie in wissenschaftlicher Hinsicht ein dringendes Bedürfnis geworden, weshalb der Verein der deutschen Eisenbahntechniker sich auf meinen Antrag veranlaßt gefunden hat, diese Angelegenheit zu einer Vereinskache zu machen, indem er es bei den kürzlich in Berlin stattgehabten Conferenzen den theilhaftigen Mitgliedern angelegentlich empfahl, in verschiedenen Gegenden Deutschlands, wo sich eben Gelegenheit dazu findet, nach der sinnreichen Methode von de Pambour möglichst umfangreiche Versuche anstellen zu lassen. Kommen dieselben, wie beschlossen worden, nach einem gleichmäßigen Verfahren zur Ausführung, so werden die Ergebnisse geeignet sein, eine fühlbare Lücke der Ingenieur-Wissenschaft auszufüllen.

III. Versuche über den Widerstand der Achsenreibung.

Die in der Ueberschrift genannten Versuche (mitgetheilt im Kunst- und Gewerbeblatt für Bayern, Bd. XXVII, S. 452 u. f.) sind auf Veranlassung des königlich Bayrischen Oberbaurathes,

Herrn Pauli, in der Eisenbahnwagen-Bauanstalt zu Nürnberg angestellt, um zu ermitteln: welche Legirung zu den Lagern der schmiedeeisernen Achsen für Eisenbahnwagen den geringsten Widerstand erzeuge, bei welchen dieser Legirungen am frühesten eine nachtheilige Erwärmung eintrete, und in wiefern durch eine geringe Vergrößerung der sich reibenden Flächen wirklich eine Verminderung jener nachtheiligen Wirkungen zu erzielen sei.

Der zu diesen Versuchen in Anwendung gebrachte Kraftmesser ist der bekannte Spiralfeder-Dynamometer von White, den Herr Pauli durch Beschreibung und Abbildung näher erläutert, und worauf hier der Kürze halber Bezug genommen wird. Alle Versuche wurden mit zwei Achsen von verschiedener Größe angestellt, indem man dieselben auf beiden Seiten des Versuchsapparates in genau passenden Lagern aus den zu prüfenden Metallcompositionen legte und durch eine Dampfmaschine mit der beim Fahren üblichen Geschwindigkeit von 5½ deutschen Meilen in der Stunde gleichzeitig in Bewegung setzte. Dabei wurde der durch eine Hebelverbindung hervorgebrachte Druck auf die Achslager, welcher für beide Achsen stets gleich war, so normirt, daß er einer Belastung von 33 Zolcentnern für jeden Zapfen entsprach.

Die kleinere Versuchsachse hatte Zapfen von 2,484 Zoll Durchmesser, 4,944 Zoll Länge; die Zapfen der größeren Achse hatten 2,784 Zoll Durchmesser und 6 Zoll Länge, alle Abmessungen in Bayrischem Maße verstanden. Als Zapfenschmiere wurde gewöhnliches Maschinenöl genommen, um die Resultate der wirklichen Anwendung möglichst anpassend zu erhalten.

Nachstehende Tafel läßt die Bestandtheile der geprüften Lager und die entsprechenden Reibungscoefficienten ersehen.

Nr. des Verf.	Bestandtheile der Lager in Gewichtsprozenten				Zapfen von 2,784" Durchm.		Zapfen von 2,484" Durchm.		Bemerkungen.
	Zinn.	Kupfer.	Antimon.	Zink.	bewegb. Kraft an 6" Hebelsarm.	Reibungscoefficient.	bewegb. Kraft an 6" Hebelsarm.	Reibungscoefficient.	
1	95,5	4,0	0,5	—	22	0,0146	48	0,0357	Die Zapfen der einen Achse wurden nach 2, die der andern Achse nach 1 Stunde heiß.
2	90,9	6,1	—	3,0	5	0,0033	45	0,0334	
3	90,4	1,9	7,7	—	7	0,0046	35	0,0260	Bei der ersten Achse wurden die Zapfen selbst nach 11ständiger Arbeit nicht heiß; bei der zweiten erhitzten sie sich schon nach 1 bis 2 Stunden mehr oder weniger.
4	89,3	1,8	8,9	—	7	0,0046	38	0,0282	
5	88,9	3,7	7,4	—	40	0,0265	75	0,0557	Nach 1½ und ¾ Stunden erhitzt.
6	87,0	4,3	8,7	—	12	0,0080	12	0,0089	Die Zapfen der ersten Achse blieben stets kalt, die der andern erhitzten sich nach 1½ Stunden.
7	77,8	18,5	3,7	—	22	0,0146	57	0,0423	
8	64,5	24,4	—	11,1	38	0,0252	62	0,0461	Nach 1½ und 1 Stunde erhitzt. " 1 " ½ " desgl.
9	61,6	7,7	3,07	—	150	0,0994	175	0,1300	Nach 10 Min. wurden die Zapfen beider Achsen sehr heiß und ihre Oberfläche durch Abnutzung rauh.
10	16,7	83,3	—	—	120	0,0796	125	0,0929	
11	Gußeiserne Lager				115	0,0762	125	0,0929	Zapfen und Lager nach 10 Min. stark angegriffen und erhitzt.

Außer den vorstehend aufgeführten Metallcompositionen wurden noch Achslager aus 75 Zinn, 8½ Blei, und 16½ Wismuth, so wie solche aus 66½ Antimon und 33½ Blei geprüft. Erstere wurden

in wenigen Minuten so heiß, daß sie schmolzen*); letztere zeigten sich dagegen als spröde und leicht zerbrechlich, weshalb sie keine weitere Berücksichtigung verdienen.

Die Folgerungen, welche Herr Pauli aus den angeführten Versuchen herleitet, sind

- 1) Der kleine Zapfen verursachte durchgehend einen beträchtlicheren Widerstand als der große.
- 2) Der geringste Widerstand war bei 90 % Zinngehalt, nach Vers. Nr. 2, 3 und 4. Bei einem größeren Zinngehalt, wie in Nr. 1, scheint die Composition zu weich zu sein, während der Widerstand in dem Maße zunimmt, als der Zinngehalt unter 90 % herabsinkt.
- 3) Kupfer und Antimon dürfte der Legirung, nach Nr. 3 und 4, im Verhältniß zu 2 und 8 % zuzusetzen sein.
- 4) Ein starkes Vorwalten des Antimons wie in Nr. 9 erhöht die Reibung beträchtlich, während ein Uebermaß von Kupfer, wie in Nr. 7 und 8, keine auffallenden Abweichungen veranlaßt.
- 5) Antimon und Zink scheinen sich gegenseitig, laut Proben Nr. 2 und 8, vertreten zu können, ohne daß wesentliche Nachtheile entstehen.

Die auf Grund dieser Resultate bei der Königl. Wagenbauanstalt angenommene Legirung besteht aus 90 % Zinn, 2 % Kupfer und 8 % Antimon; sie soll bisher in Bezug auf Dauer, leichten und kalten Gang allen Erwartungen entsprochen haben.

Hinsichtlich der dritten Frage, deren Beantwortung der Zweck dieser Versuche war, so begnügt sich der Autor, darauf hinzuweisen, daß die stärkeren Zapfen nicht bloß eine geringere Reibung, sondern auch eine langsamere Erhitzung als die kleinen Zapfen gezeigt haben, woraus die Bejahung der bezüglichen Frage gefolgert wird. Nach meinem Dafürhalten ist dieselbe aber durch vorstehende Versuche noch nicht vollständig entschieden; vielmehr wäre dazu nöthig gewesen, bei einer und derselben Achse die Lagerflächen in möglichst weiten Grenzen zu verändern, und den Einfluß davon auf den Betrag der Reibung und die Erhitzung zu beobachten. Bei den Versuchen waren nämlich die Lager so construirt, daß sie die Umfänge der Zapfen nur auf 120 Graden berührten. Es wäre sehr wünschenswerth und lehrreich gewesen, die Versuche auf Lager auszudehnen, welche aufwärts eine Berührungsfläche bis zu 180° des Zapfenumfanges, abwärts aber eine immer kleinere Fläche bis zu einer linearen Berührung darbieten. Unter Andern würde sich dadurch herausstellen haben, in wie fern die von mir über diesen Gegenstand aufgestellte Theorie (S. 134) mit der Erfahrung übereinstimmt, oder vielleicht der Berichtigung bedarf.

Morin's Versuche über Achsenreibung. Die nachstehenden Angaben sind als Mittelwerthe der Ergebnisse einer sehr großen Anzahl von Versuchen zu betrachten, die der genannte Autor mit der ihm eigenthümlichen Genauigkeit angestellt und nebst den Resultaten anderer Versuche in einer besondern Schrift**) bekannt gemacht hat. Die der Prüfung unterworfenen zwei Zapfen hatten 0,054 und 0,1 Meter (2 u. 3¼ Zoll) Durchmesser; die Belastung der zugehörigen Achse variierte in verschiedenen Abstufungen von 447 bis 1884 Kilog., und eben so verschieden waren die Geschwindigkeiten, indem man die Wellen von 6 bis zu 30 Umgängen in der Minute machen ließ.

*) Legirungen aus Zinn, Blei und Wismuth in verschiedenen Verhältnissen bilden bekanntlich die sogenannten leichtflüssigen Metalle.

**) *Nouvelles Expériences sur l'adhérence des pierres et des briques posées en bain de mortier, le frottement des axes de rotation, la variation de tension des courroies, etc.* Paris, 1838.

Reibende Körper:	Beschaffenheit der Schmieren.	Reibungs- Coefficient.	Bemerkungen.
1. Gußeiserne Zapfen in Lagern aus Gußeisen.	Olivenöl, Schweinesfett oder Talg, nach einander gebraucht.....	0,054 0,073 — 0,082	Die Schmieren beständig erneuert. Auf gewöhnliche Art von Zeit zu Zeit geschmiert.
	Desgleichen und mit Wasser genezt.....	0,079	
	Asphaltschmiere.....	0,054	Bergtheer von Bechelbronn.
	Bloß fettig anzufühlen.....	0,137	Die vorige Schmiere abgewischt.
	Desgleichen und mit Wasser genezt.....	0,137	Entsprechend dem Falle, wo die Schmiere nicht unausgesetzt erneuert wird.
Die Oberflächen sehr fettig.....	0,073		
	Desgleichen und mit Wasser genezt.....	0,073	
2. Gußeiserne Zapfen in Lagern aus Bronze.	Olivenöl, Schweinesfett oder Talg.....	0,054 0,070 — 0,080	Die Schmieren beständig erneuert. Von Zeit zu Zeit geschmiert.
	Weicher Theer (cambouis).....	0,065	
	Bloß fettige Oberflächen.....	0,166	Die Theerschmiere abgewischt.
	Sehr wenig fettig.....	0,194	Die Flächen fingen an sich abzureiben.
	Fettig und mit Wasser genezt.....	0,161	
	Von Asphaltschmiere noch fettig.....	0,091	
	Desgleichen und mit Wasser genezt.....	0,086	
3. Gußeiserne Zapfen in Lagern aus Guajacholz.	Trocken ohne Schmiere.....	0,185	Die Schmieren beständig erneuert.
	Olivenöl oder Talg.....	0,092	
	Schmiere aus Schmalz und Graphit....	0,109	
	Fettig nach dem Abwischen des Oels....	0,100	
	Desgleichen nach der Graphitschmiere....	0,143	
4. Schmiedeeiserne Zapfen in Lagern aus Gußeisen.	Del, Schweinesfett, Talg.....	0,054 0,070 — 0,080	Die Schmieren beständig erneuert. Von Zeit zu Zeit geschmiert.
5. Schmiedeeiserne Zapfen in Lagern aus Bronze.	Del, Schweinesfett, Talg.....	0,054 0,070 — 0,080	Die Schmieren beständig erneuert. Von Zeit zu Zeit geschmiert.
	Schweinesfett und Graphit gemengt.....	0,111	
	Theer, Asphaltschmiere.....	0,090	Desgleichen.
	Bloß fettig und mit Wasser genezt.....	0,189	Die Schmieren waren etwas steif. Die Flächen fingen an sich abzureiben.
6. Schmiedeeiserne Zapfen in Lagern aus Guajacholz.	Delschmiere.....	0,114	Von Zeit zu Zeit geschmiert.
	Schweinesfett.....	0,135	
	Bloß fettige Oberflächen.....	0,188	
7. Zapfen und Lager aus Bronze.	Delschmiere.....	0,101	Von Zeit zu Zeit geschmiert.
	Talgschmiere.....	0,093	
8. Zapfen aus Bronze i. Lagern a. Gußeisen.	Delschmiere.....	0,052	Desgleichen.
	Talgschmiere.....	0,045	

Reibende Körper.	Beschaffenheit der Schmieren.	Reibungs- Coefficient.	Bemerkungen.
9. Guajaczapfen in Lagern aus Guß- eisen.	Schweinesfett.....	0,116	Von Zeit zu Zeit geschmiert.
	Bloß fettig.....	0,153	
10. Zapfen u. Lager aus Guajacholz.	Schweinesfett.....	0,070	Die Schmiere beständig erneuert.

Herr Morin folgert aus diesen Versuchen, daß die Achsenreibung eben so, wie er dies früher bei der gleitenden Reibung beobachtet hat, der Belastung proportional und von der Geschwindigkeit unabhängig ist; denn der Reibungscoefficient behält, unter sonst gleichen Umständen, stets denselben Werth, wenn auch jene in dem Verhältnisse wie 1 : 4, diese dagegen wie 1 : 5 geändert wurde.

Was den Durchmesser der Zapfen betrifft, so hat die Größe desselben bei einer gleichen Beschaffenheit der sich berührenden Flächen keinen Einfluß auf den Werth des Reibungscoefficienten gezeigt. Nur in sofern war allerdings eine Verschiedenheit zu bemerken, als bei den kleinen Zapfen durch den größeren Druck auf jeden Punkt ihrer Lagerflächen die angewandte Schmiere mehr oder minder herausgetrieben wurde, was natürlich um so vollständiger erfolgte, je weicher und flüssiger die Schmiere war. Dadurch wurden die sich berührenden Flächen dem Zustande nahe gebracht, der in der vorstehenden Tabelle mit „bloß fettig“ angezeigt ist. In der That hörte jene vom Durchmesser oder Zapfen herrührende Verschiedenheit ganz auf, so bald man durch Entfernung der Schmiere den „bloß fettigen“ Zustand der Berührungsflächen von Hause aus herstellte.

Im Allgemeinen schließt der Autor, daß der Betrag der Reibung weniger von der Substanz der reibenden Körper als von der Beschaffenheit der in Anwendung gebrachten Schmiermittel und deren öfteren Erneuerung abhängig ist. Für Zapfen und Lager aus Schmiedeeisen, Gußeisen und Bronze (Roßguß?) wird die Reibung unter gleichen Umständen als gleich angenommen, sei es, daß Olivenöl, Schweinesfett oder Talg als Schmiere in Anwendung kommt. Für diese Substanzen ist nach Herrn Morin der Reibungscoefficient anzunehmen:

Bei beständiger Erneuerung der Schmiere = 0,054;
wenn wie gewöhnlich nur von Zeit zu Zeit geschmiert wird . . . = 0,070 bis 0,080;
bloß fettige Oberflächen nach Wegnahme der Schmiere = 0,140 „ 0,160.

Im letztern Falle soll es keinen Unterschied machen, ob die sich reibenden Flächen mit Wasser benetzt werden oder nicht.

Schließlich verdient bemerkt zu werden, daß die vorstehenden Angaben ziemlich gut übereinstimmen, mit dem nach meiner Theorie aus den Morin'schen Versuchen über die gleitende Reibung berechneten Werth der Coefficienten für drehende Reibung, welche S. 138 dieser Schrift tabellarisch zusammen gestellt sind. Nach denselben ergibt sich nämlich im Mittel für Talg, Del und Schweinesfett:

bei Schmiedeeisen auf Gußeisen	0,052	}	Mittel = 0,052.
» Gußeisen » dito	0,050		
» Schmiedeeisen » Bronze	0,054		

Für den bloß fettigen Zustand der Flächen findet dagegen eine größere Abweichung statt, da nach meiner Berechnung die entsprechenden Reibungscoefficienten bezüglich = 0,074, 0,092 und 0,102 sind. Ich wage es so wenig, von dieser Abweichung eine Erklärung zu versuchen, als in jener Uebereinstimmung eine definitive Bestätigung meiner Theorie zu finden, nach welcher die drehende Reibung bei einer genauen Berührung des Zapfens mit allen Punkten des ihn zur Hälfte umfassenden Lagers nur $\frac{7}{11}$ derjenigen Reibung beträgt, die bei einer bloß linearen Berührung zwischen Zapfen und Lager stattfindet. Herr Professor Weisbach*) hat die Richtigkeit dieser Theorie bestritten, und indem er eine andere Vertheilung des Drucks auf die verschiedenen Punkte der Lagerfläche in Anwendung bringt, ist er zu dem entgegengesetzten Ergebnisse gekommen.

Nach meinem Dafürhalten kann dieser Streitpunkt, für dessen ganz sachgemäße Anregung ich übrigens dem Herrn Weisbach im Interesse der Wissenschaft nur dankbar sein kann, nicht wohl anders als auf dem Wege des Experiments entschieden werden. Herr Maschinenbaumeister Vorsig hat bereits die Güte gehabt, sich zur thätigen Mitwirkung dabei anzubieten, und werde ich nicht ermangeln, die unter diesen Umständen zu erwartenden genauen Resultate, mögen sie nun meine Ansicht als irrig oder richtig darstellen, seiner Zeit bekannt zu machen.

*) im Polytechn. Centralblatt von 1840, Nr. 67.

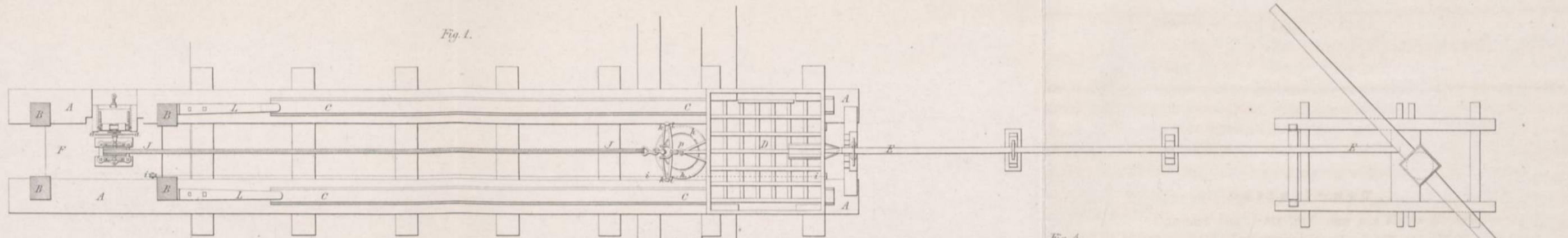


Fig. 1.

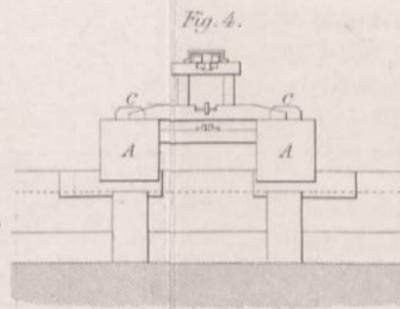


Fig. 4.

Querschnitt nach TU.

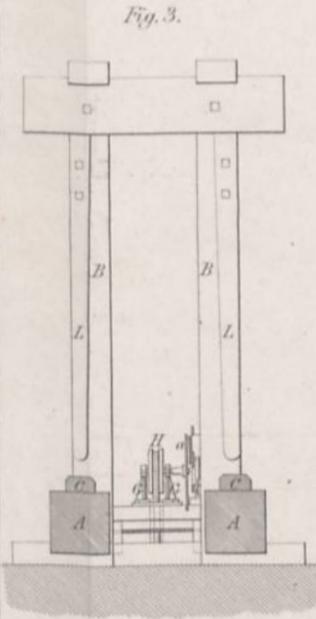


Fig. 3.

Querschnitt nach RS.

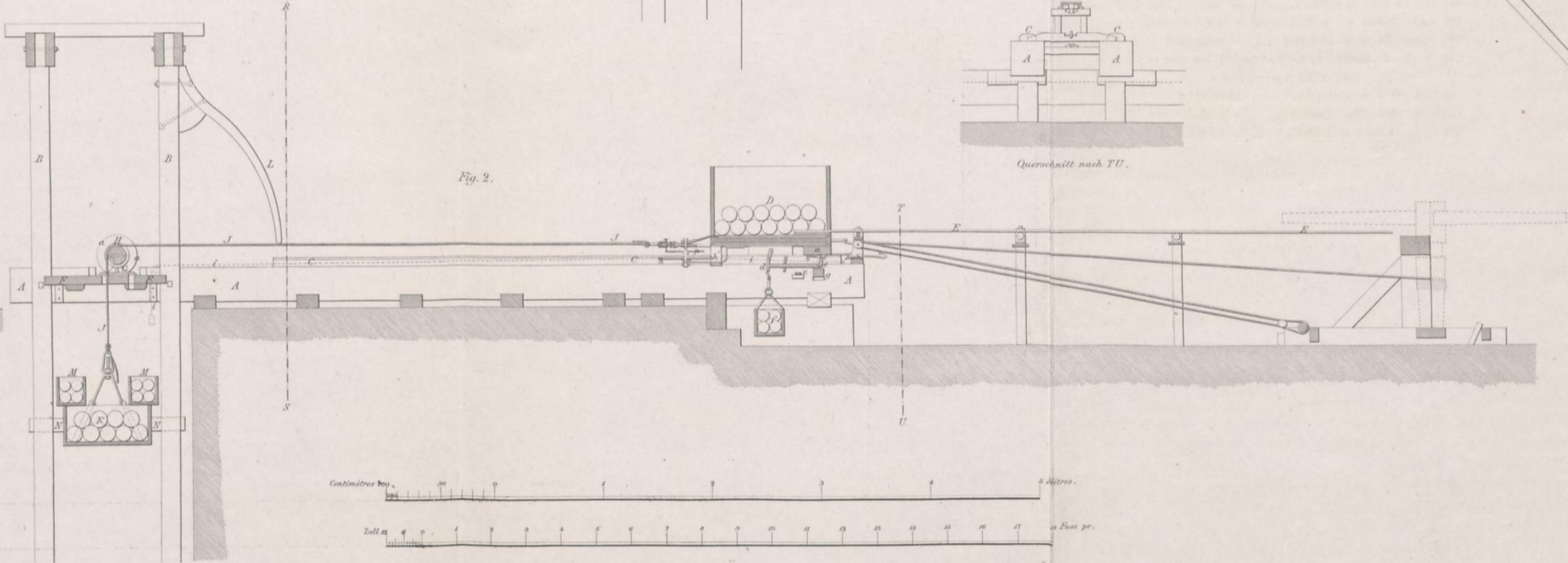
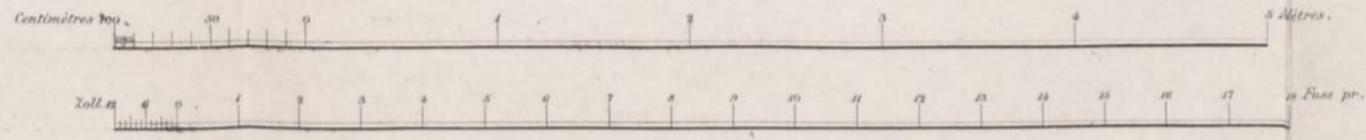
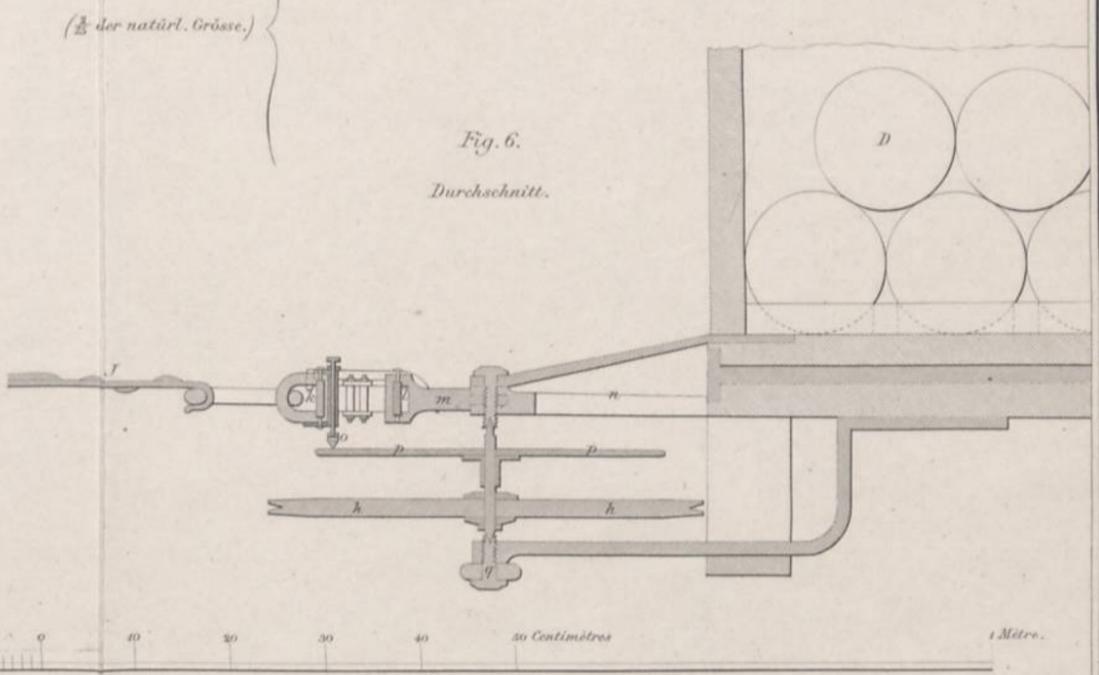
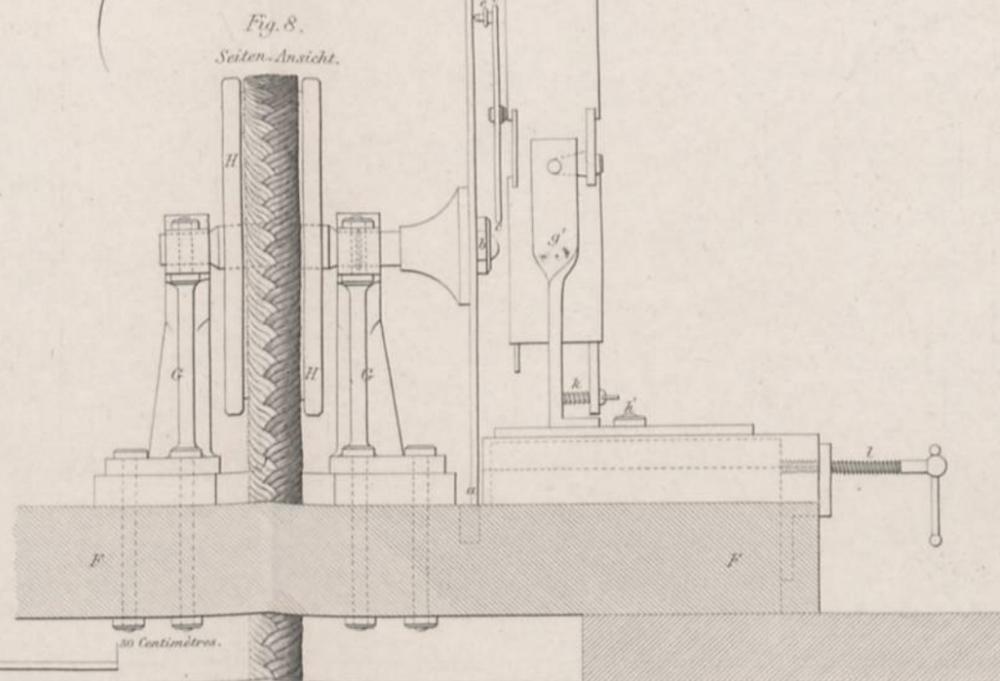
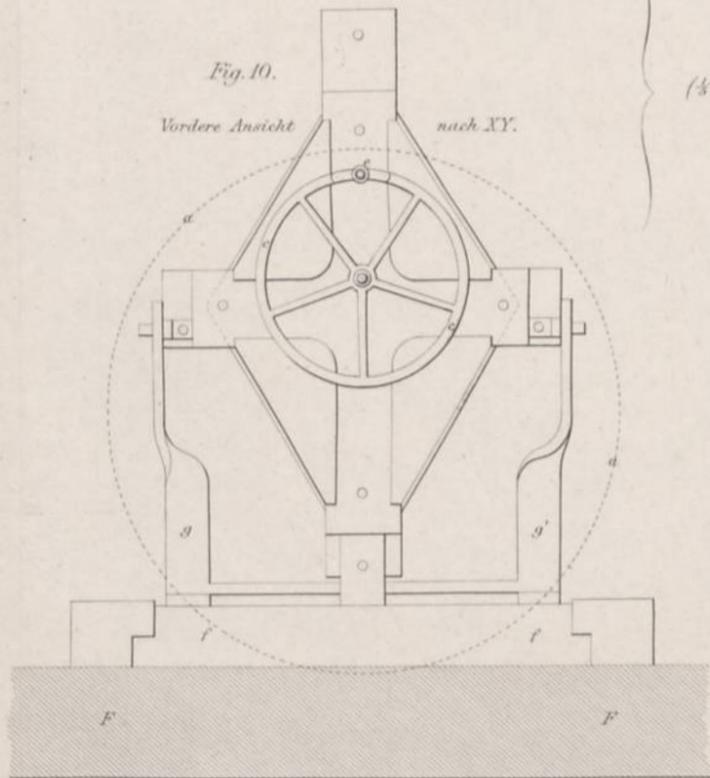
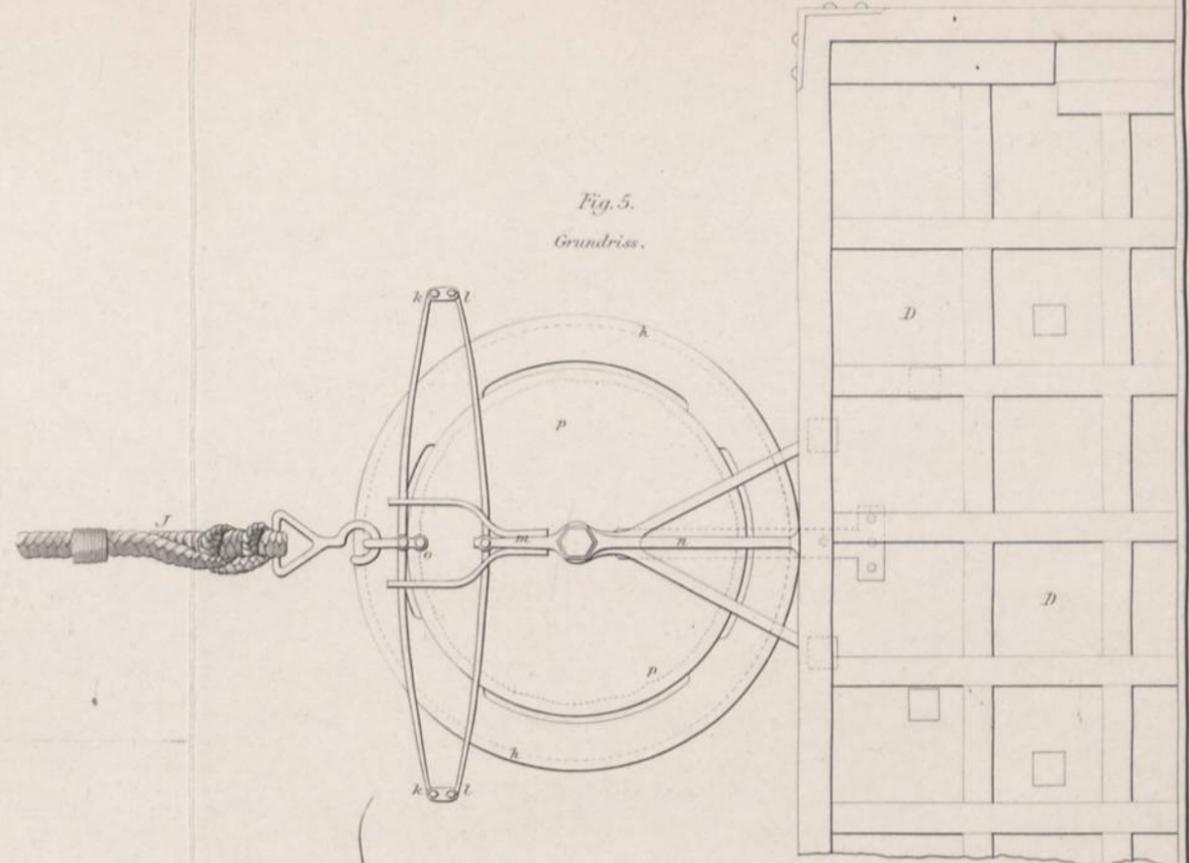
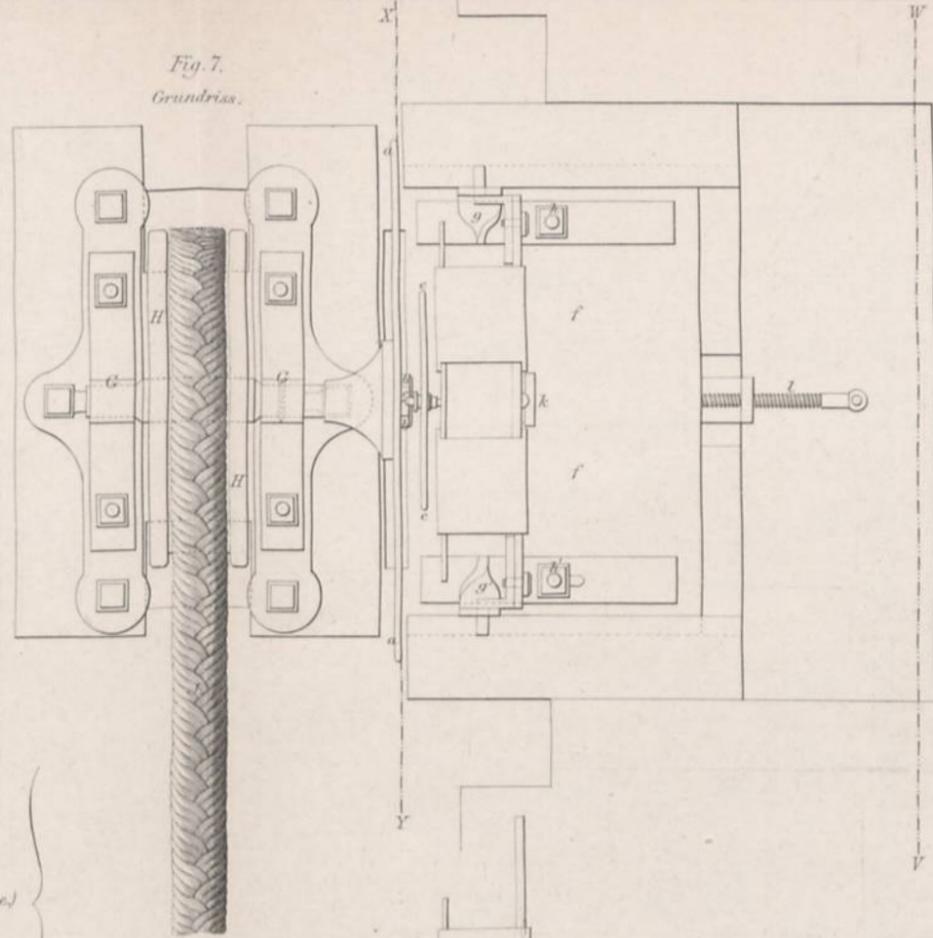
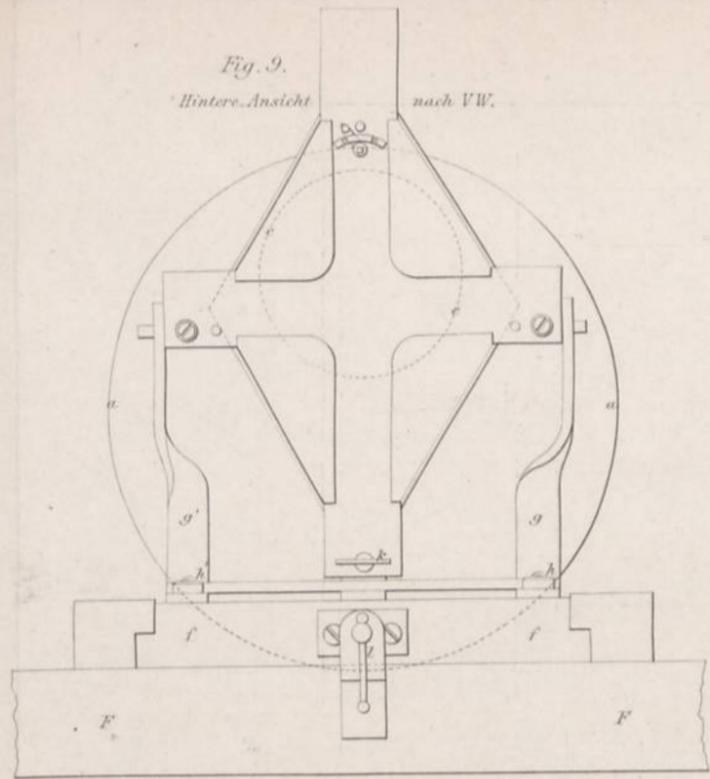


Fig. 2.





(1/2 der natürl. Grösse.)

(1/2 der natürl. Grösse.)

Eichenholz auf Eichenholz.

N^o 2 der ersten Versuchsreihe von Morin.

Fig. 14.
Bewegungs-Curve.

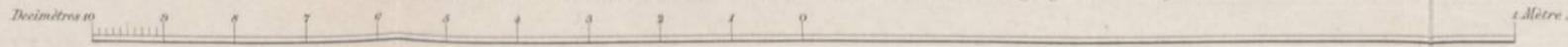
Fig. 11.

Halbe natürl. Grösse.

Fig. 12.
Spannungs-Curve.

Fig. 13.

xu Fig. 12 u. 14. 40 M. auf den Mètre für die Wege u. Zeiten, 160 M. auf den Mètre für die Biegungen des Federdynamometers.







BIBLIOTEKA GŁÓWNA

357771L/1