

Bowden / Tabor

Reibung und Schmierung
fester Körper

0313.5
B1
E2

7862120

Reibung und Schmierung fester Körper

Von

F. P. Bowden und D. Tabor

Department of Physics, Cambridge

Deutsche durchgearbeitete Übersetzung der zweiten Auflage

von

E. H. Freitag

Department of Physics, Cambridge

Mit 114 Abbildungen und 32 Bildtafeln



Springer-Verlag

Berlin/Göttingen/Heidelberg

1959



E7862120

Titel der Originalausgabe:
F. P. Bowden and D. Tabor
The Friction and Lubrication of Solids, 2nd Edition
At the Clarendon Press, Oxford, 1954

Alle Rechte vorbehalten
Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es auch nicht gestattet,
dieses Buch oder Teile daraus auf photomechanischem Wege
(Photokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen
Printed in Germany

0974

Reibung und Schmierung fester Körper



Vorwort zur ersten englischen Auflage

Sir David Rivett und Sir Ben Lockspeiser gewidmet, deren weise Führung wissenschaftlicher Angelegenheiten so viel zur Förderung der Forschung im allgemeinen und dieser Arbeit im besonderen beitrug.

Diese Monographie beschreibt eine experimentelle Studie der physikalischen und, in geringerem Maße, der chemischen Vorgänge, die sich beim Gleiten fester Körper — vor allem der Metalle — abspielen, sowie eine Untersuchung des Mechanismus der Reibung und der Grenzschmierung. Das Gebiet des behandelten Stoffes ist etwas größer als der Titel vielleicht anzeigt und umfaßt eine Reihe von physikalischen Eigenschaften fester Oberflächen. Das Buch ist nicht als allgemeines Lehrmittel gedacht; denn es befaßt sich beinahe ausschließlich mit den experimentellen Forschungen der Autoren und ihrer Mitarbeiter. Die Versuche werden weitergeführt, und man erkennt nur allzu deutlich, daß noch viele Fragen unbeantwortet sind und entsprechend viel zu tun bleibt.

Die Forschungsarbeiten wurden wenige Jahre vor dem Kriege in Cambridge begonnen, in der „Tribophysics“-Abteilung des „Australian Council for Scientific and Industrial Research“ in Melbourne von 1939 bis 1944 fortgesetzt (wenn auch stark vermischt mit kriegswichtigen Untersuchungen) und seither wieder in Cambridge aufgenommen. Einige Gesichtspunkte gewisser Probleme werden weiterhin gemeinsam mit dem „Tribophysics“-Laboratorium in Melbourne, das unter der Leitung von Dr. S. H. BASTOW steht, bearbeitet.

Wir sind vielen zu großem Dank verpflichtet: Dem verstorbenen Sir WILLIAM HARDY und Dr. DAVID PYE, die beide vor dem Kriege Mitglieder des Ausschusses für Schmierforschung waren; Sir DAVID RIVETT und den Mitgliedern der Direktion und der Verwaltung des australischen C. S. I. R.; der Universität Melbourne und insbesondere Prof. E. J. HARTUNG, dessen Institut noch immer die „Tribophysics“-Gruppe beherbergt; Sir HENRY TIZARD und dem verstorbenen Sir RALPH FOWLER, die uns ermutigten, die Arbeit in Cambridge wieder aufzunehmen; schließlich Sir BEN LOCKSPEISER und dem Versorgungsministerium (Luftfahrt) für förderndes Interesse und Unterstützung, sowie für großzügige Stipendien an die Universität Cambridge, wodurch die Fortsetzung der Forschungen erst eigentlich ermöglicht wurde. Anteilnahme und Hilfe wurden uns auch von Sir EDWARD APPLETON und

der Abteilung für wissenschaftliche und industrielle Forschung und von vielen andern zuteil.

Den früheren und gegenwärtigen Mitgliedern des Laboratoriums, sowie Dr. BASTOW und seinen Mitarbeitern im Tribophysics-Institut schulden wir ebenfalls großen Dank für die Unterstützung bei der Vorbereitung dieses Buches. Ihre Namen sind zu zahlreich, um hier aufgeführt zu werden, doch finden sich die meisten im Text.

Cambridge, im Februar 1949

F. P. B.
D. T.

Vorwort des Übersetzers

In der 1954 erschienenen zweiten englischen Auflage, auf die sich die vorliegende deutsche Fassung stützt, waren die seit 1949 gewonnenen Erkenntnisse in einem Anhang gesammelt. Diese Addenda zu jedem Kapitel sind bei der Übersetzung, um Wiederholungen und Zweispurigkeit zu vermeiden, in den eigentlichen Text eingeflochten worden. Die deutsche Ausgabe entstand in enger Zusammenarbeit mit den englischen Autoren, so daß es möglich war, der gegenwärtigen Auffassung der Verfasser Rechnung zu tragen, wo sich im Laufe der Zeit eine Wandlung oder Klärung ergeben hatte. Das Verzeichnis der seit 1954 veröffentlichten Originalarbeiten am Ende des Buches wird es dem Leser erleichtern, sich mit dem heutigen Stand der Forschung in Cambridge und anderswo vertraut zu machen.

Cambridge, im Oktober 1958

E. H. F.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Einführung	1
I. Die Berührungsfläche zwischen festen Körpern	
Die Messung der Rauigkeit und Oberflächengestalt	5
Taststiftmethoden S. 5 — Optische Interferenz S. 6 — Das Elektronenmikroskop S. 10 — Das Schrägschnittverfahren S. 11 — Andere Methoden der Oberflächenprüfung S. 12	
Die Berührungsfläche zwischen festen Körpern	13
Vorsprünge von kugelförmiger Form S. 14 — Die Wirkung der Kaltverfestigung S. 18 — Vorsprünge von konischer oder pyramidalen Gestalt S. 21 — Die wirkliche Kontaktfläche S. 23 — Wirkliche und scheinbare Berührungsfläche S. 23 — Die Wirkung der Entlastung S. 27	
Der elektrische Widerstand als Maß der wirklichen Kontaktfläche	30
Der Einfluß der Last auf den Kontaktwiderstand S. 33 — Die Berührung zwischen ebenen Oberflächen S. 34	
Schrifttum	37
II. Die Oberflächentemperatur reibender Körper	
Die Oberflächentemperatur gleitender Metalle	39
Berechnung der Oberflächentemperatur S. 39 — Messung der Oberflächentemperatur S. 41 — Die Temperatur trocken gleitender Metalle S. 43 — Die Temperatur geschmierter Oberflächen S. 47 — Die Schwankungen der Oberflächentemperatur S. 48 — Oberflächentemperatur und Wärmeleitfähigkeit S. 48	
Die Oberflächentemperatur gleitender Isolatoren	49
Die Temperatur, bei der „hot spots“ sichtbar werden S. 50 — Die Wärmeleitfähigkeit und das Auftreten von „hot spots“ S. 51 — Die photographische Aufnahme der „hot spots“ S. 52 — Der Einfluß von Fremtteilchen auf das Auftreten von „hot spots“ S. 54 — Der Einfluß der Größe und Gestalt des Reiters S. 55 — Die Ausmessung von „hot spots“ S. 55	
Eine genauere Berechnung der Oberflächentemperatur	59
Schrifttum	65
III. Reibungswärme und plastisches Fließen an der Oberfläche	
Das Polieren und plastische Fließen fester Oberflächen	66
Der Einfluß des Schmelzpunktes S. 69 — Der Poliermechanismus S. 73 — Die Wirkungsweise eines typischen Poliermittels S. 74	

	Seite
Der Mechanismus des Gleitens auf Eis und Schnee	75
Das Schmelzen unter Druck S. 75 — Das Schmelzen infolge Reibungs- wärme S. 76 — Die Bildung einer Wasserschicht S. 77 — Die Wirkung der Temperatur S. 78 — Die Wirkung der Wärmeleitfähigkeit S. 78 — Sta- tische und kinetische Reibung und der Einfluß der Geschwindigkeit S. 79	
Schrifttum	83
IV. Reibung und Oberflächenbeschädigung gleitender Metalle	
Die Reibungsmessung	84
Die Temperaturmessung an ruhenden Oberflächen S. 87 — Die Vor- bereitung der Oberflächen S. 90	
Die Reibung der Metalle	90
Chemische und radioaktive Verfahren zur Entdeckung der Metallübertragung	99
Reibung und Oberflächenschaden bei leichter Belastung	101
Ältere Theorien der metallischen Reibung	107
Schrifttum	109
V. Der Mechanismus der metallischen Reibung	
Abscherung und Furchenbildung	111
Der Furchungsanteil S. 113 — Der Scheranteil S. 115 — Die Scherfestig- keit der Metallbrücken S. 117 — Das Gesetz von AMONTONS S. 118	
Die gegenseitige Abhängigkeit von Scherung und Furchenbildung	122
Die Art der Berührung und der Einfluß von Fremdschichten	125
Intermittierende Bewegung	126
Die Schmiereigenschaften dünner Metallschichten	135
Die Reibung in Abhängigkeit der Furchenbreite S. 136 — Die minimale Schichtdicke S. 137 — Das Versagen der Schicht S. 138 — Der Ver- schleiß der Schichten S. 139 — Die Wirkung der Temperatur S. 141	
Metallschichten als Schmiermittel	143
Der Mechanismus der Rollreibung	145
Schrifttum	146
VI. Die Wirkungsweise von Lagerlegierungen	
Kupfer-Blei-Lagerlegierungen	150
Das Reibungsverhalten von Stahl, Kupfer und Blei S. 151 — Dünne Bleichichten auf Kupfer S. 151 — Kupfer-Blei-Legierungen S. 152 — Die Wirkung des Verschleißes auf die Reibung S. 154 — Die Wirkung der Temperatur auf die Reibung S. 155 — Die Rolle dünner Schichten bei Lagerlegierungen S. 157 — Vergleich des Verhaltens dendritischer und nichtdendritischer Legierungen S. 158	
Weißmetall-Lagerlegierungen	159
Bleilegierungen: Struktur und Härte S. 160 — Ungeschmierte Ober- flächen S. 161 — Geschmierte Oberflächen S. 165 — Die Rolle der Grundmasse und der harten Teilchen S. 166 — Zinnlegierungen: Struktur und Härte S. 167 — Ungeschmierte Oberflächen S. 168 — Geschmierte Oberflächen S. 169 — Vergleich der Blei- und der Zinn- Lagerlegierungen S. 169	
Silber-Blei-Lager	170

	Seite
Die Wirkung von Temperaturschwankungen auf Lagerlegierungen	170
Die Rolle des weichen Bestandteiles in Lagerlegierungen	173
Schrifttum	176

VII. Die Reibung reiner Oberflächen: Die Wirkung von Verunreinigungen

Der Einfluß von Fremdschichten an der Oberfläche	177
Die Wirkung adsorbierter Gase auf die metallische Reibung S. 178 —	
Der Einfluß von Oxydschichten auf die Reibung S. 182	
Der Einfluß der Temperatur auf die Reibung reiner Metallflächen	186
Der Einfluß des Zwischenflächenpotentials auf die Reibung	188
Die Wirkung von elektrolytisch abgeschiedenem Wasserstoff oder	
Sauerstoff S. 188 — Reibung und Oberflächenspannung S. 192	
Die Reibung von Graphit	193
Schrifttum	195

VIII. Die Reibung von Nichtmetallen

Kristalline Körper S. 197 — Saphir und Diamant S. 199 — Kohlenstoff	
und Graphit S. 200 — Molybdändisulfid S. 202 — Glimmer S. 202 —	
Plastikstoffe S. 203 — Die Verschweißung von Plastikstoffen infolge	
Reibung S. 207 — Wolframkarbid S. 208 — Glas S. 209 — Gummi S. 211	
Fasern S. 212	
Die Reibungselektrizität	218
Oberflächenrauigkeit und die Reibung von Metallen	218
Schrifttum	221

IX. Die Grenzreibung geschmierter Metalle

Flüssigkeitsschmierung	223
Grenzschmierung durch langkettige Verbindungen	225
Der Einfluß der Kettenlänge S. 225 — Die Wirkung der Temperatur S. 228	
Fettsäuren in Lösung S. 231	
Die Schmiereigenschaften monomolekularer und polymolekularer Schichten	233
Stearinsäureschichten S. 234 — Cholesterinschichten S. 237 — Die Ver-	
schleibeigenschaften von Schmierschichten S. 238 — Die minimale	
Schichtdicke für wirksame Schmierung S. 239	
Die Schmiereigenschaften von Silikonen und fluorierten Kohlenwasser-	
stoffen	241
Der Einfluß von Belastung und Geschwindigkeit auf die Reibung ge-	
schmierter Oberflächen	243
Die Wirkung der Belastung S. 244 — Die Reibung geschmierter Ober-	
flächen unter sehr leichter Belastung S. 244 — Die Wirkung der Ge-	
schwindigkeit S. 245.	
Schrifttum	248

X. Der Mechanismus der Grenzschmierung

Die Bedeutung des chemischen Angriffs	249
Die Schmiereigenschaften metallischer Seifen S. 252	

	Seite
Die Struktur der Schmierschicht: Versuche über Elektronenbeugung . . .	257
Der Mechanismus der Seifenbildung: Der Einfluß von Wasser	262
Untersuchung der Oberflächenadsorption mit Hilfe der Radioaktivität . . .	266
Fettsäuren S. 266 — Alkohole S. 267 — Ester S. 267	
Die Adsorption von Fettsäuren, Alkoholen und Estern auf Metallen	267
Die Dicke adsorbierter Wasser- und Dampfschichten S. 271	
Der Mechanismus der Grenzschmierung	272
Schrifttum	282

XI. Die Wirkungsweise von Hochdruckschmiermitteln

Die Schmierung von Metallen durch Chlorverbindungen	285
Chloridschichten S. 285 — Organische Chlorverbindungen S. 286 — Die Wichtigkeit der Chloridbildung S. 288	
Die Schmierung von Metallen durch Schwefelverbindungen	289
Sulfidschichten S. 289 — Sulfurierte Verbindungen S. 292 — Die Wichtigkeit des chemischen Angriffs und der Natur der Fremdschichten S. 294	
Phosphoradditive	296
Das Reaktionsvermögen von Hochdruckadditiven	296
Die Temperaturempfindlichkeit von Hochdruckschmiermitteln S. 297	
Hochdruckschmiermittel beim Zerspanen und Ziehen von Metallen	299
Der Mechanismus der Zerspanung von Metallen S. 305	
Schrifttum	307

XII. Das Versagen von Schmierschichten

Die Schmierung zwischen den Kolbenringen und der Zylinderwandung eines Motors	309
Die Wirkung der Geschwindigkeit S. 310 — Die Wirkung von Zähigkeit und Temperatur S. 310	
Die Schmierung zwischen Welle und Lagerschale	313
Die Wirkung von Last, Geschwindigkeit, Zähigkeit und Temperatur S. 314	
Die Wirkung der Temperatur auf die Schmierschichten	318
Schrifttum	325

XIII. Das Wesen der Berührung zwischen zusammenstoßenden Körpern

Kugelige Oberflächen	327
Die Wirkung eines veränderlichen Fließdruckes S. 329 — Die Stoßzahl S. 332 — Vergleich zwischen statischer und dynamischer Härte S. 333 — Die Stoßdauer S. 336 — Die Temperatur während des Zusammenstoßes S. 339 — Die Wirkung einer Schmierschicht S. 341	
Ebene Oberflächen	343
Der in der Flüssigkeitsschicht entwickelte Druck S. 345 — Die Strömungsgeschwindigkeit und das Schergefälle S. 348 — Die in der Flüssigkeitsschicht entwickelte Temperatur S. 349	
Praktische Auswirkungen	351
Schrifttum	354

XIV. Die Natur des metallischen Verschleißes

Örtliche Adhäsion und Verschleiß	356
Der Verschleißmechanismus S. 359	
Verschleißverminderung durch dünne Metallschichten	360
Chemische Reaktion und Verschleiß	364
Die Wichtigkeit der Oberflächenoxydation	368
Der Einfluß von Schmierschichten auf den Verschleiß	369
Schrifttum	372

XV. Die Adhäsion zwischen festen Oberflächen: Der Einfluß von Flüssigkeitsschichten

Die Adhäsion zwischen harten Oberflächen: Glas, Platin, Silber	374
Die Wirkung der Oberflächenrauigkeit S. 377 — Der Einfluß der Feuchtigkeit S. 378 — Die Adhäsion infolge Oberflächenspannung und Viskosität S. 379	
Die Adhäsion an weichen Metallen	381
Der Einfluß der Oberflächenoxydation S. 384 — Adhäsion in Gegenwart von Schmierfilmen S. 386	
Adhäsion und Reibung	388
Die Wirkungsweise von Klebstoffen	391
Schrifttum	393

XVI. Chemische Reaktion infolge Reibung und Stoß

Der Einfluß von Druck, Schubbeanspruchung und Oberflächentemperatur .	394
Die Wirkung der Reibung auf photographische Platten	396
Die Zersetzung von Explosivstoffen	397
Zündung durch Reibung S. 397 — Zündung durch Stoß S. 398 — Die Reibung zwischen festen Teilchen S. 399 — Die Ausbreitung der Explosion S. 401	
Schrifttum	402
Anhang: Einige typische Reibungswerte	405
Neueres Schrifttum	410
Namenverzeichnis	413
Sachverzeichnis	416

Einführung

Die beiden grundlegenden Reibungsgesetze, wonach der Reibungswiderstand proportional zur Belastung und unabhängig von der Ausdehnung der Gleitflächen ist, sind seit langem bekannt. Es scheint, daß sich schon LEONARDO DA VINCI (1452—1519) mit seiner genialen Einsicht darüber im Klaren war und sie auch experimentell bestätigte; denn er schrieb: „Reibung ruft die doppelte Anstrengung hervor, wenn das Gewicht verdoppelt wird“, und „bei gleichem Gewicht verursacht die Reibung den gleichen Widerstand zu Beginn der Bewegung, obschon der Kontakt von verschiedener Länge und Breite sein mag.“ Die Wiederentdeckung dieser Gesetze durch den französischen Ingenieur AMONTONS im Jahre 1699 wurde von der Académie Royale des Sciences mit einiger Überraschung und Skepsis aufgenommen:

«Dans le Discours que fit M. AMONTONS sur son Moulin à feu, il avança seulement en passant, que c'était une erreur de croire, comme l'on fait communément, que le frottement de deux corps qui se meuvent en s'appliquant l'un contre l'autre, soit d'autant plus grand, que les surfaces qui frottent sont plus grandes. Il dit qu'il avait reconnu par expérience que le frottement n'augmente que selon que les corps sont plus pressés l'un contre l'autre, et chargés d'un plus grand poids. Cette nouveauté causa quelque étonnement à l'Académie».

Diese Beobachtungen wurden von COULOMB im Jahre 1781 bestätigt, wobei er deutlich zwischen statischer Reibung — der für das Abgleiten benötigten Kraft — und kinetischer Reibung — der für das Aufrechterhalten der Bewegung erforderlichen Kraft — unterschied. Er zeigte, daß die kinetische Reibung merklich geringer als die statische sein kann und beobachtete, daß erstere von der Gleitgeschwindigkeit beinahe unabhängig ist (was gelegentlich als drittes Gesetz angeführt wird). COULOMB überlegte sich die Möglichkeit, die Reibung sei auf eine molekulare Adhäsion zwischen den Oberflächen zurückzuführen, doch verwarf er den Gedanken, weil die Reibung in diesem Fall proportional zur Gleitfläche sein sollte, während er fand, daß sie davon unabhängig war. Er schloß daraus, die Reibung beruhe auf dem Ineinandergreifen der Rauheitsvorsprünge und stelle hauptsächlich die bei der Fortbewegung der Last zu leistende Hebearbeit dar. Es scheint, daß er diese Theorie mit gewissen Vorbehalten verbreitete, und offenbar war auch die Akademie nicht geneigt, von ihren Mitgliedern irgendwelche Hirngespinnste anzunehmen; denn er schrieb:

«Je ne m'étendrai pas davantage sur cette théorie; elle paroît expliquer avec facilité tous les phénomènes du frottement; mais l'Académie ne demande aujourd'hui que des recherches qui puissent être utiles: ainsi il serait dangereux de trop se livrer à un système qui pourrait peut-être influer sur la manière de rendre compte des expériences qui nous restent à faire».

In neuerer Zeit wurden wichtige experimentelle Untersuchungen, besonders über die statische Reibung von Körpern, die mit sehr dünnen

Schichten von Kohlenwasserstoffverbindungen geschmiert waren, vor allem von Sir WILLIAM HARDY durchgeführt. Er zeigte insbesondere, welche wichtige Rolle eine monomolekulare Schmierschicht, die sogenannten Grenzschiebt oder das Epilamen (nach HOLM), spielt. Dieser an der Oberfläche haftende Film besitzt eine bestimmte Orientierung und übt auf die Reibung eine tiefgreifende Wirkung aus. HARDYS Versuche waren elegant und einfach angelegt, und er betonte die Notwendigkeit, beim Studium dieser Oberflächenerscheinungen moderne physikalische und chemische Auffassungen und Methoden anzuwenden. Seine Arbeit hat mehr als jede andere eine zeitgemäße Bearbeitung dieses Gebietes angeregt.

Das vorliegende Buch beschreibt eine experimentelle Erforschung der physikalischen und chemischen Vorgänge, die sich beim Berühren und Übereinandergleiten fester Oberflächen abspielen, sowie ein Suchen nach dem Mechanismus der Reibung und der Grenzschmierung. Die erste Frage, die wir uns stellen, lautet: Welche wirkliche Kontaktfläche entsteht, wenn feste Körper miteinander in Berührung gebracht werden? Es zeigt sich, daß selbst auf das sorgfältigste angefertigte Oberflächen Hügel und Täler aufweisen, die im Vergleich zu molekularen Dimensionen groß sind. Die Körper werden gegenseitig auf den Gipfeln ihrer Unebenheiten abgestützt, so daß die Fläche engster Berührung sehr klein ausfällt. Die wirkliche Kontaktfläche ist tatsächlich beinahe unabhängig von der Ausdehnung der Oberflächen und vorwiegend durch die Last bestimmt, da unter der hohen örtlichen Druckbeanspruchung an den Berührungsstellen plastische Verformung und Fließen stattfinden, bis eine der Belastung standhaltende Tragfläche geschaffen ist.

Beim Gleiten tritt die Reibung gerade in diesen kleinen Bezirken auf, und es ist zu erwarten, daß die Oberflächentemperatur in den reibenden Kontaktstellen hohe Werte erreicht. Um diese Temperaturverhältnisse zu untersuchen, gelangten verschiedene Meßmethoden zur Anwendung, und die Ergebnisse zeigen, daß bei Metallen in der Tat schon bei mittleren Gleitgeschwindigkeiten hohe Temperaturen vorkommen, die in den Berührungsgebieten zum Erweichen oder Schmelzen eines Metalles führen können. Diese örtlichen Temperaturspitzen werden bei Wärmeschutzstoffen noch leichter erzeugt, und das Erweichen oder Schmelzen spielt eine wichtige Rolle beim Polieren und einer Reihe von andern physikalischen Vorgängen.

Als dritten Punkt der Untersuchung betrachten wir die Natur der Oberflächenbeschädigung. Es wird gezeigt, daß bei Metallen an den Berührungsstellen eine echte Adhäsion und Verschweißung erfolgt. Die Reibung stellt im wesentlichen diejenige Kraft dar, die für das Abscheren dieser Verbindungen benötigt wird. Diese Beobachtungen erklären die klassischen Reibungsgesetze; denn der Querschnitt der Ver-

bindungsbrücken ist von der Ausdehnung der Gleitflächen beinahe unabhängig und direkt proportional zur angewandten Belastung. Die „Kaltverschweißung“ wird bei ruhenden Flächen oder bei geringer Gleitgeschwindigkeit durch den hohen örtlichen Druck in den Berührungsbezirken herbeigeführt und bei hohen Geschwindigkeiten durch das Erweichen oder Schmelzen des Metalls infolge der Reibungstemperaturen begünstigt. Das Abscheren, Verformen und Abreißen dieser Verbindungsbrücken bedingt den physikalischen Verschleiß der Metalle, und es wird untersucht, auf welche Arten dieser entstehen kann. Der Aufstrich einer dünnen Schicht eines weichen Metalls auf ein hartes kann eine Verminderung der Reibung bewirken, und es wird erörtert, welche Rolle eine derartige Werkstoffpaarung in der Wirkungsweise der Lagerlegierungen spielt.

Die Wechselwirkung zwischen metallischen Oberflächen und das Ausmaß der unmittelbaren gegenseitigen Berührung erfahren durch die Anwesenheit adsorbierter Gas- oder Oxydschichten eine weitgehende Veränderung. Bei der Erforschung dieser Verhältnisse wird gezeigt, daß die Reibung und die Adhäsion nackter Metalle sehr hohe Werte erreichen. Eine knappe Darstellung des Reibungsverhaltens einiger Nichtmetalle wurde beigefügt; aber die experimentelle Grundlage ist noch unvollständig, und es bedarf offensichtlich weiterer Versuche.

Wir wenden unsere Aufmerksamkeit darauf geschmierten Oberflächen zu. Die Ingenieure streben im allgemeinen danach, die Flüssigkeitsschmierung zu verwirklichen, wobei die Oberflächen durch einen verhältnismäßig dicken Schmierfilm getrennt sind und der Reibungswiderstand im wesentlichen durch die hydrodynamischen Eigenschaften der Flüssigkeit bestimmt wird. Die Grundlagen der hydrodynamischen Schmierung sind seit der Pionierarbeit von OSBORNE REYNOLDS im Jahre 1886 klar festgelegt. Unter vielen Betriebsbedingungen ist es jedoch nicht möglich, die Flüssigkeitsschmierung aufrechtzuerhalten, und die Oberflächen werden dann durch eine Grenzschicht von vielleicht nur molekularer Dicke getrennt. Mit diesem Gesichtspunkt der Schmierung befassen wir uns hier hauptsächlich und betrachten insbesondere das allgemeine Verhalten von Metallflächen, die mit einer Grenzschicht aus langkettigen Molekeln geschmiert sind. Dabei ergibt sich, daß die frühere Auffassung, wonach die Schmierwirkung auf dem Übereinandergleiten von physikalisch adsorbierten und gerichteten, einmolekularen Filmen beruht, eine zu starke Vereinfachung darstellt. Mit Hilfe radioaktiver Metalle und anderer empfindlicher physikalischer Methoden findet man im allgemeinen immer einige Durchbrüche durch die Grenzschicht, was örtliche metallische Adhäsionen zur Folge hat. Ferner wird gezeigt, daß die wirksamste Schmierung von Metallen durch Fettsäuren nur dann erzielt wird, wenn das Metall mit der Säure reagiert, um eine

Seife zu bilden. Das Metall wird dabei häufig auf dem Umweg über die Oxydschicht angegriffen, so daß edle oder oxydfreie Metalle durch Fettsäuren möglicherweise nicht wirksam geschmiert werden. Die seitliche Bindung zwischen den Kohlenwasserstoffketten ist von größter Wichtigkeit; denn die Oberflächenfilme genügen nur dann den Anforderungen, die an diese Schmierstoffe gestellt werden, wenn die Moleküle zu „festen“ Grenzschichten zusammengefügt sind. Man wird in dieser Ansicht durch Elektronenbeugungsversuche über die Struktur dieser Filme und deren Desorientierung oder „Schmelzen“ bei ausreichender Temperaturerhöhung bestärkt. Der chemische Angriff auf die Oberfläche ist auch bei der „Hochdruck“-Schmierung von großer Bedeutung, und es wird eine Untersuchung zur Ermittlung dieses Schmiermechanismus beschrieben, in der Verbindungen mit Schwefel, Chlor und anderen aktiven Gruppen verwendet wurden.

Obschon dieses Buch die reine Flüssigkeitsreibung nicht behandelt, werden einige Versuche über die Schmierung zwischen dem Kolbenring und der Zylinderwand eines laufenden Motors, sowie über die Schmierung eines Gleitlagers besprochen. Sie lehren, daß eine Unterbrechung der hydrodynamischen Schicht und kurzzeitige Berührung zwischen den festen Oberflächen selbst bei geringer Beanspruchung sehr leicht eintreten können.

Anschließend folgt eine Darstellung des Zusammenpralls fester Körper, sowohl in der Gegenwart als auch in der Abwesenheit von Flüssigkeitsschichten, und es geht daraus hervor, daß die durch den flüssigen Film übertragenen Kräfte ohne weiteres eine plastische Verformung und Beschädigung des Metalls verursachen können, ohne daß ein fester Kontakt zustandekommt.

Nach einer Diskussion des metallischen Verschleißes werden sodann einige Versuche über den Mechanismus der Adhäsion von Metallen und andern festen Stoffen, sowie über den Einfluß von Fremdschichten auf die Adhäsion mitgeteilt. Die Adhäsionsexperimente liefern einen direkten Beweis für die Bildung metallischer Verbindungsbrücken zwischen Metalloberflächen. Unter geeigneten Bedingungen kann die Normalkraft, die zur Trennung der Oberflächen benötigt wird, die gleiche Größenordnung erreichen wie die Tangentialkraft, die das Gleiten auslöst; der Adhäsionsbeiwert kann also tatsächlich beinahe gleich dem Reibungsbeiwert werden.

Im letzten Kapitel werden schließlich durch Stoß und Reibung hervorgerufene chemische Reaktionen behandelt, und es wird die Auslösung von Explosionen erörtert, die auf diese Weise gezündet werden. Dabei zeigt sich, daß die Erzeugung heißer Reibungsstellen auch bei diesen Vorgängen eine wichtige Rolle spielt.

I. Die Berührungsfläche zwischen festen Körpern

Die Messung der Rauigkeit und Oberflächengestalt

Es ist außerordentlich schwierig, Oberflächen herzustellen, die wirklich eben sind. Selbst auf sorgfältig polierten Flächen bestehen Erhöhungen und Vertiefungen, die im Vergleich zu einem Molekül große Abmessungen aufweisen. Wenn also zwei Körper aufeinander gelegt werden, so tragen die Gipfel der Unebenheiten der einen Oberfläche die gegenüberliegende, und weit ausgedehnte Gebiete sind durch, an der Reichweite der molekularen Kraftfelder gemessen, große Entfernungen getrennt. Obgleich in der Schleif- und Poliertechnik in den letzten Jahren beträchtliche Fortschritte erzielt wurden, bedarf es immer noch besonderer Anstrengungen, um Flächen anzufertigen, die auf 100 bis 1000 Å eben sind, was im Maschinenbau allerdings selten verlangt wird. Da die molekulare Anziehung sich nur über einige Ångström auswirkt, dürfen wir erwarten, daß die Fläche engster Berührung, d. h. das Gebiet, in dem sich die molekularen Einflußbereiche der beiden Oberflächen überschneiden, auch bei besonders sorgfältig präparierten Flächen sehr klein ausfallen wird. Unsere Kenntnis der Struktur und Gestalt fester Oberflächen hat in den letzten Jahren eine nennenswerte Erweiterung erfahren, und eine Reihe von experimentellen Methoden wurde entwickelt, um die Größe und Form der Rauigkeiten, die an Oberflächen vorkommen, zu messen. Einige dieser Verfahren, die bei den hier beschriebenen Arbeiten zur Anwendung gelangten, seien unten kurz erwähnt.

Taststiftmethoden

Zur schnellen und bequemen Untersuchung eines Oberflächenprofils sind Instrumente konstruiert worden, die die Vertikalbewegung einer langsam über die Unebenheiten geführten Nadel stark vergrößert aufzeichnen. Als Taststift dient gewöhnlich ein konisch geschliffener Diamant, der an der Spitze einen Krümmungshalbmesser von nur etwa 2×10^{-4} cm aufweist. Die Vertikalbewegung wird meist elektrisch verstärkt und auf einen laufenden Papierstreifen übertragen. Beträchtlicher Erfindergeist und große Herstellungsgenauigkeit kommen im Bau dieser Geräte, die erfolgreich mit 50000facher Vertikalvergrößerung arbeiten, zum Ausdruck. Bei hohen Vergrößerungen ist allerdings gewissen, dem Verfahren innewohnenden Fehlerquellen vermehrte Auf-

merksamkeit zu schenken. Das genaue Festlegen der Bezugsebene, beispielsweise, bietet einige Schwierigkeiten, und bei weichen Metallen muß auf die Verletzung durch den Taststift geachtet werden. Ein Instrument dieser Art bietet den großen Vorteil, daß es die Wiedergabe eines Oberflächenprofils rascher und müheloser liefert als andere Methoden, wobei die Oberfläche außerdem nicht zerstört wird. Seine Empfindlichkeit erfährt zwar durch die räumliche Ausdehnung der Nadel eine Begrenzung, da das Eindringen in die feinsten Risse und Grübchen verhindert wird. Unter günstigen Umständen können aber immerhin Kratzer oder Narben von nur 250 Å Tiefe entdeckt werden. Eine ausgezeichnete Darstellung der den Taststiftverfahren zugrunde liegenden Theorie sowie eine Diskussion ihrer Nützlichkeit und Grenzen wurde von REASON, HOPKINS und GARROD (1944) gegeben (siehe auch „Conference on Surface Finish“, 1940). Messungen der Rauigkeiten fester Oberflächen mit Hilfe des TALYSURF-Gerätes werden später beschrieben.

Optische Interferenz

Einfache, auf der Interferenz zweier Lichtstrahlen beruhende Verfahren zur Messung der Oberflächengestalt waren natürlich seit langem im Gebrauch. Ein bekanntes Beispiel dafür bildet die Verwendung NEWTONScher Ringe zwischen einer Linse und einer optisch ebenen Platte, um die Linsenkrümmung zu messen. Bei dieser Methode entstehen verhältnismäßig breite, helle und dunkle, Interferenzstreifen. Die Schwankung der Lichtintensität von einem Maximum zum nächsten erfolgt nach einer quadratischen Sinus-Funktion, und die Breite eines Streifens bei halber Intensität beträgt die Hälfte des Abstandes von „Linie“ zu „Linie“. Dies bedeutet, daß ein Oberflächendetail, das eine Verschiebung des Maximums um weniger als einen Fünftel des Ordnungsabstandes verursachte, beinahe unsichtbar wäre. TOLANSKY (1948), der die Interferenzmethoden auf einen hohen Grad von Empfindlichkeit entwickelte, erzielte in dieser Hinsicht bemerkenswerte Fortschritte. Bedeckt man die Oberflächen einer optischen Platte und einer Linse mit einer Silberschicht von hohem Reflexionsvermögen (Reflexionskoeffizient 85—95%) und ausreichender Durchlässigkeit, so wird das einfallende Licht hin- und hergeworfen, und es entsteht das resultierende Interferenzbild aller dieser Strahlen. Das Ergebnis dieser Mehrfachinterferenz (analog der Vermehrung der Anzahl der Linien eines Beugungsgitters) besteht darin, daß die Intensitätsminima und -maxima dieselbe Lage wie vorher einnehmen, während sich die Intensitätsverteilung zwischen zwei Maxima veränderte. Die Lage der Maxima ist durch die übliche Beziehung gegeben:

$$n\lambda = 2vd \cos \vartheta.$$