001519

Das Wesen des Verschleißes.

Von Professor Dr.-Ing. E. Siebel, MPA, Berlin-Dahlem.

Soweit nicht eine Zerstörung durch äußere Einflüsse oder die Ermüdung des Werkstoffes das Unbrauchbarwerden eines Bauteils herbeiführt, ist der V e r s c h l e i ß der bewegten Teile für die Lebensdauer unserer Maschinen und Bauwerke maßgebend. Der Verschleißminderung kommt daher insbesondere im Kriege, in welchem der Ersatz der unbrauchbar werdenden Teile begrenzt ist, eine ganz ausserordentliche Bedeutung zu. Die richtigen Wege zur Verschleißminderung kann man rein empirisch oder durch systematische Erforschung der Zusammenhänge suchen. Die Auswertung von Versuchsreihen wird dabei durch die große Zahl der Einflußgrößen auf der einen Seite, die Verschiedenartigkeit der Verschleißerscheinungen auf der anderen Seite erschwert. Die richtige Deutung der Versuchsergebnisse setzt voraus, daß das Wesen des Verschleißes richtig erkannt ist. Es soll daher im folgenden versucht werden, zu einer Grundvorstellung über den Verschleißvorgang zu kommen.

Gleiten zwei Körper unter einer bestimmten Anpreßkraft aufeinander, so werden sie sich auch bei sorgfältiger Bearbeitung und Anpassung der Gleitflächen nicht überall in gleicher Weise berühren. In Wirklichkeit werden vielmehr nur wenige Stellen der scheinbaren Berührungsfläche tragen. An diesen Stellen herrscht dann eine Flächenpressung, die etwa der Härte des weicheren der aufeinander gleitenden Stoffe entspricht [1]. Man vermag also die effektive Flächenpressung durch die Wahl des Gegenwerkstoffes weitgehend zu beeinflussen, wovon man ja insbesondere beim Bau von Gleitlagern weitgehend Gebrauch macht.

---

1) A. Eichinger: Verschleiß metallischer Werkstoffe. Mitt. KWInst.f.Eisenforschung 23(1941) S.247

Besteht zwischen den gleitenden Körpern ein großer Härteunterschied, so kann man zu einer rein mechanischen Vorstellung über den Verschleißvorgang kommen, indem man annimmt, daß die Vorsprünge der härteren Seite gem. Abb. 1 in den weicheren Gegenkörper eindringen, der dann beim Vorwärtsgleiten entsprechend geritzt wird. Unter der stärkeren örtlichen Druckwirkung werden dabei, wenn es sich um einen spröden Werkstoff handelt, Teile der weicheren Oberfläche abgesplittert. Bei bildsamen Werkstoffen tritt unter den Vorsprüngen eine entsprechende bleibende Verformung auf. Bei einer mehrmaligen Wiederholung der Materialverdrängung durch die nacheinander angreifenden Vorsprünge wird das Verformungsvermögen der Oberflächenschicht schnell erschöpft und so ebenfalls ein Loslösen von Teilen dieser Oberfläche und damit ein Verschleiß bewirkt. Der vorstehend geschilderte " ritzende Verschleiß " tritt besonders dann in Erscheinung, wenn sich ein hartes Verschleißmittel zwischen zwei aufeinander gleitenden Flächen befindet.

Wie die Erfahrung lehrt, tritt beim Gleiten ungeschmierter Flächen auch dann Verschleiß ein, wenn kein Härteunterschied vorhanden ist und die Gleitflächen keine Rauhigkeit im technischen Sinne aufweisen. Die rein mechanische Erklärung des Verschleißvorganges führt hier also nicht zum Ziel. Auch in diesem Falle muß jedoch, wie bereits erläutert, damit gerechnet werden, daß örtlich eine erhöhte Flächenpressung auftritt. An diesen Stellen vermögen alsdann einzelne Oberflächenteilchen des einen Körpers in den Bereich der freien Molekularkräfte der Gegenfläche zu gelangen (Abb. 2) [2]. Die betroffenden Atome werden dann aus ihrer Ruhelage im Atomverband ausgelenkt. Bei der Weiterbewegung kann sich die Bindung zwischen den Atomen der beiden Oberflächenschichten wieder lösen, wobei dieselben unter Freiwerden einer entsprechenden Reibungswärme in ihre Ausgangs-

2) H. Hahn: Die technische Physik der elektrischen Kontakte. Technische Physik in Einzeldarstellungen. 4 Jul.Springer, Berlin 1941.

001517

lage zurückschwingen. Es ist aber auch der Fall denkbar, daß die neue Bindung des Atoms sich als widerstandsfähiger erweist, so daß das betreffende Atom unter Lösung der ursprünglich vorhandenen Bindung wiederum unter Bildung von Reibungswärme sich an der Gegenfläche festsetzt. Ein derartiger Vorgang muß aber zumindest zu einer Aufrauhung der gleitenden Fläche führen, die auf die Dauer den Verschleiß fördert. Schließlich kann der Fall eintreten, daß die Atome zwar zunächst nach Lösung der Bindung mit der Gegenfläche in ihre Ausgangsstellung zurückkehren, daß dabei aber der ursprünglich vorhandene Verband mit den Nachbaratomen gelockert wird, und daß bei einer mehrmaligen Wiederholung des Vorgangs schließlich Teilchen aus ihrem Verband gelöst werden, ohne eine neue Bindung mit der Gegenfläche einzugehen. Es handelt sich im letzteren Falle dann um einen Verschleiß, der zur allmählichen Abtragung einer oder beider aufeinander gleitenden Flächen führt.

Gleiten spröde Körper aufeinander, so wird dieses Abtragen in atomare Schichten das normale Verschleißbild sein, soweit nicht die anfängliche Oberflächenrauhigkeit so groß ist, daß sie zu Verhakungen und damit zum Herausbrechen größerer Teile führt. Bei bildsamen Stoffen liegen die Verhältnisse insofern anders, als hier die Reibungskräfte zu einer entsprechenden Schub-Verformung von Bereichen der Gleitfläche führen können. Die damit verbundene Verfestigung begünstigt die Loslösung größerer Teile, sobald deren Formänderungsvermögen erschöpft ist. Auf der anderen Seite vermag die Verfestigung der Oberflächenschicht, die bei den kristallin aufgebauten metallischen Werkstoffen durch eine derartige Kaltverformung hervorgerufen wird, u.U. auch verschleißhemmend zu wirken [3]. So zeigt sich z. B. beim Gleiten von Cu auf St 60 ein Abnehmen des Verschleißes mit wachsender

---

3) E. Siebel u. R. Kobitzsch : Verschleißerscheinungen bei gleitender trockener Reibung. VDI-Verlag, Berlin 1941.

Verfestigung der Oberflächenschicht (Abb. 3) Deutlich sind dabei auf den Kupferproben die verfestigten Stellen zu erkennen, auf welche die Herabsetzung des Verschleißes zurückzuführen ist.

Gleiten gleichartige Werkstoffe aufeinander, so wirkt sich das gemäß Abb. 4 bei Metallen besonders ungünstig auf den Verschleiß bei trockener Reibung aus. Durch die gegenseitige Beeinflussung der Oberflächenatome werden hier beide Gleitflächen aufgerauht. Gleichartig metallische Oberflächen neigen zudem meist in besonderem Maße zum Verschweißen [4]. Mit der Aufrauhung setzen daher starke Freßerscheinungen ein, die zu einem schnellen Abtragen der Gleitflächen führen. Ist die Härte der beiden gleitenden Körper voneinander verschieden, so vermag die Flächenpressung an den tragenden Stellen der Gleitflächen, wie bereits auseinandergesetzt, höchstens die Härte der weicheren Werkstoffe zu erreichen. Bei genügendem Unterschied in der Härte kann eine Schubverformung nur an der weicheren Gleitfläche auftreten. An dieser Fläche tritt naturgemäß auch vorwiegend Verschleiß in Erscheinung, da bei dem weicheren Werkstoff eine kleinere Kraftwirkung zur Abtragung von Teilen der Oberfläche erforderlich ist. Bei sehr großen Härteunterschieden ist die Abnutzung der härteren Gleitflächen dabei so gering, daß eine Aufrauhung dieser Fläche und damit ein Ansteigen des Verschleißes völlig vermieden wird.

Praktisch werden alle Verschleißvorgänge dadurch in starkem Maße beeinflußt, daß an den Gleitflächen Gase oder Schmiermittel haften, welche entsprechend chemische und physikalische Wirkungen ausüben [5]. Bei trockener Reibung, also beim Fehlen eines eigentlichen Schmiermittels erweist sich der Einfluß des umgebenden Mediums auf Reibung und Verschleiß als erstaunlich groß. Bei Verschleißversuchen in

4) W. Dawihl: Zeitschr. techn. Phys. 21 (1940) S. 336
W. Dawihl: Die Vorgänge beim Verschleiß von Hartmetallegierungen. St. u. Eis. 61 (1941) S. 210

5) H. Donandt: Versuche über gleitende Reibung. Reibung und Verschleiß. VDI-Verlag Berlin 1939

001519

Kohlensäure zeigten sich z. B. gem. Abb. 5 beim Lauf von St 60 gegen St 60 praktisch keinerlei Verschleißerscheinungen, während bei Durchführung der Versuche in der Luft unter sonst gleichen Bedingungen starkes Pressen und entsprechend hoher Verschleiß auftritt. Als Erklärung bleibt nur, daß die an den Gleitflächen haftenden O_2- Moleküle die unmittelbare Berührung der Gleitflächen verhindert haben, wofür insbesondere auch die starke Herabsetzung des Reibungsbeiwertes spricht. Auch in Sauerstoff bleibt der Verschleiß bei derartigen Versuchen unter den vorliegenden Versuchsbedingungen ($p = 2\ kg/cm^2$; $v = 0{,}5\ m/s$) ausserordentlich gering. Da sich dabei nur feiner oxydischer Abrieb bildet, ist anzunehmen, daß im Sauerstoff unter der örtlich hohen Druckwirkung und der durch die Reibungswärme hervorgerufenen Temperatursteigerung die Oberflächenschicht bereits oxydiert, wobei die geringe Festigkeit des gebildeten Oxydes die gleichmässige Abtragung in feinsten Teilen begünstigt. Nach Versuchen von G. Tammann und G. Salge [6] scheinen zudem bei den Oxyden die freien Kraftfelder geringer zu sein, als bei den entsprechenden Metallen. Die deutliche Verschleißminderung, die bei Verschleißversuchen in Stickstoff gegenüber dem Verschleiß in Luft beobachtet wird, ist nach Untersuchungen von Dies [7] darauf zurückzuführen, daß eine Verstickung der Oberflächenschicht auftritt, welche die Härte und damit den Verschleißwiderstand dieser Schicht erhöht.

In noch weit stärkerem Maße als durch Gase wird der Verschleiß durch Schmiermittel herabgesetzt, welche auf den Gleitflächen einen schützenden Film bilden und so die unmittelbare Berührung der gleitenden Flächen verhindern. Wesentlich ist dabei, daß die Schmierschicht insbesondere bei hohen Gleitgeschwindigkeiten eine große Tragfähigkeit

---

6) Z. Metallkunde 19 (1927) S. 187
7) Dies : Reibung und Verschleiß. VDI-Verlag Berlin 1939

besitzt und so eine gleichmässige Druckverteilung herbeiführt. Man vermag den Schmiervorgang auch so aufzufassen, daß hier in Form des Schmierfilmseine stete Regeneration der verschleißenden Oberflächenschicht stattfindet, welche den Verschleiß vom Grundwerkstoff fernhält. Ein meßbarer Verschleiß vermag daher an geschmierten Gleitflächen nur dort aufzutreten, wo der Schmierfilm, sei es infolge zu hoher örtlicher Druckwirkungen, sei es infolge zu geringer Tragfähigkeit durchbrochen ist. Ich möchte hier nicht weiter auf die Theorie der Schmierung eingehen, da sie an anderer Stelle behandelt wird. Es sei nur darauf hingewiesen, daß nach den Untersuchungen von Heidebroek [8] auch durch Schmiermittel Zugkräfte übertragen werden können, welche zur Lostrennung feiner Teile der berührten Oberfläche genügen.

Ein Sonderfall des Verschleißes an geschmierten Gleitflächen ist die durch Verunreinigungen des Schmiermittels hervorgerufene Abnutzung. Es läßt sich zeigen, daß hierbei ritzender Verschleiß in Erscheinung tritt, wenn die Größe der Körner des Verschleißmittels etwa der Dicke des Schmierfilms entspricht oder diese übertrifft. Entsprechend nimmt der Verschleißangriff bei verunreinigten Schmiermitteln mit der Zeit ab, sobald das Verschleißmittel auf genügende Kornfeinheit zerrieben ist. Die Abnutzung durch Verschleißmittel steigt gem. Abb. 6 mit der Härte des Verschleißmittels und sinkt mit zunehmender Härte der Gleitflächen. Bei ungleicher Härte beider Gleitflächen ist normalerweise die Abnutzung des weicheren Werkstoffs am größten. Verschleißmittel höchster Härte betten sich u.U. in die weichere Gleitfläche ein und erzeugen alsdann den größeren Abrieb auf der härteren Seite [9].

---

8) E.Heidebroek : Untersuchungen über den Schmierzustand in der Grenzreibung. Angew.Chemie 54 (1941) S.85

9) K. Sporkert : Untersuchungen über den Einfluß von Schleifmitteln auf den Verschleißvorgang. In: Reibung u.Verschleiß Vorträge der VDI-Verschleißtagung Stuttgart 1938. Berlin VDI-Verlag 1939 S.78

001521

Beachtenswert ist es, daß beim trockenen Gleiten der Reibungsbeiwert bei den verschiedensten metallischen Werkstoffpaaren nur in den Grenzen von 0,3 bis 0,7 schwankt, während der entsprechende Verschleiß sich unter gleichartigen Bedingungen zwischen 0,002 und 1,4 mm/km Laufweg bewegt. Die auf die Volumeneinheit bezogene Verschleißarbeit ist entsprechend gem. Zahlentafel 1 ausserordentlich verschieden. Die bezogene Verschleißarbeit ist naturgemäß dann am größten, wenn die Abtragung in atomaren Schichten erfolgt und wird umso kleiner, je größere Teile auf einmal losgelöst werden.

Für das Verständnis des Verschleißvorganges beim Gleiten ungeschmierter Flächen erscheinen die Temperaturänderungen an den Gleitflächen von größter Bedeutung, die durch die Reibungswärme hervorgerufen werden. Nimmt man an, daß die Reibungswärme vorwiegend senkrecht zur Gleitfläche abfließt, so läßt sich das Temperaturgefälle $\frac{dt}{dx}$ an den Gleitflächen berechnen zu

$$\frac{dt}{dx} = m \cdot \frac{\mu_o \cdot p \cdot v}{A \cdot \lambda}$$

Dasselbe erweist sich also d. Reibungsbeiwert μ_o der Flächenpressung p und der Gleitgeschwindigkeit v sowie dem Kehrwert der Wärmeleitfähigkeit λ verhältnisgleich. Mit A ist dabei das mechanische Wärmeäquivalent und mit m der Anteil der gesamten Reibungswärme bezeichnet, der in die betroffende Gleitfläche abfließt. Bei den hohen örtlichen Flächenpressungen vermögen bereits bei geringen Gleitgeschwindigkeiten hohe Temperaturen und Temperaturgefälle aufzutreten[10], welche sowohl die an den berührenden Stellen auftretenden Bindungskräfte als auch den Verschleißwiderstand der gleitenden Körper weitgehend beeinflussen. In Abb. 7 ist der von Dies[7] gemessene Temperaturverlauf in der Verschleißschicht eines Stahles mit 0,26 % C bei einer Gleitgeschwin-

---

10) F.P. Bowden u. H.E.W. Ridler. Proc. roy. Soc. London A Bd. 154 (1936) S. 64

digkeit von 1 m/s in Abhängigkeit von der Flächenpressung dargestellt. Es ist dabei zu beachten, daß die mit einem Thermoelement gemessenen Temperaturen nur Mittelwerte sind, welche die örtlichen Temperaturspitzen nicht erfassen.

Mit steigender Temperatur der Gleitflächen sinkt die Beständigkeit der adsorbierten Gas- und Schmierschicht. Bei Verschleißversuchen an metallischen Werkstoffen mit sorgfältig geläppten Gleitflächen setzt daher im Trockenlauf nach einem bestimmten Einlaufweg mit ganz geringem Verschleiß und niedriger Reibungszahl ($\mu = 0{,}1 - 0{,}2$) in der Regel ganz plötzlich ein verstärkter Verschleiß ein, womit eine Erhöhung des Reibungsbeiwertes auf $\mu = 0{,}3 - 0{,}8$ parallel geht. Es kann angenommen werden, daß die Durchbrechung der " epilamen Schicht " bei genügendem Temperaturanstieg die Ursache dieser Erscheinung ist.[2] Eine weitere Temperatursteigerung etwa durch Erhöhung der Gleitgeschwindigkeit fördert eine chemische Reaktion der adsorbierten Gase an der Gleitfläche, wodurch dann abermals die ganzen Verschleißverhältnisse grundlegend geändert werden. Die Verschiedenartigkeit der Verschleißerscheinungen vor und nach Beendigung des Einlaufes ist beim Vergleich der Ergebnisse von Verschleißuntersuchungen stets zu beachten. Eine systematische Erforschung der Abhängigkeit des Gleitwiderstandes und der Haftung von der Flächenpressung und der Temperatur bei den verschiedenen Stoffkombinationen erscheint zur Förderung unserer Erkenntnisse über den Verschleißvorgang erforderlich.

Zum Schluß sei mit einigen Worten auf den Verschleiß bei rollender Reibung eingegangen. Auch hier ist zunächst eine rein mechanische Erklärung der Verschleißerscheinungen als Ermüdungsvorgang möglich. Die bei jedem Umlauf wiederholte hohe Beanspruchung an der Berührungsstelle dürfte sicherlich die Ermüdung und damit das Herauslösen von Werkstoffteilen aus der Lauffläche fördern. Zu beachten ist dabei, daß die höchste Beanspruchung bei Zugrundelegung der elastischen Spannungsverteilung nicht an der Berührungs-

00152

fläche selbst, sondern in einem gewissen Abstand unter der Oberfläche stattfindet [11]. Es vermögen aber auch während der jeweiligen Berührung der Rollflächen in ähnlicher Weise wie bei der gleitenden Reibung Oberflächenkräfte aufzutreten, die eine allmähliche Aufrauhung der aufeinander rollenden Flächen bewirken. Diese Erscheinung kann bei Anwesenheit von Sauerstoff noch wesentlich durch chemische Einwirkung und das Erscheinen von Reiboxydation gefördert werden [12],[13],[14].

---

11) A. Eichinger: Das Problem der Abnutzung bei rollender und gleitender Reibung. Reibung und Verschleiß. VDI-Verlag Berlin 1939.

12) H. Diergarten: Reibung und Verschleiß bei Wälzlagern. Reibung und Verschleiß. VDI-Verlag 1939

13) M. Fink : Neue Ergebnisse auf dem Gebiete der Verschleißforschung. Diss. T.H.Berlin 1929

14) S. Rosenberg und L. Jordan : Influence of oxyde films on the wear of steels. Trans. Amer. Soc. Met. Bd. 23 (1935) S. 577

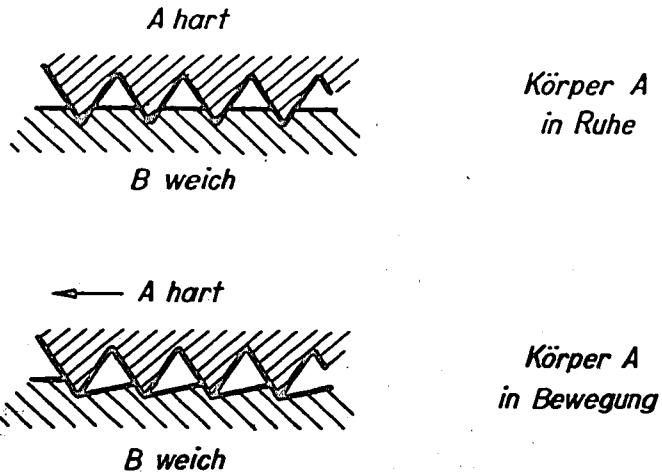


Abb.1: Trockenlauf von technisch rauhen Flächen.

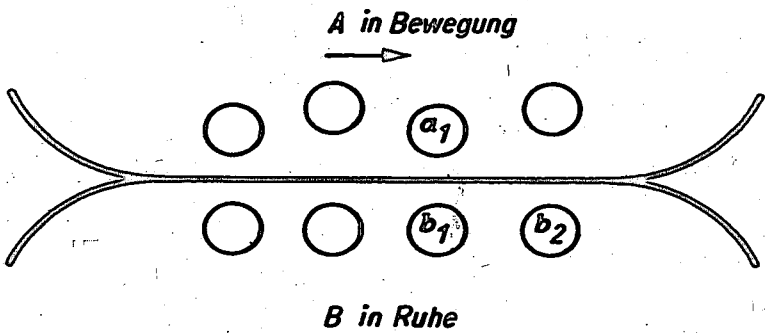
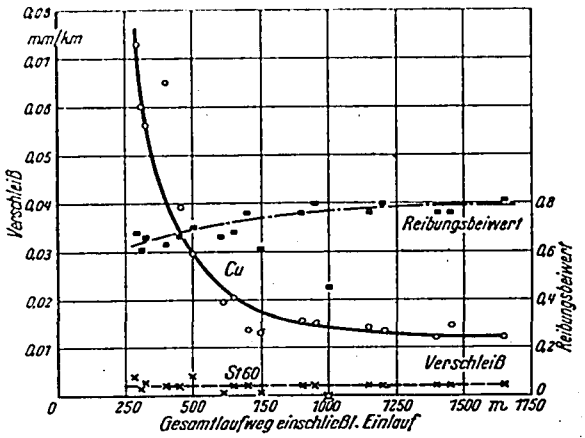


Abb.2: Trockenlauf von technisch glatten Flächen.

00152 5



$p = 2\,kg/cm^2$
$v = 0{,}5\,m/s$

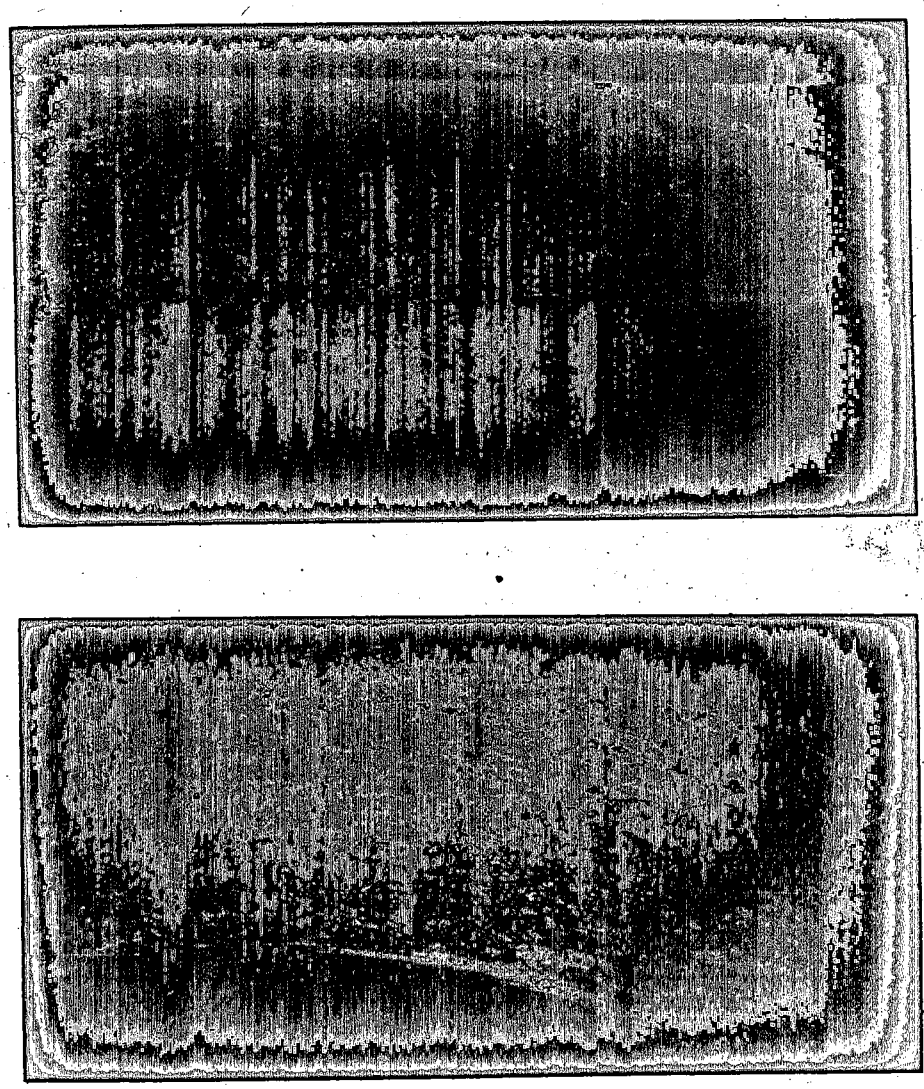


Abb.3: Verschleißform II, Trockenlauf von Kupfer gegen ST 60.

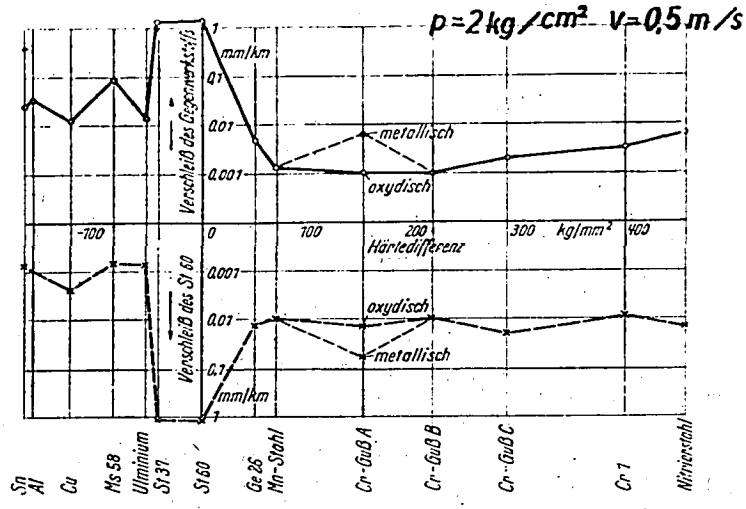


Abb.4: Verschleißform I, Trockenlauf von St 60 gegen ST 60..

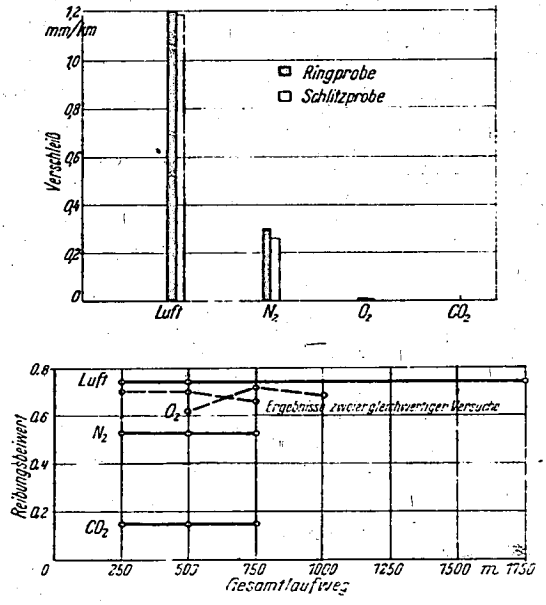


Abb.5: Versuche in verschiedenen Gasen. St 60 gegen ST 60.

: 001527

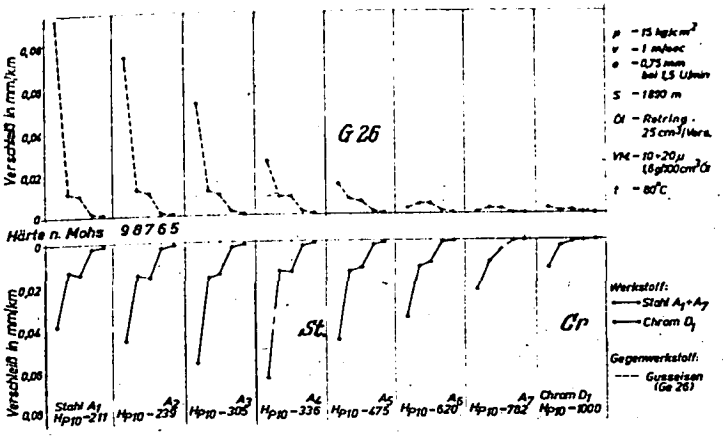


Abb.6: Einfluß der Härte des Verschleißmittels.

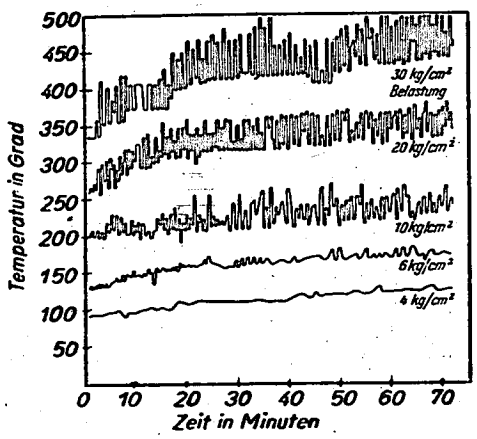


Abb.7: Temperatur-Verlauf in der Verschleißschicht von Stahl mit 0,26% C bei verschiedenen Flächenpressungen.

Werkstoffpaar	Reibungsbeiwert im Mittel	Verschleißarbeit je km cmkg/km	Werkstoff	Härte kg/mm²	Verschleiß im Mittel mm³/km	bez. Verschleißarbeit cmkg/mm³	bez. Verschleißarbeit auf St60/St60 bez.	Verschleißform
St60/St60	0,72	317.000	St60	180	308	515	1	I
Ms58/St60	0,25	110.000	Ms58	98	19,80	5550	10,8	I
"	—		St60	180	—	—	—	
Cu / St60	0,79	348.000	Cu	60	2,64	105.000	204	II
"	—		St60	180	0,66			
Al / St60	0,42	185.000	Al	22	6,6	28.000	54,4	II
"	—		St60	180	—	—	—	
Ge26/St60	0,67	295.000	Ge26	230	1,10	67.000	130	III
"	—		St60	180	3,30			
Nitr.St/St60	0,57	251.000	Nitr.St	630	1,76	47.500	92	III
"	—		St60	180	3,52			

Abb.8: Verschleiß verschiedener Werkstoffpaare im Trockenlauf; p = 2 kg/cm², v = 0,52 m/s.