

Prüfmethoden und Schmieröleinfluß bei der

3800

Rattermarkenbildung an Wälzlagern.

Von Dr.-Ing.W.Hampp, FKFS, Stuttgart.

Übersicht.

Die Rattermarkenbildung bei Wälzlagern stellt über ihre engere Bedeutung innerhalb der Wälzlagertechnik hinaus ein Verschleißproblem dar, das eng mit Fragen der Grenzschmierung, der Reiboxydation, des Oxydationsverschleißes und allgemein der molekularphysikalischen und chemischen Vorgänge in Grenzschichten verknüpft ist. Bis jetzt wurde die Frage der Rattermarkenbildung fast ausschließlich unter dem Gesichtspunkt der Schmiermitteleigenschaften und -einflüsse betrachtet. Im Forschungsinstitut für Kraftfahrzeugwesen und Fahrzeugmotoren an der Technischen Hochschule in Stuttgart wurden wegen der technischen und wirtschaftlichen Bedeutung der Rattermarkenbildung Untersuchungen über diese Erscheinung durchgeführt.

Kennzeichnende Merkmale der Rattermarkenbildung.

Bei der sogenannten Rattermarken- oder Riffelbildung an Wälzlagern handelt es sich um Beschädigungen, die auftreten, wenn ein Lager, ohne sich zu drehen, Erschütterungen ausgesetzt ist. Dieser Fall liegt in der Praxis bei den Kipphebellagern von Motoren, bei Flugwerkslagern, bei Lagern von Verstellpropellern und am Fahrwerk von Flugzeugen vor. Weitere Beispiele sind Hilfsmaschinen, die nicht dauernd mitlaufen, und Transporte von Maschinen auf Fahrzeugen.

Die Beschädigungen bestehen aus Vertiefungen, die durch die Wälzkörper in die Laufbahnen eingearbeitet werden, Abb. 1. Kennzeichnend für die Rattermarkenbildung ist ihr Auftreten auch bei Belastungen, die weit unterhalb der statischen und dynamischen Tragfähigkeit des Lagers liegen. Ferner handelt es sich bei den Vertiefungen nicht um plastische Verformungen infolge hoher Belastung oder ungenü-

gender Härte der Laufbahnen, sondern um Verschleiß.

Von der Gestaltungs- oder Werkstoffseite her können nur in beschränktem Umfang Verbesserungen und in wenigen Sonderfällen vollständige Abhilfe geschaffen werden. Im allgemeinen versprach man sich bisher von der Wahl geeigneter Schmiermittel am ehesten eine Verminderung oder Beseitigung der Beschädigungen. Versuche anlässlich von Lagerbeschädigungen beim Transport von Kraftfahrzeugen auf Eisenbahnwagen und Lastkraftwagen, die in Amerika von Almen (1) mit einer für diesen Zweck entwickelten Prüfmaschine und einer größeren Zahl von Schmiermitteln durchgeführt wurden, hatten das Ergebnis, daß für die Laufbahnbeschädigungen die Zähigkeit der Schmiermittel maßgebend ist. Mit abnehmender Zähigkeit stellte Almen eine Verringerung der Beschädigungen fest.

#### Zweck weiterer Versuche über den Einfluß des Schmiermittels.

Da sich die maßgebenden Vorgänge an der Berührungsstelle zwischen Wälzkörpern und Laufbahnen im Gebiet der Grenschmierung abspielen müssen, überraschen die Feststellungen Almens über den ausschlaggebenden und eindeutigen Einfluß der Zähigkeit unter den Schmiermitteleigenschaften. Dies war mit der Anlaß für eine Versuchsreihe mit verschiedenen Schmiermitteln, die im Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen in Stuttgart im Rahmen von Untersuchungen über die Rattermarkenbildung durchgeführt wurden. Dabei wurde im Gegensatz zu der seither üblichen gefühlsmäßigen Beurteilung eine mehr objektive Bewertungs- und Vergleichsmöglichkeit durch quantitative Verschleißmessungen angestrebt.

#### Versuchsverfahren.

Von verschiedenen zur Anwendung gebrachten Versuchsverfahren (2) eignete sich das im folgenden geschilderte wegen der Übersichtlichkeit der Versuchsbedingungen und der einfachen und billigen Herstellung der Versuchsteile besonders für grundsätzliche Untersuchungen. Bei dem in Abb.2 dargestellten Gerät schlägt eine Kugel gegen ein ebenes, geschlif-

feines Prüfstück aus gehärtetem Kugellagerstahl. Die Kugel ist an einem Schwinghebel befestigt, der durch einen Nocken bewegt wird, wobei eine auf die Massenwirkung abgestimmte Feder das Anliegen am Nocken und die Beschleunigung in Richtung des Prüfstücks bewirkt. Kugel und Prüfstück sind von einem Behälter zur Aufnahme des Schmiermittels umgeben. Durch elektrische Heizung kann das Schmiermittel feinstufig auf Temperaturen bis  $150^{\circ}\text{C}$  erwärmt werden.

Mit dem Gerät gelang es, dieselben Verschleißerscheinungen wie im wirklichen Betrieb zu erzeugen. Gut ausmeßbare Vertiefungen wurden bei 3000 Schlägen/min in Versuchszeiten von 45 Stunden erreicht. Aus dem Durchmesser und der größten Tiefe kann ein Verschleißmaß gebildet bzw. die Verschleißmenge unter Zugrundelegung eines Kugelabschnittes annähernd berechnet werden. Die Tiefe der eingearbeiteten Mulden beträgt meist nur einige  $\mu$  und häufig auch weniger als  $1 \mu$ ; sie wurde dem Lichtschnittgerät nach Prof. Schmaltz(3) gemessen.

#### Beobachtungen über den Verschleißvorgang.

Das Verschleißbild unterscheidet sich je nach den Voraussetzungen, unter denen die Umsetzungen in den Grenzschichten vor sich gehen. Das Aussehen der Verschleißmulde kann durch Reiboxydation, eine feinkörnig rauhe, mehr oder weniger stark oxydierte Oberfläche oder durch die Spuren von Verschweißungsvorgängen beherrscht sein. An Lagern von Verstellpropellern wurde an den Enden der großen Halbachse der Druckellipsen Reibrost beobachtet, für den an diesen Stellen durch die Wirkung der Tangentialspannungen und kleiner tangentialer Gleitbewegungen unter hohen Drücken die Voraussetzungen gegeben sind. In der Mitte derselben Druckfiguren führten dagegen selbst hohe schwellende Druckspannungen (die Kugeln standen unter dauernder Vorspannung) nicht zur Reibrostbildung bzw. überhaupt zu einer geringen Verschleißneigung. Anders verläuft der Verschleißvorgang, wenn durch die Betriebsweise ein Abheben der Wälzkörper von den Laufbahnen erfolgt. Hier hängt das Aussehen der Oberfläche

und des Verschleißproduktes außerdem stark von dem umgebenden Medium ab, wobei sich z.B. mit Schmiermitteln ein vorwiegend blankes bis mattgraues Aussehen der Verschleißmulde zeigt. Die Verschleißprodukte sind jedoch auch in diesem Fall oxydiert, wobei noch nicht voll geklärt ist, ob dem Lostrennen der Werkstoffteilchen eine Oxydation und Korrosionszerrüttung an den Korngrenzen vorangeht oder ob erst die losgerissenen Teilchen und die frischen Trennflächen oxydieren (1), (4), (5).

Verfolgt man den Verschleißvorgang im Falle des fortgesetzten Andrückens und Abhebens der Wälzkörper bei nicht allzu hohen Belastungen in kürzeren Zeitabständen, so zeichnet sich schon nach kurzer Zeit, z.B. nach einer Minute, die Berührungsstelle als dunkler Fleck, der von einem helleren und rauheren Rand umgeben ist, ab. In der Mitte der Berührungsstelle ist wahrscheinlich eine plastische Verformung und eine Glättung der Oberfläche eingetreten. Schon nach 10 Minuten, Abb.3, zeigt sich unter mikroskopischer Betrachtung, daß einzelne kleine Stellen, wohl Teile der obersten Erhebungen, ausgebrochen oder herausgerissen worden sind. Nach 20 Minuten hat sich die Größe und Zahl der losgerissenen Teilchen merklich vermehrt. Während nach einer Stunde noch unberührte Teile der Druckfläche vorhanden waren, hat der Verschleiß 6 Stunden die ganze Berührungsstelle in Form einer Mulde erfaßt, deren Oberfläche ein feinkörnig rauhes Aussehen erhalten hat, vgl. Abb.4 nach 12-stündigem Betrieb. Von da ab ändert sich der Charakter des Verschleißbildes nur noch unwesentlich dadurch, daß etwas gröbere Oberflächenstruktur mit einer feineren wechselt. Der Verschleiß nimmt mit der Betriebszeit laufend zu, Abb.5.

#### Versuche über den Einfluß des Schmiermittels.

In der Regel vermögen Schmiermittel den Verschleiß gegenüber dem Betrieb in Wasser, Luft und Stickstoff wesentlich zu vermindern, ohne jedoch zu seiner gänzlichen Beseitigung zu führen.

Durch die in der Praxis und bei den Versuchen beobachtete unterschiedliche Wirkung der einzelnen Schmiermittel entstand die Frage, welche Schmiermitteleigenschaften die Rattermarkenbildung beeinflussen. Entsprechend ihrer Bedeutung bei anderen Schmier- und Verschleißvorgängen stehen die Zähigkeit und die Schmierfähigkeit (6) im Vordergrund. Hinsichtlich der Änderung der Zähigkeit wurde von folgenden Möglichkeiten Gebrauch gemacht:

- 1) Verwendung verschieden zäher Schmiermittel,
- 2) Beimischung von Oppanol B 15 zu jeweils demselben Grundöl,
- 3) Änderung der Temperatur.

Die Versuche ergaben, daß der Verschleiß nicht eindeutig in eine Beziehung zur Zähigkeit des Schmiermittels gesetzt werden kann. Vor allem ergeben die einzelnen Schmiermittel gegenseitig große Unterschiede, Abb.6. Auch bei den Fetten war die Konsistenz nicht unbedingt ein Maß für die Rattermarkenbildung mit der Einschränkung, daß mit einem weniger konsistenten Flugzeugfett die günstigsten Ergebnisse unter den untersuchten Fetten erzielt wurden und zwar mit wenig höheren Verschleißwerten als bei den ungünstiger liegenden Ölen. Obwohl sich eine auf der Zähigkeit allein beruhende Gesetzmäßigkeit nicht ableiten läßt, kann doch über gewisse Bereiche, insbesondere für dasselbe Schmiermittel, häufig ein stetiger Einfluß der Zähigkeit erkannt werden, Abb.7.

Dieses Ergebnis war vorauszusehen, da bei den Vorgängen in molekularen Grenzschichten nicht die dynamische Zähigkeit, sondern die Orientierungseigenschaften, die Haftfestigkeit und das Arbeitsvermögen (7) ausschlaggebend sind. In diesem Zusammenhang sind ferner die chemischen Vorgänge wichtig, die sich durch das Auftreten, die Geschwindigkeit und den Grad der Oxydation auswirken und deren Bedeutung durch eine weitere Versuchsreihe nachgewiesen wurde. Diese Versuchsreihe führte auch zu der Vermutung, daß die mit der Zähigkeit eintretenden Unterschiede durch einen verschiedenen Oxydationsschutz bedingt sind. Die höchsten Verschleißwerte traten in Luft an der Sättigungsgrenze und in Wasser auf. Starker Ver-

schleiß und vorwiegend aus rotbraunem Rost bestehende Verschleißprodukte, sowie geringere Verschleißneigung und graue bis schwärzliche Ablagerungen gingen Hand in Hand. Der außerordentlich große und rasch wirkende Einfluß der Feuchtigkeit auf die Oxydation und den Verschleiß trat besonders bei einem Versuch hervor, bei dem durch abwechselnde Erwärmung und Abkühlung die Sättigungsgrenze im Abstand von einer Stufe unter- und überschritten wurde. Es ergab sich auf diese Weise der 40- bis 60fache Verschleiß, wie wenn der in der Luft enthaltene Wasserdampf z.B. durch langsame stetige Erhöhung der Temperatur in überhitzter Form gehalten wurde.

In Wasser waren die größten Verschleißwerte etwa 50 mal so hoch wie in trockener Luft oder in den ebenfalls vorkommenden weniger zur Oxydation neigenden Fällen in feuchter Luft an der Sättigungsgrenze. Wie hier kamen aber auch bei Wasser niedere Verschleißwerte vor, wobei die Oxydation aus noch nicht geklärten Gründen zurücktrat. Zusätze von Emulsionsöl zu Wasser wirkten sich im Vergleich zum Durchschnittswert mit Wasser allein stark verschleißmindernd aus. Bei Zusatz von 6% Emulsionsöl ging der Verschleiß auf etwa 3% des Durchschnittswertes bei Wasser zurück. Eine Erhöhung des Ölgehaltes über 6% brachte unter den vorliegenden Verhältnissen nur noch eine geringe Verminderung des Verschleißes, während ein Zusatz von nur 4% noch nicht ausreichend war, vgl. die Positionen Nr.13 bis 17 in Abb.8.

Die Wirkung von Zusätzen, die im allgemeinen die Schmierfähigkeit erhöhen, trat nicht in der bei gleitender Reibung bekannten Weise ein. Ein gefettetes Flugmotorenöl (Nr.7 und 8 in Abb.8) ergab wohl etwas niedrigere Verschleißwerte als ein etwa gleich zähes reines Mineralöl, dagegen ergaben Beimischungen von 5% kolloidalem Graphit oder von 5% Chlornaphtalin eine Verschleißerhöhung. Insbesondere wurde aber der Verschleiß auf den etwa 6-fachen Betrag durch einen Zusatz von 5% Öleinsäure erhöht. Dieses Verhalten zeigt ebenfalls die starke Beteiligung der Oxydation an der

Beschleunigung des Verschleißes. Rüböl, das für gute Schmierfähigkeit bekannt ist, unterschied sich im mittleren Zähigkeitsbereich nicht von reinem Mineralöl, während bei niedriger Zähigkeit sogar wesentlich höherer Verschleiß auftrat. Eine Beimischung von Wollfett zu Mineralöl wirkte sich insbesondere bei größerer Zähigkeit ungünstig aus. Sehr günstig verhielt sich ein synthetischer Schmierstoff, der bei Zähigkeiten zwischen 4 und 5<sup>0</sup>E besonders niedrige Verschleißwerte ergab. Insgesamt wurden die günstigsten Verschleißverhältnisse mit dem genannten synthetischen Schmiermittel, ferner mit dem ebenfalls erwähnten gefetteten Flugmotorenöl und ohne Schmiermittel in einer Kohlensäureatmosphäre festgestellt. Die zuletzt angeführten Versuche zeigen, daß auch die als Schmierfähigkeit bezeichnete Eigenschaft im Falle der Rattermarkenbildung nicht ausschlaggebend ist. Der wichtigste Einfluß, den die Schmiermittel bei dieser Verschleißart auszuüben scheinen, ist ein mehr oder weniger oxydationsvermindernder, wobei insbesondere die Zähigkeit mittelbar beteiligt sein kann.

#### Zusammenfassung.

Die Rattermarkenbildung bei Wälzlagern spielt sich unter Grenzschmierungsbedingungen ab. In der Berührungsfläche treten in mikrogeometrischen Einzelbetrieben Zug-Druck-Wechselbeanspruchungen bzw. bei Vorspannung schwelende Zug- oder Druckbeanspruchungen auf, die zum allmählichen Lostrennen der Oberflächenteilchen z.T. in Verbindung mit Reiboxydation führen. Zugkräfte werden dabei durch die Wechselwirkung zwischen den metallischen Oberflächen und den adsorbierten Fremd- bzw. Schmiermittelschichten übertragen. Der Verschleißvorgang wird durch die Reaktionsempfindlichkeit der durch das Ausbrechen selbst zerklüfteten und mit frischen Trennflächen bedeckten Oberfläche unter hohem Druck unterstützt. Die Schmiermittel bzw. das umgebende Medium wirken hauptsächlich

durch den Einfluß, den sie auf die Voraussetzungen für den Ablauf dieser Reaktionen ausüben, während die Eigenschaften der dynamischen Zähigkeit und der Schmierfähigkeit nur mittelbar zum Ausdruck kommen.

Schrifttum.

- (1) J.O.Almen, Lubricants and false brinelling of ball and roller bearings. Mechanical Engin.Bd.59 (1937) S.415-422, Übersetzung ZWB.
- (2) W.Hampp, Riffelbildung bei Wälzlagern, Jb.1941 d. Dtsch.Luftf.-Forschg.
- (3) G.Schmaltz, Technische Oberflächenkunde 1936 S.75
- (4) M.Fink, Neue Ergebnisse auf dem Gebiet der Verschleißforschung. Org.Fortschr.Eisenbahnw. Bd.66 (1929) S.405
- (5) G.A.Tomlinson, The Rusting of steel surfaces in contact. Prod.roy.Soc.London Bd.115(1927) S.472
- (6) A.v.Philippovich, Forschung auf dem Gebiet der Schmierung und der Schmiermittel. Z.VDI Bd.81 (1937) S.1467  
E.H.Kadmer, Ein Bericht zum Problem der Schmierfähigkeit. Öl und Kohle März 1939.
- (7) E.Heidebroek u.  
E.Pietsch Untersuchungen über den Schmierzustand in der Grenzreibung. Forschg. Ing.Wes. Bd.12 (1941) S.74-87.  
E.Pietsch Das Schmiermittel im Zahnradgetriebe unter besonderer Berücksichtigung der Grenzreibung. Dtsch.Kraftf.-Forschg. H.59, Berlin 1941.



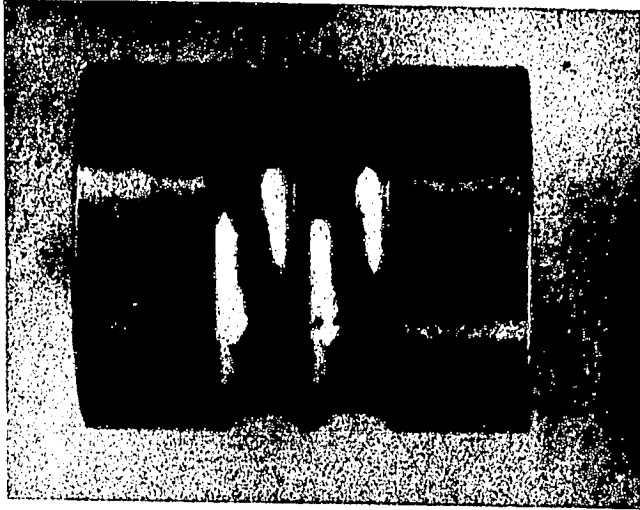


Abb. 1: Laufring eines Pendelkugellagers mit Rattermarken.

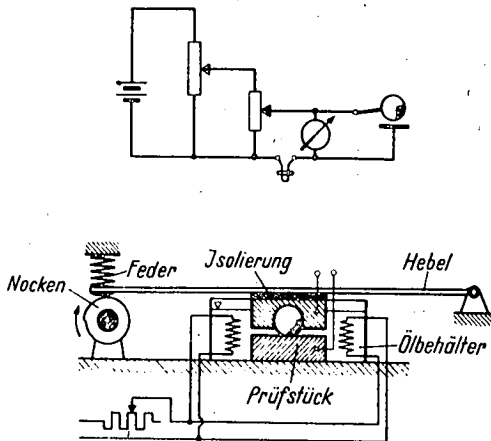


Abb. 2: Kugelschlaggerät.

Die elektrische Meßeinrichtung dient zur Überwachung des Berührungsvorganges zwischen Kugel und Prüfstück.

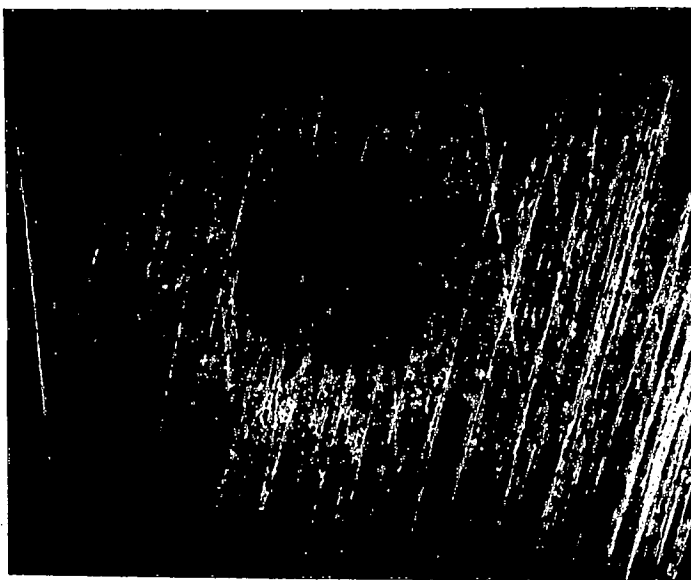


Abb.3: Druckstelle nach 10 Minuten bei 3000 (erzwungenen) Schlägen pro Minute. (Dazwischen erfolgt ein elastisches Abheben.)

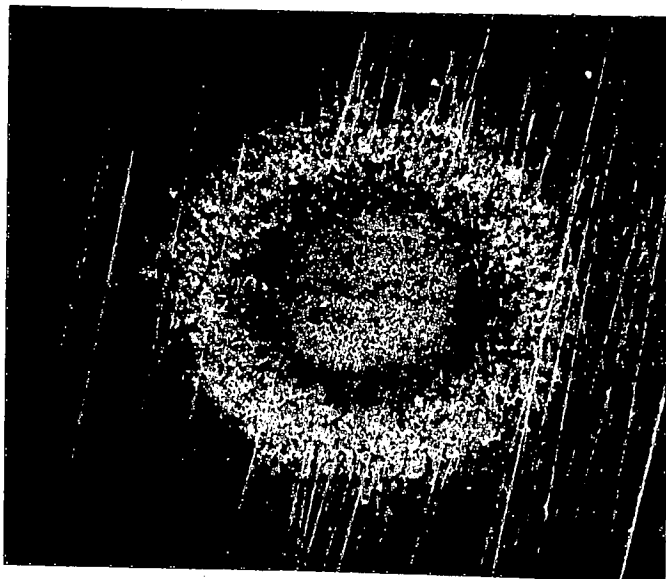


Abb.4: Aussehen der Verschleißmulde nach 12 Stunden.

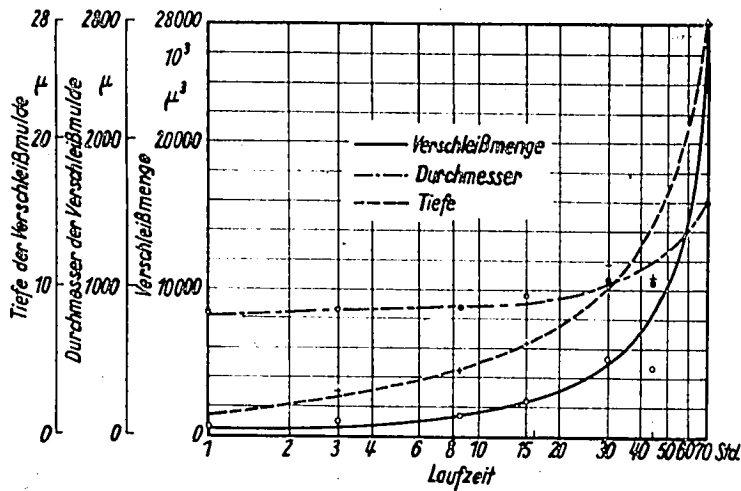
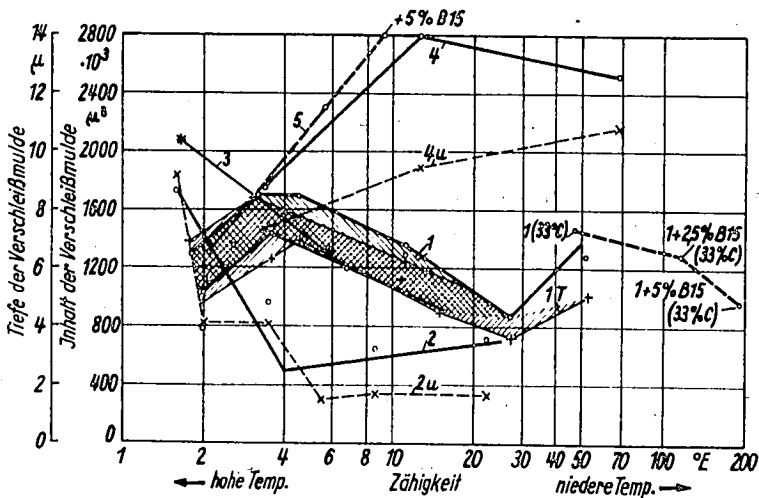
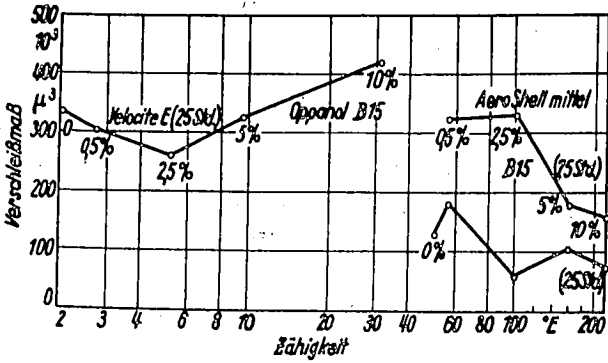


Abb. 5: Zunahme des Verschleißes am ebenen Prüfstück mit der Betriebszeit bei 3000 Schlägen/min.

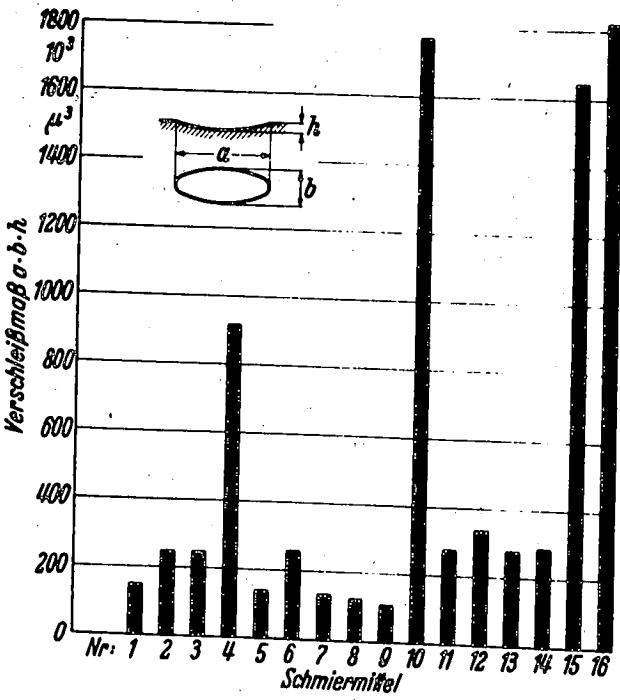


1 Rotring-Oel; 2 Synthetischer Schmierstoff; 3 Rübbil; 4 Rotring + 40% MoS<sub>2</sub>; 5 Velocite E-Oel

Abb. 6: Verschleiß in Abhängigkeit von der Zähigkeit bei verschiedenen Schmiermitteln. Die Zähigkeit wurde teils durch die Temperatur (bei allen ausgezogenen Linien), teils bei einer konstanten Temperatur von 33°C durch Mischung mit Oppanol B 15 (gestrichelte Linien) verändert.



**Abb. 7:** Verschleiß in Abhängigkeit von der Zähigkeit bei Beimischung von Oppanol B 15. Ein ähnlicher ansteigender Verlauf im Gebiet kleiner u. mittlerer Zähigkeit ergab sich bei Verwendung verschiedener, der Grundzähigkeit nach abgestufter Motorenöle ohne Beimischung.



**Abb. 8:** Rattermarkenverschleiß bei verschiedenen Schmiermitteln und Zusätzen.