

Versuche mit der Vierkugelmachine

Von Reg.Bmstr. R. Halder

Techn.Prüfstand Oppau, I.G.Farbenindustrie AG. Ludwigshafen/Rh.

Die Vierkugelmachine wird zur Prüfung von Hochdruckschmiermitteln verwendet. Die Ansichten über ihre Brauchbarkeit sind jedoch sehr geteilt. Es bestehen Zweifel darüber, wie weit die Ergebnisse aus der Vierkugelmachine, die bei extrem hohen Drücken prüft, auf die Verhältnisse der Praxis angewandt werden können. Ein weiterer Grund, warum die Vierkugelmachine ein etwas umstrittenes Gerät ist, ist die wiederholt festgestellte grosse Streuung ihrer Ergebnisse. In neuerer Zeit wurde vom Heereswaffenamt die Prüfung in der Vierkugelmachine in die Lieferbedingungen für Getriebschmiermittel aufgenommen. Es erscheint daher notwendig, sich mit diesem Gerät etwas eingehender zu befassen.

Im Techn.Prüfstand der I.G.Farbenindustrie in Oppau wurde eine solche Maschine entworfen. Der Aufbau geht in seinen Einzelheiten aus Bild 1 hervor. Die vier Kugeln besitzen einen Durchmesser von $1/2''$ und sind so angeordnet, dass die Mittelpunkte einen Tetraeder bilden. Die unteren 3 Kugeln sind in einen Kugelhalter eingespannt, der becherförmig ausgebildet ist und zur Aufnahme des Öles dient. Die obere Kugel ist am unteren Ende der senkrechten Welle befestigt, die durch einen Elektromotor über einen Riementrieb in Drehung versetzt wird. Um das Öl bei verschiedener Temperatur prüfen zu können, ist der Kugelhalter mit einer elektrischen Heizwicklung versehen. Die Messung dieser Temperatur geschieht mit einem Thermoelement, das zwischen den drei Kugeln von unten in das Öl hineinragt. Der Kugelhalter ist so gegen den Belastungshebel abgestützt, dass er nach allen Richtungen frei beweglich ist, sich also unbedingt entsprechend der Lage der vierten Kugel einstellen kann. Der Belastungshebel ist auf einem Exzenter gelagert, um das Einführen und Herausnehmen des Kugelhalters zu erleichtern. Zur Messung des auf die drei unteren Kugeln übertragenen Drehmoments ist der Kugelhalter

gegen einen Indikator abgestützt, der die in jedem Augenblick übertragene Kraft aufschreibt. Das Bild 2 zeigt das Gerät in Ansicht.

Die Versuchsdurchführung kann auf zwei verschiedene Arten erfolgen. Man arbeitet entweder mit gleichbleibender Belastung, wobei die Zeit bis zum Fressen gemessen wird oder mit einem von 0 ansteigenden Gewicht und stellt fest, bei welcher Belastung Fressen eintritt. Bei der ersten Art bringt man von vorneherein eine bestimmte, während des Versuchs gleichbleibende Belastung auf, schaltet dann den Motor ein und stoppt die Zeit, die verfließt, bis Fressen eintritt, was durch einen plötzlichen, starken Ausschlag am Indikator angezeigt wird. Der so erhaltene Fressverzug kann auf diese Weise bei verschiedener Belastung oder bei verschiedener Temperatur ermittelt werden. Dies ist die am häufigsten angewandte Methode. Ungünstig scheint dabei der Umstand zu sein, dass unter Last angefahren werden muss und dass bei kleinem Fressverzug der Versuch schon zu Ende sein kann, bevor der Motor die volle Drehzahl erreicht hat.

Es wurde nun vermutet, dass die beobachtete grosse Streuung auf diese Nachteile in der Versuchsdurchführung zurückzuführen ist; daher wurde im Technischen Prüfstand der zweite Weg beschritten, um festzustellen, ob damit vielleicht brauchbarere Werte erzielt werden können. Das Anfahren erfolgt bei dieser Methode bei unbelasteten Kugeln. Im Augenblick des Einschaltens des Motors wird ein Wasserzulauf geöffnet, wodurch eine genau festgelegte Wassermenge von 0,15 l/sec in einen als Belastung verwendeten Behälter fließt. Die Zeit vom Anfahren bis zum Eintreten des Fressens wird bestimmt und daraus die Menge des in dieser Zeit zugeflossenen Wassers errechnet. Man erhält so die Belastung, bei der Fressen eintritt. Prüft man bei verschiedenen Temperaturen, so bekommt man Kurven, anhand deren man die Abhängigkeit der Fressbelastung von der Temperatur verfolgen kann. Obwohl diese Methode die vorhin geschilderten Nachteile des anderen Verfahrens vermeidet, konnte dadurch keine merkliche Besserung bezüglich Wiederholbarkeit erzielt werden.

Zur Beurteilung des Gerätes ist es notwendig, den Schmierzustand an den Berührungspunkten der Kugeln zu kennen und zwar, ob an diesen Stellen Vollschmierung, Teilschmierung oder Grenzschmierung herrscht. Zu diesem Zweck wurden die Reibungszahlen ermittelt. Sie liegen zwischen 0,01 und 0,02; es handelt sich also nach der jetzt üblichen Bezeichnung um den Zustand der Teilschmierung.

In Anbetracht der ausserordentlich hohen Flächenpressungen, die -wenn man die Abplattung der Kugeln nach Hertz zu Grunde legt- über 10 000 kg/cm² beträgt, ist diese Tatsache erstaunlich und nur dadurch zu erklären, dass an den Kugeln sehr gute Keilwirkung vorhanden ist, die im Stande ist, einen Schmierfilm, wenn auch nur kurzzeitig, aufrecht zu erhalten. Da es sich um Teilschmierung handelt, ist anzunehmen, dass die Viskosität des Öles bei den Ergebnissen eine Rolle spielt. Diese Vermutung sollte durch Versuche bestätigt werden. Dazu wurden die fünf in Bild 3 angeführten Öle verwendet. Bei den ersten vier Ölen handelt es sich um Kohlenwasserstofföle ähnlicher chemischer Konstitution, jedoch mit verschiedener Zähigkeit; das letzte Öl H 426 ist ein Ester und von allen Ölen das dünnflüssigste. Von diesen fünf Ölen wurde bei gleichbleibender Belastung von 80 kg für verschiedene Temperaturen der Fressverzug ermittelt. Man erkennt, dass sich die Öle entsprechend ihrer Viskosität einordnen, wobei das zähflüssigste Öl H 140 die besten Werte ergibt. Führt man die Prüfung bei verschiedener Temperatur durch, so erhält man für diese fünf Öle mit steigender Temperatur kürzere Fressverzüge. Würde man den Fressverzug nicht in Abhängigkeit von der Temperatur sondern von der Viskosität auftragen, so fielen die Kurven für die Kohlenwasserstofföle zusammen, lediglich der Ester läge etwas niedriger. Die Viskositätsabhängigkeit dieser Versuche in der Vierkugelmaschine ist dadurch bewiesen.

Nach diesen allgemeinen Erörterungen über die Vier - kugelmaschine soll nunmehr über Versuche im Technischen Prüfstand berichtet werden, die vor allem darauf abzielten, das Wesen und die Ursache der z.T. sehr beträchtlichen Streuung zu ergründen.

Dass die Wiederholbarkeit der Versuche bei der Vierkugelmachine ganz allgemein zu wünschen übrig lässt, zeigt Bild 4. Die hier dargestellten Versuchspunkte stammen aus einer Veröffentlichung von Clayton.⁴⁾ Man sieht z.B., dass bei einer Belastung von 104 kg Werte gefunden werden, die zwischen rd. 1 s und 7 s liegen, also etwa um den siebenfachen Betrag von einander abweichen, oder Werte bei 80 kg, die zwischen 11 und 24 s liegen. Wie bereits erwähnt, wurde auch nach der Methode des Technischen Prüfstandes -also bei allmählich ansteigender Belastung- keine Verbesserung in der Streuung erzielt. Als Beispiel dafür zeigt Bild 5, wie die Versuchspunkte fallen, wenn man von drei verschiedenen Ölen jedes 25 mal bei gleichen Bedingungen prüft und die Häufigkeit der Ergebnisse für die einzelnen Bereiche aufträgt. Z.B. fallen bei Aeroshell von 25 Versuchen 15 Versuche zwischen 130 und 140, 5 Versuche zwischen 120 und 130 kg. Dieses Öl zeigt also verhältnismässig wenig Streuung. Für Rüböl ist die Wiederholbarkeit der Versuche ausgesprochen schlecht, denn wie man sieht, liegt die Fressbelastung zwischen 120 und 280 kg ziemlich gleichmässig verteilt; für Rotring D sind die Verhältnisse nur wenig besser.

Die Ursache dieser beträchtlichen Streuung ist noch reichlich unklar. Diese zu klären, haben wir weitgehende Versuche durchgeführt. Das nächstliegende war, die Kugeln auf ihre Gleichmässigkeit zu untersuchen. Es wurden bei 10 Kugeln an 10 auf der Oberfläche gleichmässig verteilten Punkten Härteprüfungen vorgenommen. Dabei betrug die Härte nach Rockwell im Mittel $63,5 \text{ kg/mm}^2$ und schwankte zwischen $62,5$ und $64,5 \text{ kg/mm}^2$, das sind im Mittel $\pm 1,6\%$. Auch Schnitte durch die Kugeln und Härteprüfungen der Schnittflächen ergaben keinerlei Anhaltspunkte dafür, dass die Kugeln für die Streuung verantwortlich zu machen sind. Wir hatten auch Versuche mit Kugeln angestellt, die durch Ausglühen auf eine geringere Härte gebracht wurden. Die ersten Versuche erweckten den Anschein, als ob hier eine Besserung zu erzielen wäre. Wir be-

⁴⁾ Clayton, D., The use of the four-ball extreme-pressure lubricant testing apparatus for ordinary lubricants. General Discussion on Lubrication and Lubricants, Bd.2, S.274-284, London, The Instn. Mech. Engrs., 1937.

stellten daraufhin bei den Deutschen Kugellagerfabriken eine grössere Menge solcher Kugeln, die für unsere Zwecke besonders angefertigt wurden. Es zeigte sich aber, dass die Streuung der Härtezahlen bedeutend grösser war als bei normalen Kugeln. Die Herstellungsgenauigkeit dieser Sonderanfertigung liess also zu wünschen übrig. Eine Besserung der Versuchsergebnisse konnte damit nicht erzielt werden und wir gaben daher die Versuche wieder auf.

Eine Prüfung der Oberflächenrauigkeit an den normalen Kugeln wurde nicht durchgeführt. Man darf aber annehmen, dass der Unterschied der Rauigkeit an den Kugeln unter der Messgenauigkeit der bekannten Instrumente liegt.

Da es sich also herausstellte, dass der Werkstoff der normalen Kugeln wohl als einwandfrei zu bezeichnen ist, wurde versucht, durch Änderung der Versuchsbedingungen eine Verbesserung zu erzielen. Zu diesem Zweck wurden die Drehzahlen verändert. Bild 6 zeigt die Wirkung der Erhöhung der Drehzahl von 800 auf 1500 und 2000 U/min. Die erzielte Verbesserung ist unverkennbar. Während bei der Drehzahl von 800 U/min die Fressbelastungen zwischen 80 und 200 kg fallen, liegt ihr Streubereich bei 2000 U/min zwischen 60 und 80 kg. Zu gleicher Zeit sieht man, dass die Belastungen im Mittel niedriger sind. Es scheint also gewisse Bereiche zu geben, in denen das Gerät besonders starke Streuungen aufweist.

Mit der Drehzahl von 2000 U/min wurden nun weitere Versuche durchgeführt, wobei aber nicht mit Wasserzulauf, sondern mit gleichbleibendem Gewicht gearbeitet wurde. Es wurden eine Reihe von Schmierstoffen in dieser Weise geprüft und bei einem Teil dieser Öle eine Verteilung der Versuchspunkte festgestellt, wie in Bild 7 für Rotring D gezeigt wird. Man erkennt hier zwei Streufelder, die durch eine deutliche Lücke von einander getrennt sind. Für gewisse Belastungen wie hier zwischen 60 und 65 kg gibt es Punkte, die sowohl im unteren als auch im oberen Streufeld liegen. Man muss daher annehmen, dass es sich um 2 Kurven handelt, von denen die obere mit zunehmender Belastung von der unteren ersetzt wird. Ergebnisse dieser Art traten bei vielen Schmierstoffen auf, besonders deut -

lich bei den im Bild 8 dargestellten Ölen.

Diese Erscheinung einer Unstetigkeit im Kurvenverlauf war uns zunächst sehr überraschend, sie wurde jedoch auch von Blok⁺⁾ gefunden. In Übereinstimmung mit Blok konnte auch von uns festgestellt werden, dass in diesem Gebiet zweimal Fressen eintreten kann. Lässt man beim erstmaligen Fressen —entsprechend der unteren Kurve— den Versuch weiterlaufen, so geht der Ausschlag am Indikator beinahe wieder auf seine ursprüngliche Höhe zurück, doch schlägt der Indikator nach einigen Sekunden zum zweiten Mal aus. Man kann diese Erscheinung vielleicht so erklären, dass bei diesen geringen Belastungen sich wohl beginnendes Fressen bemerkbar macht, dass aber infolge der dadurch erzeugten höheren Temperatur die chemische Aktivität des Schmiermittels gesteigert wird. Dies hat zur Folge, dass das bereits begonnene Fressen noch einmal verzögert wird und dass erst einige Sekunden später echtes Fressen eintritt. Diese hier gefundenen Unstetigkeiten können besonders bei Vorhandensein von nur wenigen Versuchspunkten sehr leicht als Streuung gewertet werden. Es wird also häufig erforderlich sein, sich durch zahlreiche Versuche darüber Klarheit zu schaffen.

Das Problem der Streuung ist damit jedoch noch nicht erschöpft. Wie schon vorher bei Rüböl und Aeroshell dargelegt wurde, kann die Streuung mit dem Charakter der Öle wechseln. Aufgrund unserer zahlreichen Versuche lässt sich sagen, dass die meisten fetten Öle sehr grosse Streuungen ergeben im Gegensatz zu den Ölen mit Hochdruckzusätzen. Die Mineralöle verhalten sich sehr unterschiedlich. Gewisse Mineralöle wie z.B. Wehrmachtseinheitsöl oder Gargoyle-Motorenöl zeigen gute Wiederholbarkeit zum Unterschied von Rotring D u.a. Diese Tatsache lässt die Vermutung aufkommen, dass die Streuung nicht nur physikalisch begründet ist, sondern dass hier der chemische Aufbau der Öle und ihr Verhalten z.B. gegen Stahl weitgehend mit im Spiele sind.

^{+) H. Blok, Seizure-Delay "Method for Determining the Seizure of EP Lubricants", SAE Journal Mai 1939, Seite 193.}

Daher befasste sich die weitere Untersuchung nunmehr mit dem Schmieröl, seiner Zusammensetzung und der Auswirkung auf die Streuung. Zunächst war die Frage von Interesse: Wie verhält sich ein Öl in der Vierkugelmachine, das eine Mischung aus zwei Komponenten darstellt, von denen beide sehr wenig streuen, die aber in ihrer chemischen Zusammensetzung so weit verschieden sind, dass sie stark unterschiedliche Fressverzüge liefern. Die Antwort darauf gibt das Bild 9. Es zeigt die Kurven für Wehrmachtseinheitsöl, ein Motorenöl und für Valvoline Hypoid-Getriebeöl, das Hochdruckzusätze enthält. Beide Öle liefern sehr gut liegende Versuchspunkte. Dagegen ergibt die Mischung von 1 Teil Valvoline Hypoid und 9 Teilen Wehrmachtseinheitsöl nur im Bereich höherer Drücke ein günstiges Fallen der Versuchspunkte, während bei geringen Belastungen die Punkte zwischen den beiden Kurven der Komponenten streuen.

Zu einem ähnlichen Ergebnis führen die Versuche mit Wehrmachtseinheitsöl mit Zusätzen von Tetrachlorkohlenstoff (Bild 10). Während bei einem Zusatz von 2% CCl_4 brauchbare Werte erzielt werden, gibt das gleiche Öl mit nur 0,1% ganz beträchtliche Streuung, besonders wiederum im Gebiet niedriger Drücke.

Auch mit anderen Ölen und mit anderen Zusätzen wurden während der laufenden Untersuchungen ähnliche Beobachtungen gemacht. Bild 11 zeigt für Sismaschinenöl gelb hinsichtlich Streuung gute Ergebnisse. Ein Zusatz von 9% eines Schwefelproduktes setzt den Fressverzug bedeutend herauf, wobei ebenfalls geringe Streuung beobachtet wird. Bei der 5%igen Mischung erwartet man, dass die Versuchspunkte zwischen die beiden anderen Kurven fallen. Im Bereich der höheren Drücke trifft dies auch zu, während bei geringer Belastung Werte erzielt werden, die über denen der 9%igen Mischung liegen und dabei eine sehr unbefriedigende Wiederholbarkeit zeigen.

Verwendet man das gleiche Produkt als Zusatz zu einem anderen Öl, z.B. zu Gargoyle-Motorenöl (Bild 12), so kann man feststellen, dass hier eine Menge von 9% noch nicht ausreichend ist, um wenig streuende Werte zu erhalten, sondern dass hierzu eine

stärkere Konzentration notwendig ist, wie z.B. eine solche von 17%. Im übrigen ist dieses Bild dem vorhergehenden weitgehend ähnlich.

Die Versuche zeigen also, dass man durch Zusätze von chemisch aktiven Stoffen Streuungen erzeugen und Streuungen beseitigen kann. Man könnte sich vorstellen, dass ein Öl, das grosse Streuungen ergibt, von vorneherein Anteile enthält, die in einer für die Wiederholbarkeit ungünstigen Konzentration vorhanden sind. Zur Erklärung dieser Vorgänge ist man geneigt anzunehmen, dass man bei Versuchen mit Ölen, die Zusätze in verschiedenen Konzentrationen enthalten, ebenfalls auf eine Unstetigkeit stösst, die bei oberflächlichem Betrachten als Streuung bewertet wird. Versuche dieser Art haben wir bereits in Angriff genommen.

Zum Schluss seien noch Ergebnisse aus dem Gebiet der Oberflächenbehandlung von Metallen gezeigt. Bild 13 gibt Versuchsergebnisse wieder mit Rotring D und mit Kugeln, die durch Atramentieren mit einer Phosphatschicht überzogen wurden. Zum Vergleich sind angeführt die Ergebnisse mit normalen Kugeln mit Rotring D mit und ohne Zusatz. Wie man erkennt, ist die Wirkung dieser Oberflächenbehandlung sehr bedeutend. Wenn solche Versuche auch unmittelbar nichts mit Schmierung zu tun haben, geben sie vielleicht doch die Möglichkeit, die Vorgänge an Grenzflächen näher zu erforschen.

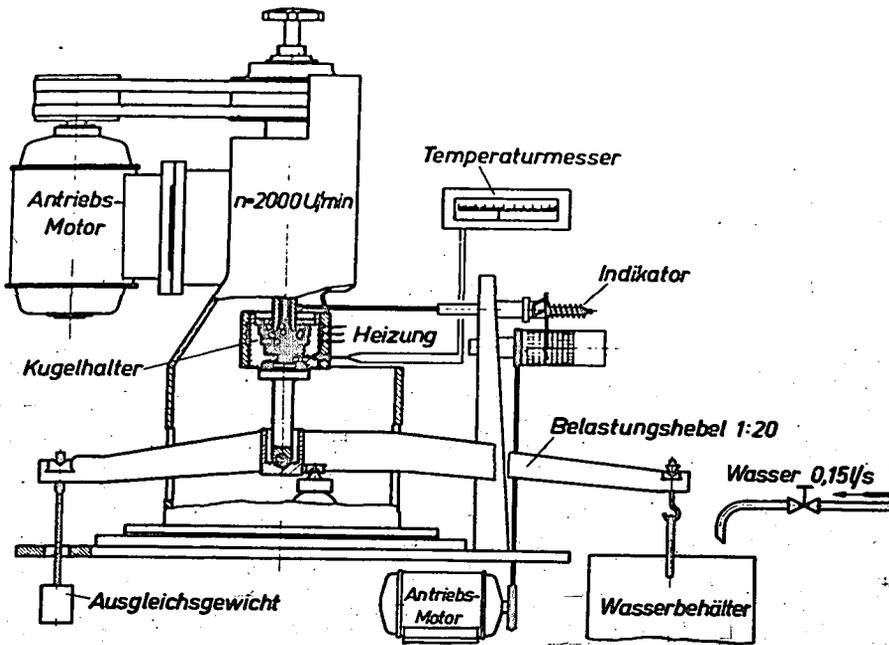


Abb. 1: Vierkugelmachine der I.G.-Farben-Industrie A.-G.

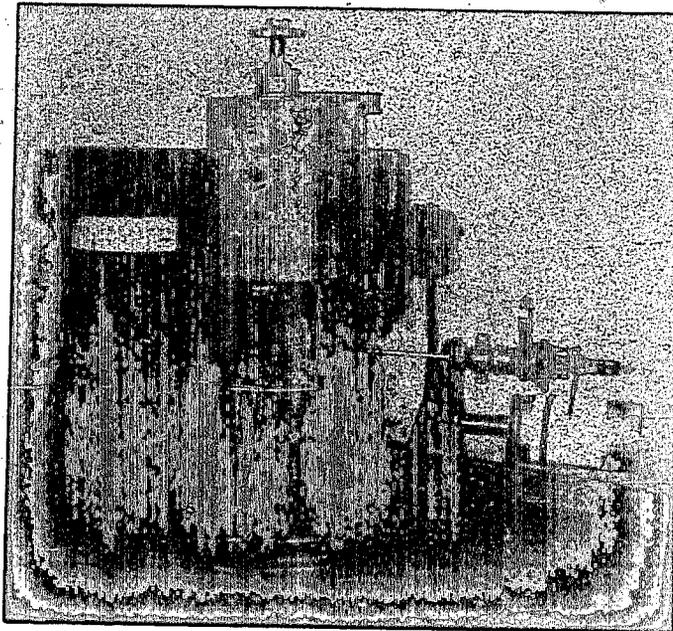


Abb. 2: Vierkugelmachine, Bauart: I.G. Farben-Industrie

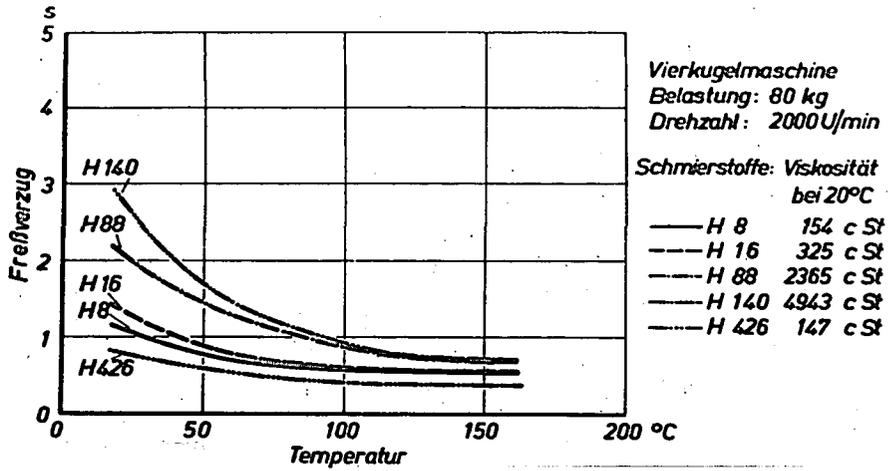


Abb. 3: Freßverzug in Abhängigkeit von der Öltemperatur.

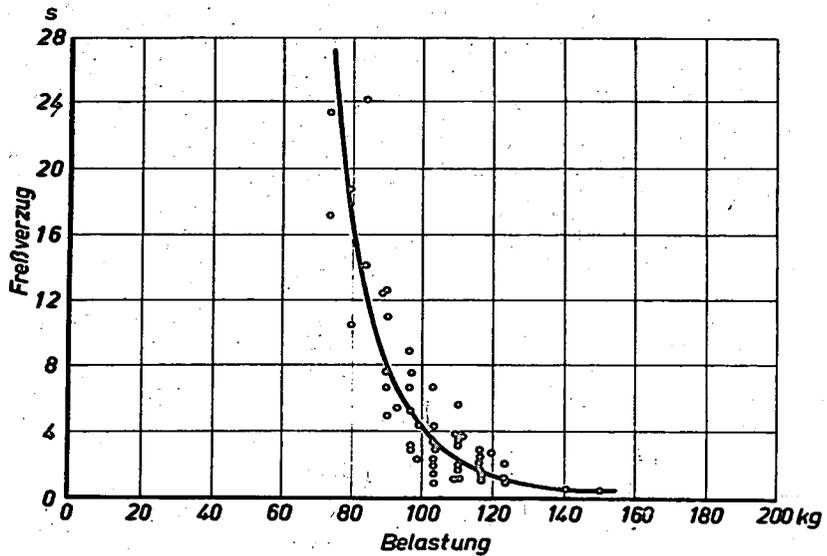


Abb. 4: Freßverzug für Rizinusöl nach Clayton.

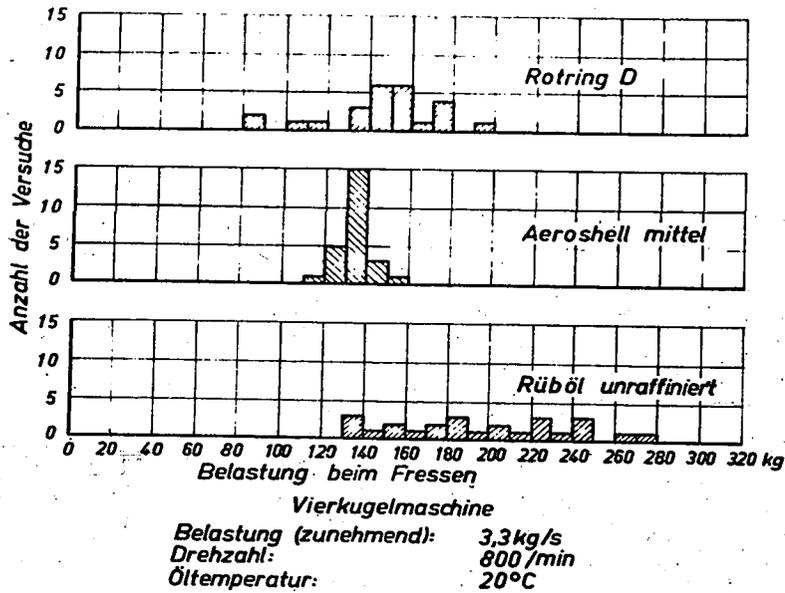


Abb.5: Häufigkeitswerte aus 25 Versuchen für 3 verschiedene Öle.

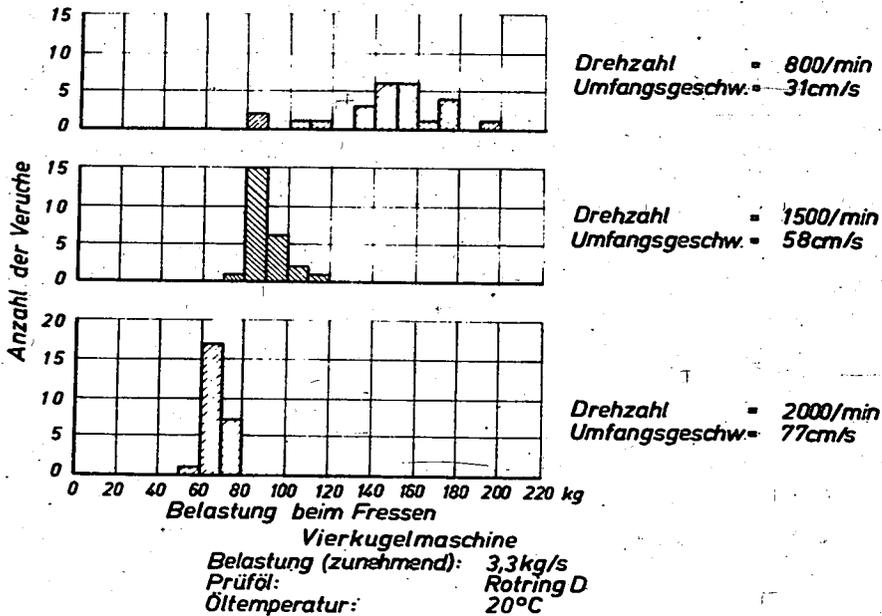


Abb.6: Häufigkeitswerte aus 25 Versuchen bei 3 verschiedenen Drehzahlen für Rotring D.

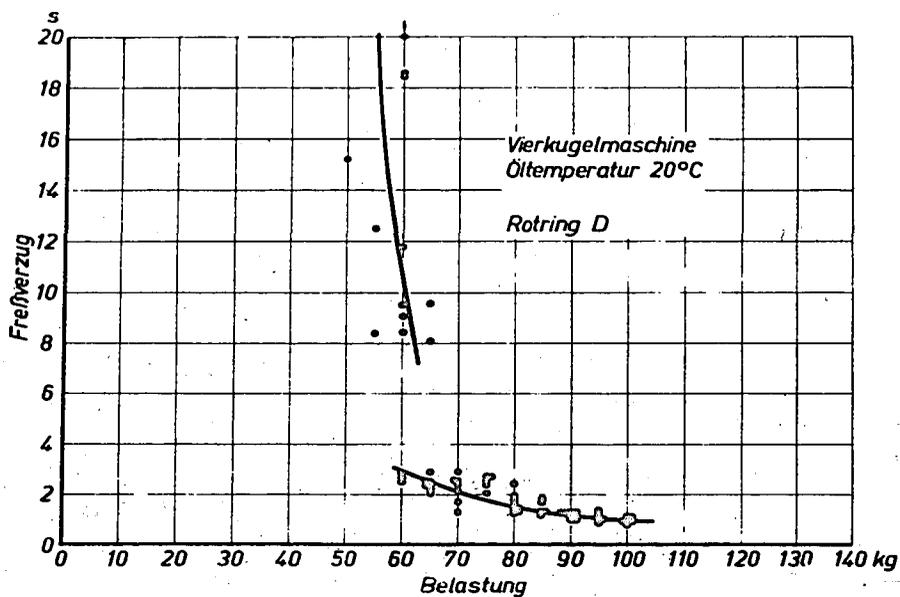


Abb.7: Freßverzug in Abhängigkeit von der Belastung.

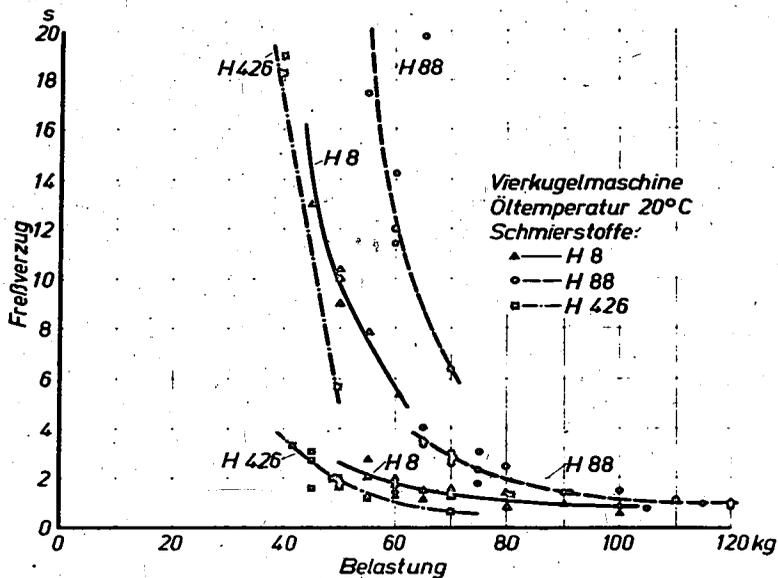


Abb.8: Freßverzug in Abhängigkeit von der Belastung.

001629

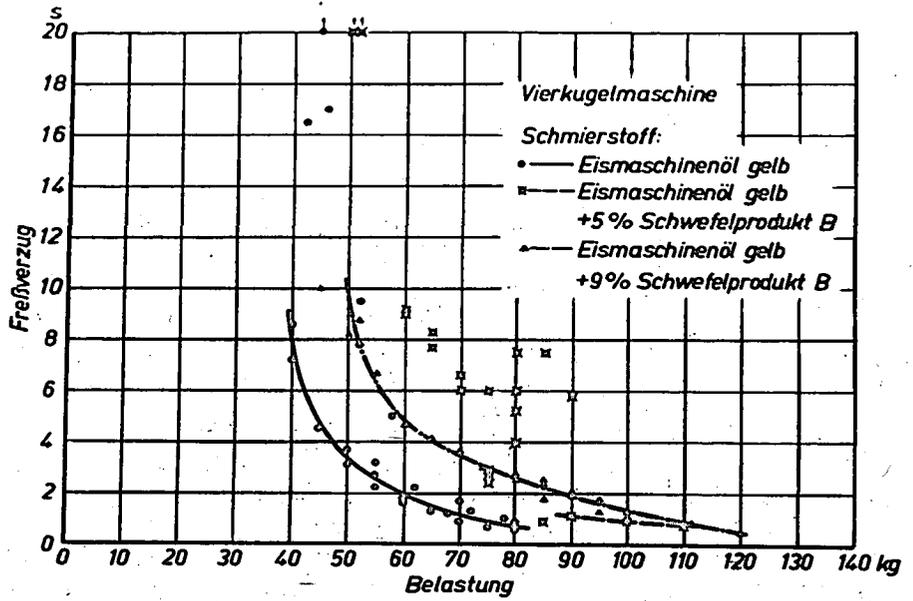


Abb.11: Freßverzug für ein Eismaschinenöl mit einem Schwefelprodukt.

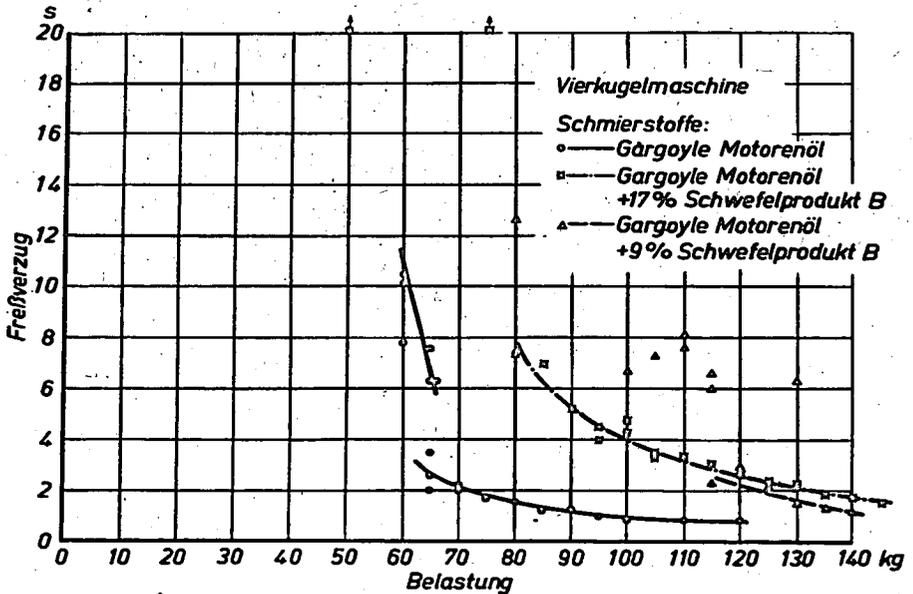


Abb.12: Freßverzug für Gargoyle-Motorenöl mit einem Schwefelprodukt.

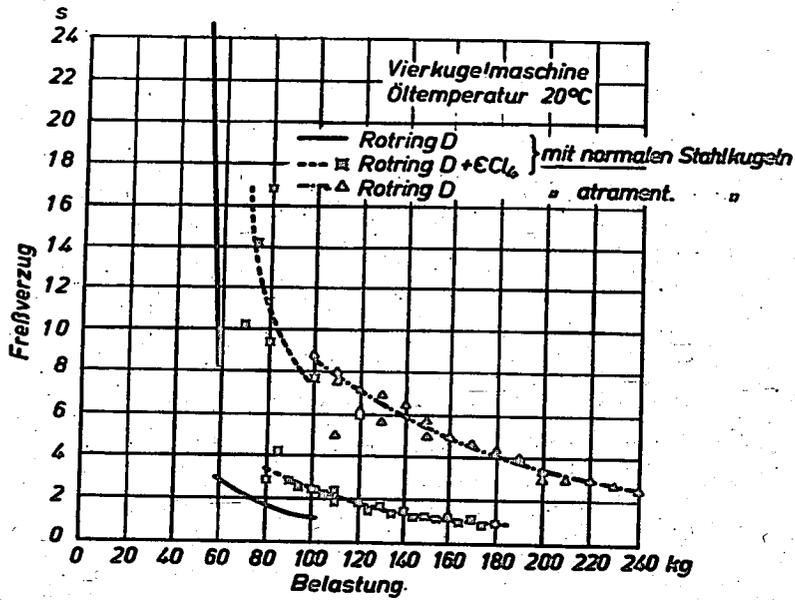


Abb.13: Freßverzug für Rotring D bei normalen und atramentierten Stahlkugeln.