

im 20 cm-Rohr  $\alpha = 1,20^\circ$ , also  $[\alpha]_D = +9,6^\circ$  als Enddrehung. Die Drehung ist nicht sehr genau, weil die Ablesungswinkel klein sind; ist die Lösung etwas trüb, so muß sie filtriert werden.

Das Reduktionsvermögen wurde mit Allihn'scher Kupferlösung bestimmt. 0,3078 g V<sup>1</sup> gaben 264 mg Cu = 136,8 mg Dextrose = 44,4%; 0,313 g V<sup>2</sup> gaben 279 mg Cu = 145 mg Dextrose = 46,3%. Ein anderes Präparat hat Dr. Yachya<sup>2)</sup> untersucht und das Drehungsvermögen  $[\alpha]_D = +10,45$  und das Reduktionsvermögen 48,6% gefunden.

Die reine Cellotriose löst sich in 10–15 Teilen kaltem Wasser, leichter in heißem, und kristallisiert aus Wasser und aus wässrigem Alkohol in feinnadeligen Warzen; im Vakuum über  $H_2SO_4$  entwässert, verliert sie bei  $110^\circ$  noch etwa 1% an Gewicht. Sie schmeckt kaum süß und ist mit Bierunterhefe nicht vergärbar. Durch 3%ige Salzsäure wird sie, auf dem Wasserbade erhitzt, nur sehr langsam hydrolysiert, nach 6 Stunden war das Reduktionsvermögen auf 60% der Dextrose, nach 10 Stunden auf 80% gestiegen, also nach 10 Stunden noch unvollständig zu Dextrose aufgespalten; ob hierbei nur Dextrose entsteht, bedarf noch der Prüfung. Mit Phenylhydrazin bildet sie ein leichtlösliches schleimiges Osazon; 1 g Triose mit 2,5 g Phenylhydrazin, 2,5 g Eisessig, 0,5 g Natriumacetat und 25 g Wasser 1 Stunde auf siedendem Wasserbade erhitzt, färbte sich kaum, schied heiß nichts, beim Erkalten ein wenig Schleim aus, der zur näheren Untersuchung nicht einlud.

Dr. Yachya fand bei zwei Elementaranalysen

Gefunden:		Berechnet für:		
I.	II.	$3 C_6H_{10}O_5$	$C_{18}H_{32}O_{16}$	$3 C_6H_{12}O_6$
C = 42,70	42,78	44,44	42,85	40,00
H = 6,31	6,29	6,17	6,35	6,67

Als Molekulargewicht fand Yachya, durch Gefrierpunktniedrigung der wässrigen Lösung, die Zahlen 460,1 und 476,4; aus den Formeln  $C_{18}H_{30}O_{15}$ ,  $C_{18}H_{32}O_{16}$  und  $C_{18}H_{36}O_{18}$  berechnen sich die Molekulargewichte 480, 504 und 540. Obwohl die gefundenen Molekulargewichte am besten zur Formel  $C_{18}H_{30}O_{15}$  stimmen, also für eine dextrinartige Tricellulose, und auch die Eigenschaften mehr denen eines Dextrins als eines Zuckers ähneln, beweisen die zuverlässigeren Elementaranalysen, daß die Formel  $C_{18}H_{32}O_{16}$  die richtige ist, d. h., daß eine echte Triose vorliegt. Eigene Analysen meiner besten Präparate beweisen dasselbe; sie wurden vakuumtrocken analysiert, mit 1% Wasser und 0,3% Asche. Präparat V<sup>1</sup>: 0,2473 g Subst. = 0,2441 g wasser- und aschefrei, gaben 0,3820 g  $CO_2$  und 0,1470 g  $H_2O$ . — Präparat V<sup>2</sup>: 0,3070 g Subst. = 0,3030 g wasser- und aschefrei, gaben 0,4724 g  $CO_2$  und 0,1790 g  $H_2O$ .

Gefunden:		Berechnet für:
I.	II.	$C_{18}H_{32}O_{16}$
C = 42,68 $\frac{0}{10}$	42,52 $\frac{0}{10}$	42,85 $\frac{0}{10}$
H = 6,58 $\frac{0}{10}$	6,45 $\frac{0}{10}$	6,35 $\frac{0}{10}$

Eine Konstitutionsformel dieser Cellotriose aufzustellen, halte ich für verfrüht, und noch weniger bleiben den Wert können die heutigen Konstitutionsformeln der Cellulose selbst haben. Das experimentelle Material ist noch zu dürftig, die Isocellobiose mit ihren Beziehungen zur Cellobiose bedarf näherer Untersuchung, und neue Abbauprodukte der Cellulose vielleicht durch Pilze sind aufzufinden, um uns das Innere des Cellulosemoleküls zu erschließen. [A. 212.]

<sup>2)</sup> Yachya, Dissert. Hannover 1925, nicht gedruckt.

## Über die Beurteilung der Lagerschmierung nach elektrischen Messungen.

Von H. SCHERING und R. VIEWEG,  
Physikalisch-Technische Reichsanstalt.

Vorgetragen von R. Vieweg auf der Hauptversammlung des Vereins deutscher Chemiker in Kiel.

(Eingeg. 29. Mai 1926.)

Es ist seit den Untersuchungen von Reynolds<sup>1)</sup> über die Schmierung bekannt, daß sich der Zapfen in einem Lager unter dem Einfluß von Drehzahl, Belastung und Zähigkeit des Öles verlagert. Anknüpfend an Reynolds haben Sommerfeld<sup>2)</sup> und später Gumbel<sup>3)</sup> das Problem der Lagerreibung weiter geklärt, so daß unter vereinfachenden Annahmen über das Lager die Dicke der Ölschicht berechnet werden kann. Bei der großen, technischen und wirtschaftlichen Bedeutung der Lagerschmierung hat man nun vielfach versucht, auch praktisch am ausgeführten Lager Messungen der Filmdicke vorzunehmen. Auf mechanischem Wege mittels Mikrometer haben z. B. Stoney<sup>4)</sup> und seine Mitarbeiter Schichtdicken bestimmt. Optisch wird die Kontur der Welle im Öldickenmesser nach V. Vieweg<sup>5)</sup> und A. Wetthauer beobachtet. Aber auch elektrische Messungen sind zur Beurteilung der Lagerschmierung herangezogen worden.

Den elektrischen Versuchen liegt die Überlegung zugrunde, daß im allseitig geschmierten Lager der Zapfen gegen die Schale durch Öl elektrisch isoliert sein muß. Aus der Größe des Isolationswiderstandes wird auf die Dicke des Ölfilms geschlossen. Als erster hat wohl Wadsworth<sup>6)</sup> 1897 eine Untersuchung hierüber veröffentlicht. Erwähnt seien weiter die Arbeiten von Kenelly und Adams<sup>7)</sup> sowie von Moore<sup>8)</sup>. Moore verwendet die Widerstandsbestimmung mit Gleichstrom insbesondere dazu, den Beginn vollständiger Isolierung des Zapfens gegen das Lager, d. h. den Eintritt reiner Flüssigkeitsreibung oder, wie wir sagen wollen, den Eintritt der Vollschröpfung festzustellen. In neuerer Zeit haben Biel<sup>9)</sup>, ferner Schenfer<sup>10)</sup> sowie Hersey<sup>11)</sup> Isolationsmessungen an Lagern beschrieben. Michels<sup>12)</sup> prüfte elektrisch mit Hilfe des Oszillographen die Schmierung im Halslager einer empfindlichen Druckwaage, v. Freudenreich<sup>13)</sup> untersuchte die Schichtdicke in einem Segmentdrucklager. Endlich sei noch auf eine Nutzanwendung der Widerstandsmethode hingewiesen: man schaltet den Ölfilm in den Kreis einer elektrischen Lampe, deren Brennen bei umlaufendem Zapfen ungenügende Schmierung anzeigt.

Die erwähnten elektrischen Lagermessungen lieferten im wesentlichen nur qualitative Ergebnisse. Eine exakte zahlenmäßige Bestimmung der Filmdicke hat sich nicht durchführen lassen. Ein Grund hierfür liegt darin, daß,

<sup>1)</sup> Phil. Trans. Roy. Soc. of London 1886.

<sup>2)</sup> Z. f. Math. u. Phys. 50, 97–155 [1904].

<sup>3)</sup> Vgl. Gumbel-Everling, Reibung und Schmierung im Maschinenbau, Berlin, Verlag M. Krayn, 1925.

<sup>4)</sup> Engineering 113, 249 [1922].

<sup>5)</sup> Petroleum 18, 1405–1412 [1922].

<sup>6)</sup> Phys. Rev. 5, 75–97 [1897].

<sup>7)</sup> Electric. World and Eng. 1903, S. 231.

<sup>8)</sup> Americ. Maschinist 1903, S. 1282.

<sup>9)</sup> Z. VDJ. 65, 449–458 [1920].

<sup>10)</sup> Arch. f. Elektrot. 11, 129–130 [1922].

<sup>11)</sup> J. of the Americ. Nav. Eng. 35, 648–674 [1923].

<sup>12)</sup> Ann. d. Phys. 72, 285–320 [1923].

<sup>13)</sup> BBC-Mitteilungen 4, Heft 1–4 [1917].

solange Zapfen und Schale sich noch irgendwie berühren, sei es auch nur mit wenigen Zacken, der Schichtwiderstand praktisch Null ist. Sobald jedoch die Welle wirklich allseitig geschmiert ist, ergibt sich für den Film ein außerordentlich hoher Widerstand, der in der Größe von 100 Megohm und mehr liegt. Die Messung so großer Widerstände ist an sich nicht einfach, aber auch bei Überwindung der hierin liegenden Schwierigkeiten bleibt noch ein weiterer, wichtiger Grund, aus dem Widerstandsmessungen an Lagern nicht zum Ziele führen. Die in die Messungen eingehende Materialkonstante, die Leitfähigkeit  $\kappa$  des Schmierstoffs ist, wie Zahlentafel 1 an einem Öl I zeigt, außerordentlich von der Temperatur abhängig und wird vor allem durch Erwärmung dauernd verändert. Die

Zahlentafel 1.

Temp. °C	Öl I			Öl II	
	abs. Zähigkeit $\eta$ CGS	Leitfähig- keit $\kappa$ cm/Ohm	Dielektrizi- tätszahl $\epsilon$	abs. Zähigkeit $\eta$ CGS	Dielektrizi- tätszahl $\epsilon$
20	0,68	$1,5 \cdot 10^{-14}$	2,26	3,99	2,23
50	0,16	$9,4 \cdot 10^{-14}$	2,23	0,66	2,20
80	0,07	$53 \cdot 10^{-14}$	2,18	0,21	2,16

Leitfähigkeit des Öles ist durch Säuregehalt, Feuchtigkeit und Verunreinigungen bedingt, diese sind aber im Lager auch zeitlich starken Änderungen unterworfen. Schmierstoffe nehmen bekanntlich aus der Luft Feuchtigkeit auf, und die Säurezahl steigt allmählich durch Oxydation. Z. B. ergab die künstliche Verschlechterung eines Öls durch Zusatz von 0,5 % Ölsäure und 0,5 % Wasser eine Vergrößerung der Leitfähigkeit von rund 1 : 1000. Aus den angeführten Gründen muß festgestellt werden, daß die Leitfähigkeit keine geeignete Basis für die Bestimmung der Schmierfilmdicke im Lager bildet.

Es ist aber doch möglich, durch elektrische Messungen zu einer Beurteilung der Lagerschmierung zu gelangen. Man kann das Lager im Zustande der Vollschmierung als einen Kondensator betrachten. Zapfen und Lagerschale sind die beiden Belegungen, zwischen denen sich als Dielektrikum das Öl befindet. Aus der Kapazität des Kondensators wird auf die Dicke der Ölschicht geschlossen. Die für diese Messungen wichtige Materialkonstante, die Dielektrizitätszahl  $\epsilon$  des Schmiermittels, erweist sich als praktisch konstant; sie ist von der Temperatur in dem für das Lager in Betracht kommenden Bereich fast unabhängig (vgl. Zahlentafel 1) und wird auch durch Feuchtigkeit, Säurezahl und Verunreinigungen nur sehr wenig beeinflusst. Bei dem erwähnten Beispiel, wo sich die Leitfähigkeit durch Zusätze von Ölsäure und Feuchtigkeit zum Öl wie 1 : 1000 änderte, betrug die Änderung der Dielektrizitätszahl rund 2 %. Die Kapazität eignet sich also wesentlich besser für die Ermittlung der Ölfilmdicke.

In Fig. 1 ist schematisch eine Welle im Lager gezeichnet. Im Stillstand liegt der Zapfen unten in der Schale auf. Beim Umlauf hebt er sich von der Schale ab und verschiebt sich bei Vollschmierung etwas im Sinne der Drehrichtung. Bei der Drehzahl  $\infty$  und bei der Belastung 0 würde die Welle zentriert in der Lagerschale laufen. Die Filmdicke wäre ringsherum gleich dem radialen Lagerspiel  $R - r = s$ . Mit abnehmender Drehzahl und zunehmender Belastung sinkt der Zapfen; der Abstand zwischen Zapfen und Schale an der engsten Stelle, die „geringste Schmierschichtstärke“, werde  $h$  genannt, die radiale Verlagerung oder Exzentrizität  $e$ , mit- hin ist  $h + e = s$ . Den Quotienten  $h/s$ , der die geringste Schichtdicke als Bruchteil des radialen Lagerspiels aus-

drückt, bezeichnen wir als relative, geringste Schmier- schicht, entsprechend  $e/s$  als relative Exzentrizität. Die Länge des Lagers sei  $l$ . Da  $e$  und  $s$  klein gegen  $r$  und  $l$  sind, ist der Einfluß der Ränder des Lagers verschwin-

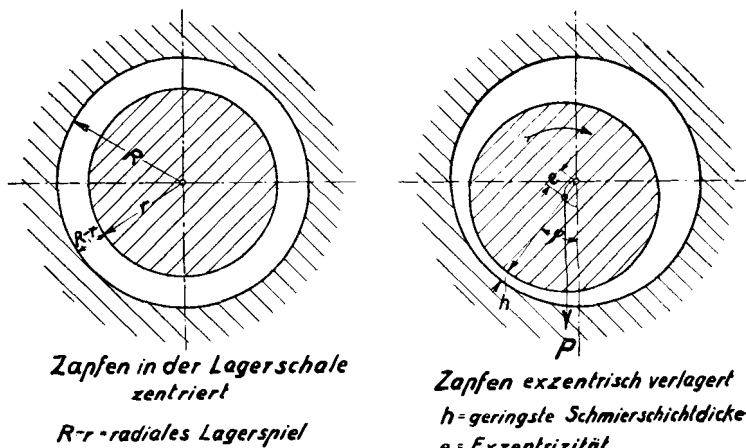


Fig. 1.

dend. Durch Näherungsrechnung ergibt sich die Kapazität  $K$  des Zapfens gegen das Lager bei ganz umschlie- ßender Schale zu:

$$1) \quad K = \frac{2\pi l r \epsilon}{4\pi s \sqrt{1 - \frac{e^2}{s^2}}}$$

Bei zentrischer Lage des Zapfens wird  $e = 0$ , die Kapa- zität erreicht ihren Kleinstwert  $K_{\min}$ , es ist also

$$2) \quad K_{\min} = \frac{2\pi l r \epsilon}{4\pi s}$$

$$3) \quad \frac{K}{K_{\min}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{e^2}{s^2}}}$$

Die Kapazitätsmessung bei hoher Drehzahl ohne Be- lastung gibt  $K_{\min}$ . Aus der bei bestimmten Betriebs- verhältnissen gemessenen Kapazität  $K$  erhält man dann nach Gleichung 3) die zugehörige relative geringste

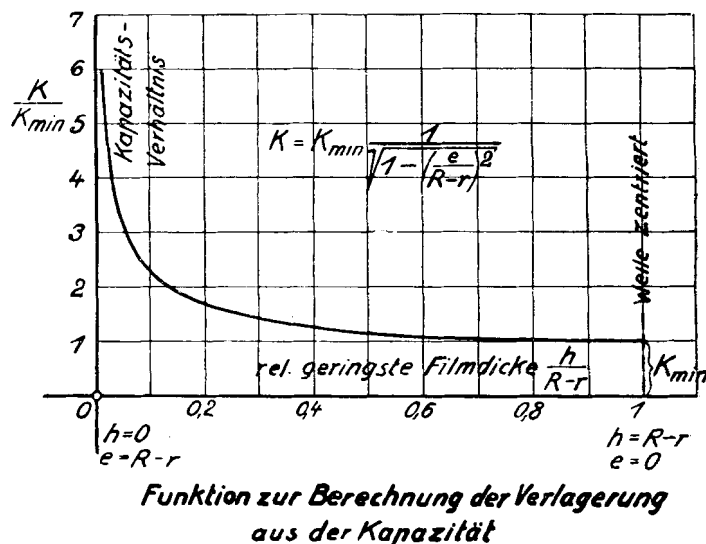


Fig. 2.

Schmierschichtdicke  $\frac{h}{s}$ . In Fig. 2 ist die Beziehung zwischen den Kapazitäten und  $\frac{h}{s}$  graphisch dargestellt. Bei allmählichem Absinken des Zapfens aus der zen- trischen Lage nimmt  $\frac{K}{K_{\min}}$  zunächst sehr wenig zu, steigt aber bei kleinen Dicken stark an. Bei unseren

Gleitlagern trat bei etwa  $\frac{K}{K_{\min}} = 2$ , also  $\frac{h}{s} \approx 0,15$  dauernder Durchbruch der Schmierschicht (Teilschmierung) ein, womit der Kapazitätsmessung ein Ende gesetzt war. Für die Auswertung der Messung ist die Zahlentafel 2 bequemer<sup>14)</sup>.

Zahlentafel 2.

$$u = 1/\sqrt{1 - (e/s)^2}$$

$\frac{h}{s}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	$\infty$	7,08	5,03	4,113	3,692	3,204	2,930	2,720	2,552	2,412
0,1	2,294	2,194	2,106	2,026	1,959	1,898	1,843	1,793	1,748	1,705
0,2	1,667	1,631	1,598	1,567	1,539	1,512	1,486	1,464	1,442	1,420
0,3	1,400	1,382	1,364	1,347	1,331	1,316	1,302	1,288	1,275	1,262
0,4	1,250	1,239	1,228	1,218	1,207	1,197	1,188	1,180	1,171	1,163
0,5	1,155	1,147	1,140	1,133	1,126	1,120	1,114	1,108	1,102	1,097
0,6	1,092	1,087	1,082	1,077	1,073	1,068	1,064	1,059	1,055	1,052
0,7	1,048	1,045	1,042	1,039	1,036	1,033	1,030	1,027	1,025	1,023
0,8	1,021	1,019	1,017	1,015	1,013	1,012	1,010	1,009	1,007	1,006
0,9	1,005	1,004	1,004	1,003	1,002	1,001	1,001	1,001	1,000	1,000

Es ist nun aber noch eine Korrektur anzubringen. Die Lagerfläche enthält meist Aussparungen; unser Versuchslager z. B. hatte seitlich zwei, die „Öltaschen“ und oben je eine für jeden Schmierring. In der Formel ist nur die an der Kapazität beteiligte Fläche  $F$  einzusetzen, also sind von der Fläche  $2\pi lr$  die Aussparungen abzuziehen. An der Stelle der Aussparungen für die Ringe umschließt die Schale den Zapfen nur halb. Bei der Entfernung des Zapfens aus der zentrischen Lage tritt mit abnehmender Schichtdicke eine Kapazitätsvermehrung ein, die nicht, wie bei ganz umschließender Schale, zum Teil durch eine Kapazitätsverminderung auf der oberen Seite des Lagers aufgehoben wird.

Die Kapazität des halbumschlossenen Lagers von der Länge  $l'$  ist

$$K' = \frac{2\pi r l' \epsilon}{4\pi s \sqrt{1 - \frac{e^2}{s^2}}} \left[ \arctan \left( \sqrt{\frac{1 + \frac{e}{s}}{1 - \frac{e}{s}}} \tan \frac{90^\circ + \varphi}{2} \right) + \arctan \left( \sqrt{\frac{1 + \frac{e}{s}}{1 - \frac{e}{s}}} \tan \frac{90^\circ - \varphi}{2} \right) \right],$$

worin  $\varphi$  den in Fig. 1 gezeichneten, unbekannten Verlagerungswinkel bedeutet. Setzen wir für die Korrekturrechnung in ausreichender Annäherung  $\varphi = 0$  (das ergibt den Größtwert der Korrektur), so wird

$$K' = \frac{\pi r l' \epsilon}{4\pi s \sqrt{1 - \frac{e^2}{s^2}}} \cdot 4 \arctan \sqrt{\frac{1 + \frac{e}{s}}{1 - \frac{e}{s}}}.$$

<sup>14)</sup> Zusatz bei der Korrektur: Aus Gl. 3) erhält man:  $\left(\frac{e}{s}\right)^2 + \left(\frac{K_{\min}}{K}\right)^2 = 1$ , d. h.  $\frac{e}{s}$  und  $\frac{K_{\min}}{K}$  sind die Katheten eines rechtwinkligen Dreiecks mit der Hypotenuse 1; hieraus ergibt sich eine sehr einfache und genaue Methode der graphischen Auswertung: zwei senkrechte Achsen sind in mm geteilt und entsprechend 100 mm = 1,00 beziffert. Setzt man einen Zirkel mit dem Spitzenabstand 100 mm mit einer Spitze auf der einen Achse an der dem Wert  $\frac{K_{\min}}{K}$  entsprechenden Stelle ein, so schneidet die andere Spitze beim Kreisschlagen die andere Achse an der Stelle  $\frac{e}{s}$ . Beziffert man diese Achse gemäß der Beziehung  $\frac{h}{s} = 1 - \frac{e}{s}$  gegenläufig, so kann man unmittelbar  $\frac{h}{s}$  ablesen.

Bezeichnen wir zur Abkürzung die Fläche der Aussparungen für die Schmierringe mit  $f = \pi r l'$ , und setzen wir weiter

$$u = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{e^2}{s^2}}},$$

$$v = \frac{4}{\pi} \arctan \sqrt{\frac{1 + \frac{e}{s}}{1 - \frac{e}{s}}},$$

so wird

$$2a) \quad K_{\min} = \frac{F \epsilon}{4\pi s},$$

$$3a) \quad \frac{K}{K_{\min}} = u + \frac{f}{F} u (v - 1).$$

Die Werte der Funktion  $u (v-1)$  sind in Zahlentafel 3 in Abhängigkeit von  $\frac{h}{s}$  dargestellt.

Zahlentafel 3.

$$u (v-1)$$

$\frac{h}{s}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0						2,58	2,26	2,05	1,89	1,75
0,1	1,63	1,54	1,44	1,36	1,29	1,23	1,17	1,11	1,06	1,02
0,2	0,98	0,94	0,91	0,87	0,84	0,81	0,78	0,75	0,73	0,71
0,3	0,68	0,66	0,64	0,62	0,61	0,59	0,57	0,55	0,53	0,52
0,4	0,51	0,49	0,48	0,47	0,46	0,44	0,43	0,42	0,41	0,39
0,5	0,38	0,37	0,36	0,35	0,34	0,33	0,32	0,31	0,30	0,29
0,6	0,29	0,28	0,27	0,26	0,25	0,24	0,23	0,23	0,22	0,21
0,7	0,20	0,20	0,19	0,18	0,17	0,17	0,16	0,15	0,15	0,14
0,8	0,13	0,13	0,12	0,11	0,11	0,10	0,09	0,09	0,08	0,07
0,9	0,06	0,06	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01

Aus  $K_{\min}$  ergibt sich das mittlere radiale Lagerspiel  $s$ . Die anfänglich geringe Änderung des Kapazitätsverhältnisses mit der Exzentrizität ermöglicht es, auch bei nicht genau zentrischer Lage,  $s$  hinreichend genau zu berechnen. Dieses Ergebnis ist um so wichtiger, als die sonst üblichen Methoden zur Passungsbestimmung am Gleitlager, Innentaster, Fühlbleche (sog. „Spione“), nur eine punktweise Ermittlung gestatten, während man hier einen Mittelwert über die ganze Lagerfläche gewinnt.

Es sei hier erwähnt, daß bei Widerstandsmessungen die Änderung des Leitwerts derselben Gesetzmäßigkeit folgt wie die Kapazität. Auch der Leitwert ist bei zentrierter Welle am kleinsten und steigt mit der Verlagerung nach der in Fig. 2 dargestellten Funktion. Änderungen des Leitwerts im Verhältnis 1 : 2 sind natürlich kaum festzustellen, wenn die Leitfähigkeit selbst so starken und vielseitigen Änderungen unterliegt.

Die Meßanordnung zur Bestimmung der Kapazität zeigt Fig. 3. Sie besteht in einer Wechselstrombrücke mit Summer und Telephon.  $K_x$  ist die Lagerkapazität,  $K_2$  ein Drehkondensator,  $R_3$  und  $R_4$  sind Widerstände. Bei Stromlosigkeit des Telephons ist

$$K_x = K_2 \frac{R_3}{R_4}.$$

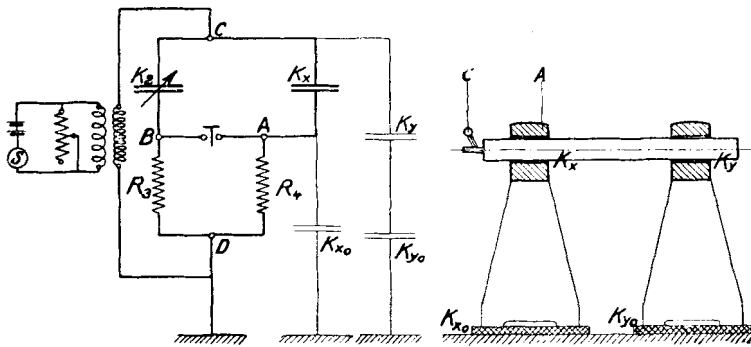
In Fig. 3 (s. S. 1122) ist neben der Brücke eine in zwei Gleitlagern gelagerte Welle skizziert. Sind beide Lager unmittelbar oder über Erde leitend verbunden, so ist nur die Summe der beiden parallel geschalteten Kapazitäten bestimmbar. Diese Messung läßt sich mit den gebräuchlichen, z. B. für die Ermittlung von Antennenkapazitäten dienenden Summerbrücken ausführen. Will man jedes Lager für sich untersuchen — für die Beurteilung der Lagerschmierung wird dies immer wünschens-

wert sein — so müssen die Lager gegeneinander isoliert sein, z. B. durch eine Isolierschicht zwischen Lagerbock und Erde. Wird nun die Kapazität  $K_x$  des einen Lagers

der Ringe sowie das Schmiermittel sind hier von Einfluß. Durch Anwendung isolierender Schichten lassen sich diese Störungen beseitigen.

Fig. 4 zeigt die Messung der Kapazität eines Ringschmierlagers von 35 mm Bohrung und 100 mm Länge bei einer spezifischen Belastung von  $p = 0,3 \text{ kg/qcm}$  in Abhängigkeit von der Drehzahl. Es war  $F = 89 \text{ qcm}$ ,  $f = 13 \text{ qcm}$ . Als Schmiermittel diente das Öl I von 68 Centipoisen bei  $20^\circ$ . Man sieht, daß sich bei den gegebenen Bedingungen die Kapazität von etwa 900 U/min an kaum mehr mit zunehmender Drehzahl ändert. Für das mittlere Lagerspiel ergab sich rund 0,1 mm. Unter 50 U/min war die Kapazität infolge zu häufiger Durchbrüche nicht mehr meßbar. Die Brückenwiderstände bei dieser Messung waren  $R_3 = 2000 \text{ Ohm}$ ,  $R_4 = 1000 \text{ Ohm}$ ; der Drehkondensator  $K_2$  hatte ein Meßbereich bis zu 2000 cm.

Um nun aus der Kapazitätsmessung die Filmdicke zu ermitteln, muß man den Wert  $K_{\min}$  möglichst genau kennen. Wir wissen: Die Lagerkapazität ist am kleinsten bei höchsten Drehzahlen und geringster Belastung. Die Drehzahl war bereits so hoch gewählt, daß weitere Steigerung keinen Einfluß mehr ausübte; ein Betrieb mit

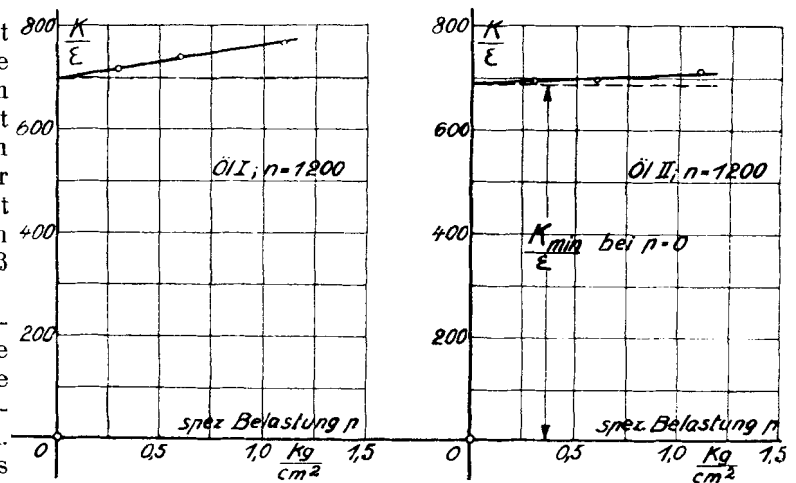


Kapazitätsmessungen an Lagern

Fig. 3.

ermittelt, so ist zu beachten, daß mit der Lagerkapazität noch die Kapazität  $K_{x0}$  des Bockes gegen Erde in Reihe liegt. Zu  $K_x$  und  $K_{x0}$  liegen ferner noch die Kapazitäten  $K_y$  und  $K_{y0}$  parallel. Die Schaltung nach Fig. 3 schließt den Einfluß der Nebenkapazitäten auf die Messung von  $K_x$  durch die Wahl der Brückenerdung aus. Nicht nur  $K_y$  und  $K_{y0}$  sind unschädlich, sondern auch  $K_{x0}$  bleibt ohne Einfluß, wenn nur der Widerstand  $R_4$ , zu dem  $K_{x0}$  parallel liegt, genügend klein gewählt wird, so daß  $K_{x0}$  keine merkliche Phasenverschiebung bewirkt.

Die Wechselspannung wurde einem Klingeltransformator (1:15) entnommen, dessen Unterspannungsseite über einen Summer-Unterbrecher an eine 4 Voltbatterie gelegt war. Ein zur Unterspannungsseite parallel liegender Widerstand gestattete die Spannung zu verändern. Wird die Spannung zu hoch gewählt, so macht sich das an einem knackenden Geräusch bemerkbar; man hört, wie der Film durchschlagen wird. Durchbrüche treten auch auf, wenn Welle und Lager einander zu berühren beginnen. Solange sie aber nicht in zu schneller Folge



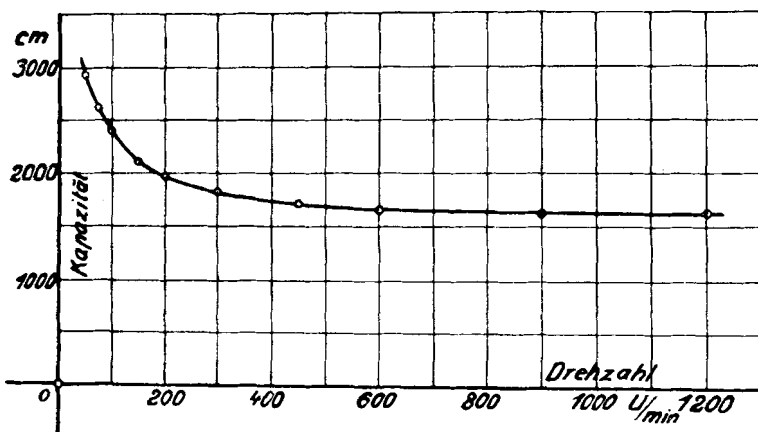
Bestimmung der Lagerkapazität  
bei  $p=0$

Fig. 5.

der Belastung 0 ist freilich nicht herstellbar, aber wir können auf die Kapazität bei  $p=0$  durch Extrapolation schließen.

Fig. 5 zeigt die bei der gleichen hohen Drehzahl und verschiedenen kleinen Belastungen  $p$  ermittelten Kapazitäten. Geradlinige Extrapolation ergibt die Kapazität bei  $p=0$ . Der Versuch wurde unter sonst gleichen Bedingungen für zwei Öle, das bereits gekennzeichnete Öl I und ein dickes Maschinenöl (II) von 400 Centipoisen bei  $20^\circ$  durchgeführt. Als Ordinate ist, um von den Dielektrizitätskonstanten unabhängig vergleichen zu können,  $K/\epsilon$  aufgetragen. Man erkennt die gute Übereinstimmung des extrapolierten Wertes bei beiden Ölen.

Fig. 6 zeigt das Ergebnis einiger Meßreihen an dem Gleitlager mit den beiden erwähnten Ölen. Die Abhängigkeit der Schichtdicken von Drehzahl und Belastung tritt klar in Erscheinung. Steigende Drehzahl zentriert die Welle, steigende Belastung verlagert sie exzentrisch. Nicht minder deutlich ist der Unterschied der Schichtdicken bei den beiden Ölen. Zum Beispiel bildet sich für  $p = 1,1 \text{ kg/qcm}$  mit Öl I erst bei 900 U/min die gleiche Schichtdicke aus wie mit Öl II bei 200 U/min.



Kapazität eines Gleitlagers  
in Abhängigkeit von der Drehzahl

Fig. 4.

vorkommen, läßt sich die Kapazität noch bestimmen. Bei Ringschmierlagern machen die Schmierringe zeitweilig Kurzschluß zwischen Welle und Schale. Art und Gewicht

Es sei hier nochmals hervorgehoben, daß die Möglichkeit der elektrischen Schichtdickenmessung nicht auf Versuchsstände beschränkt ist. Wir konnten z. B. auch an den Lagern mehrerer elektrischer Maschinen die Kapazität ermitteln; allerdings nur die beider Lager zusammen, da deren Isolierung gegeneinander schwierig durchzuführen ist.

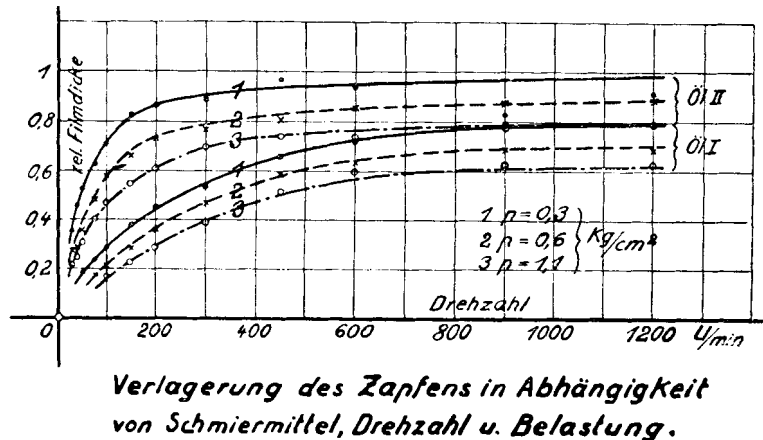
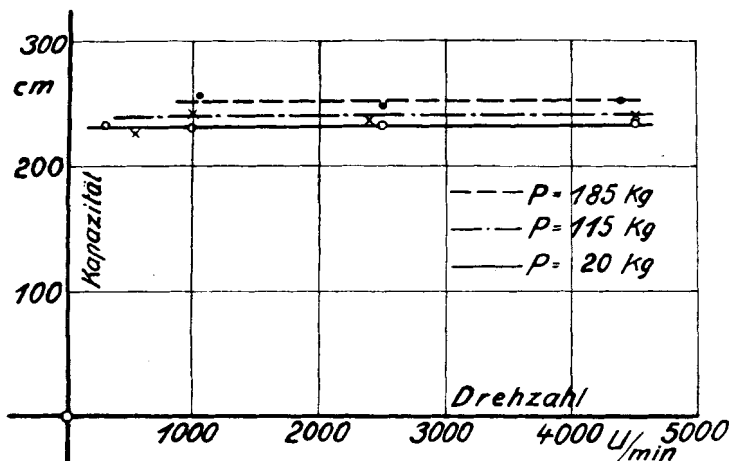


Fig. 6.

Auch bei Kugellagern ist die Kapazität bei genügend hoher Drehzahl meßbar. Man kann also auch hier von Vollschröierung sprechen. Fig. 7 zeigt die an einem zweireihigen Querlager für mittelschwere Belastung (40 mm Bohrung, DIN 623) bei Schmröierung mit Öl II bestimmte Kapazität in Abhängigkeit von Drehzahl und Belastung; ein Einfluß der Drehzahl ist nicht erkennbar. Die Drehzahl, von der an die Kapazität gemessen werden kann, liegt um so höher, je höher die Belastung und je dünnflüssiger das Schmröiermittel ist. Auch bei Füllung des Lagers mit einem handelsüblichen Kugellager fett war die Kapazität meßbar. Die Brückenwiderstände bei den Kugellagerversuchen waren  $R_3 = 500 \text{ Ohm}$ ,  $R_4 = 2000 \text{ Ohm}$ . Der Drehkondensator hatte wie bei den Gleitlagermessungen max. 2000 cm. Meßtechnisch be-



**Kapazität eines Kugellagers  
in Abhängigkeit von Drehzahl u. Belastung**

Fig. 7.

darf bei den angewandten hohen Drehzahlen die Stromzuführung zur Welle besonderer Beachtung. Wir haben je ein kleines Goldbürstchen, wie sie bei Elektrizitätszählern in Gebrauch sind, oberhalb und unterhalb der Welle angeordnet, so daß bei jeder Drehrichtung eine Bürste im Drehsinne auflag.

Bei Kugellagern erhält man merkwürdigerweise auch durch Strommessung mit Gleichspannung ver-

wertbare Ergebnisse. Fig. 8 gibt Gleichstrommessungen an dem Kugellager bei Füllung mit Öl II wieder. Als Ordinate ist in logarithmischem Maßstab der errechnete Widerstand aufgetragen, der aber nicht dem Widerstand der Ölschicht entspricht; denn nach künstlicher Erhöhung der Leitfähigkeit des Öles auf das Tausendfache ergaben sich praktisch die gleichen Kurven. Augen-

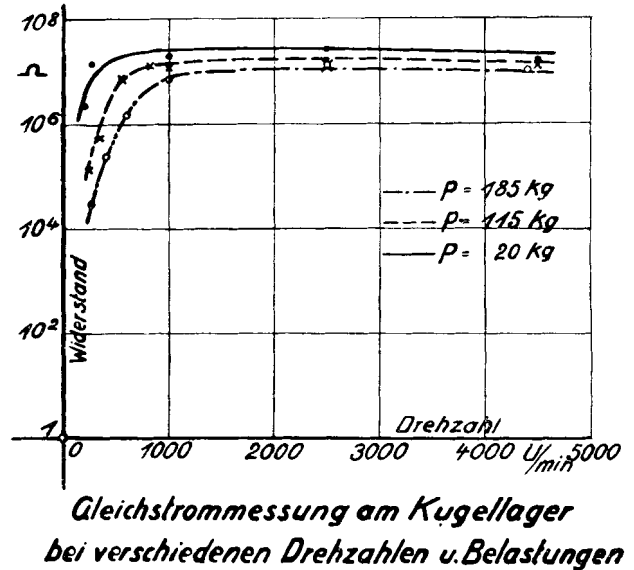


Fig. 8.

scheinlich mißt das Galvanometer den Mittelwert der Stromstöße von Durchbrüchen. Da bei Gleitlagern, wie man bei der Kapazitätsmessung hört, auch bei Vollschröierung einzelne Durchbrüche vorkommen, ist es erklärlich, daß man mit der Gleichstrommessung schwer etwas ausrichten kann. Bei Kugellagern dagegen geben die Durchbrüche infolge der großen Zahl von Kugeln einen ziemlich regelmäßigen Mittelwert der Stromstöße, aus dessen Verlauf in Abhängigkeit von Drehzahl und Belastung auf die Schmröierung des Kugellagers geschlossen werden kann. Der Verlauf der Kurven ähnelt oberhalb des Knies dem der Kapazitätskurven. An der Stelle, wo die Widerstandskurve horizontal abbiegt, wird die Kapazitätsmessung möglich. Die Gleichstrommessung erlaubt jedoch, auch bei noch niedrigeren Drehzahlen Schlüsse auf die mit steigender Umlaufzahl allmählich vollkommener werdende Kugellagerschröierung zu ziehen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß für die Beurteilung der Schmröierung in Kugellagern die Strommessung mit Gleichspannung und die Kapazitätsmessung in Betracht kommen, während für die Untersuchung der Schichtdicke in Gleitlagern als elektrisches Meßverfahren nur die Kapazitätsbestimmung befriedigende Ergebnisse liefert. Auch bei Schmröiermitteln wird also die Dielektrizitätskonstante, die bei diesen bisher kaum Bedeutung besaß, in Zukunft Beachtung verdienen. [A. 138.]

## Zur Frage der Gefährlichkeit des Quecksilberdampfes.

Von Dr.-Ing. KARL HOFER,  
Chemiker u. Vereinsingenieur des Dampfkessel-Überwachungs-  
Vereins der Zechen im Oberbergamtsbezirk Dortmund.

(Eingeg. 6. Aug. 1926.)

Die in Nr. 15 dieser Zeitschrift <sup>1)</sup> von Prof. Stock erschienene Veröffentlichung, in der die schädliche Wirkung des Quecksilberdampfes auf den menschlichen Organismus eingehend geschildert wurde, gab uns eine Erklärungsmöglichkeit für

<sup>1)</sup> Vgl. Z. ang. Ch. 39, 461 [1926].