

de Juhasz und Geiger

Der Indikator

Der Indikator

Seine Theorie und seine mechanischen
optischen und elektrischen Ausführungsarten

Von

Prof. K. J. de Juhasz und **Dr.-Ing. J. Geiger**

Mitglied der Technischen Versuchsanstalt
The Pennsylvania State College, U.S.A.

Oberingenieur, Augsburg

Mit 392 Textabbildungen



Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH 1938

Alle Rechte, insbesondere
das der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten.
Copyright 1938 by Springer-Verlag Berlin Heidelberg
Ursprünglich erschienen bei Julius Springer in Berlin 1938
Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1938

ISBN 978-3-642-51262-9 ISBN 978-3-642-51381-7 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-642-51381-7

Vorwort.

Der Indikator ist ein altes und gebräuchliches Hilfsmittel in der Hand des Ingenieurs. In seinen anfänglichen Bauarten diente er der Vervollkommnung der Dampfmaschine und hat auf diesem Gebiet sehr nützliche Dienste geleistet. Auch auf die Entwicklung der Gas- und Ölmaschinen von den alten langsam laufenden zu den neuzeitlichen schnelllaufenden und wirtschaftlichen Motoren ist er von erheblichem Einfluß gewesen.

Über Indikatoren ist seit langen Jahren kein Sammelwerk erschienen, andererseits hat aber der Indikator gerade in den letzten 20 Jahren eine außerordentliche Entwicklung durchgemacht. Vor dem Weltkriege gab es keine elektrischen Indikatoren, die optischen staken noch ziemlich in den Kinderschuhen, und es war übrigens für beide noch kein besonders vordringliches Bedürfnis vorhanden. Die mechanischen Indikatoren schienen auf einer Höchststufe der Entwicklung angekommen zu sein. Heute hat sich das Bild gründlich geändert. Der mechanische Indikator ist bei weitem nicht mehr der alleinige Herrscher, sondern ist auf wichtigen Gebieten, z. B. bei den Untersuchungen über die Klopfvorgänge bei Motoren, zugunsten der elektrischen Indikatoren in den Hintergrund getreten. Neben einer großen Anzahl optischer Indikatoren ist die Fülle der aufgetauchten elektrischen Indizierverfahren und -geräte fast verwirrend, und der Ingenieur, der mit der Untersuchung rasch wechselnder Druckvorgänge zu tun hat, muß sich unbedingt mit ihnen eingehend beschäftigen, will er dem heutigen Stand der Technik gerecht werden. Die Veröffentlichungen hierüber sind aber in den verschiedensten in- und ausländischen Zeitschriften und Patentblättern zerstreut. Aus diesem Grunde lag ein Bedürfnis nach einem Werk vor, das neben den Vervollkommnungen der mechanischen Indikatoren, die sich besonders auf die punktweise Indizierung und die unmittelbare Anzeige des mittleren Druckes beziehen, auch die zahlreichen optischen und elektrischen Verfahren und Geräte gebührend berücksichtigt. Aus diesem Bedürfnis entstand das vorliegende Werk.

Da es sich heute noch nicht völlig sicher übersehen läßt, welches der zahlreichen elektrischen Verfahren sich am meisten einbürgern wird, so wurden — dem Charakter des Sammelwerkes entsprechend — sämtliche bisher bekanntgewordenen Verfahren geschildert und erläutert. In gleicher Weise wurde auch bei den optischen und mechanischen Indikatoren vorgegangen, so daß der Leser auch hier über jedes beliebige System die entsprechenden Angaben findet.

Auch auf die Theorie des Indikators übte die Entwicklung der beiden letzten Jahrzehnte einen ganz wesentlichen Einfluß aus. Während sich früher die Theorie der Hauptsache nach auf die Kinematik, d. h. auf die verhältnismäÙige geradlinige Wiedergabe des Kolbenweges durch den Schreibstift erstreckte, ist heute an Stelle der Kinematik die Dynamik getreten und man hat erkannt, daÙ man nur dann von einem Indikator — gleichviel ob mechanisch, optisch oder elektrisch — brauchbare Ergebnisse erwarten kann, wenn er den jeweils vorliegenden Betriebsbedingungen, insbesondere hinsichtlich seiner schwingungstechnischen Eigenschaften genügend gewachsen ist. Bei der Schnelläufigkeit unserer heutigen Brennkraftmaschinen ist es für jeden, der mit der Indizierung von Maschinen zu tun hat, notwendig, die schwingungstechnischen Eigenschaften der einzelnen Indikatortypen kennenzulernen. Nur so wird er sich vor Fehlschlägen hüten.

Mit Rücksicht auf die außerordentlich gestiegene Bedeutung der elektrischen Indikatoren erschien schließlich noch ein allgemeiner theoretischer Vergleich der mechanischen und der elektrischen Indizierverfahren am Platze, um eine klare Antwort auf die Frage zu geben, bis wie weit die mechanische Indizierung brauchbar ist bzw. von wo ab dem elektrischen Verfahren der Vorzug zu geben ist.

Das Zustandekommen dieses Werkes war nur durch die Bereitwilligkeit möglich, mit welcher industrielle und akademische Forscher und Forschungsanstalten, Firmen und Zeitschriften, Angaben und Abbildungen über ausgeführte Indikatoren den Verfassern zur Verfügung stellten. Die betreffenden Namen der Forscher und Anstalten sind im Text erwähnt und die Verfasser hoffen, daÙ in dieser Beziehung kein Übersehen vorgekommen ist. Für die Hilfsbereitschaft soll auch an dieser Stelle aufrichtig gedankt werden.

Besonderer Dank gebührt Herrn Dr.-Ing. C. W. Fieber für die kritische Durchlesung des Abschnittes über elektrische Indikatoren. Herr Ing. H. Havemann hat die Korrektur mit großer Sorgfalt durchgelesen.

Die Verfasser sind der Verlagsbuchhandlung Julius Springer für die ausgezeichnete Ausstattung des Buches und für das während der Verfassung des Buches immer erwiesene verständnisvolle Entgegenkommen zu großer Anerkennung verpflichtet.

Im Mai 1938.

Prof. Kalman J. de Juhasz,
Engineering Experiment Station,
State College, Pennsylvania, USA.

Dr. Jos. Geiger,
Oberingenieur, Augsburg.

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
I. Die Entstehungsgeschichte des Indikators	1
J. Watt erfindet, J. Southern verbessert den Indikator. — Weitere Verbesserungen u. a. durch McNaught, Richards, Thompson, Crosby u. a. — Stand um die Jahrhundertwende	8
II. Mechanisch aufzeichnende Indikatoren	10
Crosby; Trill, Dobbie-McInnes; Dreyer, Rosenkranz und Droop;	14
Lehmann & Michels; Geiger; Maihak; de Juhasz	17
Stabfederind. von Maihak; Gümbel; Innen- und Außenfeder	21
Bestandteile und Hilfseinrichtungen der mechanisch auf- zeichnenden Indikatoren	22
Rahmen, Indikatorhahn, Indizierventil	24
Zylindereinsatz, Kolben, Kolbenstange	27
Meßfedersysteme (Stangenfeder, Stabbiegungsfeder, Schrauben- feder, Plattenfeder, Rohrfeder), Federmaßstab, Vergleich der verschiedenen Federsysteme, Schreibgestänge (Lemniskaten- lenker, Ellipsenlenker, Storchschnabelgetriebe, Crosbygetriebe und deren kinematische Untersuchung)	31
Schreibstift	36
Papiertrommel für hin- und hergehende Bewegung, für fort- laufende Diagramme, für Uhrwerkantrieb	36
Schnurführungsrollen	39
Trommelantrieb; Hubverminderer mit Hebel, Rolle oder Kurbel; Indiziergestänge	42
Fehlergröße der Trommelbewegung bei unrichtigem Schub- stangenverhältnis	50
III. Optische Indikatoren	50
A. Mikroindikatoren von Mader, Collins, Schmitz und Pabst (DVL)	53
B. Spiegelindikatoren	57
a) Optische Indikatoren mit einem Spiegel von einem Freiheitsgrad:	57
Lewis, v. Elbe, von der Nahmer, Kallhardt	59
Nakanishi (schaltet Erschütterungsfehler aus), Berg, Thring und Rumpf (für Gewehre)	60
Balfour (für Geschütze), Kirner (Linsenindikator mit Inter- ferenzringen)	67
Geiger (für Untersuchung von Luftwirbelungen und Stoß- drücken von Brennstoffstrahlen im Brennraum von Motoren)	71
Gibson, Thoma, Förderreuther, Volckhardt und Deckel (für Wassermessungen und besonders hohe Genauigkeit)	76
b) Optische Indikatoren mit zwei Spiegeln von je einem Freiheitsgrad	80
Burstall, Midgley, Huguenard, Magnan und Planiol, Burman, van Dyck und Broeze, Proefstation Delft	85
c) Optische Indikatoren mit einem Spiegel mit zwei Freiheitsgraden	90
Hopkinson, Hospitalier und Carpentier, Société Genevoise.	90

	Seite
Schulze, Osa-Apparate, Thring	93
de Juhasz mit verbessertem Strahlengang	94
IV. Elektrische Indikatoren	97
Anzeigegerät, Druckgeber und Abszissengeber, Vorteil der räumlichen Getrenntheit der Druckmeß- und Anzeige- elemente	97
A. Oszillographen	100
Schleifenszillograph von Blondel	100
Saitengalvanometer nach Edelmann	102
Glimmlampenszillograph	102
Kathodenstrahloszillograph	103
Wehnelt-Zylinder hierzu	104
B. Indizierverfahren mittels druckveränderlichen Wider- standes	107
Heimann, Leistungsmesser von Frisch, Indikator von Brown- Boveri mit Bourdon-Röhre, Nernst (auf Zug beanspruchter Widerstandsdraht)	108
Druckmesser von Schmaltz, Wallichs und Opitz mit Elektrolyt, dessen Widerstand vom Druck abhängt	109
Druckindikator von Eichelberg	110
Kohlesäulenverfahren von Bernhard, Glamann, Triebnigg und Rumpf	110
Fehlerquellen desselben	111
Telemeter von Peters, McCollum und Johnston	111
Telemeter von Martin und Caris	112
Indikator von Glamann und Triebnigg	113
Weiterentwicklung desselben von Rumpf, Eichmethode hierzu Indikatoren von Dodds, Sprake und Garner	114 115
C. Indizierverfahren mittels druckveränderlichem Potential	118
Piezoelektrische Eigenschaft einiger Kristalle	118
Piezo-Indikator nach Ervin	119
Piezo-Indikatoren nach Hull, Wood, Karcher, Kent, Joachim, Illgen, Kluge, Linckh, Kallhardt, Karde, Marti, Blaum, Kamm, Rieckert, v. Kienlin und Meurer	120
Einspannung der Quarzsäule nach Broeze bzw. Meurer	123
Druckmeßkammern nach Amelkin, Watson und Keys	124
Quarzkammer nach Paul und Eldredge	125
Quarzkammer der Proefstation Delft	126
Schaltung der Meßanordnung nach Kluge und Linckh	127
Quarzkammer zur Druckmessung in der Brennstoffleitung (Blaum)	128
Zeiß-Ikon-Indikator	130
Kolbenwegübertragung nach Watzinger und Schnell-Larsen	131
D. Indizierverfahren mittels der lichtelektrischen Wirkung	132
Verfahren von Labarthe und Demontvignier	133
Verfahren von Döring, Rose, Wilson und Benedict	135
Photoelektrisches Verfahren von Marboux	136

	Seite
E. Indizierverfahren mittels druckveränderlicher Kapazität	137
Geberkondensator nach Obata, Joshida und Munetomo,	
Kondensatormeßelement von Kiyoshi Tomizuka	138
Meßkondensator von Schnauffer	139
Indikator von Fieber	140
Stroboskopisches Indizierverfahren von Wilberg	142
F. Indizierverfahren mittels druckveränderlicher Induktivität.	144
Schaltungen nach Keinath, Fiene und Sawyer	145
Der Standard-Sunbury-Indikator	147
Verfahren von Hetzel für Klopfuntersuchungen	150
Indikator von Taylor, Draper und Williams mit beweglicher	
Spule	152
Allgemeines über Indikatoren mit druckveränderlicher In-	
duktivität	152
G. Magneto-elektrisches Indizierverfahren	152
Kobayashi-Indikator	153
V. Punktweise anzeigende Indikatoren	154
Einteilung in zwei Gruppen	154
Standards-Indikator	156
Farnborough-Indikator	157
Untersuchungen von Serruys und Meurer	163
Verfahren von Taylor und Draper	164
Glimmlampenindikator der DVL.	165
Indikator nach Schweitzer	169
Geräte von de Courcy und Spohrleder	171
Indikator von de Dion Bouton.	172
Indikator von de Juhasz	173
Phasenwählerschalter von Jan Szal	178
Indiziereinrichtungen von Gale und Geissler	178
Gasprobenentnahmevorrichtung nach Klüsener	180
Anordnungen von Mehlig, de Dion-Bouton, Withrow, Lovell	
und Boyd und Young	181
Gasentnahmeventil der Langley-Field-Luftfahrt-Versuchsanstalt	
Indiziereinrichtung für Brennstoff-Einspritzleitungen nach	
Heinrich	183
VI. Indikatoren für Sonderzwecke	185
A. Indikatoren für fortlaufende Diagramme	185
B. Arbeitszähler (Ashton, Storey, Little, Hamann, Gümbel, Bött-	
cher und Lehmann)	187
Kraft \times Weg-Produktbildung durch Beeinflussung einer Stoff-	
menge oder einer Lichtquelle (Arndt, Döring)	194
C. Leistungsmesser (Picht, Roucka, Krupp, Frisch)	195
D. Mitteldruckindikatoren.	198
a) Mitteldruckindikatoren für den indizierten und tangentialen	
mittleren Druck (Wimperis, Schimanek, Kutzbach, Fisch-	
mann)	199
b) Mitteldruckindikator von Geiger. Abhängigkeit des auf die	
Zeit bezogenen mittleren Druckes von dem auf den Hub	
bezogenen	205

	Seite
E. Höchstdruckindikatoren (Okill, R. Bosch, Langer, Thomé und Marquardt, Lehmann, Bothur und Beil, Mazellier und Carpentier, Lorenz, N.A.C.A.; DVL.)	209
F. Indikatoren für Druckunterschiede (Schäffer und Budenberg, Sackheim, Lehmann & Michels)	216
G. Indikatoren für Bewegungen (Maihak, Stewart, Blohm)	218
H. Indikatoren für Klopfuntersuchungen. Sprungstabindikator von Midgley.	220
VII. Prüfung und Eichung des Indikators	222
Prüfung der Proportionalität, Meßtisch von Stauß, Meßmikroskop von Maihak, Kolbenmanometer (Dreyer, de Juhasz); Metallbalgmanometer (Pigott); Eichung im betriebswarmen Zustand	228
VIII. Fehlerhafte Diagramme	229
Indizierkanal, Antriebsgestänge	229
Einfluß der unrichtigen Einstellung des Trommelantriebs	230
Treppenförmige Linien	232
Massenwirkungen der Indikatortrommel, Indikatorfeder, Ungenauigkeiten im Vergrößerungsgestänge	233
IX. Dynamik des Indikators	234
A. Allgemeine Dynamik	234
Mathematische Untersuchung im Beharrungszustand	234
Harmonische Analyse	235
Einfluß der Lage der Eigenfrequenz. Größe der Dämpfung, mechanische Reibung und von der Geschwindigkeit abhängige Dämpfung	236
Mathematische Untersuchung bei nicht periodischer Gasdruckschwankung.	239
Gasdruck nimmt linear mit der Zeit zu. Zahlenbeispiele und deren Diskussion	240
Gasdruck nimmt quadratisch mit der Zeit zu. Zahlenbeispiel	242
Gasdruck nimmt sinusförmig mit der Zeit zu. Mehrere Zahlenbeispiele	243
Gasdruck setzt plötzlich in voller Größe ein und verläuft dann cosinusförmig	247
Allgemeine Schlußfolgerungen hinsichtlich der notwendigen Höhe der Eigenfrequenz	248
Zeichnerisches Verfahren von Borth zur Entzerrung eines Diagrammes	249
Theorie der Höchstdruckindikatoren	251
B. Bestimmung der dynamisch gleichwertigen Masse	252
C. Wiedergabe der Maschinenkolbenbewegung	254
Massenwirkungen, Reibung, Formel von Wilke, Eigenfrequenz des Trommelantriebs	256
Verdrehung der Kurbelwelle, Dehnung des Maschinengestells	258
Einfluß der Länge des Indizierkanals	259

	Seite
X. Mechanische oder elektrische Indikatoren?	261
Zahlenmäßige Untersuchung der Fehler bei gegebener Eigenfrequenz bei einem bei $n = 1500$ min abgenommenem Diagramm mit hoher Drucksteigerungsgeschwindigkeit. Für Klopfuntersuchungen scheiden mechanische Indikatoren aus, für eine Reihe anderer Zwecke ist ihre Verwendung bei genügend hoher Eigenfrequenz wegen ihrer Einfachheit unter Umständen angebracht	262
XI. Das Indizieren von Kolbenmaschinen	265
A. Diagramme an Dampfmaschinen	266
B. Diagramme an Verdichtern	266
C. Diagramme an Kraftmaschinen mit innerer Verbrennung, insbesondere Gasmaschinen und Dieselmotoren .	268
Einfluß der Drehzahl auf den Zünddruckanstieg	273
Einfluß des Einspritzbeginns	273
Einfluß der Kühlwassertemperatur bzw. eines Zündbeschleunigers	274
Diagramm der Brennstoffleitung eines Dieselmotors mit direkter Einspritzung	275
Schrifttumsverzeichnis	276
Namenverzeichnis	291

I. Die Entstehungsgeschichte des Indikators.

Die Erfindung des Indikators fällt auf das Ende des 18. Jahrhunderts. Ihre Ehre gebührt James Watt (1736—1819) und John Southern (1758—1815) gemeinsam.

In der Geschichte der wissenschaftlichen Technik stellt die Erfindung des Indikators einen wichtigen Meilenstein dar. Um deren Bedeutung in ihrer wahren Größe würdigen zu können, ist es zweckmäßig, auf den damaligen Stand der Technik einen kurzen Rückblick zu werfen. Die Dampfmaschine war schon vor Watts Zeit erfunden (Savery, Newcomen) und soweit entwickelt, daß sie für das Auspumpen von Wasser aus Bergwerken angewendet werden konnte. Es handelte sich hierbei um die sogenannten atmosphärischen Maschinen, in welchen der Dampf unter den Kolben eingeführt wurde und denselben während des Leerlaufhubes anhub; danach wurde der Dampf durch Wassereinspritzung niedergeschlagen, wodurch im Zylinder ein Unterdruck entstand. Der Kolben wurde durch den Atmosphärendruck niedergedrückt und dabei wurde Arbeit geleistet. Der Wirkungsgrad war natürlich äußerst gering, etwa 1—2%; die Hubzahl sehr niedrig, etwa 8—12 pro Minute. Die Werkstattstechnik war zur damaligen Zeit in einem äußerst primitiven Zustand. Der Zylinder wurde aus Blech durch Handarbeit hergestellt, wobei die Abweichung von der wahren Zylinderform etwa 10 mm und mehr ausmachte. Der Kolben wurde aus Holz angefertigt und mit Filz oder Tau, in Öl getränktem Papier oder Tuch und mit Talg, so gut es ging, abgedichtet. Um das Eindringen der atmosphärischen Luft in den Zylinder zu verhindern, wurde die obere Kolbenseite mit einer Schicht Wasser bedeckt und dazu noch mit Pferde- oder Kuhdünger ausgestopft. Gußeiserne Zylinder wurden aber schon zu Watts Zeiten eingeführt, und es war als ein großer Fortschritt zu bezeichnen, als 1775 Boulton (Watts Gesellschafter) schreiben konnte: „... Mr. Wilkinson hat mehrere Zylinder beinahe fehlerfrei ausgebohrt... ein Zylinder von 57 Zoll Durchmesser ist bis auf die Dicke eines abgenutzten Schillings genau.“

Aus solchen bescheidenen, ja heute sogar lächerlich erscheinenden Anfängen sind unsere heutigen Kolbenmaschinen entwickelt worden. Von Watts Zeit bis heute ist der angewendete Dampfdruck von einigen Zehntel Atmosphären bis 35—40 und sogar 100 at gestiegen. Der Wirkungsgrad ist von 1 oder 2% vor Watts Zeiten in unseren heutigen Dieselmotoren bis zu 35 und mehr Prozent gestiegen. Watt erreichte in seinen späteren, umlaufenden Maschinen etwa 30 U/min, während

heute in Automobilrennmotoren 7000 und mehr U/min angewendet werden. Und doch ist dieser Fortschritt das Ergebnis keiner sprunghaften, sondern einer stetigen Entwicklung, welche sich aus den oben geschilderten primitiven Anfängen von Schritt zu Schritt verfolgen läßt. Die Keime unserer heutigen Kolbenmaschinen sind schon in den früheren Maschinen erkennbar.

In dieser Entwicklung spielte der Indikator eine beachtliche Rolle.

Watts Verdienste in der Entwicklung der Dampfmaschine sind wohlbekannt und wurden von berufenen Federn gebührend gewürdigt. Durch seine Erfindungen und Verbesserungen, wie den getrennten Kondensator, die Anwendung des Überdruckes, die Benutzung der Ausdehnungsarbeit des Dampfes, die Einführung der Doppelwirkung wurden die Wirtschaftlichkeit der Maschine erhöht und ihre Anwendungsmöglichkeiten erweitert, so daß sie nicht nur für Wasserausschöpfen, sondern auch für andere industrielle Zwecke, Textilbetriebe, Beförderungszwecke usw. verwendbar wurde. Watt hat auf die Entwicklung der Technik einen wertvollen Einfluß ausgeübt durch seine wissenschaftliche Einstellung, die er technischen Problemen entgegenbrachte. Seine Vorgänger waren Mechaniker, die sich mit qualitativen Ergebnissen begnügten und Verbesserungen gefühlsmäßig ausführten. Watt war aber ein geborener Forscher mit einer Leidenschaft für quantitative Messung, der seine Erfindungen systematisch auf Erkenntnissen aufbaute, die er aus Messungen gewonnen hatte. Er maß Dampfverbrauch, Kohlenverbrauch, Temperatur des Kondenswassers und Arbeitsleistung. Der von ihm stammende Begriff Pferdekraft als Leistungseinheit ist ein bleibendes Denkmal seiner Forschertätigkeit.

Auch der Indikator ist die Frucht seines Strebens nach genauer Messung. Den Dampfdruck im Kondensator hat er schon früher mit einem Quecksilbermanometer gemessen; für die Messung der schwankenden Zylinderdrücke war aber dieses Gerät infolge seiner Trägheit nicht gut geeignet. Watt suchte nach einem Gerät mit geringerer Trägheit, das den Druckschwankungen in jeder Kolbenstellung genau folgen sollte. Sein erstes Gerät wurde etwa 1790 erbaut und bestand aus einem Zylinder mit einem genau eingeschliffenen federbelasteten Kolben. An der Kolbenstange wurde ein Zeiger befestigt, welcher an einem feststehenden Maßstab den Dampfdruck anzeigte. Es war also kein aufzeichnendes, sondern nur ein anzeigendes Gerät. Wenn der Zylinderraum dieses Gerätes mit dem Maschinenzylinder verbunden wurde, konnte die Druckänderung im letzteren beobachtet werden, und durch gleichzeitige Beobachtung eines sich bewegenden Maschinenteiles (z. B. der Kolbenstange oder des Schwingbalkens) konnten auch die zugehörigen Hubwerte ermittelt werden. Infolge des langsamen Ganges der damaligen Maschinen (12—14 Hübe per Minute) war eine solche Beobachtung durch zwei Personen ohne Schwierigkeit möglich. Ein solches Gerät ist uns nicht

erhalten geblieben, aber Abb. 1 zeigt eine spätere (im Science Museum in London) aufbewahrte Abänderung, welche ähnlich wie die damaligen Schwingbalkenmaschinen mit einem Übertragungshebel zwischen Indikatorkolben und Feder ausgerüstet ist.

Etwa 1796 hat John Southern, ein Angestellter von Boulton und Watt, die bedeutende Verbesserung gemacht, daß er den Zeiger durch einen Schreibstift und den stillstehenden Maßstab durch eine Tafel ersetzte, woran ein Papierblatt befestigt werden konnte (Abb. 2). Die Tafel konnte in einer Schlittenführung mit Hilfe einer Schnur und eines Rückholgewichtes senkrecht zur Schreibstiftbewegung verschoben werden. Dadurch ist der Indikator ein aufzeichnendes Gerät geworden. In seinen ersten Messungen bewegte Southern die Tafel in nur einer Richtung, und erhielt dabei ein offenes Diagramm. Bald darauf ist er aber auf die Idee gekommen, die Tafel durch einen schwingenden Maschinenteil bewegen zu lassen, wobei die Schnur mit einem Punkt des Schwingbalkens (Balancier) verbunden war. Dadurch entstand ein geschlossenes Diagramm, woraus die Arbeitsleistung der Maschine bestimmt werden konnte. Das älteste, bis heute aufbewahrte Diagramm von 12×6 Zoll Größe (in der Sammlung von Boulton und Watt) stammt vom Jahre 1803. Bei dieser

Anwendungsweise vollführte dieses Gerät die Funktion des heutigen Indikators und enthielt auch seine beiden wesentlichen Elemente, d. h. das Druck- und das Wegmeßelement, dessen Urheberschaft mit Recht Watt und Southern zuzuerkennen ist.

Die manchmal vertretene Ansicht, daß der Indikator von Watt und Southern überhaupt das erste aufzeichnende Gerät sei, ist aber irrig. Ein Gerät für die fortlaufende Aufzeichnung der Windrichtung auf einem langen Papierstreifen wurde schon etwa 1726 von dem Leipziger Mechaniker Jakob Leupold (geb. in Planitz 1674, gest. 1727) erfunden

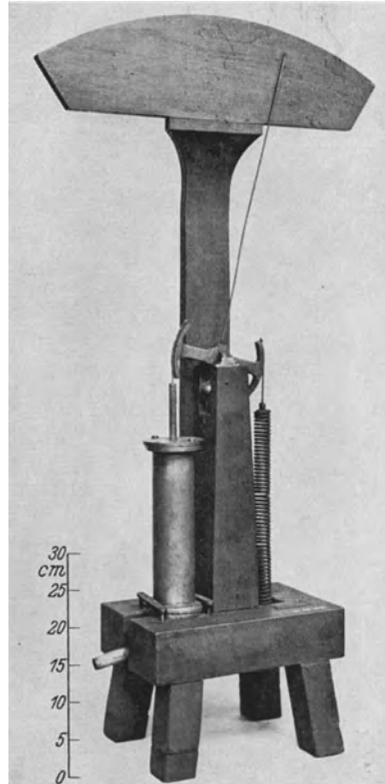


Abb. 1. Anzeigender Indikator von Watt für die Messung von Unterdrücken, etwa 1793 (aufbewahrt im Science Museum, London). Höhe etwa 75 cm, Kolbendurchmesser 1,96 Zoll (3 Quadratzoll Fläche).

und in seinem umfassenden Werke „Theatrum Machinarum Generale“ vollständig beschrieben und abgebildet.

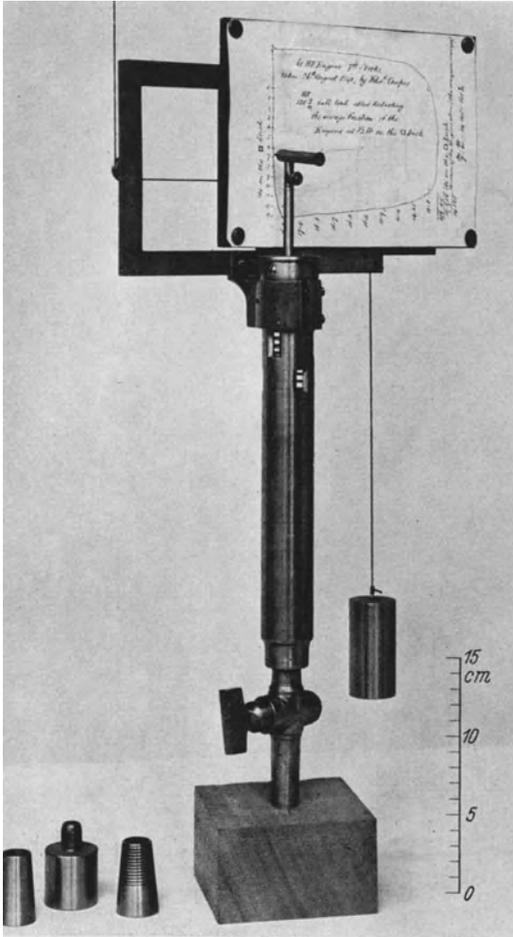


Abb. 2. Aufzeichnender Indikator nach Watt und Southern, etwa 1796 (aufbewahrt im Science Museum, London). Besteht aus Hahn, Druckfeder, Schreibstift, Tafel in Schlittenführung, Rückholgewicht. Höhe etwa 50 cm, Kolben 1,13 engl. Zoll \varnothing , 1 Quadratzoll Fläche.

Watt hat den Indikator für die richtige Einstellung seiner neu aufgestellten Maschinen sehr nützlich gefunden und versuchte dessen Bauweise geheim zu halten. Jedoch wurde er allmählich bekannt und seine Nützlichkeit anerkannt. Der Schotte Farey hat schon Indikatoren im ersten Viertel des 19. Jahrhunderts handwerksmäßig hergestellt, und etwa 1830 hat sein Angestellter McNaught die drehbare und durch eine Rückholfeder betätigte Trommel erfunden

(Abb. 3). Auch die von Maudslay und Field, einer früheren Indikatorfirma, etwa in der Mitte des 19. Jahrhunderts gebauten Indikatoren wurden mit einer Trommel versehen. (Angaben über mehrere ältere Indikatoren sind im Buch: Main and Brown: The Indicator and Dynamometer. London 1847 enthalten.) Die britischen Patente: Cowper 12889 von 1849 und McNaught 12988 von 1850 sind etwa die frühesten diesbezüglichen Patente. Dadurch wurde das Gerät handlicher und für höhere Drehzahlen besser geeignet.

1862 hat C. B. Richards, in Boston, USA. einen weiteren Schritt in dieser Richtung durch Verminderung des Kolbenhubes des Indikators und durch Verwendung eines Vergrößerungsgetriebes (USA. Pat. 37980

1862 hat C. B. Richards, in Boston, USA. einen weiteren Schritt in dieser Richtung durch Verminderung des Kolbenhubes des Indikators und durch Verwendung eines Vergrößerungsgetriebes (USA. Pat. 37980

von 1863) getan, wie es aus Abb. 4 ersichtlich ist. Dadurch wurden die Trägheitsfehler vermindert. Jedoch war der angewendete Lemniskatenlenker mit dem Nachteil behaftet, daß er den ziemlich massigen Mittelnenker enthielt.

Diesem Fingerzeig folgend haben andere Erfinder, insbesondere J. W. Thompson (USA. Pat. 167364 von 1875) und G. H. Crosby

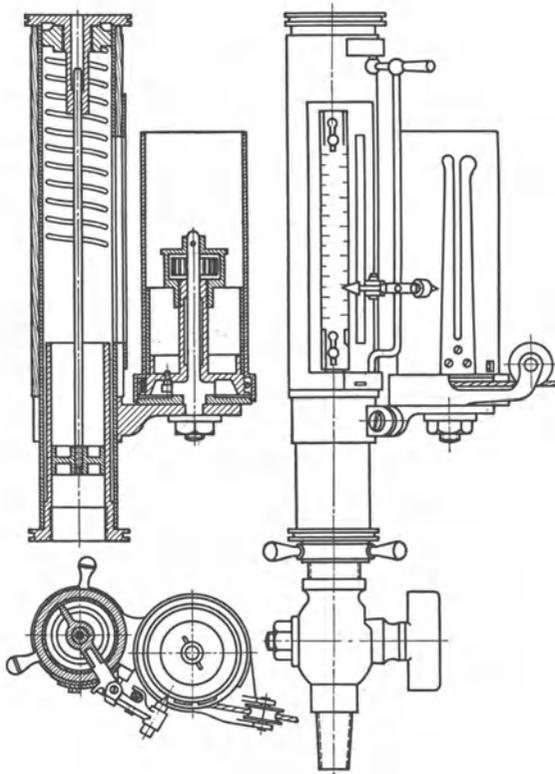


Abb. 3. Indikator von McNaught, etwa 1840. Besitzt eine Papiertrommel mit Spiralfeder für Rückdrehung, eine auf Druck beanspruchte Meßfeder, einen abhebbaren Schreibstift und einen Zeiger, der sich vor einem verstellbaren Maßstab bewegt.

(USA. Pat. 219149 von 1879) die bewegten Massen durch die Einführung der vorteilhafteren Ellipsenlenkeranordnung weiter vermindert. Sie haben außerdem auch andere Verbesserungen ausgeführt, wie die Anordnung einer Luft- oder Dampfschicht zwischen Indikatorzylinder und Gehäuse und einer Schraubenfeder für die Trommel (Abb. 5). Weitere Verbesserungen folgten, um mit der Entwicklung des Maschinenbaues Schritt zu halten, die sich durch immer wachsende Zylinderdrücke, Temperaturen und Drehzahlen kennzeichnete. Die außenliegende Feder

wurde eingeführt, zuerst als Druckfeder (Rosenkranz, 1902) (Abb. 6), dann als Zugfeder (Maihak 1902), als Doppelfeder (Abb. 7), Stauss 1903 als Einzelfeder (Abb. 8). Als weitere verdienstvolle Erfinder in dieser Weiterentwicklung sind zu nennen; Willner, Lehmann, Robertson, Dobbie, Clyde, Trill, Webster u. a. m. Nicht geringere Verdienste müssen den Forschern zuerkannt werden, die durch Auf-

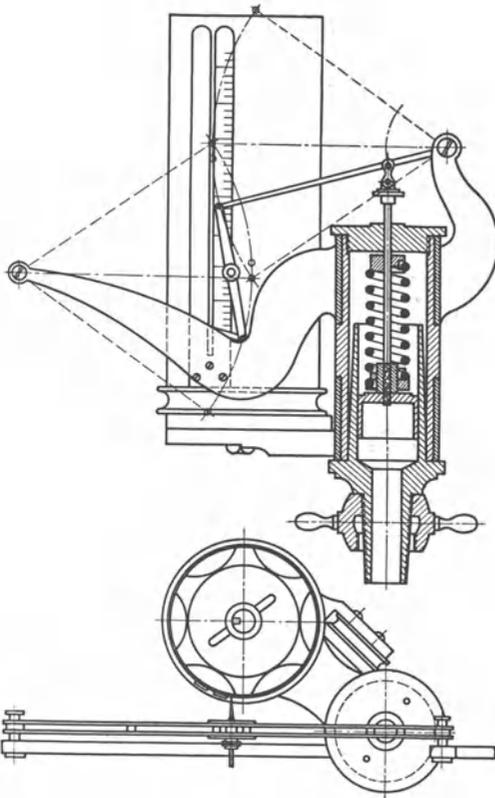


Abb. 4. Indikator nach Richards, etwa 1870, mit Vergrößerungsgetriebe mit Lemniskatenlenker.

klärung der wissenschaftlichen Grundlagen und Fehlerquellen den Weg zu weiteren Verbesserungen gezeigt haben. Bezüglich des Einflusses der Trägheit sind die Arbeiten von Osborne Reynolds und Brightmore (1885) ausschlaggebend; später hat Wilke den Einfluß der im Indikator enthaltenen elastischen Medien und das Schleudern der Papiertrommel eingehend behandelt; Krylow und neulich Holm haben den Einfluß der Federmassen gründlich untersucht.

In der Theorie des Vergrößerungsgetriebes, deren Kinematik und Proportionalität haben Prof. Slaby, Graßmann, Burmester, Hartmann und Rosenkranz wertvolle Untersuchungen ausgeführt.

Der Einfluß der Temperatur auf den Federmaßstab wurde insbesondere von

Strupler, Bollinck, Wiebe und Schwirkus einer eingehenden Untersuchung unterzogen.

Durch diese lange Erfinder- und Forscherarbeit wurde die heutige normale Ausführungsform des Indikators entwickelt, welche die Probe der Zeit bestanden hat und als zufriedenstellend angesehen werden kann. Er ist bequem zu handhaben und den normalen Beanspruchungen und sogar ziemlich robuster Behandlung gewachsen. Außer Verfeinerungen in der Ausführung der Werkstattarbeit sind Änderungen der grundsätzlichen Bauweise kaum zu erwarten.

Es sind mehrere von der normalen abweichende Ausführungsformen vorgeschlagen worden, welche zwar eine weitgehende praktische

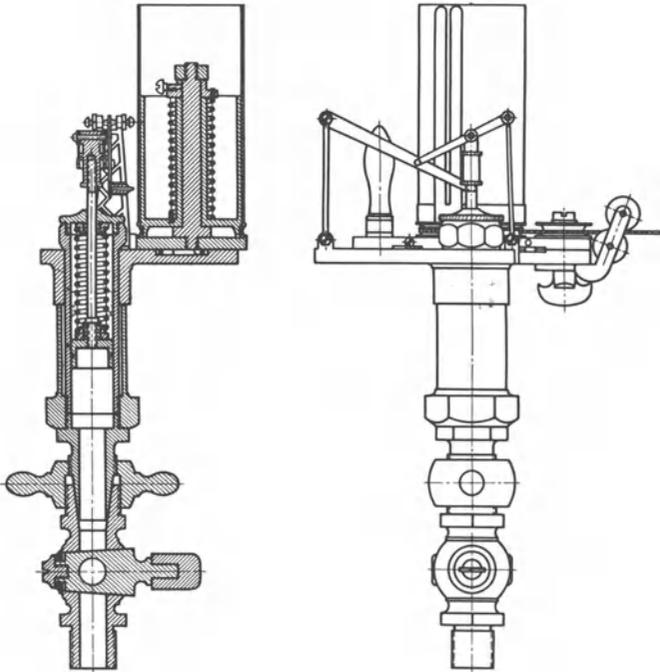


Abb. 5. Indikator nach Crosby, etwa 1879 (aufbewahrt in Smithsonian Institution, Washington), mit Vergrößerungsgetriebe, mit Ellipsenlenker und Schraubenfeder in der Trommel, welche letztere seitlich verschoben werden kann, um dieselbe mit dem Schreibstift in Berührung zu bringen oder sie von demselben zu entfernen.

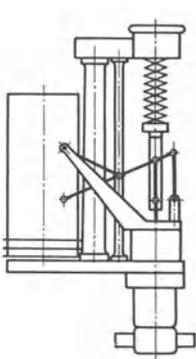


Abb. 6. Schema des Indikators nach Rosenkranz, etwa 1902, mit außenliegender Druckfeder.

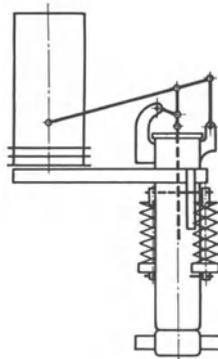


Abb. 7. Schema des Indikators nach Maihak, etwa 1902, mit zwei außenliegenden Zugfedern.

Anwendung nicht gefunden haben, jedoch sinnreiche Gedanken verkörpern. Einige von diesen sind in den Abb. 9—14 wiedergegeben.

Um die Wende des 20. Jahrhunderts entstand die hochtourige Verbrennungskraftmaschine, die in vielen Zweigen der Technik, insbesondere im Verkehrswesen eine Umwälzung bewirkte und eine ungeahnte Wichtigkeit erreicht hat. Für die indikatorische Untersuchung dieser Maschinengattung reichte der gewöhnliche Schreibindikator nicht mehr aus. Neue Wege mußten eröffnet werden, um die Arbeitsverfahren dieser Motoren oder Maschinen untersuchen zu können. Aus diesen Bestrebungen sind die optischen, elektrischen und punktweise aufzeichnenden Indikatoren entstanden. Auch der Zweck der Indizierung hat eine große Änderung erfahren. Bei der Untersuchung der großen, langsamlaufenden Maschinen ist die Bestimmung der indizierten Arbeit der Hauptzweck, da die Arbeitsleistung durch Abbremsen nicht oder schwierig feststellbar ist. Die Bestimmung der Arbeitsleistung der kleinen, schnellaufenden Maschinen ist

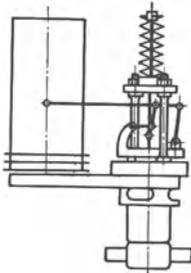


Abb. 8. Schema des Indikators nach Stauß, etwa 1903, mit einer außenliegenden Zugfeder.

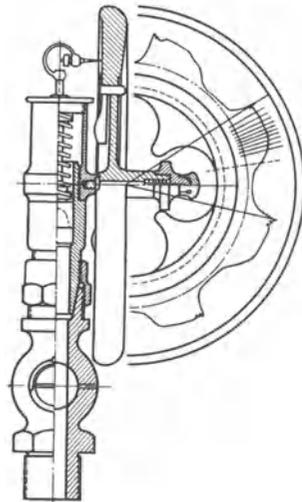


Abb. 9. Indikator nach Cody für die Aufnahme von Radial-Diagrammen; für hohe Drehzahlen bestimmt.

durch Abbremsen ohne Schwierigkeit ausführbar; für die Vervollkommnung und Weiterentwicklung dieser Maschinen spielt aber die Kenntnis des Verbrennungsvorganges und der Druckentwicklung eine wichtige Rolle. Deshalb wurde in den Sonderbauarten des Indikators für schnellaufende Motoren das Schwergewicht auf die Erreichung eines genauen Druckdiagrammes als Funktion des Kurbelwinkels gelegt, welches Diagramm die Beurteilung der zeitlichen Druckentwicklung während der Verbrennung ermöglicht. Dadurch wurde der Indikator auch ein Hilfswerkzeug in den Händen des Brennstoffchemikers bei seiner Suche nach Sonderbrennstoffen, welche für die Speisung der hochgezüchteten Motore für Renn- und Luftfahrtzwecke notwendig sind.

Der lange Weg, den die Entwicklung des Indikators durchgemacht hat, kommt am besten in den erreichten Eigenfrequenzen zum Ausdruck, die die Anwendbarkeit des Indikators für hohe Druckänderungsgeschwindigkeiten bestimmen. Der Indikator von Watt-Southern (mit einer

Kolbenfläche von 1 Quadratzoll, einem bewegten Gewicht von 122 g und einem Federmaßstab 1 Zoll = 1 Pfund/Quadratzoll) hatte eine Eigenfrequenz von etwa 6 Hz. Heutige Normalindikatoren kommen mit Starkfeder auf etwa 150 Hz.

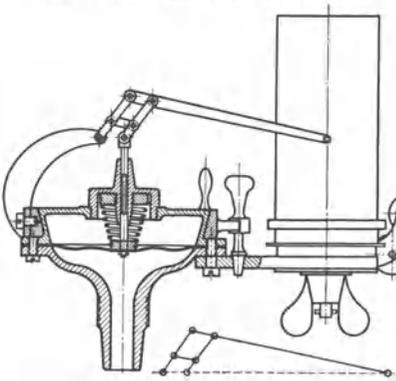


Abb. 10.

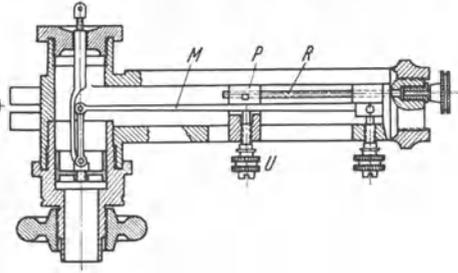


Abb. 11.

Abb. 10. Indikator nach Haedike, mit Membranabschluß, Meßfeder und Storchschnabelvergrößerung.
Abb. 11. Indikator nach Bachelder (U.S. Pat. 360,644 von 1887), mit Stabfeder, deren wirksame Länge und Federmaßstab geändert werden können. *M* Meßfeder; *R* mikrometrische Einstellschraube; *P* Klemmblock; *U* Klemmschraube.

Sonderbauarten für schnellaufende Motoren kommen bis etwa 400 Hz. Optische Indikatoren liegen im Bereich von etwa 1500 bis 5000 Hz und darüber. Die Aufzeichngeräte von elektrischen Indikatoren, die Oszillographen, haben noch höhere Eigenschwingungs-

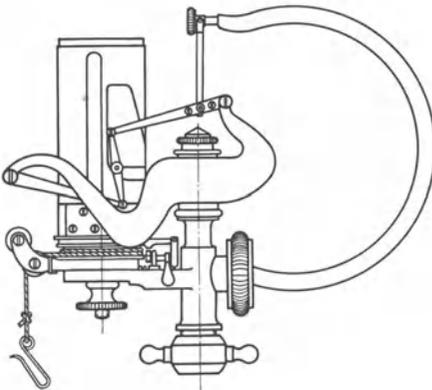


Abb. 12.

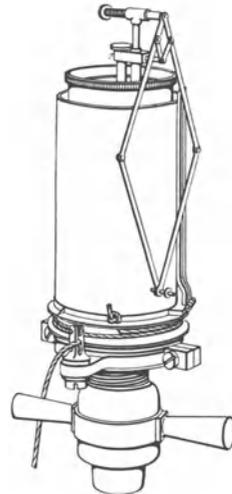


Abb. 13.

Abb. 12. Indikator nach Keynion, mit Bourdonrohr und Lemmiskatenlenker.
Abb. 13. Indikator nach Borns. Die Papiertrommel ist mit dem Indikatorzylinder gleichachsig ausgeführt, wodurch eine gedrängte Bauart und vorteilhafte Herstellung erreicht werden. Die Erhitzung der Papiertrommel erschwert die Bedienung; die einseitige Belastung der Kolbenstange durch die schweren Storchschnabelgetriebe ist nachteilig.

zahlen, nämlich die Schleifenoszillographen etwa bis 12000 Hz und die Kathodenstrahl-Oszillographen bis etwa 50000 Hz.

Soweit vorauszusehen ist, reichen diese letzteren Eigenschwingungszahlen für die Untersuchung der hier in Betracht kommenden Druckvorgänge reichlich aus. Jedoch gibt es noch viele Aufgaben, die auf Lösung warten, insbesondere die Erleichterung der Eichung und Erhöhung der

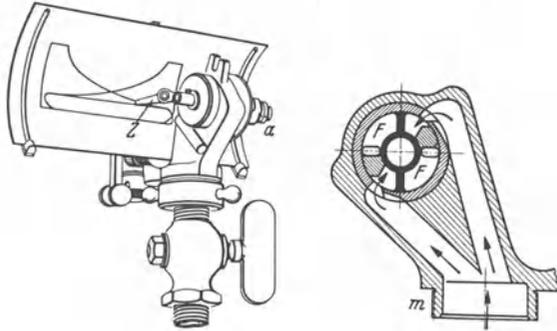


Abb. 14. Indikator nach Wayne mit zylindrisch gekrümmter Papiertafel und Drehkolben. *a* Verankerung der Drehfeder; *Z* Schreibarm; *m* Anschlußgewinde; *F F* mit der Atmosphäre in Verbindung stehende Zellen.

Genauigkeit, die Anpassung des Indikators an die sehr mannigfaltigen Betriebsverhältnisse, die Ermäßigung der Ansprüche betreffend Bedienung, die Verringerung der Kosten und noch andere mehr, welche Aufgaben für die zukünftige Tätigkeit von Erfindern und Forschern ein reichliches Arbeitsfeld bieten.

II. Mechanisch aufzeichnende Indikatoren.

In diesem Abschnitt werden die heutzutage gebräuchlichen Indikatoren beschrieben, welche das Diagramm mit Schreibstift auf einem Papierblatt in einer bequemen Größe aufzeichnen, wobei dessen Auswertung ohne besondere optische Hilfsmittel möglich ist. Die jetzige Form dieser Indikatoren ist das Ergebnis einer mehr als hundertjährigen Entwicklung, während der eine große Anzahl Entwürfe vorgeschlagen und durchprobiert wurde. Dabei wurden die unnötigen oder nachteiligen Merkmale ausgemerzt und ein Kompromiß zwischen den erwünschten und den praktisch erreichbaren Eigenschaften getroffen. Die Entwicklung ist noch immer im Gang, jedoch wird sie beschränkt auf die Anpassung des Gerätes an die gesteigerten Betriebsanforderungen.

Die Herstellung dieser Geräte wird durch eine Anzahl Firmen betrieben, unter denen zu nennen sind:

Im Deutschen Reich: Dreyer, Rosenkranz & Droop A.-G., Hannover; Lehmann & Michels, Altona/Elbe; H. Maihak A.-G., Hamburg.

In Großbritannien: Dobbie McInnes & Clyde, Ltd., Glasgow.

In USA.: Crosby Steam Gage and Valve Company, Boston; Trill Indicator Company, Corry, Pennsylvania; K. J. DeJuhasz, State College, Pennsylvania.

Diese Indikatoren können nach ihrer Gestaltung in zwei Hauptgruppen: 1. mit innenliegender Feder und 2. mit außenliegender Feder, eingeteilt werden. Die ersteren sind im allgemeinen billiger in der Herstellung und infolge ihrer geringeren bewegten Massen für hohe Drehzahlen besser geeignet. Die Feder ist aber etwas den hohen Temperaturen ausgesetzt, daher ist der Federmaßstab Unsicherheiten unterworfen. Die letzteren sind bequemer zu handhaben und haben infolge der geringen Temperaturerhöhung der Meßfeder einen gleichbleibenden Federmaßstab. Die bewegten Massen sind aber größer und die Herstellung teurer. Die meisten Indikatorfirmen stellen beide Ausführungsformen her.

Außerdem werden die Indikatoren nach ihren Abmessungen in verschiedene Größenstufen eingeteilt, die dann meistens Diagramme von verschiedenen Größen liefern, z. B.

Größe I mit Diagrammgröße bis 130 mm lang, 75 mm hoch.

Größe II mit Diagrammgröße bis 90 mm lang, 50 mm hoch.

Größe III mit Diagrammgröße bis 60 mm lang, 30 mm hoch.

Die Herstellerfirmen empfehlen die drei Größen bis zu bestimmten Höchstdrehzahlgrenzen, nämlich bis etwa 200, 500 und 800 U/min für die obigen drei Größen. Diese Drehzahlgrenzen sind aber etwas übertrieben und irreführend, da die Anwendbarkeit des Indikators und die Größe der Trägheitsfehler nicht von der Drehzahl allein, sondern auch von anderen Faktoren abhängt. Es wäre wissenschaftlich richtiger, die bewegten Massen oder die Eigenschwingungszahl der druckmessenden Elemente unter Anwendung der verschiedenen Meßfedern in Tabellen oder in einem Kurvenblatt anzugeben, wie es schon einige Indikatorfirmen tun.

Die Eigenschwingungszahl der sich bewegenden Teile und die dadurch entstehenden Trägheitsfehler werden in einem folgenden Abschnitt ausführlich behandelt. Es soll aber auch an dieser Stelle ein kurzer Überblick

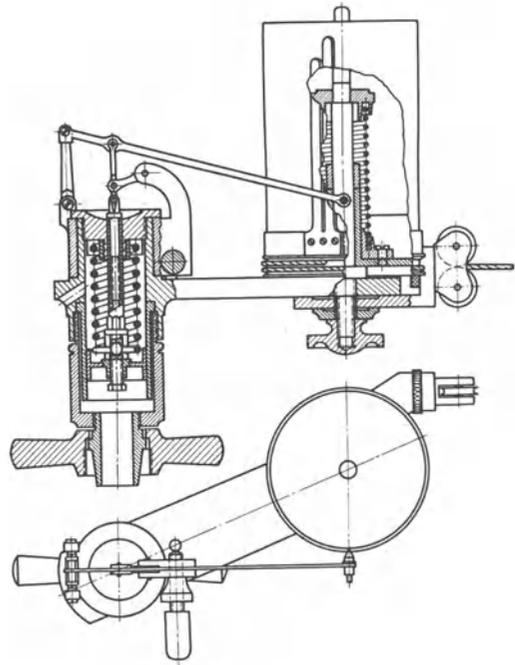


Abb. 15. Innenfederindikator nach Crosby. Merkmale: doppelgewundene Schraubenfeder mit Kugelkopf; mit Dampfmantel umgebener Zylinder; Atmosphärenlinie einstellbar durch Heraus- oder Hineinschrauben der Kolbenstange; geringe Trägheit der bewegten Teile; sechsfache Vergrößerung.

über den Zusammenhang der Diagrammgröße mit der praktisch verwendbaren Drehzahlgrenze gegeben werden. Infolge der Trägheit der bewegten Teile zeichnet der Indikator nicht den wahren Druckverlauf auf, sondern die Eigenschwingungen des Indikators lagern sich darüber. Die entstehende Abweichung ist um so größer, je schneller die Druck-

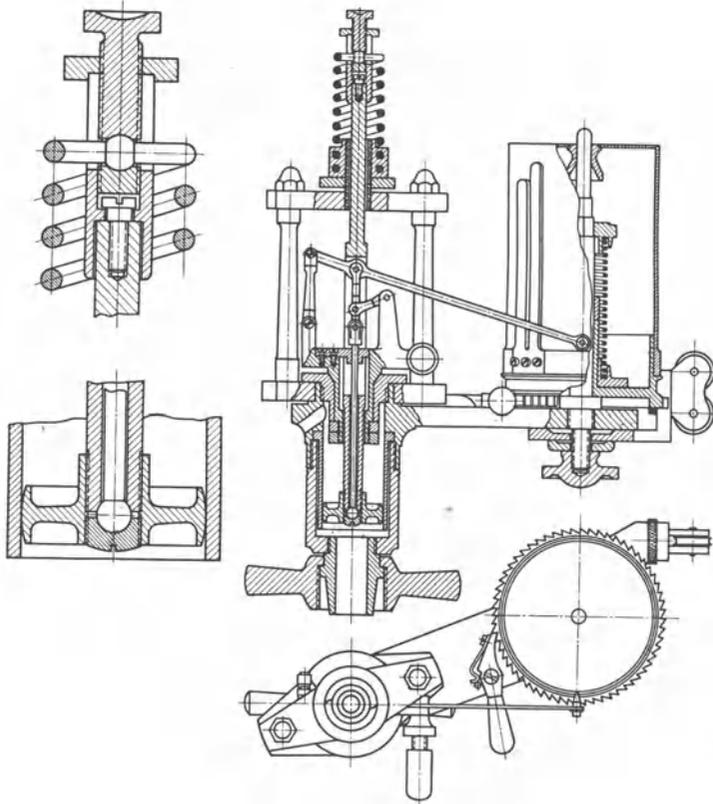


Abb. 16. Außenfederindikator nach Crosby. Merkmale: kugelliger Kolben; gegabelte Kolbenstange, welche den Schreibhebel umgibt; Atmosphärenlinie einstellbar durch höhere oder niedrigere Einstellung des Federfußes; Klinkenwerk an der Trommel zum Anhalten der Trommel ohne Abstellen der Maschine.

änderung in der zu untersuchenden Maschine und je niedriger die Eigenschwingungszahl des Indikators ist.

An einer langsamlaufenden Dampfmaschine (mit niedriger Geschwindigkeit der Druckänderung) kann ein Indikator einwandfreie Diagramme liefern, in welchen die Eigenschwingungen des Indikators kaum entdeckbar sind. Derselbe Indikator kann an einem schnelllaufenden Verbrennungsmotor (mit hoher Geschwindigkeit der Druckänderung) Diagramme liefern, welche durch die Eigenschwingungen verzerrt und für die Auswertung unbrauchbar sind.

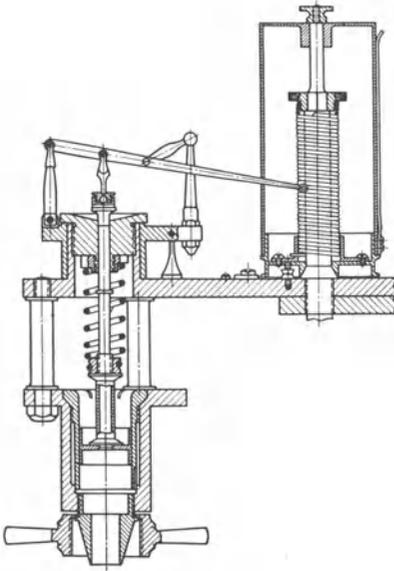


Abb. 17. Indikator nach Trill. Hohle Kolbenstange; einfach gewundene, auf Druck beanspruchte Schraubenfeder; verkürzter Ellipsenlenker; Schreibzeug mit fünffacher Vergrößerung.

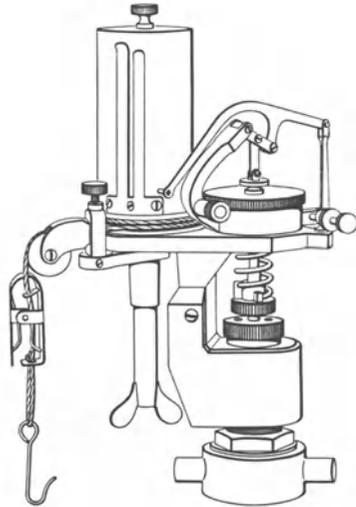


Abb. 18. Indikator nach Dobbie-McInnes. Einfach gewundene, auf Druck beanspruchte Schraubenfeder; Gehäuse und Anschlußmutter mit Hartgummiisolierung versehen; verkürzter Ellipsenlenker; Schreibwerk mit sechsfacher Vergrößerung; Haken für die Einstellung der Schnurlänge.

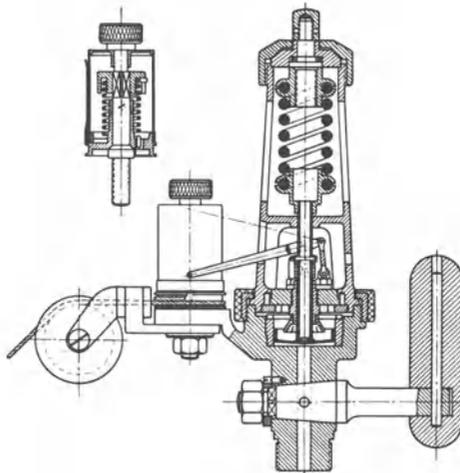


Abb. 19. Schnelläuferindikator nach Dreyer, Rosenkranz und Droop. Kolbendurchmesser 28,28 mm; Trommeldurchmesser 30 mm; Maximale Diagrammhöhe 28 mm; Eigenschwingungszahl mit stärkster Feder (bis zu 65 kg/cm^2) 75 Hz; Crosby-Lenker, Schreibzeug mit siebenfacher Vergrößerung.

Für die Beurteilung der Anwendbarkeit eines Indikators an einer Maschine ist also sowohl die Eigenschwingzahl der druckmessenden Teile des Indikators, als auch die während der Zeiteinheit auftretende Druckänderung (d. h. Druckänderungsgeschwindigkeit) in der zu untersuchenden Maschine maßgebend. Da die Geschwindigkeit der Druckänderung in Maschinen gleicher Gattung mit grober Annäherung der

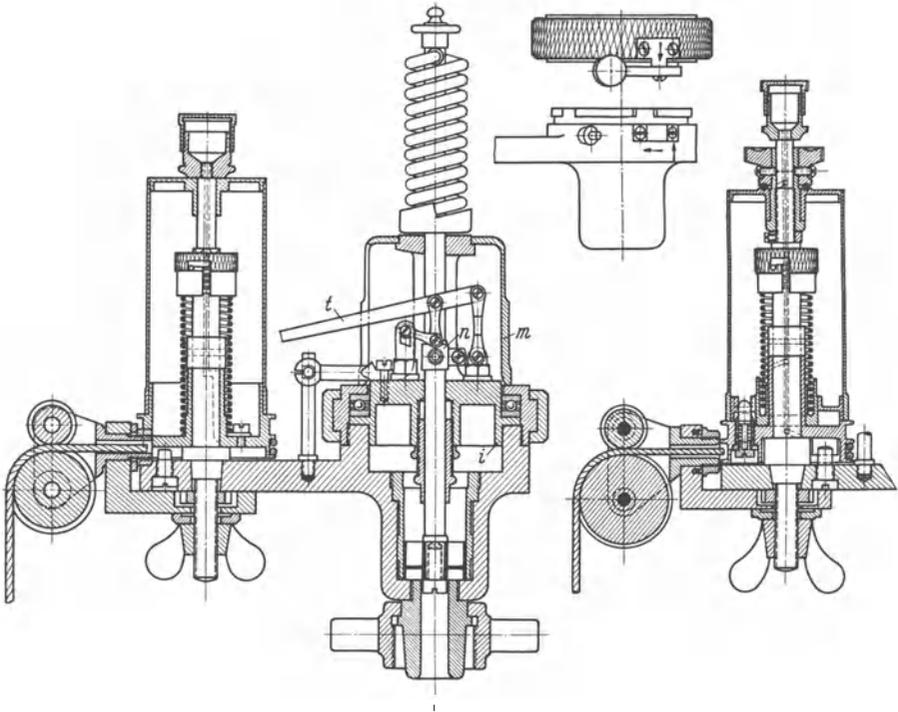


Abb. 20. Indikator nach Lehmann und Michels. Doppeltgewundene, auf Zug beanspruchte Schraubenfeder; das Schreibzeug wird an der Kolbenstange mittels der Klemmhülse *n* befestigt, wodurch die Einstellung der Atmosphärenlinie ermöglicht wird; gegabelter Schreibhebel *t*; Drehscheibe *i* auf Kugeln gelagert; die Kappe *m* schützt das Schreibzeug vor Beschädigung; das Nebenbild zeigt eine Trommel mit Anhaltevorrichtung; Schmierung der Trommel durch Staufferbüchse; das obere Bild zeigt Renkverschluß mit Klinkengesperre für die Sicherung der Überwurfmutter gegen Lösung.

Maschinendrehzahl verhältnismäßig ist, kann die obige Forderung auch wie folgt ausgedrückt werden: Die Zahl der Indikatoreigenschwingungen während eines Maschinenhubes soll eine Mindestzahl nicht unterschreiten. Diese „zulässige Mindestzahl“ ist eine willkürliche Größe, wofür wir beispielsweise die Zahl 10 wählen wollen. Mit diesem Wert soll die Eigenschwingzahl des Indikators, angewendet an einer Maschine von 100 U/min höher als $\frac{2 \cdot 100 \cdot 10}{60} = 33/s$ und für eine Maschine von 1000 U/min höher als 333/s sein.

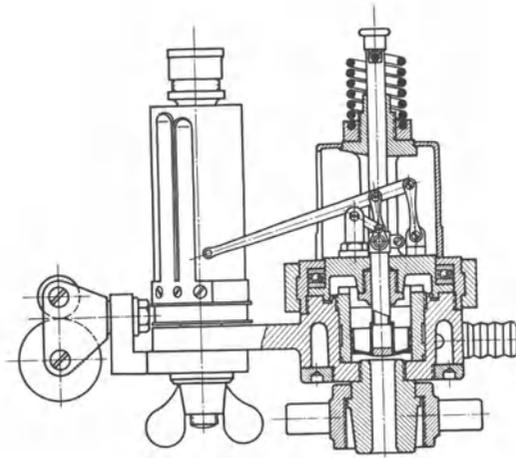


Abb. 21. Schnelläuferindikator mit Wasserkühlung nach Lehmann und Michels; bemerkenswert die weitgehende Verkleinerung der Abmessungen und der bewegten Massen.

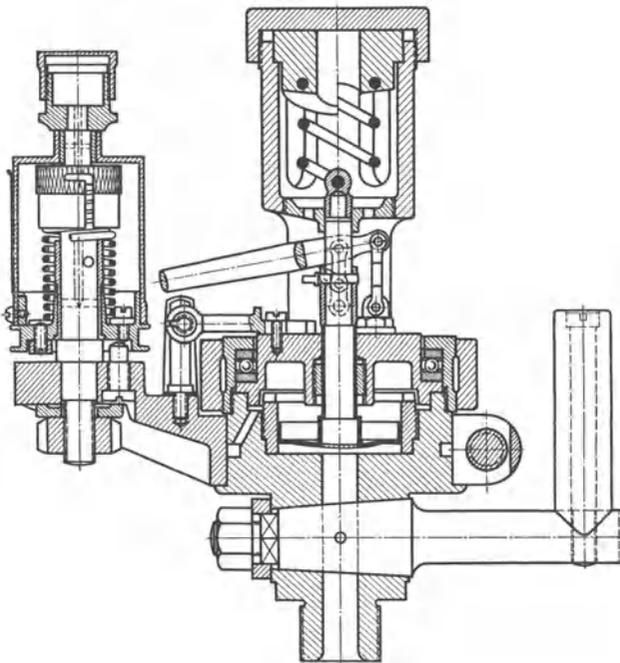


Abb. 22. Schnelläuferindikator nach Lehmann und Michels; außenliegende, auf Druck beanspruchte Schraubenfeder; Schreibzeugvergrößerung siebenfach; Indikatorhahn und Gehäuse aus einem Stück; Trommelarm kann um die Indikatorachse gedreht und in beliebiger Stellung mittels der Klemmschraube gesichert werden.

Ähnliche Überlegungen gelten auch für die Papiertrommel, deren Eigenschwingungszahl auch hoch gehalten werden muß, um das Schleudern

der Schnur und der Trommel und dadurch eine Verzerrung des Kolbenwegmaßstabes niedrig zu halten.

Die Anpassung des Indikators für höhere Drehzahlen besteht also in der mit der Erhöhung der Maschinendrehzahl verhältnismäßigen Erhöhung der Eigenschwingzahl der schwingenden Indikatorteile.

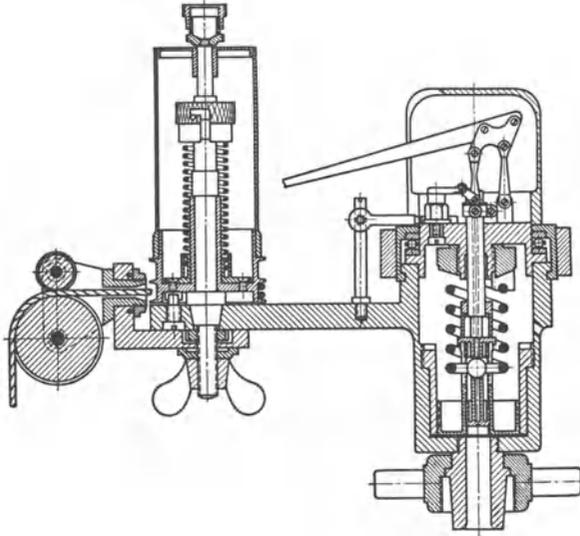


Abb. 23. Indikator nach Geiger (Lehmann und Michels); großer Kolben von 1 Quadratzoll Fläche; Innenfeder, auf Druck beansprucht; Schreibwerk mit zehnfacher Vergrößerung; Zylinder mit Schmierbüchse versehen. Schreibhebel als elliptisches, nach der Spitze zu stark verjüngtes, dünnwandiges Rohr ausgeführt; besonders leichte Schreibspitze.

Die sekundliche Eigenschwingzahl n_e einer Masse m , auf welche eine Federspannkraft c (Kraftänderung für die Einheit der Verschiebung) einwirkt, kann durch die Formel

$$n_e = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{m}}$$

ausgedrückt werden.

Beispiel. Für einen guten, gebräuchlichen Indikator für Dampf- und Dieselmotoren gelten die folgenden Angaben:

Gewicht der druckmessenden Teile, bezogen auf die Kolbenachse: 78 g; $m = \frac{78}{981} \frac{g \cdot s^2}{cm}$ und Federmaßstab: 2 mm pro kg/cm², bezogen auf eine Kolbenfläche von 0,5 Quadratzoll, und auf ein Vergrößerungsverhältnis von 6; daher wird die Federkennzahl bezogen auf die Kolbenachse: $c = 96780 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1}$.

Aus diesen Werten ergibt sich: $n_e = 175/s$.

Gemäß der obigen Annahme (10 Indikatorschwingungen für je einen Maschinenhub) wird also dieser Indikator bis zu $n = 530$ U/min ein annehmbares Diagramm ergeben.

Die Eigenschwingungszahl kann erhöht werden durch Erhöhung von c (d. h. durch kräftigere Meßfeder) oder durch Verminderung der Masse m .

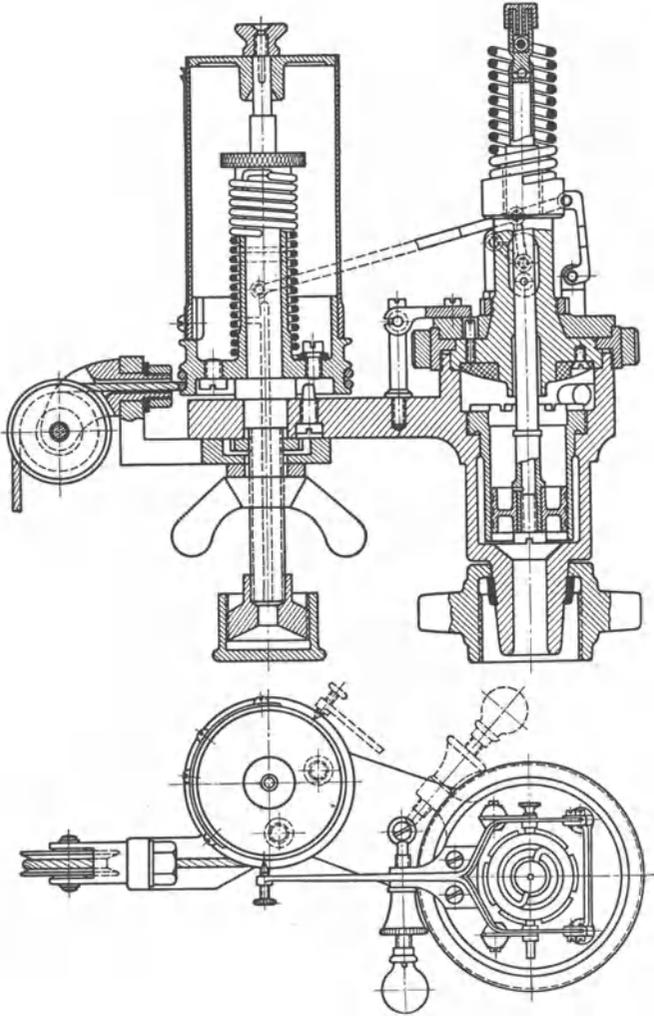


Abb. 24. Indikator nach Maihak; auf Zug beanspruchte doppelgewundene Schraubenfeder; gegabeltes Schreibzeug mit sechsfacher Vergrößerung; wärmeisolierende Platte an der Unterseite der Federträger; Staufferbüchse zur Schmierung der Trommelachse.

Die Schwierigkeit liegt darin, daß die Eigenschwingungszahl nur proportional der Quadratwurzel aus c/m in die Höhe geht.

Um die Trägheitsfehler eines vorhandenen Indikators möglichst unterzudrücken, sollen die stärksten vorhandenen Meßfedern angewendet, die Trommelfeder stark angespannt und der Trommelhub auch möglichst

klein eingestellt werden. Dadurch wird naturgemäß das Diagramm kleine Abmessungen erhalten, wodurch die Beobachtungsfehler vergrößert werden.

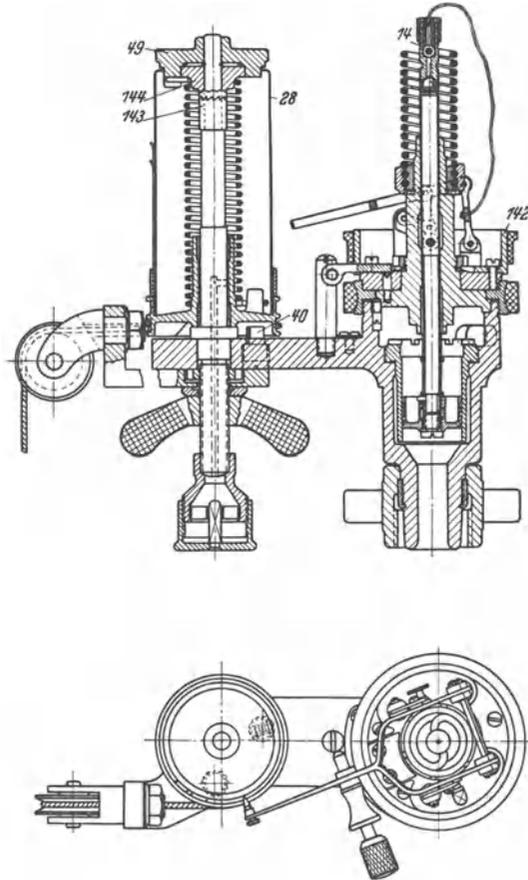


Abb. 25. Indikator nach Maihak, neuere Ausführung. Bemerkenswerte Einzelheiten: Kugeldrucklager 14 mit einer Kugel; Schutzring 142 schützt das Schreibwerk vor Beschädigung; Trommel 28 oben offen; Trommeldeckel 49 dient für die Einstellung der gewünschten Federspannung mittels der Zahnkupplung 143, 144; große Flügelmutter ermöglicht die Festklemmung des Rollenhaltwinkels ohne besonderes Werkzeug; Federbündel 40 bewirkt einen sanften Trommelschlag.

Es wurden von mehreren Indikatorfirmen besonders für hohe Drehzahlen bestimmte, sog. Schnellläuferindikatoren auf den Markt gebracht, in welchen die bewegte Masse nach Möglichkeit vermindert und die Diagrammgröße auf ein Mindestmaß beschränkt wird, welches noch einigermaßen eine normale Auswertungsmöglichkeit ohne optische Hilfsmittel gestattet. Das Diagramm solcher Indikatoren ist etwa 45 mm lang und 20 mm hoch. Je höher die angestrebte Drehzahlgrenze

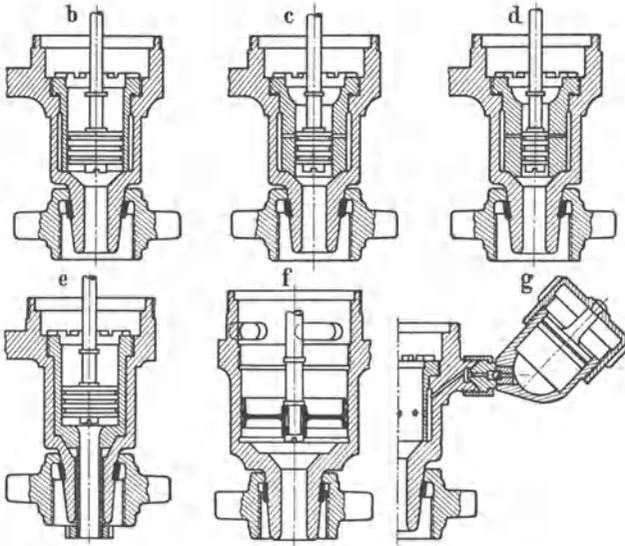


Abb. 26. Zylindereinsätze und Kolben zum Mathak-Indikator. b—d mit verschieden großen wirk-samen Flächen; e zeigt eine Stahlbüchse für Ammoniakverdichter; f großer Kolben für Niederdruck-gebläse; g Schmierbüchse mit Rückschlagventil für Verbrennungskraftmaschinen.

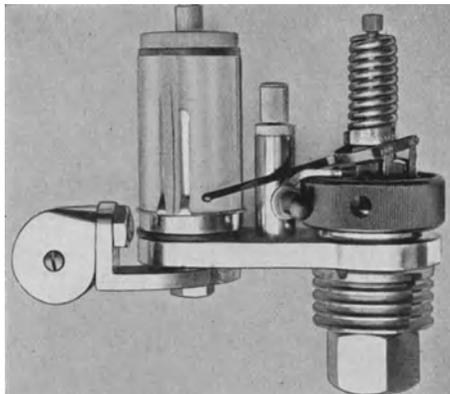


Abb. 27. Indikator nach de Juhasz, insbesondere für Dieselmotoren (DRGM., USA. Pat.). Be-merkenswerte Einzelheiten: der mit Kühlrippen versehene Körper; Schreibzeug mit siebenfacher Vergrößerung, daher kurze Kolbenstange, kurze Feder und geringe Kolbenbewegung; die Anschlag-säule dient gleichzeitig als Schmiermittelbehälter, in welchem das Schmiermittel dauernd unter Druck erhalten wird; Trommel aus Kunstharzstoff (Bakelit), daher geringe Trägheit und große Widerstandsfähigkeit gegen Einbeulung; Trommel in Kugellagern gelagert; Papierhaltefinger und Schmirrille bilden ein Stück; Trommelschmierung.

ist, um so mehr müssen häufig Nachteile, wie erschwerte Anbringung an der Maschine, unbequeme Handhabung, umständliches Auseinandernehmen und Zusammenbau usw. in Kauf genommen werden.

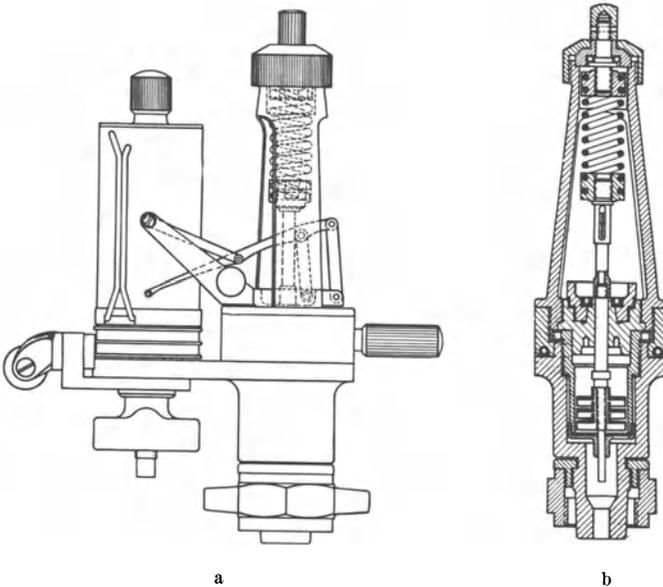


Abb. 28 a und b. Außenfederindikator nach Dreyer, Rosenkranz und Droop. Doppelgewundene Schraubenfeder, am drehbaren Kopf befestigt (Druckfeder); Ellipsenlenker; Schreibzeug mit sechsfacher Vergrößerung; Lamellenkolben, oben und unten geführt; Papierhaltefinger aus Draht.

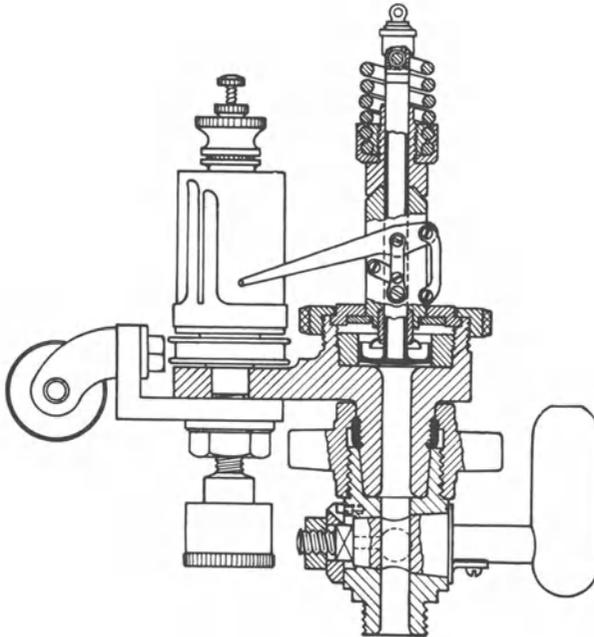


Abb. 29. Schnelläuferindikator nach Maihak. Bemerkenswert sind die kurze Kolbenstange und die kurze Feder, die ungewöhnliche Anordnung des Drehkörpers, in welchem die Schreibzeugteile angeordnet werden, und der federnde Anschlag für die Begrenzung der Kolbenbewegung.

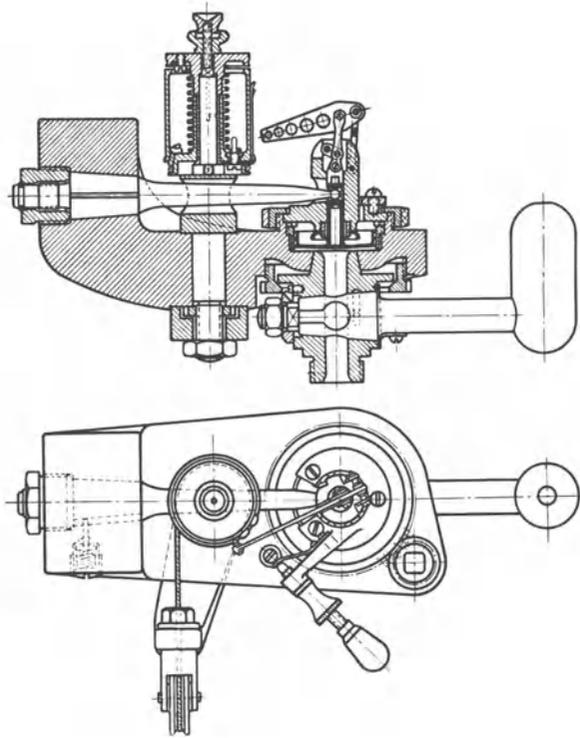


Abb.30. Schnellaufindikator mit Stabfeder nach Maihak (USA. Pat. A. A. von Gehlen, Nr. 1592876, 1923). Die als Körper gleicher Festigkeit gebaute gerade Stabfeder ermöglicht eine Bauweise mit kurzer und leichter Kolbenstange: großer Kolben; Schreibzeugvergrößerung achtfach; die Anschlußmutter wird mittels Zahnrad festgezogen und gelöst; Trommeldurchmesser 30 mm; Maximaldiagramm 25 mm hoch, 60 mm lang.

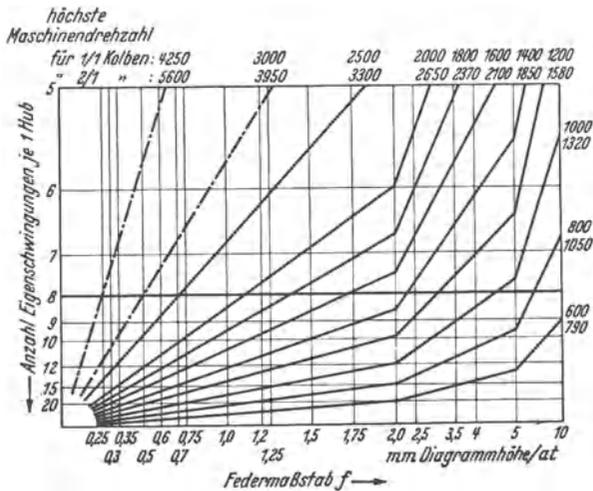


Abb. 30a. Kurventafel zum Stabfederindikator nach Maihak mit Angabe der Eigenschwingungen.

Die heutzutage gebräuchlichen normalen Indikatoren, und auch einige Vertreter der Schnellläuferindikatoren dieser Gattung, werden in den Abb. 15—31 veranschaulicht und in den Titelzeilen näher beschrieben.

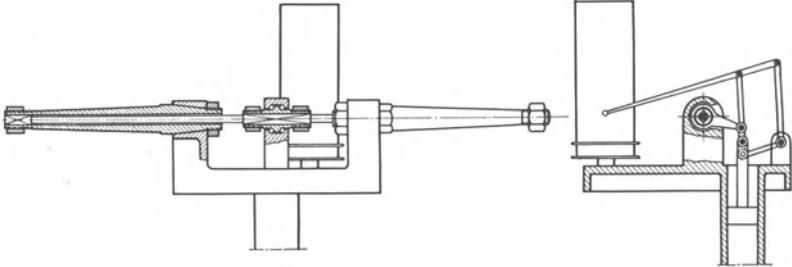


Abb. 31. Schnellläuferindikator nach Patent Gümbe! DRP. 253134, 1912, mit einer geraden Drehungsfeder, welche in der Drehachse des Gegenlenkers angeordnet wird. Tatsächliche Ausführung nicht bekannt.

Bestandteile und Hilfseinrichtungen der mechanisch aufzeichnenden Indikatoren.

1. Der Rahmen oder das Gehäuse dient für die Aufnahme der übrigen Teile und für die Feststellung der gegenseitigen Lage derselben. Er soll deshalb starr und kräftig genug gestaltet werden, um den auf ihn einwirkenden Kräften ohne elastische oder bleibende Formänderung widerstehen zu können. Die Trommelachse wird in einen vom Gehäuse seitlich herausragenden Arm eingesetzt. Es ist notwendig, daß die Trommelachse genau parallel zum Schreibstiftweg liegt. Ist das nicht der Fall, sondern schneidet der Schreibstiftweg die Trommelachse (naturgemäß ist auch dann der Winkel sehr klein), so wird der Schreibstiftdruck im oberen und unteren Bereich der Bewegung verschieden sein, welcher Umstand Reibungsfehler begünstigt. Wenn noch dazu die Trommelachse und der Schreibstiftweg nicht in derselben Ebene liegen (d. h. die beiden Linien windschief zueinander stehen), stehen die Ordinaten zu den Abszissen nicht senkrecht, wodurch sich ein Fehler in der Auswertung ergibt.

Bei manchen Indikatoren bildet der Trommelarm ein besonderes Stück, welches in den unteren Gehäuseteil eingeschraubt wird, wobei der Zylinder zwischen den beiden Teilen durch eine Flansche gesichert wird. In neueren Indikatoren wird die Bauweise mit ungeteiltem Rahmen bevorzugt, wobei der auswechselbare Zylindereinsatz von oben eingeschraubt wird.

Der untere Gehäuseteil wird am Indikatorhahn oder -ventil durch einen Kegelanschluß und Überwurfmutter gesichert.

Als Werkstoff wird Rotguß angewendet.

2. Der Indikatorhahn oder das Indizierventil wird zwischen der zu untersuchenden Maschine und dem Indikator eingebaut und hat die Aufgabe, den Indikatorzylinder entweder mit dem Maschinenzylinder oder mit der Atmosphäre in Verbindung zu bringen. Für niedrige Drücke (Dampfmaschinen, Kompressoren) wird der Hahn, für hohe Drücke und Temperaturen (Verbrennungskraftmaschinen) das Ventil bevorzugt. Es wird gefordert, daß das Öffnen und Schließen schnell, leicht, und vor allem zuverlässig erfolgen soll, da ein Versagen (z. B. Offenbleiben oder Leckwerden) ernste Folgen nach sich ziehen, sogar das Abstellen der Maschine erforderlich machen kann. Sowohl der Hahn als auch das Ventil muß drei Öffnungen, d. h. zum Maschinenzylinder, zum Indikator

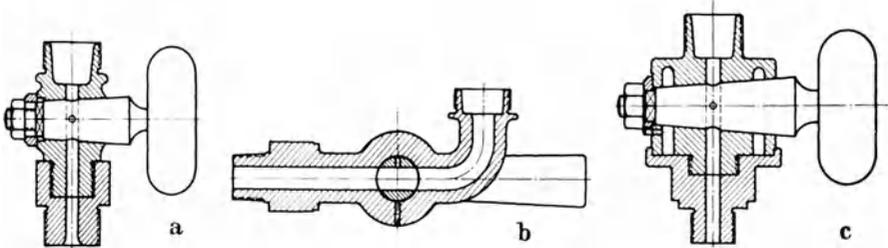


Abb. 32 a—c. Indikatorhähne. a Normaler Hahn (Maihak); b Ellenbogenhahn (Maihak); c wassergekühlter Hahn (Lehmann und Michels).

und zur Atmosphäre besitzen und die wirksame Verbindung soll äußerlich klar erkenntlich sein.

Einige Bauformen sind in den Abb. 32 und 33 veranschaulicht. Die Hähne und Ventile werden auch mit Wasserkühlung gebaut, um hohe Temperaturen und Festbrennen zu vermeiden. Hierbei erfolgt aber ein Festbrennen sicherlich, falls der Wasserdurchfluß zufälligerweise versagt. Die Kugelventile haben den Nachteil, daß der Durchgangsweg meistens länger als der in einem Hahn ist, und nicht ohne geringen Richtungswechsel gestaltet werden kann.

Bei sehr langsamlaufenden großen Dampfmaschinen ist es statthaft einen und denselben Indikator für die beiden Zylinderseiten zu gebrauchen. Für diesen Zweck wird ein Dreiwegehahn angewendet. Das lange Verbindungsrohr muß in diesem Falle von genügendem Querschnitt sein; es wird mit Asbest oder anderen wärmeisolierenden Stoffen überzogen, um Wasserniederschlag im Rohr zu vermeiden. Für schnelllaufende Maschinen ist die Anwendung einer langen Verbindungsleitung nicht statthaft; in solchen Fällen soll die Verbindung so kurz und weit gemacht werden wie möglich, um Drosseln und Trägheitseinflüsse der eingeschlossenen Gasmenge möglichst gering zu halten.

Einige Formen von Zwischenstücken für die Anpassung des Hahnes oder des Indicators an ein an der Maschine vorhandenes Gewinde zeigt Abb. 34.

3. Der Zylinder und Kolben werden in den heutigen Indikatoren austauschbar angeordnet. Der Normaldurchmesser (20,27 mm) entspricht einer Fläche von 0,5 Quadratzoll. Für hohe Drücke werden Bruchteile, für niedrige Drücke (Gebläse) ein Vielfaches desselben angewendet. Die üblichen Abmessungen und die Druckgrenzen für deren Anwendung werden in der Tabelle 1 zusammengestellt.

Manche Herstellerfirmen haben als Normaldurchmesser 20 mm angenommen, aber sonst sind die obigen Abmessungen fest eingebürgert.

Die Bilder zeigen verschiedene Bauweisen der Zylinder-einsätze und Kolben. Die Zylinder für hohe Drücke werden meistens so geformt, daß der Kolben innerhalb des Anschlußkegels zu sitzen kommt. Dadurch wird der schädliche Zusatzraum vermindert und der Druck wird nur auf eine verhältnismäßig kleine Fläche ausgeübt, wodurch die Gefahr des Platzens vermieden wird.

Für Gebrauch an Dampfmaschinen wird der Zylinder-einsatz vorzugsweise nur am oberen Ende im Gehäuse gesichert (Abb. 15, 16, 24, 25 und 28), wodurch um die Zylinderwand ein Dampfmantel gebildet wird. Dadurch wird die Temperatur des Zylinders an allen Stellen gleich und eine Verformung des Zylinders vermieden. Für Verbrennungsmaschinen ist es aber notwendig,

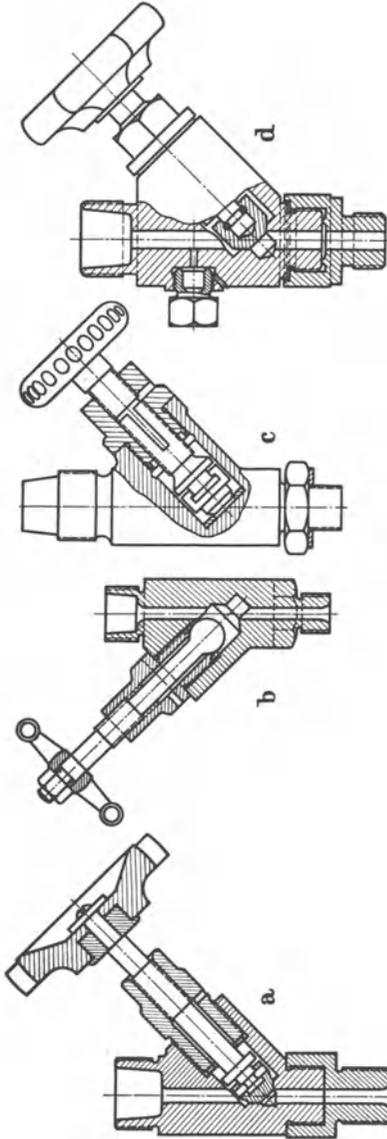


Abb. 33 a—d. Indikatorventile. a Maihak, mit frei beweglichem Ventilteller; b Lehmann und Michels, Ventilteller bildet ein Stück mit Ventilschraube; c Dobbie-McInnes mit eingesetztem, austauschbarem Ventilsitz; d Schaeffer und Budenberg, mit besonderer Atmosphärenöffnung.

den Mantel auch an der unteren Kante abzuschließen, um die Erhitzung des Zylinders zu vermindern (Abb. 17, 20, 21, 26 und 27). Diese Bauweise hat auch den Vorteil, daß die hohen Drücke von der inneren Wand des Gehäuses, welche eine große Fläche darstellt, ferngehalten und

dadurch hohe Beanspruchungen vermieden werden. Bei dieser Bauweise muß aber der Zylindereinsatz mit genügender Wandstärke gebaut werden. Der Mantelraum zwischen Gehäuse und Zylindereinsatz wird vorteilhaft für die Aufnahme eines Schmiermittels (Öl oder Fett) ausgenützt (Abb. 27).

Das Material für den Zylindereinsatz ist meistens dichte Bronze. Für die Anwendung an Ammoniakverdichtern wird oft Gußeisen angewendet, welches von dem Ammoniak weniger als Kupferlegierungen angegriffen wird (Abb. 26e). Jedoch ist der Angriff auch bei Bronze-teilen nicht allzu heftig, wenn nur für eine wirksame Schmierung gesorgt wird.

Der Kolben wird aus gehärtetem Werkzeugstahl (neuerdings auch aus nitriertem Stahl) angefertigt und mit der peinlichst sorgsamsten Genauigkeit mit dem Zylinder zusammengeläpft, damit ein freies, reibungsloses Gleiten, ohne Leck-

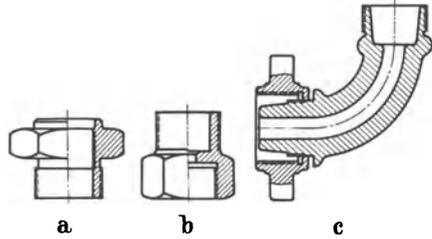


Abb. 34a—c. Zwischenstücke für den Anschluß des Indikators.

Tabelle 1.

Größennummer	$\frac{1}{16}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$	$(\frac{1}{4})$	$\frac{1}{8}$
Fläche, Quadratzoll	2	1	0,5	0,125	0,125	0,10
cm ²	12,903	6,452	3,226	1,613	0,806	0,645
Durchmesser, mm	40,54	28,70	20,27	14,35	10,13	9,06
Zulässiger Höchstdruck						
kg/cm ²	6	10	20	40	80	100
lb/sq. in.	75	150	300	600	1200	1500

Größennummer	$(\frac{1}{8})$	$\frac{1}{16}$	$\frac{1}{32}$	$\frac{1}{64}$	$\frac{1}{50}$
Fläche, Quadratzoll	0,0625	0,05	0,025	0,0125	0,01
cm ²	0,404	0,323	0,161	0,080	0,065
Durchmesser, mm	7,18	6,41	4,53	3,205	2,860
Zulässiger Höchstdruck					
kg/cm ²	160	200	400	800	1000
lbs/sq. in.	2400	3000	6000	12000	15000

verluste, gewährleistet wird. Üblicherweise werden schmale Rillen in die Berührungsfläche des Kolbens gedreht, welche zur Aufnahme des Schmiermittels und von zufällig hineingeratenen Schmutzteilen dienen. In manchen Ausführungsformen wird sogar der Kolben aus einer Anzahl von dünnen Scheiben gebildet (Abb. 28), um eine gleichmäßige Temperaturausdehnung zu erzielen und Klemmen zu vermeiden. Für diese angeblichen Vorteile muß aber eine Vergrößerung des Gewichtes in Kauf genommen werden.

In manchen Außenfederindikatoren wird der Kolben nicht zylindrisch, sondern in der Form einer Kugelzone gebildet, um eine Einstellfreiheit der Kolbenstange zu gewähren und dadurch Einklemmen des Kolbens zu vermeiden, welches sonst von einer seitlich angreifenden Federkraft verursacht werden könnte (Abb. 16). Dieser angebliche Vorteil wird aber durch den Nachteil einer erhöhten Abnutzung an der Berührungsfläche, durch größere Leckverluste und Einklemmen von Schmutzteilen teuer erkauft und wird heutzutage kaum mehr angewendet.

Für Gebrauch an Dampfmaschinen genügt es meistens, den Indikator- kolben von Zeit zu Zeit herauszunehmen und in Schmieröl einzutauchen, da der Dampf auch etwas Schmieröl enthält, keine verrostende Wirkung ausübt und die Temperatur nicht allzu hoch ist. Bei Verbrennungskraft- maschinen herrschen schwierigere Verhältnisse; es ist daher notwendig, für eine gründlichere Schmierung zu sorgen. Für diesen Zweck kann eine Art von Staufferbüchse am Indikatorgehäuse angebracht werden (Abb. 26g), welche das Schmiermittel in den Mantelraum zwischen Gehäuse und Zylinderbüchse drückt, wovon es durch kleine Bohrungen an die Berührungsfläche von Büchse und Kolben gelangt. Oder es kann ein Behälter angewendet werden, in welchem das Schmiermittel fortwährend unter Druck steht (Abb. 27). Es muß dafür gesorgt werden, daß die kleinen Bohrungen in der Zylinderbüchse in allen Kolbenstellungen vom Kolben bedeckt werden, da sonst ein Durchblasen der Zylindergase (in der oberen Kolbenstellung) oder ein Eindringen des Schmiermittels (in der unteren Kolbenstellung) erfolgen kann.

Durch zweckmäßige Wahl der Zylindergröße und Federstärke kann der Druckmaßstab in weiten Grenzen geändert werden. Im allgemeinen ist es vorteilhaft, den größten Kolben zu benutzen, welchen der vorhandene Höchstdruck zuläßt, da dadurch der Einfluß der Reibung und der Trägheit des Schreibgestänges im Vergleich zu den Druckkräften verringert wird.

Der Kolben wird auf die Kolbenstange entweder unmittelbar geschraubt oder durch einen zylindrischen oder schwach-kegeligen Sitz und eine Schraube gesichert. In beiden Fällen ist es notwendig, für die genaue Zentrierung der Kolbenstange im Kolben zu sorgen.

4. Die Kolbenstange verbindet den Kolben mit dem Schreibgestänge und der Meßfeder und muß kräftig genug bemessen werden, um den Kräften ohne Verbiegung oder Ausknickung zu widerstehen. Meistens wird sie hohl ausgeführt. Bei Außenfederindikatoren ist die Kolbenstange ziemlich lang und manchmal gegabelt ausgeführt, so daß sie den Schreibhebel umgibt. Bei Innenfederindikatoren wirkt die Federkraft unmittelbar auf den Kolben, so daß die Kolbenstange nur durch die Trägheitskräfte des Schreibgestänges belastet wird.

Wie in Tabelle 1, S. 25, angegeben, soll die Kolbenstangenkraft etwa 70 kg nicht überschreiten. Die Kolbenstange wird mit einem Wulst

versehen, welcher in der obersten Kolbenstellung gegen den Zylinderkopf anschlägt und dadurch eine Überbeanspruchung der Meßfeder verhindert.

5. Die Meßfeder ist wohl der wichtigste Bestandteil des Indikators, von deren Genauigkeit und Zuverlässigkeit die Brauchbarkeit des Diagrammes abhängt. Verschiedene Federformen wurden für Indikatoren vorgeschlagen und angewendet, nämlich:

a) Stangenfeder, auf reinen Zug oder Druck beansprucht. (Beispiel: Indikator nach Thring-Rumpff und nach Balfour; s. S. 63 bzw. 67.)

b) Stabfeder auf Biegung beansprucht. (Beispiel: Maihak-Stabfederindikator, Hopkinson-Spiegelindikator; s. S. 21.)

c) Gerade Drehungsfeder auf reine Drehung beansprucht. (Beispiel: Indikator nach Gumbel; s. Abb. 31.)

d) Gewundene Drehungsfeder (Schraubenfeder) auf Drehung und Biegung beansprucht. (Sie wird am häufigsten angewendet.)

e) Plattenfeder, frei aufliegend oder eingespannt. (Beispiel: Manograph von Hospitalier, Spiegelindikator von Lewis und v. Elbe und mehrere elektrische Indikatoren, s. S. 58.)

f) Gebogene Rohrfeder (Bourdon-Rohr). (Beispiel: Indikator nach Keynion (Abb. 12); Spiegelindikator nach Berg; s. S. 60.)

Für die Eignung der verschiedenen Federformen für Anwendung bei Indikatoren sind folgende Bedingungen maßgebend:

1. Hohe Eigenschwingungszahl; diese Eigenschaft hängt mit der in der Gewichtseinheit aufgespeicherten Arbeitsmenge zusammen, die um so größer ist, je größer die zulässige Höchstspannung und je mehr sich das Verhältnis: mittlere Spannung/Höchstspannung dem Werte 1 nähert. Diesbezüglich steht die auf reinen Zug oder Druck beanspruchte Stangenfeder an der ersten Stelle, da alle Fasern des Querschnittes einer gleichen Beanspruchung ausgesetzt sind. An zweiter Stelle steht die gerade Drehungsfeder, danach folgen etwa: gewundene Drehungsfeder, auf Biegung beanspruchte Stab-, Platten- und Rohrfeder.

2. Größe des Federungsweges. Mechanische Schreibindikatoren erfordern einen beträchtlichen Federungsweg, da die Vergrößerung praktisch nicht höher als etwa 10fach ausgeführt werden kann. Optische und elektrische Indikatoren sind dieser Beschränkung nicht unterworfen.

3. Leichte und genaue Herstellbarkeit, bequemer Einbau und Auswechslung.

Vom Federmaterial werden gefordert: unveränderlicher Elastizitätsmodul, welcher von der Temperatur möglichst wenig abhängig sein soll und möglichst hohe zulässige Beanspruchung. Es wird beinahe ausschließlich Stahl angewendet, der einer sorgfältigen Wärmebehandlung unterworfen wird. Legierte Stähle haben sich nicht so zuverlässig und gleichartig erwiesen als normale, hochwertige Kohlenstoffstähle (insbesondere solche von schwedischer Herkunft). Es sind Bestrebungen im

Gänge, Stähle mit einem von der Temperatur unabhängigen Elastizitätsmodul (dem in Uhren verwendeten Invarstahl ähnlich) für Meßfedern für Federwaagen und Druckmesser zu entwickeln. Das Iso-Elastic Metall, entwickelt von De Forest und Sayre in Verbindung mit John Chatillon and Sons, New York, ist eine Stahllegierung von 36% Ni, 8% Cr und kleineren Mengen von Mn und Mo, wird mit Erfolg für Federwaagen angewendet und mag sich auch für Indikatorfedern bewähren.

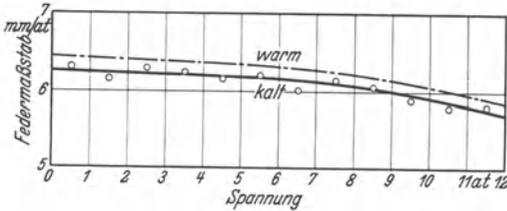


Abb. 35.

Verlauf des wahren Federmaßstabes einer Schraubenfeder im kalten und warmen Zustande (Gramberg).

Sein Schubmodul ist aber nur etwa $640\,000 \text{ kg/cm}^2$ im Vergleich zu $850\,000$ bei dem üblichen Kohlenstoffederstahl. Der Einfluß der Temperatur auf den Federmaßstab geht aus Abb. 35 hervor.

Bei Schreibindikatoren werden heutzutage beinahe ausschließlich Schraubenfedern als Meßfeder angewendet, obwohl in einem erfolgreichen Schnellläuferindikator eine auf Biegung beanspruchte Stabfeder angewendet wird.

Bei Schreibindikatoren werden heutzutage beinahe ausschließlich Schrauben-

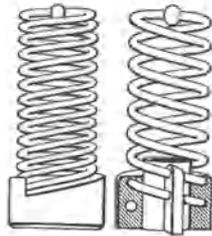


Abb. 36. Doppelgewundene Schraubenfeder; links auf Zug beansprucht; rechts auf Druck beansprucht.

Die meistens angewendete Feder ist die zylindrische Schraubenfeder. In früheren Indikatoren wurden eingängige Schraubenfedern angewendet; sie wurden aber von den doppelgängigen verdrängt, weil letztere freier von seitlichen Ausknickungen und dadurch entstehenden Seitenkräften sind. Die Einführung dieser Form wird dem Amerikaner Crosby zugeschrieben. Diese Feder wird aus einem einzigen Stück Draht hergestellt; eine kleine Kugel wird in die Mitte der Drahtlänge hartgelötet und bildet den Federkopf, der am Ende der Kolbenstange befestigt wird. Die beiden Drahtenden werden in

den Federfuß eingelötet. Diese Form hat die Vorteile kleiner bewegter Masse, achsenrichtiger Krafttrichtung und leichter und genauer Herstellung.

Durch einen auf den Indikator Kolben wirkenden Überdruck kann die Meßfeder entweder verlängert — Zugfeder —, oder verkürzt werden — Druckfeder. Beide Anordnungen haben ihre Vorteile. Die Zugfedern sind eng gewunden und haben nur soviel Abstand zwischen den Windungen, daß diese einander nicht berühren, wenn der Indikator Kolben einem Vakuum ausgesetzt wird (Abb. 36 links). Die Druckfeder muß mit soviel Abstand gewunden werden, daß die Windungen (Abb. 36 rechts) einandernicht berühren, wenn der Kolben dem beabsichtigten Höchstdruck ausgesetzt wird. Zugfedern bedingen eine längere Kolbenstange (daher größere bewegte Masse) als Druckfedern, die letzteren können aber eher

seitlich ausknicken, wodurch unerwünschte Seitenkräfte an Kolben und Kolbenstange entstehen können. Bei Innenfederindikatoren werden Druckfedern, bei Außenfederindikatoren meistens (aber nicht zwangsweise) Zugfedern angewendet.

Am Federfuß wird der Druckmaßstab angegeben, d. h. die der Druckeinheit unter Anwendung der normalen Kolben entsprechende Schreibstiftbewegung. In Großbritannien und in USA. wird dagegen der reziproke Wert, d. h. der einem Zoll Schreibstiftbewegung entsprechende Druck angegeben. Die Umrechnung geschieht mit der folgenden Formel:

M mm Schreibstiftweg pro 1 kg/cm^2 entspricht $360/M$ lb/sq. in. Druck pro 1 Zoll Schreibstiftweg oder X lb/sq. in. pro 1 Zoll Schreibstiftweg entspricht $360/X$ mm Schreibstiftweg pro 1 kg/cm^2 (genau 361,267).

Die Federmaßstäbe, die bei den verschiedenen Kolbengrößen gewöhnlich verwendet werden, sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt:

Tabelle 2. Federmaßstab (mm Schreibstiftweg pro kg/cm^2) mit den verschiedenen Kolbengrößen und üblichen Federn.

Kolbengröße	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{16}$	$\frac{1}{32}$	$\frac{1}{64}$	$\frac{1}{128}$	$\frac{1}{256}$	$\frac{1}{512}$	$\frac{1}{1024}$
Federmaßstab	240	120									
	180	90	45								
	120	60	30								
	100	50	25								
	80	40	20								
	64	32	16								
	48	24	12								
	40	20	10								
	32	16	8								
	24	12	6								
	20	10	5	2,5	1,25	1	0,625	0,5	0,25	0,125	0,10
	16	8	4	2	1	0,8	0,5	0,4	0,20	0,10	0,08
			(3,5)								
			3	1,5	0,75	0,6	0,375	0,3	0,15	0,075	0,06
			2,5	1,25	0,625	0,5	0,3125	0,25	0,125	0,0625	0,05
			2	1	0,5	0,4	0,25	0,2	0,1	0,05	0,04

Es ist hieraus ersichtlich, daß in der Auswahl der Federn und Kolben eine unnötig große Mannigfaltigkeit herrscht. Eine Normalisierung wäre zu begrüßen, durch welche die Anzahl der Kolben- und Federgrößen vermindert werden könnte.

Gleicher Maßstab über den ganzen Bereich der Schreibstiftbewegung wäre erwünscht. Das ist aber praktisch nicht ganz erreichbar; der wirkliche Federmaßstab kann in dem unteren und in dem oberen Teil der Schreibstiftbewegung nicht derselbe sein, wie die folgende Überlegung beweist:

Bezeichnet man mit P die auf die Feder wirkende Kraft und mit f den dadurch verursachten Federweg, so kann geschrieben werden:

$$P = \frac{d^4 \cdot G}{64 i r^3} f = c f,$$

wobei d Drahtdurchmesser, G Schubmodul, i Windungszahl, r mittlerer Windungshalbmesser, $2r\pi i = l$ Drahtlänge, J_p polares Trägheitsmoment $= \frac{d^4 \pi}{32}$, $c = \frac{d^4 G}{64 i r^3} = \frac{J_p G}{l \cdot r^2}$ Federungszahl bedeutet.

Wenn eine Schraubenfeder zusammengedrückt wird, nimmt der Windungsdurchmesser zu; wenn die Feder ausgedehnt wird, nimmt er ab. Weiterhin wird der Federdraht nicht nur auf Drehung, sondern auch auf Biegung beansprucht, welche letztere Beanspruchung in der obigen Formel nicht berücksichtigt wird. Durch diese Einflüsse wird der Federmaßstab in den verschiedenen Bereichen der Federbewegung geändert. Diese Änderung könnte durch Vergrößerung des Windungsdurchmessers und der Windungszahl (d. h. durch Verminderung der Windungssteigung) vermindert werden, wodurch aber (mit gegebener Höchstkraft) die Federbeanspruchung vermindert und das Federgewicht vergrößert würde. Das würde aber eine unerwünschte Vergrößerung der Federträchtigkeit mit sich ziehen. Deshalb ist ein gewisser Kompromiß nicht zu vermeiden.

In dem Stabfederindikator von Ma i h a k (Abb. 30), der sich für schnelllaufende Maschinen gut bewährt hat, wird eine auf Biegung beanspruchte gerade, als Körper gleicher Festigkeit ausgebildete Meßfeder angewendet. Es ist deshalb lehrreich, diese Federgattung mit der gewöhnlich benutzten Schraubenfeder hinsichtlich Gewicht und Eigenschwingungszahl zu vergleichen. Für eine Biegefeder gleicher Festigkeit gilt¹ für den Zusammenhang zwischen Kraft P und Durchbiegung f folgende Beziehung:

$$P = \frac{2 E J}{l^3} f = c f$$

$$\text{Federungszahl} = c = \frac{2 E J}{l^3},$$

wobei E Elastizitätsmodul, J Trägheitsmoment am Ende der Einspannung, l Federlänge bedeutet.

Unter zwei Federn mit derselben Federungszahl hat diejenige die höhere Eigenschwingungszahl, deren Volumen und damit auch deren Gewicht, denselben Stoff vorausgesetzt, für eine gegebene Federungsarbeit kleiner ist. Die Federungsarbeit einer geraden Biegefeder von dreieckiger Form gleicher Festigkeit ist:

$$A = \frac{1}{6} \frac{\sigma_{zul}^2}{E} V_B$$

und für eine Schraubenfeder:

$$A = \frac{1}{4} \frac{\tau_{zul}^2}{G} V_S,$$

wobei V_B Rauminhalt der Biegefeder, V_S Rauminhalt der Schraubenfeder, E Elastizitätsmodul, für Stahl 2100000 kg/cm², G Gleitmodul, für Stahl

¹ Hütte 26. Aufl. Bd. 1 S. 665.

etwa 830000, σ_{zul} zulässige Spannung für Biegung, für Stahl etwa 5000 kg/cm², τ_{zul} zulässige Spannung für Drehung, für Stahl etwa 4000 kg/cm².

Mit diesen Werten ergibt sich:

$$V_B : V_S = 2,5 : 1.$$

Diese Rechnung zeigt eine entschiedene Überlegenheit der Schraubenfeder. Jedoch hat die Biegefeder für eine gegebene Durchbiegung ihres Endpunktes eine geringere Bewegung ihres Schwerpunktes, welcher Umstand die obige Überlegenheit annähernd aufhebt. Auf Grund einer strengen analytischen Untersuchung kommt O. Holm zum Ergebnis, daß die Eigenschwingungszahl einer Schraubenfeder nur wenig höher ist als die einer gleichwertigen Biegefeder mit Kreisquerschnitt, die als Körper gleicher Festigkeit ausgeführt ist. Und auch diese kleine Überlegenheit wird dadurch weiter vermindert, daß die Biegefeder eine kürzere Kolbenstange und eine leichtere Ausführung des Schreibgestänges ermöglicht als die Schraubenfeder. Andererseits ist die Krafrichtung nicht achsenrichtig, sondern gibt zu unerwünschten Seitendrücken Anlaß.

Für normale Indikatoren wird die Schraubenfeder wegen ihrer leichten Herstellung, des bequemen Einbaues und insbesondere ihrer genau axialen Kraftwirkung mit Recht vorgezogen.

6. Das Schreibgestänge hat die Aufgabe, die Bewegung des Kolbens vergrößert auf den Schreibstift zu übertragen. Die Vergrößerung kann 3-, 4-, 5-, 6-, 7-, 8- und 10fach sein; gewöhnlicherweise wird eine 6fache Vergrößerung angewendet. Das Schreibgestänge hat folgende Forderungen zu erfüllen:

a) Kinematische Forderungen. Die Schreibstiftbewegung muß geradlinig sein und genau parallel zur Kolbenbewegung und in jeder Kolbenstellung genau verhältnismäßig zu derselben erfolgen.

b) Dynamische Forderung. Die Teile müssen geringe Trägheit besitzen, um Trägheitsfehler in der Anzeige möglichst niedrig zu halten.

c) Entwurfsforderungen. Die Teile müssen kräftig gestaltet werden, um den Beschleunigungskräften ohne Bruch oder Verbiegung widerstehen zu können. Kleine Abmessungen erhöhen die Handlichkeit und schützen vor Beschädigungen. Gleitende Teile wie Zapfen und Lager sollen reichlich bemessen werden, um Verschleiß und dadurch Lockerung und totem Gang vorzubeugen.

Es werden einige Schreibzeuganordnungen beschrieben.

A. Der Lemniskatenlenker (Abb. 37) war geschichtlich der erste (Richards-Indikator, Abb. 4, S. 6). Der Schreibstiftweg ist eine Lemniskate, deren mittlerer Teil, in der Nähe des Umkehrpunktes, nur wenig von einer Geraden abweicht. Der Schreibstiftweg wird mit dem Kolbenweg verhältnismäßig, wenn die drei Punkte *S*, *A* und *O* in eine Gerade fallen. (Dann sind nämlich die Dreiecke *AOB* und *SOC* einander ähnlich.)

Nachteilig bei dieser Lenkeranordnung sind infolge des großen Abstandes zwischen den zwei Festpunkten O und O' die sperrigen Abmessungen; weiterhin die große bewegte Masse des Zwischengelenkes CD .

B. Der Ellipsenlenker (Abb. 38a) beruht auf folgendem Grundsatz: Wenn die Endpunkte A und S einer Strecke AS sich auf zwei geraden

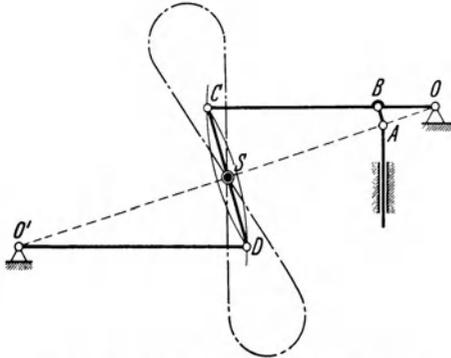


Abb. 37. Schreibwerk mit Lemniskatenlenker (Richards).

Linien x, y bewegen, die aufeinander senkrecht stehen, dann beschreibt jeder Punkt der Geraden AS je eine Ellipse, deren Hauptachsen auf x und y liegen. Umgekehrt: Wird der Punkt A auf einer Geraden x und ein anderer Punkt C auf einer Ellipse geführt, deren eine Hauptachse die Linie x ist, dann gibt es einen Punkt S auf der Geraden AC , welcher eine andere Gerade y beschreibt, die die andere

Hauptachse der Ellipse bildet. Der Halbierungspunkt c' der Strecke AS beschreibt hierbei einen Kreis.

Die Evans-Geradeführung entspricht diesem letzteren Sonderfall (Abb. 38b). In diesem wird der Punkt A auf einem Kreis-

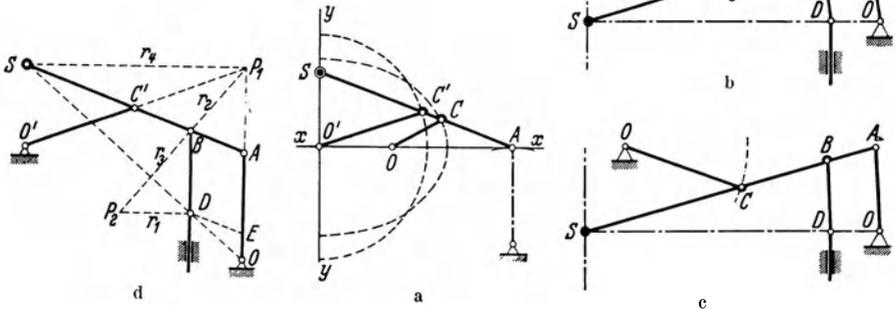


Abb. 38a—d. a Anordnung des Ellipsenlenkers; b unverkürzte, c verkürzte Ellipsenlenkeranordnung; d kinematische Verhältnisse des unverkürzten Ellipsenlenkers.

bogen geführt, der nur gering von der Geraden x abweicht, da die Bewegung nur gering ist. Deshalb weicht auch der Schreibstiftweg um ein Geringes von der Geraden ab. Die kinematischen Verhältnisse dieser Geradeführung wurden von Slaby, wie folgt, untersucht (Abb. 38d):

Der Geschwindigkeitspol P_1 des Lenkers AS liegt im Schnittpunkt von OA und $O'C'$. Der Geschwindigkeitspol P_2 der Stange BD liegt im Schnittpunkt von P_1B und der Senkrechten zur Kolbenbahn des Punktes D . Wenn nun die augenblickliche Geschwindigkeit des Kolbens

mit v_1 , die des Schreibstiftes S mit v_2 und die des Punktes B mit v_3 bezeichnet wird, so gelten die folgenden Gleichungen:

$$\frac{v_1}{v_3} = \frac{D P_2}{B P_2} = \frac{r_1}{r_3} \quad \text{und} \quad \frac{v_3}{v_2} = \frac{B P_1}{S P_1} = \frac{r_2}{r_4} \quad \text{daher} \quad \frac{v_1}{v_2} = \frac{r_1 r_2}{r_3 r_4}.$$

Aus dieser Untersuchung erhellt, daß die Schreibstiftbewegung der Kolbenbewegung verhältnismäßig ist, falls der Punkt D auf die Gerade OS zu liegen kommt. Dann wird:

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{OD}{OS} = \frac{ED}{AS} = \text{Konstante.}$$

Ein Nachteil dieser Geradföhrung ist, daß der Pol O' in die Schreibstiftbahn, Abb. 38 b, fällt. Es ist daher notwendig, den Pol außerhalb der Ebene der Schreibhebelbewegung zu verlegen, wodurch aber unerwünschte Biege- und Drehmomente entstehen. Aus diesem Grunde wurde es vorteilhaft gefunden, von den reinen kinematischen Forderungen noch weiter abzuweichen und den Pol außerhalb der Schreibstiftbahn zu verlegen: d. h. die Ellipsenbahn durch einen Kreisbogen zu ersetzen (Abb. 38 c). Trotz dieser Abweichungen von rein kinematischen Grundsätzen kann durch Wahl von zweckmäßigen Abmessungen eine zufriedenstellende Geradföhrung erreicht werden (Rosenkranz-Indikator, Abb. 6 und 28).

Wenn der Punkt A auf einem Kreisbogen (statt einer Geraden) geföhrt wird, so kann die genaue Geradföhrung des Schreibstiftes S dadurch erreicht werden, daß der Punkt C in einer von Punkt zu Punkt bestimmbarcn Schlitzkurve geföhrt wird (Abb. 39). Dadurch wird auch die Trägheitswirkung des Lenkers OC vermieden, aber unter Inkaufnahme vergrößerter Reibung und toten Ganges.

Verhältnismäßigkeit zwischen Kolbenweg und Schreibstiftweg wird dadurch erreicht, daß die drei Punkte: Schreibpunkt, Zapfen der Kolbenstange und Zapfen O des Schwinghebels AO in eine Gerade verlegt werden.

Die bisher behandelten Geradföhrungen besitzen die wünschenswerte Eigenschaft der Selbständigkeit, d. h. die Schreibpunktbahn ist unabhängig von der Geradföhrung der Kolbenstange eine Gerade. Das ist nicht der Fall bei dem Storchschnabelgetriebe.

Das Storchschnabelgetriebe (Pantograph) vergrößert die Bewegung des Kolbenstangenzapfens, bedingt also, daß der letztere selbst gerade geföhrt wird (Abb. 40). Dieses Getriebe wird in heutigen Indikatoren nicht mehr angewendet, wohl aber seine Abänderung:

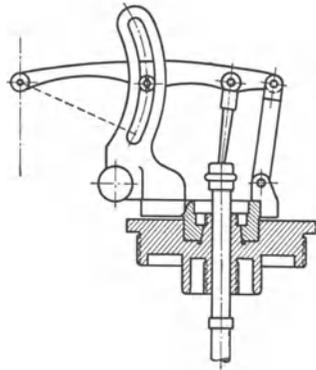


Abb. 39. Ellipsenlenkerschreibwerk mit Kurvenschlitzföhrung (Tabor-Indikator).

Das Crosby-Getriebe (Abb. 41) findet in mehreren Indikatoren Anwendung. In diesem wird ein Punkt C des Verbindungsgelenkes BD auf einem Kreisbogen geführt, der so bestimmt wird, daß mittels des Gegenlenkers $O'C$ die Schreibpunktbahn nur möglichst wenig von der gewünschten Geraden abweicht. Der Vorteil dieses Getriebes ist seine geringe Trägheit, auch lassen sich die Gelenke in die Nähe der Kolben-

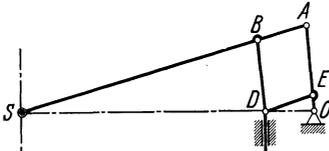


Abb. 40. Parallelogrammschreibwerk (Storchschnabel, Pantograph).

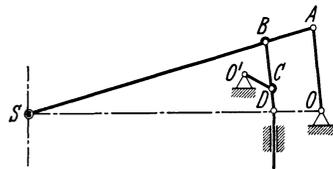


Abb. 41. Crosby-Schreibwerk (benutzt in den Indikatoren von Malhak, Lehmann und Michels, Geiger, de Juhasz).

stange verlegen. Die genaue Bestimmung der Abmessungen eines solchen Getriebes wird im folgenden beschrieben (Abb. 42).

Der Abstand $D_1 S_1$ der Kolbenstange von der Schreibpunktbahn ist durch die Abmessungen des Indikators gegeben. Die Lage O des Schwinghebelzapfens wird durch das gewünschte Vergrößerungsverhältnis m bestimmt:

$$OS_1 : OD_1 = m \text{ (in unserem Beispiel } m = 6\text{).}$$

Die Schwinghebellänge $OA = \frac{1}{4} OS_1$ ist willkürlich gewählt; diese soll nicht allzu lang sein, aber doch eine Bogenstrecke $AA_1 A_2$ ergeben, welche von einer Geraden nur möglichst wenig abweicht. Die

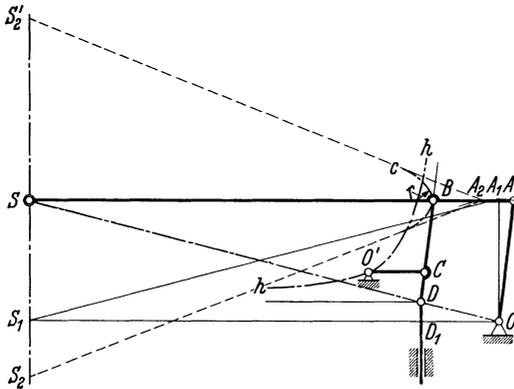


Abb. 42. Entwurf eines Crosby-Schreibwerkes.

Schreibhebellänge AS wird nun so gewählt, daß der Schwinghebel OA von seiner Mittellage OA_1 um etwa gleichen Winkel rechts und links (OA und OA_2) ausschwingt, während der Schreibpunkt von seiner Mittellage S in die obere (S'_2) und untere (S_2) Grenzlage bewegt wird. Die Länge der Verbindungsstange DB wird durch die Forderung der verhältnismäßigen Abbildung der Kolbenbewegung bestimmt, d. h.

$$\frac{OA}{BD} = \frac{m}{m-1};$$

hierbei ist m das Vergrößerungsverhältnis.

Es bleibt noch die Länge des Gegenlenkers $O'C$ und die Lage dessen Drehpunktes O' zu bestimmen. Der Punkt B der Verbindungsstange

beschreibt eine elliptische Bahn c ; der eine Halbmesser derselben ist SB , der andere Halbmesser BA . Der Krümmungsradius einer Ellipse am Ende des größeren Halbmessers (bei B) wird durch

$$r = \frac{AB^2}{BS}$$

gegeben; er hat seinen Mittelpunkt auf der größeren Ellipsenachse, wie in Abb. 42 gezeigt wird. Der andere Endpunkt D der Verbindungsstange beschreibt eine zur Schreibpunktbahn parallele Gerade, welche als ein Kreis von unendlichem Halbmesser aufgefaßt werden kann, dessen Mittelpunkt im Unendlichen liegt. Der Krümmungshalbmesser irgendeines Punktes C der Verbindungsstange ist umgekehrt proportional zu seinem Abstand von D , d. h.

$$\frac{\text{Krümmungshalbmesser zu } C}{\text{Krümmungshalbmesser zu } B} = \frac{DB}{DC}.$$

Die Krümmungsmittelpunkte liegen auf der Hyperbel h , deren zwei Asymptoten die Gerade DB und die durch D zur Kolbenbewegung gezogene Senkrechte sind. Irgendein Punkt dieser Hyperbel ist also der Krümmungsmittelpunkt der Bahn eines Punktes auf der Verbindungsstange, der mit dem Hyperbelpunkt durch eine, in Abb. 42 waagerechte Linie verbunden wird. Eine zweckmäßige Wahl für den geführten Punkt C ist:

$$DC = \frac{1}{3} DB,$$

welche eine bequeme Länge für den Gegenlenker $O'C$ ergibt.

Die Gelenke werden aus gutem Stahl hergestellt; ihre Formgebung soll den Biegungsbeanspruchungen Rechnung tragen. Wenn möglichste Verminderung der Trägheit angestrebt ist, wird der Schreibhebel als ein Rohr mit elliptischem Querschnitt ausgeführt (z. B. im Geiger-Indikator, hergestellt von Lehmann und Michels), wobei die Abmessungen in der Längsrichtung kegelig verjüngt werden.

Die Gelenkzapfen werden aus gehärtetem Stahl hergestellt, um Abnutzung und toten Gang zu vermindern, da jeder tote Gang an der Schreibspitze vergrößert zum Ausdruck kommt. Der tote Gang an der Schreibspitze darf in gut erhaltenen Indikatoren etwa 1% der Gesamtbewegung nicht überschreiten.

Die Festpunkte O und O' werden auf der Drehscheibe gelagert, welche um die Zylinderachse geschwenkt werden kann, so daß der Schreibpunkt mit der Trommel in Berührung gebracht oder davon entfernt werden kann.

Die Schreibzeuggelenke der Innenfederindikatoren und auch mancher Außenfederindikatoren werden in die Ebene der Zylinderachse gelegt. Falls die Gestaltung des Indikators diese Anordnung nicht zuläßt, wie z. B. bei den meisten Außenfederindikatoren, werden die Gelenke doppelt ausgeführt und symmetrisch zur Zylinderachse angeordnet. Diese Anordnung hat den Vorteil erhöhter Festigkeit und Widerstandsfähigkeit

gegen zufällige Beschädigungen. Vorteilhaft soll das Schreibzeug eine volle Umschwenkung ermöglichen, damit der Indikator sowohl als rechts- als auch linkshändiges Gerät gebraucht werden kann.

Bei manchen Indikatoren liegt das Schreibzeug außerhalb der Ebene der Zylinderachse. Diese Anordnung verursacht aber nachteilige Biegemomente und Seitenkräfte an der Kolbenstange und den verschiedenen Gelenken, wodurch die Reibung erhöht wird; sie ist daher nicht zu empfehlen.

Als Schreibspitze wird in neuzeitlichen Indikatoren eine Metall- oder Silberspitze angewendet. Diese ergibt eine feinere Linie als ein Bleistift und braucht nicht so oft angeschärft werden. Ein mit einem besonderen Überzug versehenes Diagrammpapier wird dabei angewendet.

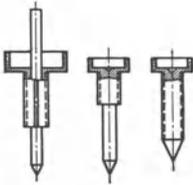


Abb. 43. Verschiedene Ausführungen der Schreibspitze.

Der Schreibstift wird in das Ende des Schreibhebels entweder eingeschraubt oder durch ein kleines Klemmfutter gesichert. Die Sicherung soll ein Loswerden unter den hohen Beschleunigungskräften verhindern, andererseits soll sie so leicht wie möglich sein, da die Masse des Schreibstiftes und des Klemmfutters mit dem Quadrat des Vergrößerungsverhältnisses zu multiplizieren ist. Einige Ausführungen der Schreibspitze zeigt Abb. 43. Die Gewichte von einigen ausgeführten Schreibspitzen wurden durch genaues Wägen zu 0,3, 0,1 und 0,065 g bestimmt. Deren auf die Kolbenachse bezogenes Gewicht ist dementsprechend — eine 6fache Vergrößerung vorausgesetzt — 11, 3,6 und 2,3 g. Der Unterschied zwischen der schwersten und der leichtesten Schreibspitze ist also über 8 g, und es lohnt sich dieses Gewicht zu sparen.

Der Schreibstift wird an das auf der Trommel befestigte Diagrammpapier durch einen an der Drehscheibe angeordneten Griffknopf ange-drückt. Die Bewegung wird durch eine im Griffknopf befestigte Einstellschraube begrenzt, welche gegen eine in den Trommelarm eingesetzte Anschlägsäule stößt. Das Andrücken des Griffknopfes geschieht von Hand; bei Indikatoren mit Fernbetätigung, wie Lokomotivindikatoren, wird die Andrückung durch einen Elektromagneten bewirkt.

7. Die Papiertrommel wird in der Trommelachse drehbar gelagert, letztere ist in den Trommelarm fest eingesetzt. Die Drehung wird durch eine Schnur gegen eine Rückdrehfeder bewirkt. Die letztere ist in heutigen Indikatoren eine Schraubenfeder; die früher übliche Spiralfeder wird nicht mehr angewendet. Die Drehung der Trommel wird durch Anschläge auf etwa 300 Grad beschränkt. Das Diagrammpapier wird an der Trommel durch zwei Klemmfedern festgehalten. Der Trommeldurchmesser beträgt in Indikatoren der Größe I, II und III etwa 50 bzw. 40 und 30 mm.

Die Trommel soll möglichst geringe Trägheit besitzen; deshalb wird sie meistens aus dünnem Stahl oder Messingrohr, manchmal auch aus Leichtmetall hergestellt. Der

Trommelboden ist meistens ein allseitig bearbeitetes

Bronzegußstück. Andererseits soll die Trommel zufälligen

Schlägen ohne Einbeulung widerstehen, da eine Einbeulung die Trommel unbrauchbar macht. Neuerdings wird

die Trommel auch aus Kunstharzstoff hergestellt (Indikator von De Juhasz, Abb. 27),

der sich sowohl wegen seiner Leichtigkeit (etwa $\frac{1}{3}$ des Gewichtes einer Metalltrommel gleicher Größe), als auch

wegen seiner Festigkeit vollaufbewährt hat. Bei manchen

Indikatoren wird der Trommelboden mit doppelter

Schnurrille ausgeführt zum Zweck, einen zweiten

Indikator durch eine Schnurverbindung betätigen zu können. Dieses Verfahren ist aber zu

verwerfen, da dadurch die Rückdrehfeder der ersten Trommel überlastet wird und ein

vergrößerter Fehler in der Verhältnisleichheit der Kolbenwegübertragung

entsteht. Manche Indikator-

trommeln sind mit einer Anhaltevorrichtung versehen, wodurch die Trommel

stillgesetzt werden kann, ohne die Schnurverbindung mit der

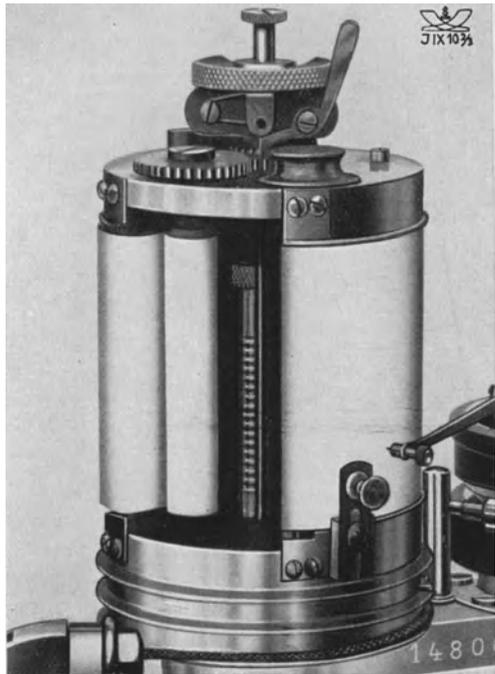
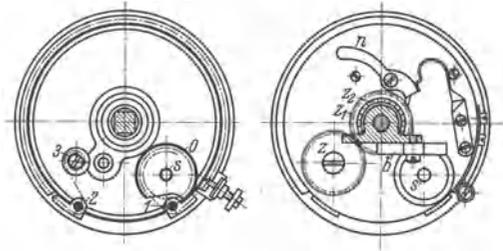
Maschine aushaken zu müssen.

Diese Vorrichtung soll das Abnehmen und Auflegen des Diagrammpapiers

insbesondere beim Indizieren schnelllaufender Maschinen erleichtern

(Abb. 20). Jedoch wird durch diese Vorrichtung die Trommelmasse

beträchtlich vergrößert, was gerade bei hohen Drehzahlen zu vermeiden



b

Abb. 44a u. b. Indikator-trommel für fortlaufende Diagramme (Maihak). Das die Förderrolle z betätigende Sperrklinkengetriebe $z_1 z_2$ kann mittels Hebels b in oder außer Wirkung gesetzt werden. Während die Trommel einmal hin- und herschwingt, wird das Papier etwa 1 cm weiterbefördert.

ist. In einer anderen Einrichtung wird die Trommel in einer Grenzlage durch eine Klinke festgehalten (Abb. 16); diese Anordnung verursacht keine Gewichtszunahme, hat aber den Nachteil, daß die Schnur bei jedem Hin- und Hergang schlaff wird, was unbequem und sogar gefährlich ist.

Es soll noch die Papiertrommel für fortlaufende Diagramme erwähnt werden (Abb. 44), die sich für die Untersuchung von Maschinen

mit stark wechselnder Belastung — vorausgesetzt, daß sie mit niedriger Drehzahl laufen — nützlich erwiesen hat. Ein etwa 4—5 m langer Papierstreifen wird von einer Vorratsspule ab- und auf eine Aufwickelspule aufgewickelt, wobei die Spulen durch eine Klinkenanordnung durch die Trommel selbst betätigt werden. Das Klinkenwerk kann auch außer Tätigkeit gesetzt

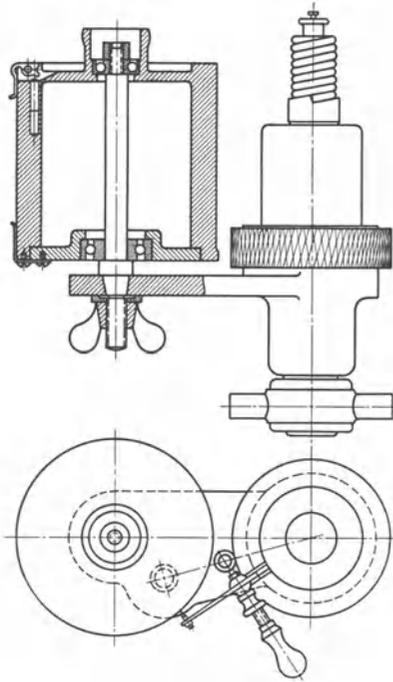


Abb. 45. Indikator mit freilaufender Trommel von großer Trägheit (Lehmann und Michels). Die Trommel wird mit der Hand angespannt. Bemerkenswert die sinnreiche Anordnung der Papierhaltefinger.

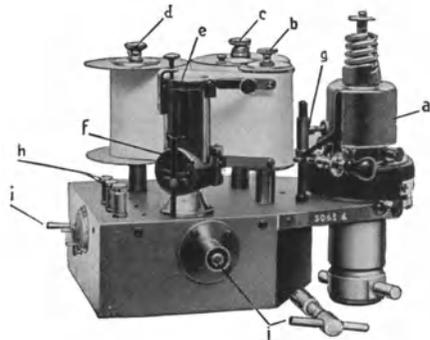


Abb. 46. Lehmag-Katalog Fig. 9. Indikator mit Trommel für fortlaufende Diagramme (Lehmann und Michels). *a* Indikator, *b* Umkehrwalze, *c* Aufwickeltrommel, *d* Abwickeltrommel, *e* Markengeber, *h* Anschlußklemmen, *i* Regler für Papiergeschwindigkeit.

werden, wobei dann die Trommel ohne Papiervorschub arbeitet wie eine gewöhnliche Trommel. Mit der Hilfe dieser sinnreichen Anordnung können auf dem Papierstreifen eine große Anzahl Diagramme in beliebigen Zeitabständen und ohne Abstellen des Indikatorantriebes aufgenommen werden. Diese Möglichkeit ist insbesondere bei Indikatoren mit Fernbetätigung, wie bei Lokomotivindikatoren, nützlich.

Um Zeitdiagramme eines Druckvorganges aufzunehmen, wurden Papiertrommeln gebaut, die eine gleichmäßige Drehung in einer Richtung ausführen. Die Trommelbewegung kann dabei entweder von Hand (wobei die Trommel mit möglichst großer Trägheit ausgeführt wird, Abb. 45)

oder durch ein Uhrwerk mit einstellbarer Geschwindigkeit (Abb. 46 und 47) oder einen Elektromotor erfolgen. Für die Untersuchung eines einzelnen Druckvorganges sind hohe Papiergeschwindigkeiten (30—150 m/min) notwendig; für die Aufzeichnung der einander folgenden Maximaldrücke (Druckspitzen) wird eine niedrige Geschwindigkeit (0,5—2 m/min) angewendet (Mathot-Trommel). Zweckmäßig werden solche Trommeln mit Markenschreiber zum Markieren bestimmter Punkte und auch mit Zeitmarkengebern für die Markierung von Zeitabständen ausgerüstet.

Für die Aufnahme von Druck-Kurbelwegdiagrammen kann die Trommel durch Schnurantrieb von der Maschinenkurbelwelle angetrieben werden.

8. Die Schnurführungsrolle wird im Rollenhalter auf einem Zapfen (oder auch in einem Kugellager, im de Juhasz-Indikator) leicht drehbar gelagert, und der Rollenhalter selbst wird im Rollenhaltwinkel um eine Tangente der Trommelrille als Drehachse drehbar angeordnet. Der Rollenhaltwinkel kann um die Trommelachse gedreht und in der gewünschten Lage festgeklemmt werden. Die Trommelachse kann wiederum um die Zylinderachse gedreht und

in der gewünschten Lage festgeklemmt werden. Diese Einstellmöglichkeiten dienen zum Zweck, die Schnurführungsrolle derart einstellen zu können, daß einerseits die Schnur in die gemeinsame Tangente der Schnurrolle und der Trommelrille, andererseits die Schnurrichtung von dem

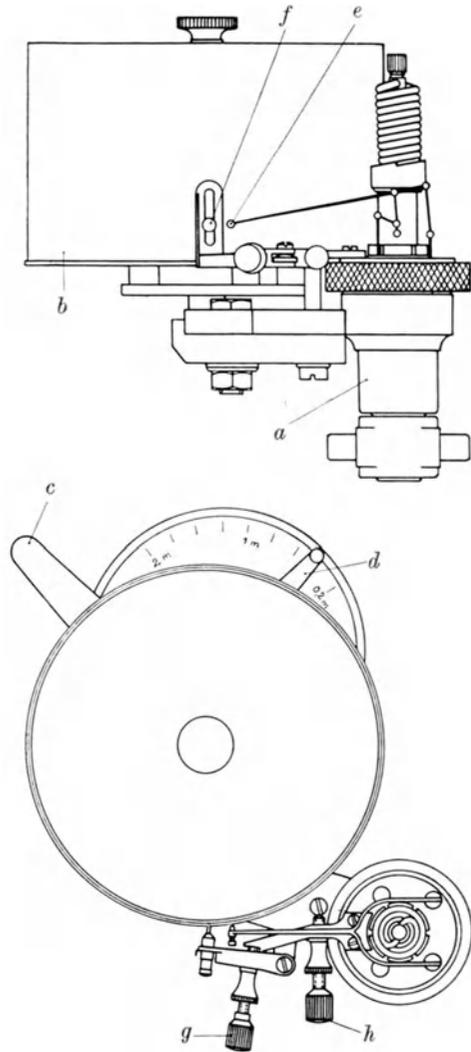


Abb. 47. Trommelwerk mit Uhrwerkantrieb (Maihak). *a* Indikator; *b* Trommel mit Laufwerk; *c* Aufzugshebel für das Laufwerk; *d* Regulierhebel für die Papiergeschwindigkeit; *e* Drucklinienschreiber; *f* Nulllinienschreiber; *g, h* Andrückknöpfe für *e* und *f*.

Hubverminderungsgetriebe in die Ebene der Schnurrolle zu liegen kommt. In dieser Stellung kommt also die Schnurrolle in die durch zwei sich schneidende Tangenten bestimmte Ebene zu liegen. Diese Forderung läßt noch einen Freiheitsgrad für die Stellung der Schnurrolle. Aus den

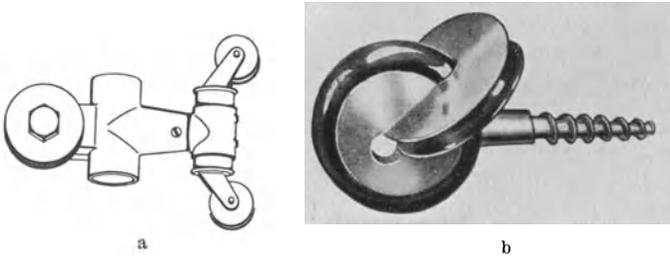


Abb. 48 a u. b. Schnurführungsrollen. a Lehmann und Michels; es werden zwei Rollen angewendet, welche um die Schnur als Achse drehbar angeordnet sind und eine Schnurführung in einer beliebigen Richtung erlauben. b Dobbie-McInnes; es wird eine einzige Rolle angewendet, deren Drehachse durch einen Ring gebildet wird.

vielen möglichen Stellungen ist nun eine solche Stellung zu wählen, bei welcher die beiden Tangenten einen möglichst stumpfen Winkel einschließen und die Gesamtlänge der Schnur vom Hubverminderungs-

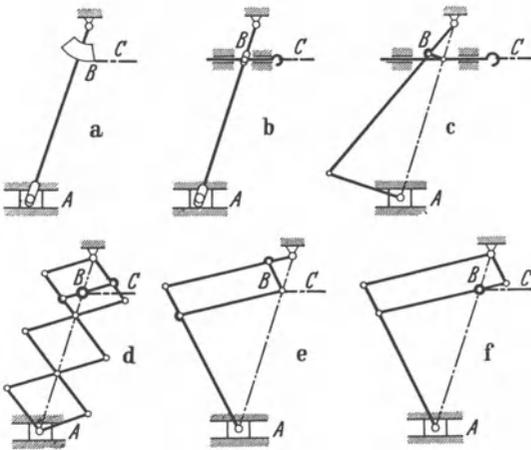


Abb. 49 a-f. Verschiedene Ausführungsformen des Hebel-Hubverminderers. a Gleitblock *A* und Kreisabschnitt *B*, Ableitungsrichtung *C*; b zwei Gleitblöcke *A* und *B*; c zwei Gleitblöcke mit kurzen Pleuelstangen; d, e und f Abarten von Parallelogramm-Hubvermindernern.

getriebe bis zur Trommel ihren Mindestwert hat. In dieser Stellung wird die auf den Indikator einwirkende Schnurkraft am geringsten.

Bei früheren Indikatoren wurden zwei Schnurrollen angewendet, um ein Abgleiten der Schnur zu vermeiden. Tatsächlich ist aber nur eine Schnurrolle nötig, da die Schnur von einer richtig eingestellten Schnurrolle nicht abfallen kann, vorausgesetzt, daß sie in keinem Punkt ihrer

Bewegung schlaff wird. Deshalb wird bei neueren Indikatoren nur eine Schnurrolle angewendet, welche aber einen möglichst großen Durchmesser und eine tiefe Einkerbung besitzt.

Es ist darauf zu achten, daß die Schnur von dem Hubverminderungsgetriebe zur Trommel auf kürzestem Wege und möglichst ohne Richtungs-

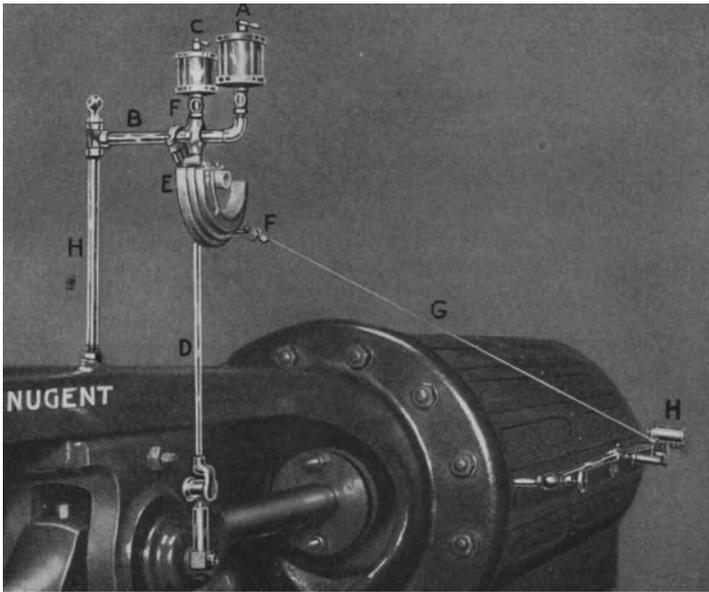


Abb. 50. Hubverminderer mittels Kreisabschnitt (Wm. W. Nugent and Co.), welcher gleichzeitig als Öler für den Kreuzkopffzapfen dient; es sind vier Kreisabschnitte vorgesehen, um die Diagrammlänge beliebig einstellen zu können: *E* Kreisabschnitte; *F* Schnurführungsrolle; *G* Schnur; *H* Indikator.

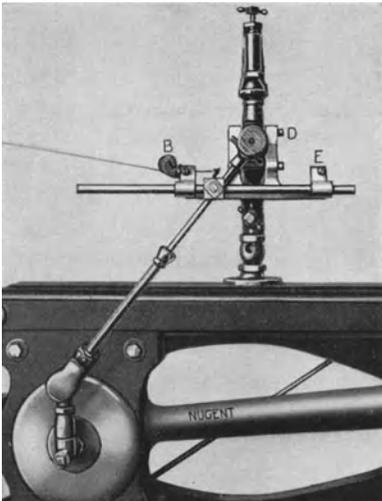


Abb. 51. Eine andere Ausführung des Hubverminderers von Nugent; der Posaunenrohrler ist klar ersichtlich.

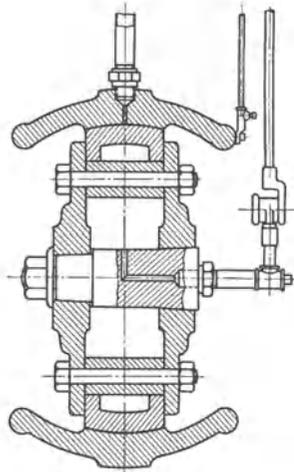


Abb. 52. Einzelheiten der Schmierölauführung zum Kreuzkopffzapfen.

wechsel geführt wird. Sind Richtungswechsel notwendig, sind an den Kehrpunkten Schnurleitrollen anzuwenden (Abb. 48a und b).

9. Der Antrieb der Papiertrommel. Es wird gefordert, daß die Winkelbewegung der Trommel verhältnismäßig mit derjenigen Veränderlichen (Zeit, Kurbelwinkel, Kolbenweg) sein soll, als deren Funktion die Druckaufzeichnung erwünscht ist.

Meistens wird ein Druck-Kolbenweg (d. h. Druck-Volumen)-Diagramm gesucht. Da der Kolbenhub der Maschine größer ist als der einem Winkel von 300 Grad entsprechende Teil des Trommelumfangs, so muß zwischen beiden eine Einrichtung eingeschaltet werden, welche die Kolbenbewegung möglichst genau verhältnismäßig vermindert. Diese Einrichtung

ist der **Hubverminderer**, von dem es drei verschiedene Ausführungen gibt, nämlich:

1. mit Hebel (Hebelhubverminderer),
2. mit Rolle (Rollenhubverminderer),
3. mit Kurbel (Kurbelhubverminderer).

Die ersten zwei Typen leiten die Bewegung von einem schwingenden Teil der Maschine, meistens vom Kreuzkopf oder vom Kolben selbst ab. Die dritte Type leitet die Bewegung von der Kurbel- oder Nockenwelle

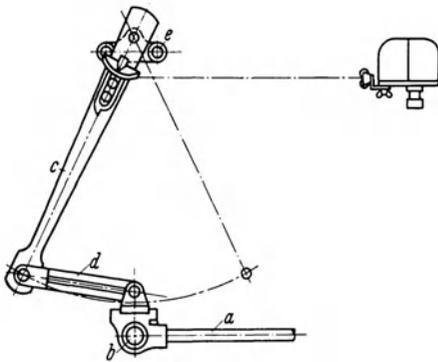


Abb. 53. Einzelheiten eines Hubverminderers für Lokomotiven (M a i h a k). Der hölzerne Hebel wird mit Metallbeschlägen und Lagerbüchsen ausgerüstet.
a Kolbenstange, *b* Kreuzkopf, *c* Schwinghebel, *d* Lenker, *e* Befestigung der Drehachse.

ab. Grundsätzlich kann die gewünschte Verhältnismäßigkeit mit jeder der drei Typen — sorgfältige Gestaltung vorausgesetzt — erreicht werden.

Einige Beispiele der Hebel-Hubverminderer sind in den Abb. 49 angegeben. *A* bedeutet hierbei den am Kreuzkopf befestigten Zapfen, *B* den Punkt, an welchem die Trommelschnur befestigt wird; *C* gibt die Schnurrichtung in der Anfangsstellung an (Abführungsrichtung der Schnur). Die Hebel werden meistens aus Hartholz hergestellt, aber auch aus Metall. Toter Gang in den Gelenken muß vermieden werden. Diese Art Hubverminderer wird gewöhnlich besonders für eine bestimmte Maschine hergestellt und ihren Abmessungen angepaßt. Die Abb. 50, 51 und 52 zeigen eine sinnreiche Einrichtung, welche in sich die Wirkung eines Kreuzkopffölers mit der eines Hubverminderers vereinigt. Abb. 53 zeigt einen Hubverminderer für eine Lokomotive.

Als Beispiel eines sorgfältigen Entwurfs sollen zwei Hubverminderer von Sass eingehend beschrieben werden. Abb. 54 und 55 zeigen das Indiziergestänge einer kleineren Viertakt-Tauchkolbenmaschine, bei welchem aus räumlichen Gründen auf eine genau verhältnismäßige Abbildung der Kolbenbewegung verzichtet werden mußte. Der Hub des Arbeitskolbens wird durch den Lenker *c* von 450 mm auf etwa 70 mm

verkleinert. Für genaue Proportionalität müßte die Lenkerstange *e* in demselben Verhältnis kürzer als die Stange *b* sein. Die dazu notwendige Führung konnte aber nicht so niedrig angeordnet werden. Daher wurde die Lenkerstange *e* länger gemacht. Die daraus für die indi-

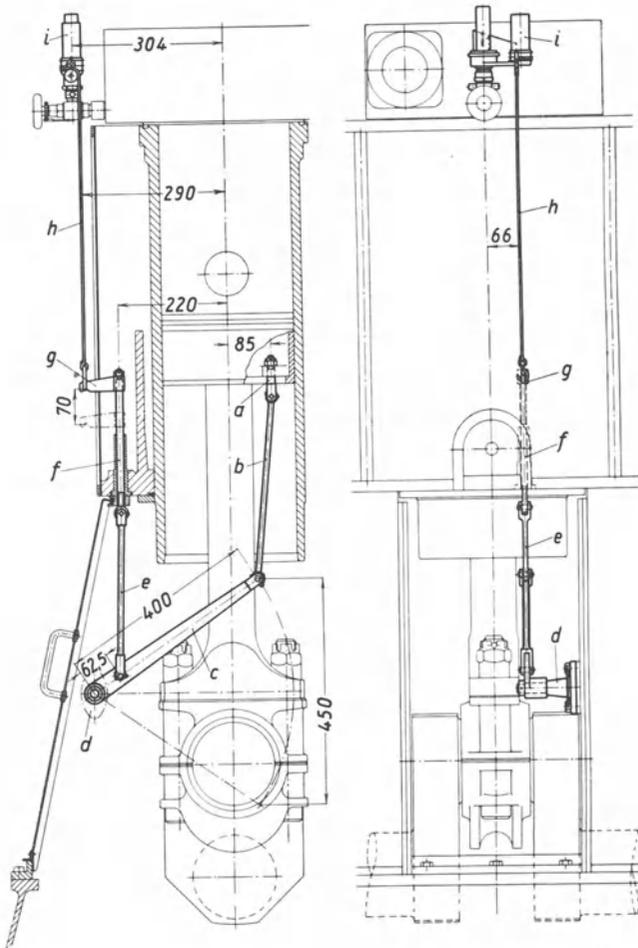


Abb. 54. Indiziergestänge einer Viertakt-Tauchkolbenmaschine (Sass).
a-g Antriebsgestänge, *h* Schnur, *i* Indikator.

zierte Leistung erwachsende Ungenauigkeit macht aber nur etwa 0,4% aus, welche wesentlich geringer ist als die Ungenauigkeit des Planimetrierens der Diagramme und die von der Schnurdehnung herführende Fehlerquelle.

Bei der in den Abb. 56 und 57 dargestellten Indiziervorrichtung einer großen doppelwirkenden kompressorlosen Zweitaktmaschine besteht eine genaue Proportionalität zwischen der Bewegung des Arbeits-

kolbens und der Mitnehmerstange *e*. Es ist bemerkenswert, daß die Mitnehmerstange *e* als starres Element die verkleinerte Kolbenbewegung bis

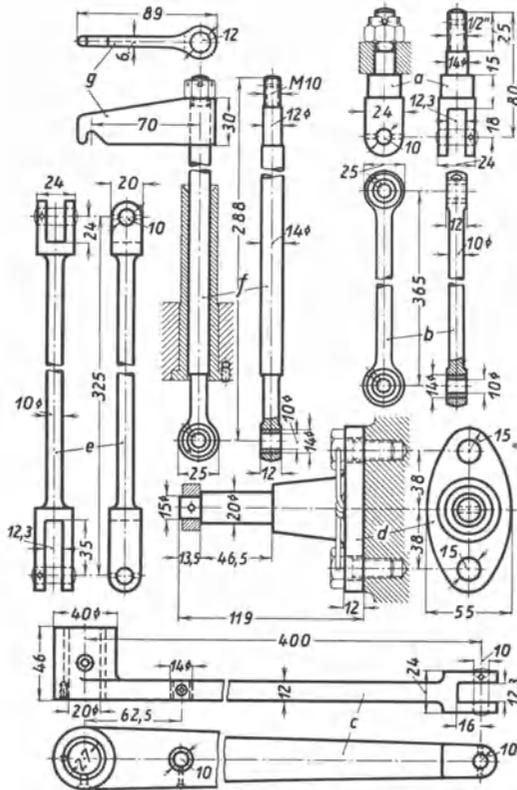


Abb. 55. Einzelteile zum Indiziergestänge. Der Augbolzen *a* wird in einen am unteren Ende des Kolbens angegossenen Flansch stramm eingepaßt und durch eine Kronenmutter mit Splint befestigt; sein Querbolzen wird ebenfalls durch Splint gesichert. An *a* greift die Lenkerstange *b* an, deren Augen mit Bronzebuchsen versehen sind; die Schmierlöcher sind so angeordnet, daß vom Kolben abgespritztes Schmieröl hineintreffen muß. Der Querschnitt des Lenkers *c* muß ein etwas größeres Widerstandsmoment erhalten, da er durch den Trägheitswiderstand auf Biegung beansprucht wird. An seinem unteren Ende ist ein kräftiges Auge angeschmiedet, das mit einer Bronzebüchse ausgefüllt und mit Schmierloch und Schmiernut versehen ist; auch das Auge, in welchem das untere Ende der Lenkerstange *e* angreift, erhält eine Bronzebüchse. Der Lenker *c* schwingt um einen am Bock *d* befestigten Zapfen, der mit seinem ovalen Fuß aus einem Stück geschmiedet und kräftig gehalten ist, da er größere Biegungsbeanspruchungen erfährt. Ein am freien Ende von *d* durch einen Splint gesicherter Stellring verhindert das Abgleiten des Hebels *c*. Die Lenkerstange *e* ist an ihrem unteren und oberen Ende gegabelt und in den Gabeln ist je ein Bolzen mittels Splint befestigt. Das obere Gabelende greift an der Mitnehmerstange *j* an, deren unteres Ende ausgebuchst und mit Schmierloch versehen ist, während auf dem oberen, abgesetzten Ende der Mitnehmer *g*, in den der Haken der Indikatorschnur gehängt wird, durch eine Kronenmutter mit Splint befestigt wird. Alle Teile sind aus Stahl geschmiedet.

zur Höhe des oberen Zylinderdeckels überträgt, so daß man beide, die obere und untere Indikatortrommel mittels kurzer Schnurstücke antreiben kann, wodurch die Schnurdehnungsfehler verringert werden. Es ist notwendig, insbesondere bei großen Maschinen darauf zu achten, daß

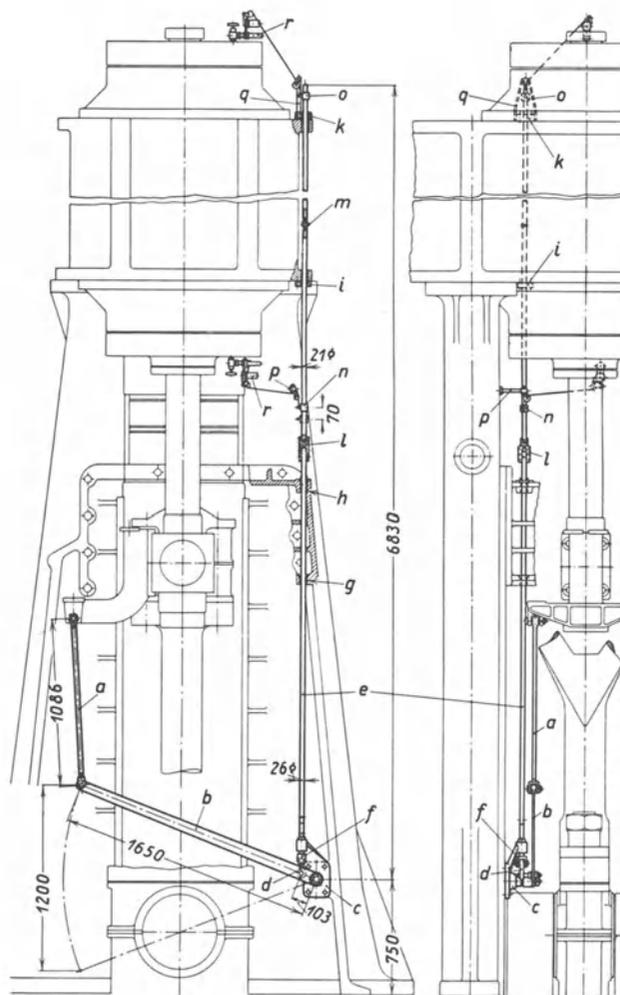


Abb. 56. Indiziergestänge einer großen doppelwirkenden kompressorlosen Zweitaktmaschine (Saas). Die Mitnehmerstange *e* erhält eine Gesamtlänge von etwa 6,5 m, so daß es für die Montage vorteilhaft wird, sie zu unterteilen; sie ist als nahtlos gezogenes Rohr von 21 mm \varnothing und 3 mm Wandstärke ausgeführt, wodurch ihr Gewicht vermindert wird. In das untere Ende ist eine Gabel *f* mit halbzölligem Rohrgewinde eingeschraubt und mit der Mitnehmerstange durch einen Stift vernietet. Unmittelbar über der Gabel ist die Stange durch ein mit Bronzebuchse versehene Halslager geführt, das am Bock *c* angegossen ist. Auch an den Stellen *g* und *h*, wo die Stange den oberen Abschlußdeckel des Kurbelgehäuses durchdringt, ist sie in Bronzebuchsen geführt. Je eine weitere Führung befindet sich bei *i* und *k*; hier gleitet die Stange in Bronzebuchsen, die in je einen am Zylinderrahmen angeschraubten Flansch gepreßt sind. Die Flanschen *i* und *k* liegen 2,7 m voneinander entfernt. Die Mitnehmerstange *e* ist dreiteilig; an den Stellen *l* und *m* befinden sich Kupplungen zur Verbindung der Stangenteile. Die untere Kupplung *l* ist besonders kräftig ausgeführt, denn sie hat nicht nur die beiden unteren Stangenteile miteinander zu verbinden, sondern dient auch zum Antrieb der Zylinderschmierpressen. Die obere Bohrung von *l* ist mit Rohrgewinde versehen; hier wird der mittlere Teil der Mitnehmerstange eingeschraubt und durch einen Stift vernietet. Die gleiche Befestigungsart wird für die obere Stangenkupplung *m* angewendet, welche aus einem Gewindestück besteht, das zum Einschrauben mit einem schmalen Sechskant

Fortsetzung auf S. 46 unten.

die Schnur so kurz wie möglich gehalten wird, da sonst das Diagramm unzulässig verzerrt werden kann.

Verschiedene Ausführungen der Rollenhubverminderer sind an beliebige Maschinen anpaßbar. Sie bestehen aus zwei Rollen, die auf dieselbe Welle aufgekeilt sind. Die große Rolle wird durch Schnurantrieb vom Maschinenkreuzkopf angetrieben, während die kleine Rolle durch

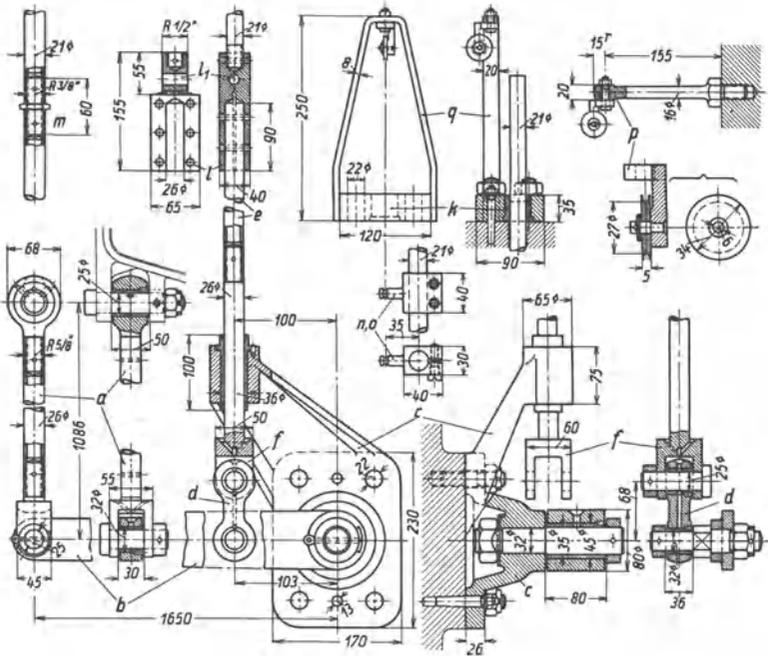


Abb. 57. Einzelteile zum Indiziergestänge.

eine andere Schnur die Indikatortrommel antreibt. Bei den meisten derartigen Hubverminderern wird eine Rückdrehfeder angewendet. Andere werden ohne Feder gebaut und die Rückbewegung wird durch die Indikatortrommelfeder bewirkt. Die kleine Rolle ist auswechselbar, um das Gerät langen und kurzen Maschinenhuben anpassen zu können. Einige Beispiele zeigen die Abb. 58—60. Diese Rollenhubverminderer

versehen ist und durch zwei Stifte mit den Rohrenden vernietet wird. Auf der Mitnehmerstange *e* sind in passender Höhe die Klemmstücke *n* und *o* befestigt, die je einen mit Rille versehenen Stift tragen, in den die Indikatorscheur gehängt wird. Auf der Zylinderunterseite wird in den neben der Mitnehmerstange liegenden Ständer der Rollenhalter *p* geschraubt; die Rolle zur Führung der Indikatorscheur läuft auf einem in ein Winkelstück eingienieteten Zapfen, das Winkelstück wird schwenkbar gegen *p* geklemmt, so daß die Mittelebene der Rolle in die Richtung der Schnur gedreht werden kann. Auf der Zylinderoberseite besteht der Rollenhalter aus einem aus Flacheisen gebogenen Bügel *q*, der mit dem Führungsstück *k* verschweißt ist. Auf dem Bügel wird ein gleiches Winkelstück mit Rolle wie bei *p* so festgeklemmt, daß die Schnur nicht von der Rolle abgleiten kann.

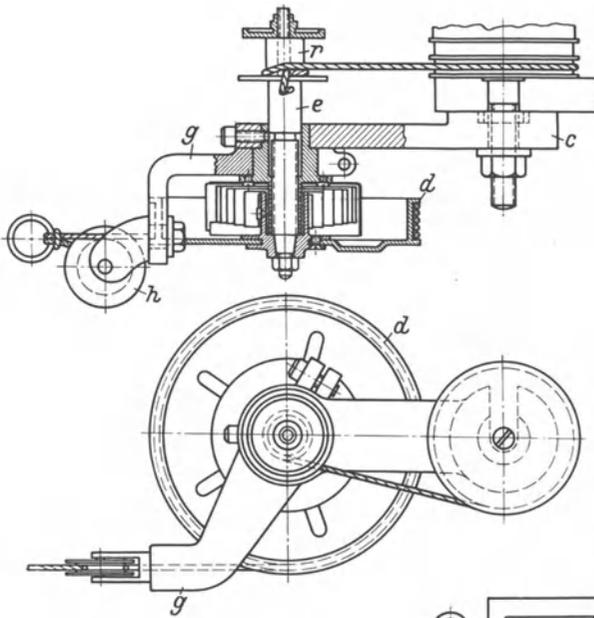


Abb. 58.

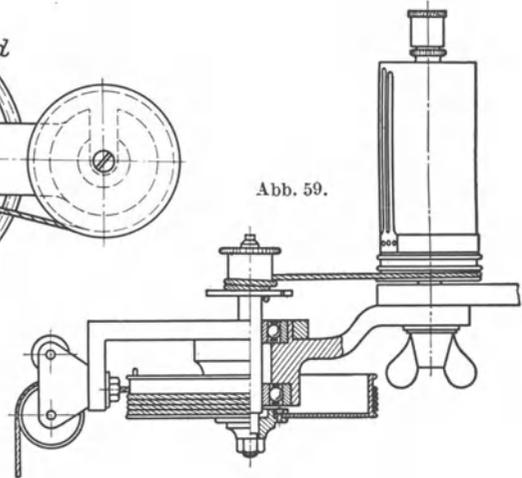


Abb. 59.

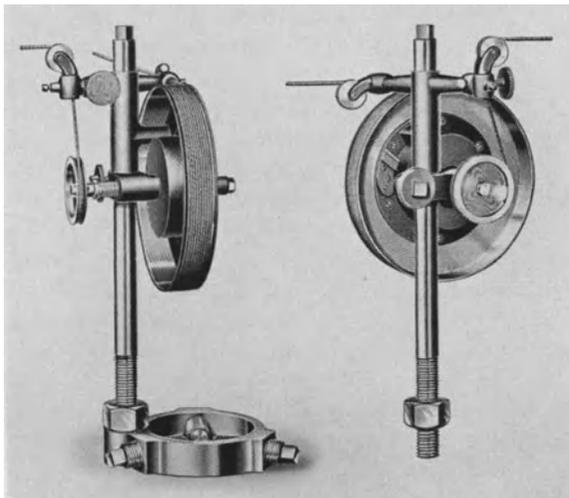


Abb. 60.

Abb. 58–60. Verschiedene Formen des Rollenhubverminderers.

Abb. 58. Maihak. *c* Arm; *d* große Rolle; *e* Welle; *g* Leitrollenträger; *h* Leitrolle; *r* kleine Rolle.

Abb. 59. Lehmann und Michels. Abb. 60. Schaeffer und Budenberg.

sollen starr sein und möglichst geringe Trägheit besitzen; aus diesem Grunde werden die Rollen oft aus Leichtmetall hergestellt. Ein Vorteil derselben ist ihre Anpassungsfähigkeit an verschiedene Maschinen, da der Rollenhubverminderer eher als ein Bestandteil des Indikators als der Maschine zu betrachten ist; ein Nachteil steht in der großen Schnurlänge, der großen Schnurgeschwindigkeit und daher auch

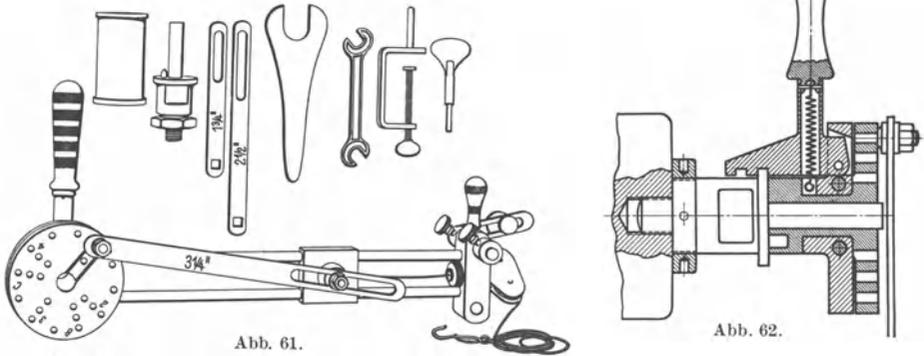


Abb. 61. Hubverminderer-Kurbeltrieb (Graham-Schaeffer und Budenberg) mit veränderbarem Pleuelstangenverhältnis und ausrückbarer Kupplung.

Abb. 62 zeigt den Schnitt durch die ausrückbare Kupplung, mittels welcher es möglich ist, den Trommelantrieb während des Maschinenlaufes stillzusetzen und falls erwünscht, die Phase zu verändern.

hohen Beschleunigung, welche zu einer beträchtlichen Verzerrung des Wegmaßstabes Veranlassung geben kann.

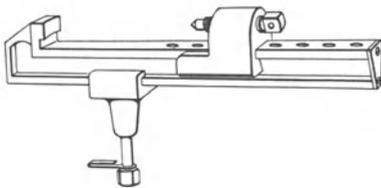


Abb. 63. Einstellbare Hubverminderer-Kurbel von Graham, welche mittels Klemmschraube am Wellenende der zu untersuchenden Maschine befestigt werden kann. Die Außenmittigkeit der Kurbel kann beliebig eingestellt werden.

Der Kurbelhubverminderer ist ein verkleinerter Kurbeltrieb, welcher dem Kurbeltrieb der zu untersuchenden Maschine geometrisch ähnlich ist. Er hat den Vorteil, daß die Bewegungen aller Teile verkleinert werden, was der Sicherheit, Abnutzung und der Trägheitseinflüsse wegen günstig ist. Weiterhin ermöglicht diese Art Hubverminderer die Aufnahme von versetzten Diagrammen,

was mit den anderen Typen nicht möglich ist. Er erfordert aber eine große Sorgfalt in der Einstellung, damit zwischen dem Kurbeltrieb der Maschine und dem Kurbeltrieb des Hubverminderers kein Phasenunterschied¹ auftritt. Die Anwendung dieses Hubverminderers ist aber nur an solchen Maschinen möglich, bei welchen ein freies zugängliches Wellenende vorhanden ist. Einige Beispiele zeigen die Abb. 62 und 63.

¹ Siehe Abschnitt: Fehlerhafte Diagramme.

Diese Art Hubverminderer wurde für schnelllaufende Maschinen von einigen Firmen (H. Maihak und Lehmann & Michels) (Abb. 64 und 65) sehr sorgfältig durchgebildet und ermöglicht die Einstellung des ge-

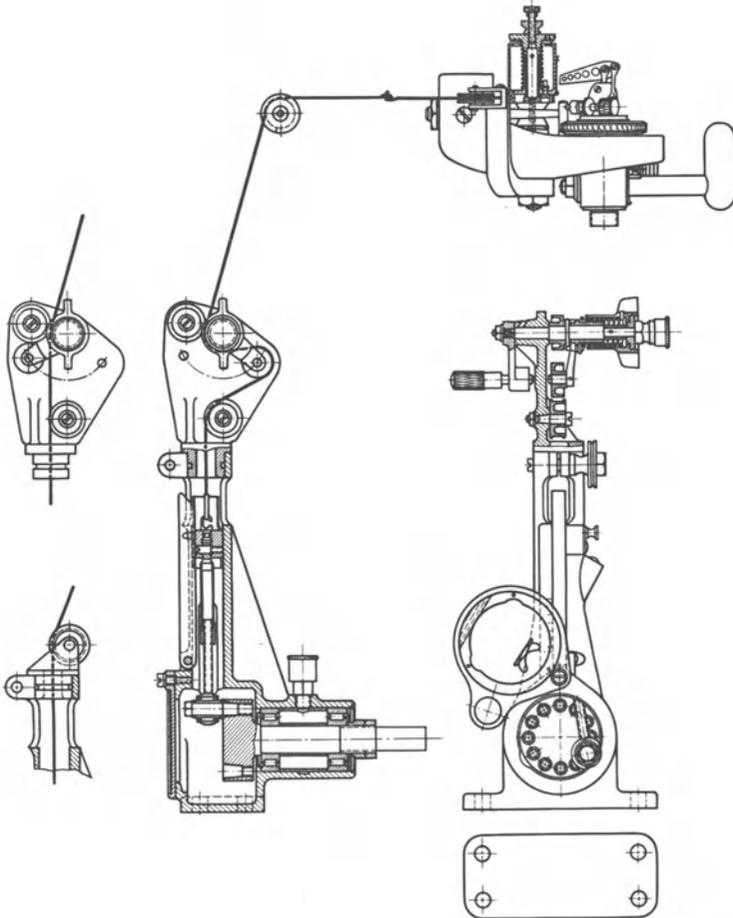


Abb. 64. Trommelantrieb zum Maihak-Stabfeder-Indikator. Das Kurbelgetriebe läuft im Öl. Die Länge der Schubstange ist zwischen $z/r = 6$ und $z/r = 4$ einstellbar. Das antreibende Stahlband ($8 \times 0,5$ mm) wird am Kreuzkopf der Antriebsvorrichtung eingehängt. Die Verbindung mit der Maschinenwelle erfolgt durch eine Flanschkupplung, deren beide Flanschen von 30 zu 30° eingestellt werden können. Die Anhaltevorrichtung besteht aus einigen Leitrollen und einem Schwenkhebel. Dieser kann in zwei Stellungen gebracht werden. In der einen Stellung läuft das Stahlband ungehindert zwischen den Leitrollen hindurch und setzt die Trommel in Bewegung. In der anderen Stellung treibt das Stahlband den Schwenkhebel hin und her, wobei die Trommel stehen bleibt.

wünschten Verhältnisses Schubstangenlänge zu Kurbelradius, die Stillsetzung ohne Abstellung der Maschine und die Änderung der Phaseneinstellung (von unversetzten zu versetzten Diagrammen). In manchen Fällen wird die Schubstange weggelassen und die Schnur unmittelbar an der Kurbel eingehängt. Diese Einrichtung entspricht etwa einer sehr

großen Schubstangenlänge und verursacht einen Fehler in der Verhältnismäßigkeit der Trommelbewegung und der Kolbenbewegung der Maschine. Der begangene Fehler ist um so größer, je kleiner in der Maschine das Verhältnis Schubstangenlänge zu Kurbelradius ist (Abb. 66).

Die Schnurverbindungen sollen möglichst gerade und kurz sein. Die Schnur



Abb. 65. Hubverminderer von Lehmann & Michels für den Schnellläuferindikator, mit einstellbarem Treibstangenverhältnis z/r und einstellbarer Phasenstellung.

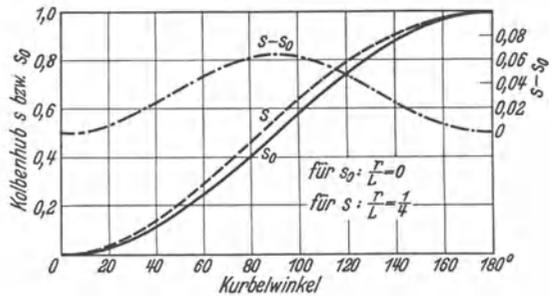


Abb. 66. Fehlergröße der Trommelbewegung, wenn bei einem Schubstangenverhältnis von $r/l = 1/4$, die Trommel durch eine lange Schnur ($r/l \sim 0$) von der Hubverminderer-Kurbel angetrieben wird.

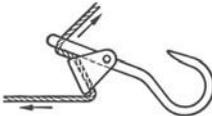


Abb. 67.



Abb. 68.

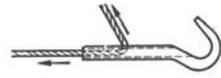


Abb. 69.

Abb. 67–69. Verschiedene Hilfswerkzeuge, d. h. Fanghaken, Schnurspannhaken und Aushängehaken für die Handhabung der Indikatorscheur während Indizierung.

soll biegsam und möglichst wenig dehnbar sein (Litzenschnur). Geflochtene Schnur ist der gezwirnten vorzuziehen. Einige Haken und Hilfswerkzeuge zeigen die Abb. 67, 68 und 69.

III. Optische Indikatoren.

Übersteigt die Änderungsgeschwindigkeit des Druckes ein gewisses Maß, wie es in sehr hoctourigen Motoren und bei Bombenexplosionen der Fall ist, so können mechanisch vergrößernde Indikatoren dem Druckvorgang nicht mehr mit befriedigender Genauigkeit folgen. Beide Meßbewegungen des Gerätes, sowohl für das Messen des Druckes als auch des Kolbenweges werden bei optischen Indikatoren äußerst verkleinert, um genügend hohe Eigenschwingungszahl zu erreichen. Die so erhaltenen Meßbewegungen werden dann durch optische Mittel vielfach vergrößert. Je nach der Art und Weise der Vergrößerung unterscheidet man Mikroindikatoren,

in welchen das kleine Diagramm nachträglich, durch mikroskopische Mittel vergrößert, beobachtet oder photographiert wird, und Spiegelindikatoren, in welchen die kleinen Meßbewegungen im Gerät selbst,

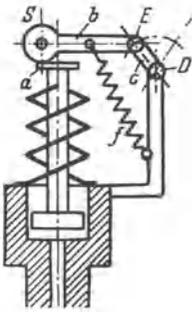


Abb. 70.

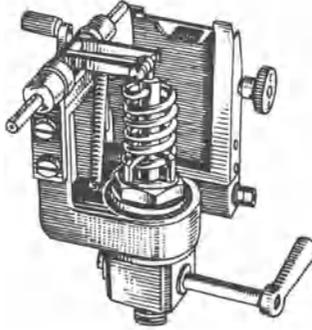


Abb. 71.

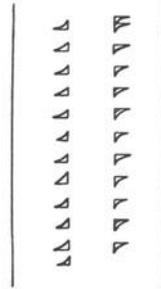


Abb. 72.

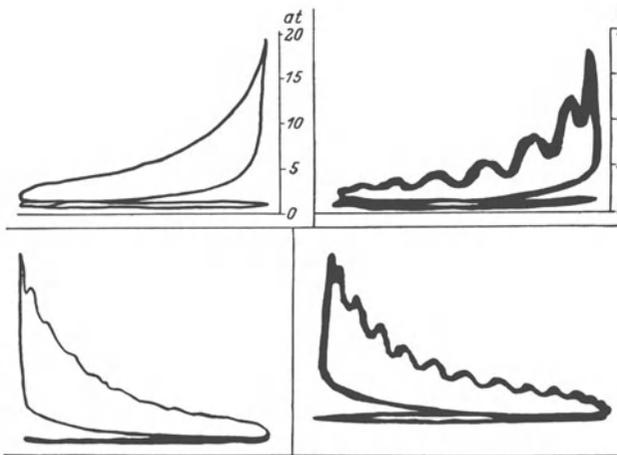


Abb. 73.

Abb. 70–73. Der Mikroindikator nach Mader (Gebrüder Staerzl, München). Abb. 70 zeigt die Prinzipskizze und Abb. 71 die vollständige Ausführung. Die kurze Kolbenstange trägt eine Plattform *a*, an welcher das kreisförmige, die Stahlspitze tragende Ende *S* des Schreibhebels *b* eine Gleitbewegung ausführen kann. Eine Feder *f* drückt den Schreibhebel *b* gegen die Plattform *a*. Der von der untersuchten Maschine angetriebene Hebel *c* erteilt dem Schreibhebel *b* eine dem Maschinenkolben verhältnismäßige Bewegung. *E* und *D* sind Gelenke. Die im Mittelpunkt der Scheibe *S* sitzende Stahlspitze beschreibt also die resultierende Bewegung der Druckmeßkolbenbewegung und der Wegmeßhebelbewegung, welche ohne Vergrößerung auf eine berußte Glasplatte eingeritzt wird. Durch Verschieben der Glasplatte können auf ihr 24 Diagramme nacheinander aufgezeichnet werden. Eine solche Platte zeigt Abb. 72, einige vergrößerte Diagramme sind in Abb. 73 dargestellt.

mittels eines Lichtstrahles vergrößert und photographisch aufgezeichnet werden. Diese Geräte erreichen im allgemeinen nicht die Einfachheit und Zuverlässigkeit der mechanisch vergrößernden Indikatoren und setzen für deren Handhabung und für die Auswertung der Diagramme eine gewisse Erfahrung und Fachkenntnis heraus. Mehr oder weniger können diese Geräte als Laboratoriumsgeräte betrachtet werden.

A. Mikroindikatoren.

Das erste derartige Gerät wurde 1912 von O. Mader ersonnen (Abb. 70—73). Eine Stahlspitze dient als Schreibstift, welcher das Diagramm auf eine stillstehende, berußte Glasplatte aufzeichnet. Der Schreibstift führt sowohl die Bewegung für das Messen des Druckes als auch jene für den Kolbenweg aus. Durch Änderung der Lage der Glasplatte

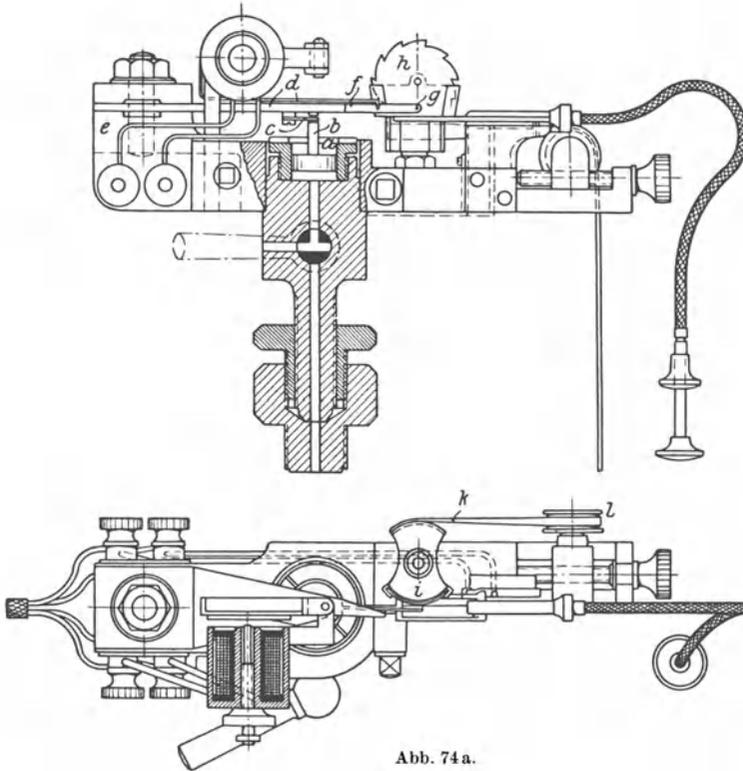


Abb. 74a.

können auf ihr 24 Diagramme (etwa 2 mm hoch und 3 mm breit) nacheinander aufgezeichnet werden. Die Rußschicht wird durch Eintauchen in Kanadabalsam beständig gemacht.

Ein anderer Vertreter dieser Gruppe ist der Mikroindikator von Collins, eingeführt 1922, welcher folgende Merkmale aufweist (Abb. 74): Eine Stabfeder belastet den Druckmeßkolben; das mechanisch etwa zweimal vergrößerte Diagramm wird in eine Zellstoffplatte eingeritzt; dem Träger der Zellstoffplatte wird eine dem Kolbenweg entsprechende hin- und hergehende Bewegung erteilt; außerdem kann die Zellstoffplatte um ihren Mittelpunkt ruckweise gedreht werden, wodurch auf einer Platte 10 Diagramme aufgezeichnet werden können; eine elektro-

magnetische Anordnung sorgt dafür, daß die Stahlspitze nach Durchlaufen eines Diagrammes von der Platte abgehoben wird; die Betätigung erfolgt durch einen Druckdraht, ähnlich wie in Lichtbildkameras. Die Einzelheiten sind aus der Abbildung ersichtlich.

Der sog. Stimmgabelindikator von Schmitz (Abb. 75) dient für die Aufzeichnung des Druckverlaufes in hydraulischen Rücklaufbremsen von Geschützen. Der mit einer Schraubenfeder belastete Druck-

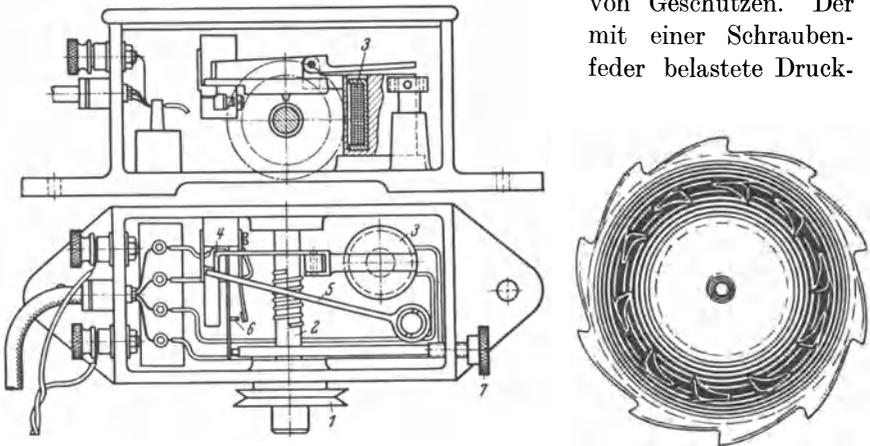


Abb. 74 b.

Abb. 74 c.

Abb. 74a-c. Der Mikroindikator nach Collins (Cambridge Instrument Company, Cambridge, England). Der Druckmeßkolben *a* wird durch eine dreieckige Stabfeder *d* (Körper gleicher Festigkeit) belastet, an deren Ende der die Schreibspitze tragende Arm *f* schwenkbar angeordnet ist. Die Kolbenstange *b* wird mittels der Feder *c* mit der Meßfeder *d* in Berührung gehalten. Der die Schreibspitze *g* tragende Arm *f* wird mittels eines Elektromagneten mit der Zelluloidschreibfläche *h* in Berührung gebracht. Die Zelluloidplatte wird an einem Trommelausschnitt *i* befestigt, welcher durch ein Stahlband *k*, das über eine verstellbare Leitrolle *l* läuft und am freien Ende von der Maschine angetrieben wird, in eine hin- und hergehende Bewegung gesetzt wird. Eine elektromagnetische Auslösevorrichtung bewirkt, daß die Stahlspitze nur während eines Kreisprozesses, d. h. zweier Umdrehungen, an die Trommel gedrückt wird. Die Zelluloidplatte ist sperrartig ausgebildet und kann durch einen Drahtauslöser, ähnlich wie in Photoapparaten um einen Zahn weiterbewegt werden. Auf einer Platte können 10 Diagramme aufgenommen werden. *b* zeigt die elektromagnetische Auslösevorrichtung, in welcher der Elektromagnet *3* den Auslöser *4* betätigt, welcher wiederum den Arm *5* freiläßt. Dieser Arm kommt mit einer daran geformten Nase mit der Schnecke *2* in Eingriff. Die Schnecke *2* wird durch das Schurrad etwa mit der Maschinenrehzahl angetrieben. Durch die Schnecke wird dem Arm *5* ein Winkelausschlag erteilt, während dessen Dauer der Kontakt *6* geschlossen bleibt und nach Beendigung der Bewegung wieder unterbrochen wird. Dieser Kontakt *6* steuert den am Indikator selbst angeordneten Elektromagnet, welcher den Schreibarm *f* betätigt.

74c zeigt eine Diagrammplatte in etwa zweifacher Vergrößerung (Originalgröße 2,5 × 3 mm).

meßkolben trägt in einer Aussparung ein poliertes und berußtes Stahlplättchen, auf welches die Auslenkungen des Kolbens durch eine feine Stahlspitze *f* aufgezeichnet werden. Um nicht nur den Höchstdruck, sondern auch den zeitlichen Verlauf des Druckes aufzuzeichnen, wird der Stahlspitze *f* eine Querbewegung dadurch erteilt, daß die Spitze *f* an einer Stimmgabel *e* von bekannter Eigenschwingungszahl befestigt wird. Damit die Linien für die Belastung und Entlastung der Feder einander nicht überdecken, ist das Stahlplättchen mit einer Abschrägung *g* versehen, die an einer schräg zur Bewegungsrichtung des Kolbens stehenden Fläche anliegt. Beim Niederdrücken des Kolbens verschiebt sich das Plättchen

also auch seitlich. Die Stimmgabel wird durch eine am Kolben befestigte Nase *h* gespannt. Die Auslösung erfolgt, sobald der Kolben den für die Freigabe der Stimmgabel nötigen Weg, etwa 0,1 mm, zurückgelegt hat. Im Bremszylinder wird meistens Glyzerin als Druckflüssigkeit angewendet; dessen Druck wird auf den Kolben *c* durch einen Zwischenkolben *i* übertragen, dessen Gehäuse unmittelbar in den Bremszylinder eingeschraubt wird und dessen Kolbenstange unter schwachem Federdruck an dem Kolben *c* anliegt.

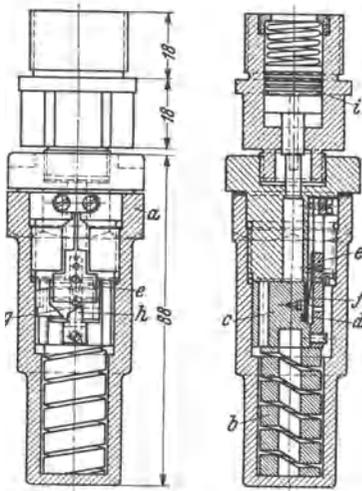


Abb. 75.

Stimmgabelindikator nach Schmitz.
a Gehäuse; *b* Meßfeder; *c* Kolben; *d* berußtes Stahlplättchen; *e* Stimmgabel; *f* Schreibspitze; *g* Abschrägung am Stahlplättchen; *h* Nase, welche die Stimmgabel festhält; *i* Zwischenkolben, welcher den Flüssigkeitsdruck aufnimmt.

Je nach dem zu erwartenden Bremsdruck werden Kolben von 1 cm² bzw. 2 cm² Fläche angewendet, um eine Federdurchbiegung von etwa 2 mm zu erreichen. Die Diagramme werden nach 40facher photographischer Vergrößerung ausgewertet. Die Schwingungszahl der verwendeten Stimmgabel ist etwa 150 bis 500 Hz.

Bei der photographischen Vergrößerung der Mikrodiagramme werden naturgemäß auch die Diagrammlinien mitvergrößert; die mögliche Verkleinerung des Diagrammes ist also von der Breite der Diagrammlinie abhängig. Je dünner die Diagrammlinie, um so kleiner kann das Diagramm sein ohne Einbuße an Genauigkeit, und je kleiner die Auslenkungen des Meßorgans sind, um so höher kann die Eigenfrequenz gelegt werden. Die Diagrammlinie ist wiederum von dem Material der Spitze und der Platte und von dem

gegenseitigen Druck bestimmt. Um möglichst feine Linien zu erreichen, wurde von Pabst (Deutsche Versuchsanstalt für Luftfahrt) ein Ritzverfahren ausgearbeitet, in welchem eine Diamantspitze von 60 Grad Kegelwinkel angewendet wird. Als Schreibfläche wird bis herab zu etwa 2 mm Maximalausschlag Zelluloid, für noch kleinere Ausschläge bis herab zu 0,2 mm eine Glasplatte angewendet. Mit einem Berührungsdruk von 5 g wurde auf Glas eine Linienbreite von 0,002 mm erreicht. Auf diesem Verfahren wurden verschiedene Meßgeräte aufgebaut.

Abb. 76 zeigt ein Gerät für die Messung des Wasserdruckes an Flossen abfliegender oder landender Seeflugzeuge und Abb. 77 zeigt ein mit dessen Hilfe aufgenommenes Diagramm. Abb. 78—81 zeigen einen Druckindikator und seine Elemente. Er wird in eine der Zündkerzenbohrungen des Zylinders eingeschraubt. Die Schreibplatte wird durch ein Uhrwerk

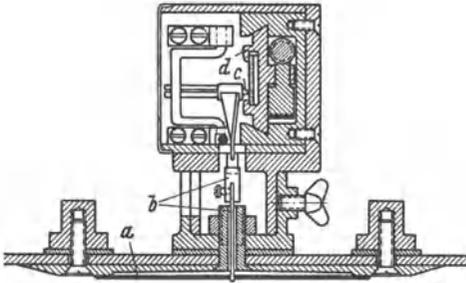


Abb. 76.

Abb. 76. Mikroindikator von Pabst (Deutsche Versuchsanstalt für Luftfahrt). Ritzschreibgerät zum Ermitteln der Bodendrücke eines abfliegenden oder landenden Seeflugzeuges. *a* Plattenfeder; *b* Stoßstange; *c* Schreibdiamant; *d* Schlitten für die Glasplatte.

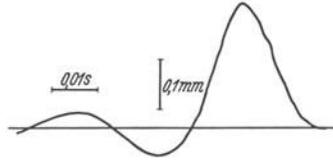


Abb. 77.

Abb. 77. Ein Mikrodiagramm vom DVL-Indikator.

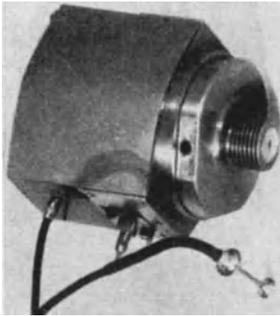


Abb. 78.

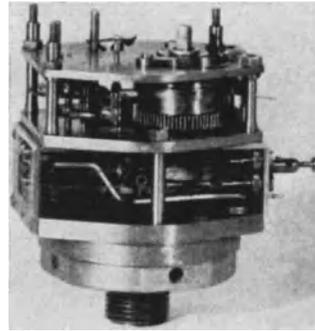


Abb. 79.

Abb. 78 und 79. Mikroindikator von Pabst (DVL.) für Motorenuntersuchungen. Ansicht und inneres Werk nach Entfernen der Schutzhaube.

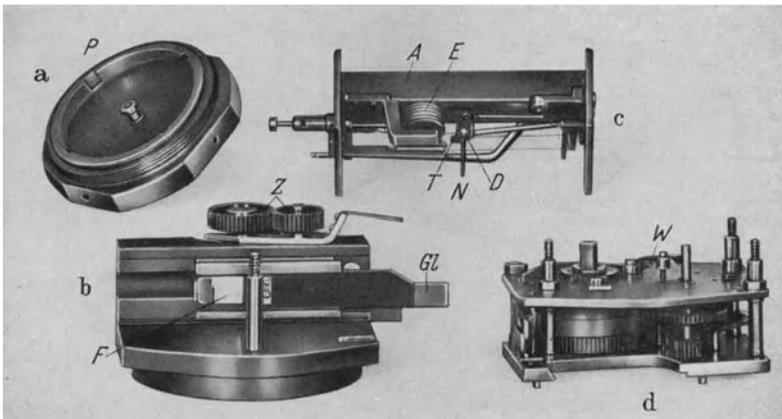


Abb. 80. Teile des DVL-Indikators. *a* Druckmeßorgan; *b* Glasvorschub; *c* Schreibwerk; *d* Uhrwerk; *P* Plattenfeder; *D* Diamantspitze für Druckaufzeichnung; *N* Stoßstange zu *D*; *T* Diamantspitze für Totpunktaufzeichnung; *E* und *A* Elektromagnet und Anker; *GL* Glasplatte; *F* Schlitten für Glasplatte; *Z* Zahnräder für den Vorschub; *W* Windrad.

angetrieben, wodurch ein Zeitdiagramm gewonnen wird, infolgedessen entfällt der Anbau eines Kurbeltriebes. Um von dem Zeitdiagramm das Kolbenwegdiagramm erhalten zu können, schreibt eine zweite Diamantspitze eine Linie mit Totpunktmarken. Diese Totpunktmarkierungsspitze wird durch einen kleinen Elektromagneten angezogen und freigelassen, welcher wiederum durch einen, an der Kurbelwelle oder an der Nockenwelle angeordneten Ringkontakt gesteuert wird. Das Uhrwerk wird durch einen Drahtauslöser, ähnlich wie an Photoapparaten, in und außer Tätigkeit gesetzt. Um eine gleichmäßige Ablaufgeschwindigkeit zu erzielen, wird das Uhrwerk durch ein Windrad abgebremst, welches mit einer hochübersetzten Drehzahl umläuft. Zur Erzielung verschiedener Ablaufgeschwindigkeiten kann das Windrad ausgewechselt werden.

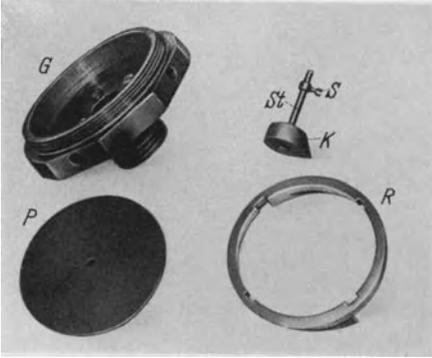


Abb. 81. Teile des DVL-Indikator. Druckmeßelement.
G Gehäuse; *K* Kolben; *St* Kolbenstange; *S* Klemmschraube für die Diamantspitze; *P* Plattenfeder;
R Ringmutter.

Der Gasdruck wirkt auf einen kleinen Kolben, welcher die Kolbenkraft über eine Stütze auf eine Plattenfeder überträgt

($d = 40 \text{ mm } \varnothing$, Dicke für

hohe Drücke bis 40 at 1 mm, für niedrige Drücke bis etwa 4 at 0,25 mm). Kurtz und Oestrich berechneten die Eigenschwingungszahl unter

Annahme starrer Einspannung der Plattenfeder und Berücksichtigung des Schreibzeuges für die starke Platte zu 26200 Hz, für die schwache Platte zu 3520 Hz.

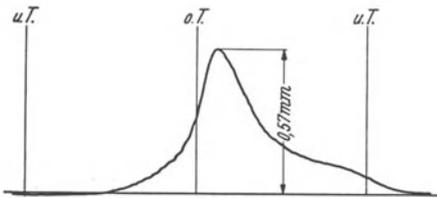


Abb. 82. Ein vergrößertes Motordiagramm des DVL-Indikators.

Unter Annahme freier Auflage der Platte am Rand ergibt sich: für die starke Platte 16600 Hz und für die schwache Platte 2220 Hz.

Es ist anzunehmen, daß die tatsächlichen Werte zwischen diesen Grenzwerten liegen, wodurch die Eignung dieser Meßgeräte für hohe Drehzahlen begründet wird. Das so erhaltene Diagramm wird unter dem Mikroskop ausgemessen oder mit einer bekannten Vergrößerung photographiert. Ein solches Photomikrogramm zeigt Abb. 82, welches das Diagramm eines Einzylindermotors von 1500 U/min darstellt. Die ursprüngliche Höhe des Diagrammes ist 0,57 mm und doch erscheint die Diagrammlinie in der Vergrößerung klar und scharf. Der Indikator wird durch Druckluft und einen genauen Druckmesser geeicht.

B. Spiegelindikatoren.

In den Spiegelindikatoren wird die kleine Meßbewegung des druckmessenden und des wegmessenden Elementes in die Winkelbewegung eines oder zweier Spiegel umgewandelt und durch einen auffallenden und zurückgeworfenen Lichtstrahl an einer Mattscheibe sichtbar gemacht oder auf lichtempfindlichem Papier photographiert. In diesen Geräten dient also als Vergrößerungshebel ein masseloser Lichtstrahl. Die zahlreichen Ausführungsformen können in zwei Gruppen eingeteilt werden, d. h.:

1. Indikatoren mit Spiegel von einem Freiheitsgrad, in welchem einem Spiegel nur eine Bewegungskomponente erteilt wird, und

2. Indikatoren mit einem Spiegel von zwei Freiheitsgraden, in welchen der Spiegel sowohl unter dem Einfluß des Kolbendruckes als auch des Kolbenweges sich bewegt.

Innerhalb dieser Gruppen unterscheidet man optische Indikatoren mit Anwendung von Membranen, welche gleichzeitig sowohl als Abschlußorgan als auch als Kraftmeßorgan dienen, und solche mit Anwendung von Kolben als Abschlußorgan und einer besonderen Meßfeder. Als Meßfeder werden Schraubenfedern, einseitig oder zweiseitig eingespannte Stabfedern, Plattenfedern, Rohrfedern, Zug- oder Druckfedern angewendet.

a) Optische Indikatoren mit einem Spiegel von einem Freiheitsgrad.

Die Indikatoren in der erstgenannten Gruppe zeichnen sich durch Einfachheit und Genauigkeit aus und sind in Fällen, wo eine gedrängte Bauart nicht besonders notwendig ist, im allgemeinen vorzuziehen. Um die Wegkomponente zu erhalten, wird der Lichtpunkt auf einer Filmtrommel photographiert, der eine Drehbewegung von der Kurbelwelle, Nockenwelle oder einem Uhrwerk erteilt wird. Will man das Diagramm, als Zeitdiagramm auf einer Mattscheibe sichtbar machen, so muß der von dem „Druck“spiegel abgelenkte Lichtstrahl nochmals von einem „Weg“spiegel abgelenkt werden. Beide Anordnungen werden angewendet.

In diese Gruppe gehört eine große Anzahl Indikatoren, welche für Explosionsuntersuchungen von Gasgemischen u. dgl. in besonders dazu gebauten Bomben benutzt worden sind. Ein ausgedehnter Literaturnachweis wird von Coward und Hersey angegeben. Bei diesen Geräten wird die höchsterreichbare Genauigkeit der Anzeige angestrebt; Raumfrage und Bequemlichkeit sind nebensächliche Gesichtspunkte, da es sich um Laboratoriumsgeräte handelt. Kühlung, Schmierung, Hitzebeständigkeit der Meßorgane sind auch unwichtige Gesichtspunkte, da

es sich nicht um wiederkehrende sondern nur einmal auftretende Druckvorgänge handelt. Ein besonders sorgfältig entworfenes Gerät von Lewis und von Elbe (Bureau of Mines USA. Washington) wird in Abb. 83 gezeigt, in welchem eine dicke Plattenfeder angewendet wird, deren Durchbiegungen durch den Spiegel etwa 1000fach vergrößert werden. Die Plattenfeder schließt glatt mit der inneren Oberfläche der Kugel ab; zur Vermeidung des Schlüpfens werden Plattenfeder und Rahmen aus einem Stück Monelmetall (aus chemischen Gründen) hergestellt. Um lineare Abhängigkeit zwischen Druck und Ausschlag zu erhalten und um elastische Nachwirkungen zu verhindern, soll beim Höchstdruck der Ausschlag im Mittelpunkt nicht mehr als etwa das 0,4fache der Plattenfederdicke betragen. Die Beziehung zwischen dem Ausschlag a_1 im Mittelpunkt, dem Plattenhalbmesser a , der Dicke h und dem Druck p lautet:

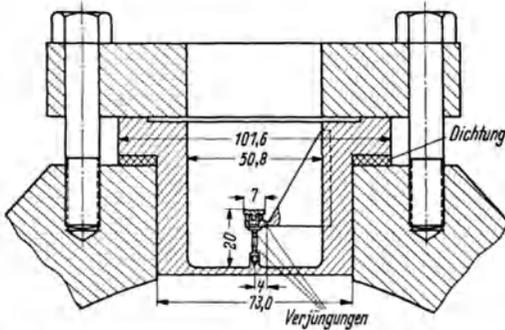


Abb. 83. Spiegelindikator nach Lewis und v. Elbe (Amerikanisches Bureau of Mines). Bemerkenswert sind die, aus einem Monelmetallstück ausgearbeitete Plattenfeder, die Anwendung von verjüngten Biegepunkten statt Scharniergelenken und der hohlgeschliffene Spiegel.

$$a_1 = 0,171 \cdot \frac{p \cdot a^4}{E \cdot h^3},$$

wo E der Elastizitätsmodul (Dehnsteife) und m die Poissonsche Zahl ist.

Die Gleichung für die Eigenschwingungszahl n_e lautet:

$$n_e = \frac{10,21}{a^2} \sqrt{\frac{gD}{\gamma h}}$$

in welcher Formel $\frac{\gamma h}{g}$ die Masse je Flächeneinheit und $D = \frac{E h^3}{12(1-m^2)}$ ist.

Das abgebildete Gerät dient für die Messung von Explosionsdrücken bis zu 7 atü, die in einem Kugelgefäß innerhalb 0,005 bis 0,01 s entwickelt wurden. Die Plattendicke beträgt 1,4 mm; der Spiegel wurde kugelig hohlgeschliffen, um einen Lichtpunkt in einer Entfernung von 1,5 m zu erzeugen. Der Radius der Spiegeldrehung ist 4 mm, bestimmt durch den Abstand der biegsamen Verjüngung von der Mittellinie. Die Ablenkung am Schirm ist etwa 8,5 cm für 7 atü. Die Eigenschwingung liegt oberhalb 3000 Hz. Es werden keine Gelenke, sondern nur elastische Formänderungen angewendet, infolgedessen treten kein toter Gang und keine Änderung der Nulllage auf und es können nur Ablese- und Eichfehler entstehen.

In dem von Von der Nahmer ausgebildeten und von Kallhardt weiterentwickelten Indikator (Technische Hochschule München) wurde

ein Maihak-Stabfederindikator verwendet, von welchem das Schreibzeug entfernt wurde. Die Stabfeder ist über den Kolbenangriffspunkt hinaus durch ein hohlgebohrtes, rechteckiges Stück verlängert, auf dem ein kleiner Spiegel befestigt ist (Abb. 84 und 85). Von einer schwingungsfrei aufgehängten Bogenlampe fällt ein Lichtstreifen, dessen Breite mit Hilfe einer Blende mit senkrechtem Schlitz auf 0,3 mm eingestellt ist, auf einen Umlenkspiegel, wird von hier auf den Indikatorspiegel reflektiert und gelangt dann auf eine schwingungsfrei aufgehängte photographische Aufnahmevorrichtung (Firma Edelmann, München).

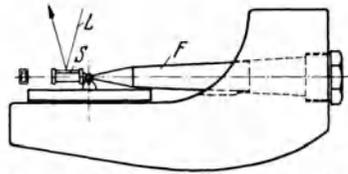


Abb. 84. Optischer Maihak-Stabfederindikator, nach Von der Nahmer und Kallhardt (T. H. München, Professor Nusselt). *F* Stabfeder; *L* Lichtstrahl; *S* Indikatorspiegel.

Die vor der Aufnahmevorrichtung angebrachte Stablinse schneidet aus dem senkrechten Spaltbild ein 0,2 mm langes Stück heraus und ergibt auf diese Weise auf dem hinter ihr ablaufenden lichtempfindlichen Papier einen Punkt, dessen Lage dem jeweiligen Druck entspricht. Die Zeiteinteilung geschieht durch eine vor der Stablinse des Aufnahmeapparates angebrachte Heliumröhre, die von einem Stimmgabelunterbrecher mit der Frequenz von 100 Hz gesteuert wird. Die Zeitmarken verlaufen strichförmig über die gesamte Breite des Registrierpapiers. Zur Totpunktmarkierung dient ein Bosch-Zündmagnet, der von der Motorenwelle angetrieben wird und dessen Unterbrecherkontakt genau in dem oberen Totpunkt des untersuchten Zylinders sich öffnet. Als Totpunktmarke dient der Sekundärfunke, der zwischen zwei vor der Stablinse der Aufnahmevorrichtung befestigten Platinstiften überspringt. Der Zeitverzug zwischen der Unterbrechung des Primärstromes und dem Überspringen des Funkens beträgt etwa 0,0001 s, derselbe muß bei der Auswertung des Diagrammes berücksichtigt werden. Ein Diagramm gibt Abb. 86 wieder.

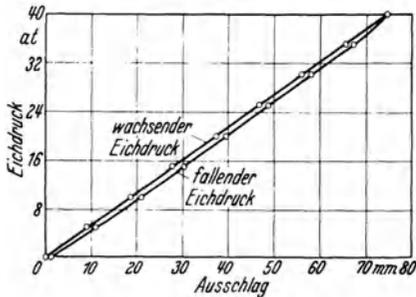


Abb. 85. Eichdiagramm.

Der Zeitverzug zwischen der Unterbrechung des Primärstromes und dem Überspringen des Funkens beträgt etwa 0,0001 s, derselbe muß bei der Auswertung des Diagrammes berücksichtigt werden. Ein Diagramm gibt Abb. 86 wieder.

In dem von Nakanishi (Versuchsanstalt für Luftfahrt der Tokyo Universität) entwickelten Spiegelindikator (Abb. 87—91) wurden die von den Erschütterungen herrührenden Fehler weitgehend vermindert. Der Zylinderdruck wirkt auf den Kolben *a*, welcher mit einer beiderseitig eingespannten Balkenfeder belastet wird. Die Balkenfeder trägt zwei Spiegel *c*₁ und *c*₂, deren gegenseitige Neigung durch die Durchbiegung der Feder geändert wird. Der Strahlengang wird in Abb. 88 angegeben. Der durch den Schlitz *d* gehende Lichtstrahl wird durch eine große Linse gesammelt, durch beide Spiegel reflektiert und fällt schließlich

auf die Filmtrommel *e*. Die zwei Spiegel gleichen die Einflüsse etwaiger Erschütterungen und Verdrehungen des Indikators als Ganzes aus und lassen lediglich die Wirkung der gegenseitigen Winkeländerung der beiden Spiegel im Diagramm erscheinen. (Die Anordnung ist in ihrer Wirkung mit dem im Vermessungswesen gebrauchten Winkelspiegel vergleichbar.) Abb. 91 zeigt die Ausschaltung sämtlicher Erschütterungen.

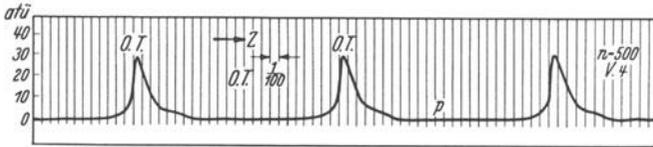


Abb. 86. Ein mit dem Indikator aufgenommenes Druck-Zeitdiagramm.

Infolge der Ausschaltung der Erschütterungsfehler können eine große Entfernung (etwa 2 bis 4 m) zwischen Indikator und Filmtrommel, daher große Vergrößerungsverhältnisse und steife Feder angewendet werden. Mit einer Federungszahl von $\frac{1}{1000}$ mm pro 1 at läßt sich

angeblich eine Eigenschwingungszahl von 5000 bis 10000 Hz erreichen. In der neueren Ausführung (Abb. 89) wird statt einem Kolben eine verhältnismäßig schwache Plattenfeder angewendet, wodurch Schmierungsfragen wegfallen. Aber in der Ausführung

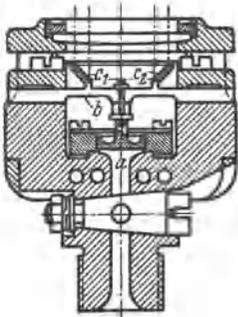


Abb. 87.

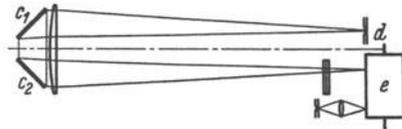


Abb. 88.

Abb. 87. Spiegelindikator nach Nakanishi (Versuchsanstalt für Luftfahrt der Tokyo Universität). *a* Kolben; *b* Balkenfeder; *c*₁ und *c*₂ Spiegel; *d* Lichtschlitz; *e* Filmtrommel. Die im Indikatorkörper angebrachten Bohrungen dienen für Wasserkühlung. Abb. 88 zeigt den Strahlengang.

für sehr hohe Drücke (Untersuchung von Einspritzpumpen und Düsen) hat Nakanishi die Kolbenanordnung beibehalten.

In der Versuchsabteilung der Deutschen Werke hat Berg einen Indikator für die Untersuchung von Druckvorgängen in Brennstoffleitungen entwickelt (Abb. 92 und 93), in welchem ein Bourdon-Rohr als druckmessendes Element dient. Der Indikator besteht aus dem Mittelstück *a*, dem kugelförmigen Gehäuse *c* mit dem abnehmbaren Oberteil *b*. Mit der Kordelmutter *d* und dem Prisma *e* wird das Gerät an der Druckleitung *f* befestigt. Der Indikator wird auf das Rohr so aufgesteckt, daß die Seitenbohrung *g* im Rohr und die Bohrung *h* im Mittelstück des Indikators zur Deckung kommen. Das Rohr erhält an der Mündungsstelle der Seitenbohrung *g* eine Arbeitsfläche *k*; abgedichtet werden die

Teile durch die Weichkupferscheibe i . Das Mittelstück a enthält das eigentliche Druckmeßgerät. Es besteht aus einer kleinen Rohrfeder l , die am oberen biegsamen Ende

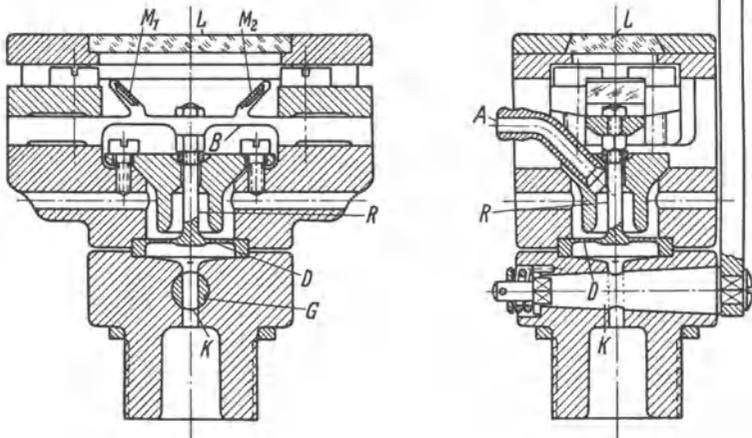


Abb. 89. Neuere Ausführungsform des Nakanishi-Spiegelindikators. A Kühlluftzuführung; B Balkenfeder mit den zwei Spiegeln M_1 und M_2 ; L Linse von 3 m Brennweite; D Plattenfeder aus rostfreiem Stahl, etwa 0,1 mm dick; K Indikatorhahn; G Verbindung zur Atmosphäre.

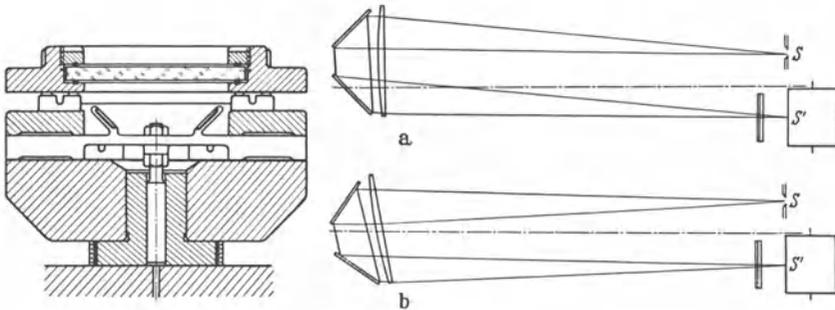


Abb. 90.

Abb. 91 a und b.

Abb. 90. Ausführungsform des Nakanishi-Spiegelindikators für hohe Drücke (Untersuchungen von Brennstoffpumpen und Düsen).

Abb. 91a und b. Strahlungsgang des Nakanishi-Spiegelindikators. Einfluß von Erschütterungen des Indikators. A . Senkrechte Erschütterungen in der Ebene von Abb. a. Da die Schwingungszahl der auferlegten Schwingungen unterhalb der Eigenschwingungszahl der Spiegel liegt, wird der Winkel der beiden Spiegel durch die Maschinerschütterungen nicht beeinflusst und die Abbildung des Schlitzes S ändert ihre Lage nicht. B . Erschütterungen quer zur Ebene der Abb. a, verursachen eine entsprechende Bewegung des Lichtstrahles; aber der Lichtstrahl wird mittels der zylindrischen Linse von kurzem Brennweitenabstand auf den Film geworfen; die Bewegung des entstehenden Leuchtpunktes wird praktisch vernachlässigbar. C . Erschütterungen in der Richtung des Lichtstrahles stören theoretisch die Schärfe des Bildes; aber der Schwingungsausschlag ist verschwindend klein im Vergleich zur Brennweite der Linse, daher ist die Wirkung vernachlässigbar. D . Drehschwingungen um die Achse senkrecht zur Ebene von Abb. b verursachen, wie in Abbildung gezeigt, keine Fehler, solange der Winkel der beiden Spiegel unverändert bleibt. E . Drehschwingungen um die anderen zwei Achsen wirken ähnlich wie im Fall B und die entstehenden Fehler sind vernachlässigbar. Kurz gefaßt, keinerlei Erschütterungen verursachen einen Fehler, und die Lage des Leuchtpunktes auf dem Film wird lediglich von dem Winkel beider Spiegel zueinander bestimmt.

mit einer Plattform für die Befestigung des Spiegels m versehen ist. Die Rohrfedern werden aus Stahl (für gewöhnliche Aufnahmen) und

aus Bronze (für Schwachfederaufnahmen) hergestellt. Die Rohrfeder ist mit Hilfe einer Mutter n mit Innen- und Außengewinde in das Mittelstück a eingeschraubt; eine Kupferscheibe dient als Dichtung. In der Tabelle 3 sind die wichtigsten Kenngrößen der Feder zusammengestellt:

Tabelle 3.

	Stahlrohrfeder	Bronzerohrfeder
Ausschlag des Lichtstrahles (Bogenmaß)		
je at	etwa 0,00008	etwa 0,0002
Lebensdauer (Pumpenhübe) bei 400 at	30000 bis 40000	8000 bis 10000
Zulässiger Höchstdruck in at	600	400
Schädlicher Raum in cm^3	0,040 bis 0,007	0,040 bis 0,007

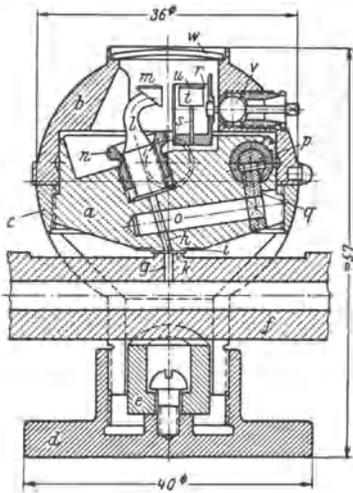


Abb. 92. Spiegelindikator von Berg (Versuchsabteilung Deutsche Werke), mit gekrümmter Rohrfeder. a Mittelstück, b Gehäuseoberteil, c kugelförmiges Gehäuse; d Kordelmutter; e Andrückprisma; f Druckrohrleitung; g , h Bohrungen; i Dichtungsscheibe (Weichkupfer); k Dichtungsfläche am Rohr f ; l Rohrfeder; m Spiegel; n Einsatzmutter, o Absperrhahn; p Zahnstange und q Segment zum Betätigen von o ; r Zeitnehmer; s Blattfeder; t Masse; u Spiegel; v kugelige Lagerung des Zeitnehmers; w Glasfenster.

Die Verbindungsbohrung h zwischen dem Rohr f und der Rohrfeder l ist durch den eingeschliffenen Drosselhahn o abgesperrt, der beim Indizieren mit Hilfe eines Drahtauslösers über die Zahnstange p und das Segment q geöffnet werden kann; eine Feder sperrt nach der Aufnahme die Bohrung selbsttätig ab. Durch diese Vorrichtung wird die sehr hoch beanspruchte Rohrfeder geschont und ihre Lebensdauer ganz beträchtlich verlängert.

Das Gehäuseoberteil b enthält den Zeitnehmer r , der nach Art eines Zungenfrequenzmessers aus einer Blattfeder s und einer am freien Ende befindlichen Masse t besteht, die den Spiegel u trägt. Die beiden Spiegel m und u sind dicht nebeneinander angeordnet. Diese Anordnung ermöglicht kleinste Abmessungen des Gerätes, so daß es auch an unzugänglichen Meßstellen verwendbar ist, und man spart ferner eine besondere Lichtquelle für den Zeitnehmer, da die beiden Spiegel von dem Lichtbündel einer einzigen Lichtquelle getroffen werden.

Eine Einrichtung zum Erregen des Zeitnehmers ist nach Angabe des Erfinders nicht erforderlich, da die bei Maschinenmessungen unvermeidlichen Erschütterungen genügen, um die Blattfeder zum Schwingen zu bringen. Zum Schutz vor Berührung ist der Zeitnehmer in einem besonderen Gehäuse untergebracht. Die kugelige Lagerung v dieses Gehäuses gestattet, die Zeitmarke an die zweckmäßigste Stelle des Films

zu verlegen oder überhaupt wegzulassen. Die beiden Spiegel sind durch ein gemeinsames Glasfenster *w* vor Beschlagen durch Brennstoffnebel und Verschmutzung geschützt. Das Glas ist sorgfältig geschliffen und gewölbt, damit auf dem Film keine störenden Lichtflecke entstehen. In besonderen Fällen kann die Rohrfeder auch ohne Gehäuse verwendet werden. In solchen Fällen wird sie unmittelbar in die zu untersuchende Rohrleitung eingeschraubt oder eingelötet. Die Filmtrommel wird in Abb. 93 gezeigt. Sie ist für Filme von 300 mm Breite und bis 150 mm Höhe eingerichtet und läuft gewöhnlich mit 100 bis 1500 U/min. Sie wird

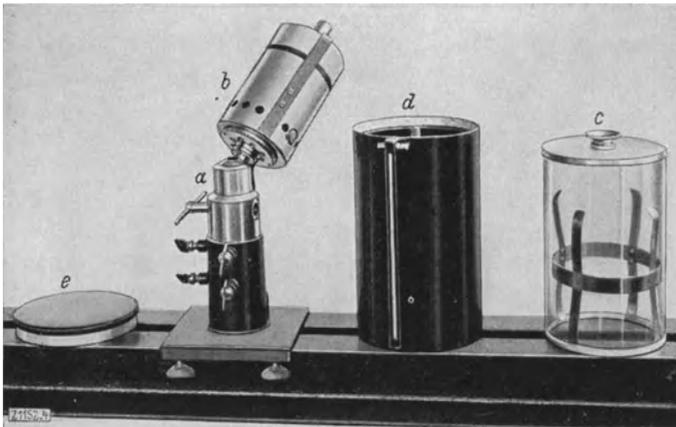


Abb. 93. Filmtrommel für den Spiegelindikator von Berg. *a* Ständer mit Kugelgelenk; *b* Antriebsmotor (Achse fest, Gehäuse läuft um); *c* durchsichtige Filmtrommel; *d* Trommelgehäuse mit Schlitzblende; *e* Deckel des Trommelgehäuses.

in die gewünschte Lage gebracht und durch eine Kugelklemme festgeklemmt.

Für die zweckmäßigste Pulververwertung in Gewehren und Geschützen ist es von großer Wichtigkeit, den Druckverlauf zu kennen. Der Bestimmung des Druckverlaufes stehen aber große Schwierigkeiten entgegen, da die Drücke sehr hoch (zwischen 1500 und 5000 at) sind, der Druckanstieg in einer sehr kurzen Zeit (innerhalb einigen $\frac{1}{100\,000}$ s) vor sich geht und Temperaturen bis zu 3500° auftreten können. Es wurden aber doch Indikatoren entwickelt, die solche Messungen ermöglichen.

Ein diesbezügliches Gerät ist der Indikator von Thring (Universität von Cambridge, England: U.S.Pat. 1 398 608—1921), welches von Rumpff (Bonn a. Rh.) weiterentwickelt wurde. Die Druckmeßfeder besteht aus zwei ineinandergeschobenen Röhren, deren eines auf Zug, das andere auf Druck beansprucht wird, wenn der Explosionsdruck auf den Meßkolben wirkt. Die elastische Längenänderung der Röhre bewirkt die Winkeländerung eines Spiegels, die dann photographisch aufgezeichnet wird. In einer

Stange oder einem Rohr, welches auf Zug oder Druck beansprucht wird, sind alle Materialfasern in gleicher Spannung (im Gegensatz zur Drehung oder Biegung, wobei die Spannung vom Abstand von der „neutralen Faser“ abhängig ist). Daher ist das Arbeitsvermögen des Stückes und auch seine Eigenfrequenz bei dieser Art von Beanspruchung besonders hoch. Es wird angegeben, daß die Eigenfrequenz dieses Gerätes von 16000 bis 20000 Hz beträgt und sogar in Sonderkonstruktionen bis zu 50000 Hz getrieben werden kann.

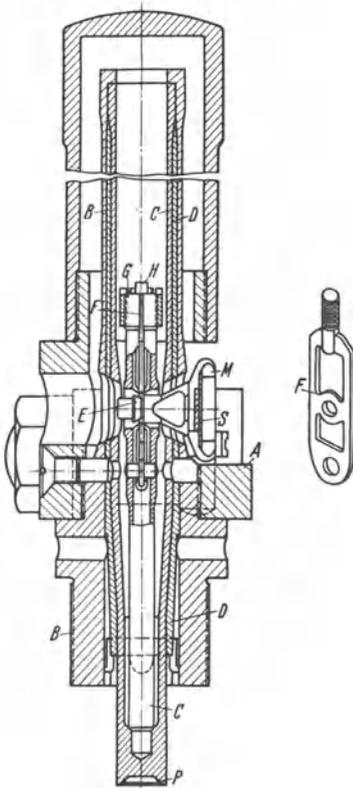


Abb. 94. Der Spiegelindikator nach Thring und Rumpff, Längsschnitt. *B* Büchse, deren Oberteil als Zugfeder dient; *A* Schraubstück; *P* Druckkolben; *C* Druckfeder; *D* Zwischenrohr; *E* Spiegelhalter; *M* Spiegel; *S* Stahlband; *G* Druckstange; *F* Federungsstück; *H* Spannmutter.

Einen Längsschnitt des Gerätes zeigt Abb. 94; in diesem ist *B* eine Büchse, welche einerseits in ein passendes Loch des Gewehrlaufes eingeschraubt wird und andererseits das Schraubstück *A* trägt. Aus dem unteren Ende der Büchse ragt der Gasdruckkolben *P* gerade so weit heraus, daß seine untere Fläche gerade mit der Wandung der Patronenkammer des Gewehres abschließt. Die Bohrung im Gewehr dient also als Indikatorzylinder und muß sorgfältig hergestellt sein. Der Druckkolben *P* ist hohl ausgebildet und sein rohrförmiger Oberteil *C* bildet eine Druckfeder. Das obere Ende von *C* ist mit der rohrförmigen Verlängerung *B* der Büchse *B* vereinigt, die dann als eine auf Zug beanspruchte Feder wirkt. Die zwei Rohrfedern *B* und *C* werden durch das Zwischenrohr *D* auseinandergehalten und geführt, damit Ausknickung der Druckfeder vermieden wird. Die Abmessungen der Rohrfeder sind so gewählt, daß sie bei dem höchsten Gasdruck fast bis zur Elastizitätsgrenze beansprucht wird, um einerseits eine meßbare Bewegung zu erhalten und andererseits eine bleibende Längenänderung und Änderung der Nullage zu vermeiden.

Der Spiegel *M* wird in dem Stück *E* gefaßt, welches auf einem dünnen Stahlband befestigt ist. Das Stahlband ist wiederum an seinen beiden Enden (senkrecht zur Bildebene) am Schraubstück *A* festgemacht. Das Stahlband wird also auf Drehung beansprucht, wenn der Spiegel in der Bildebene einen Winkelausschlag ausführt. Die Bewegung des Kolbens wird auf die Spiegelfassung *E* mittels Druckstange *G* und

Federungsstück *F* übertragen. Mit Hilfe der Mutter *H* kann das ganze bewegliche System auf eine gewisse Anfangsspannung gebracht und so toter Gang vermieden werden. Das ist eine unbedingte Notwendigkeit, da die Kolbenbewegung äußerst klein ist.

In der Abbildung des vollständigen Gerätes (Abb. 95) erkennt man auf der linken Seite den Gewehrlauf, welcher mit seinem Verschuß in einem kräftigen Stahlsockel eingeschraubt ist. Auf diesem Sockel sitzt das Druckelement, welches mit seinem unteren Ende durch eine Bohrung mit dem Innern des Laufes in Verbindung steht. Ein Lichtstrahl aus der

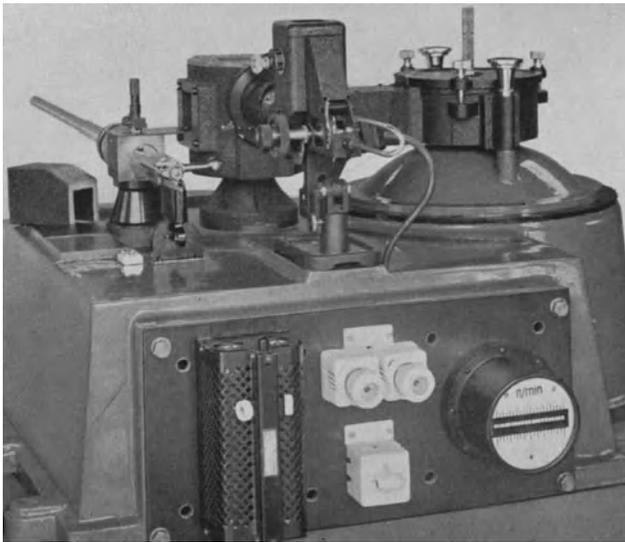


Abb. 95. Gesamtansicht des Thring-Rumpff-Spiegelindikators.

Bogenlampe (in der Bildmitte) wird durch ein optisches System (Blende, Linsen und Prisma) zum Indikatorspiegel geführt, und von demselben auf eine Filmtrommel geworfen. Die Filmtrommel und ihre lichtdichte Kassette können zwecks Auswechslung abgenommen werden. Ein Objektivverschluß schützt den Film vor unnötiger Belichtung und läßt den Lichtstrahl nur während einer oder zweier Trommelumdrehungen durch. Mit dem Objektivverschluß wird gleichzeitig ein Elektromagnet betätigt, der das Gewehr automatisch abfeuert, so daß nur während des Schusses der Spiegel belichtet und dadurch ein Diagramm aufgezeichnet wird.

Für die Auswertung des Diagrammes ist es notwendig, den Zeitpunkt im Diagramm festzulegen, in welchem das Geschöß den Lauf verläßt (Austrittsmoment). Dieses geschieht entweder mit Hilfe eines überspringenden Funkens (nach Art eines Funken-Chronographen) oder mittels einer oszillographischen Aufzeichnung.

Im Diagramm *I* (Abb. 96) sind bei *F* eine Reihe von Punkten ersichtlich. Diese entstehen durch das Überspringen mehrerer elektrischer Funken durch die Entladeschwingungen im Sekundärkreis einer Induktionsspule, sobald der Primärkreis dieser Spule durch das austretende Geschöß an der Laufmündung zerrissen wurde. Aus Entwurfsgründen ist es nicht möglich, den Funken genau über dem Lichtpunkt überspringen zu lassen, mit welchem das Druckelement das Diagramm schreibt. Infolgedessen muß man auf dem Diagramm von dem ersten Funken der Reihe eine bestimmte Strecke *L* nach dem Diagramm zu abtragen, um Punkt *D* entsprechend dem Moment des Geschößaustrittes zu erhalten.

Benutzt man eine Oszillographenschleife zur Markierung des Geschößaustrittes, so erhält man ein Diagramm wie bei *II* in Abb. 96. (Die

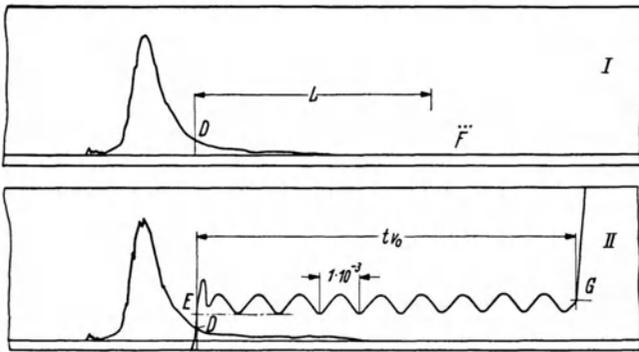


Abb. 96. Mittels des Thring-Rumpff-Spiegelindikators aufgenommenes Diagramm von einem Gewehr.

Oszillographenschleife wird waagrecht angeordnet, da die Filmtrommel sich um eine senkrechte Achse dreht.) Durch diese Meßschleife fließt dauernd ein Wechselstrom von z. B. 1000 Hz. (Dieser Strom wird von einem kleinen Röhrensummer geliefert; die Frequenz wird mit hoher Genauigkeit von $\pm \frac{3}{10\,000}$ konstant erhalten.) Außer diesem Wechselstrom wird der Meßschleife ein besonderer Gleichstrom überlagert, welcher durch den Draht an der Mündung des Gewehres fließt. Ein zweiter Kontaktdraht bzw. ein Drahtgitter befindet sich in einem Abstand von 6 m vor der Gewehrmündung und wird beim Schuß ebenfalls durchgeschossen. Solange der Kontaktdraht an der Mündung noch nicht durchgeschossen ist, fließt soviel Gleichstrom durch die Meßschleife, daß der Lichtzeiger infolge seiner starken Ablenkung durch den Gleichstrom nicht auf dem Registrierpapier schreibt. Erst in dem Augenblick, in welchem der Draht durchgeschossen wird, schnellt der Lichtzeiger auf das Registrierpapier und schreibt dort eine Wechselstromkurve von *E* bis *G*. Der Gleichstrom, welcher durch das zweite Kontaktgitter (6 m vor der Mündung) fließt, wird in dem Augenblick, in welchem das Geschöß dieses Kontaktgitter durchbricht, von der Meßschleife abgeschaltet.

Hierdurch wird der Lichtzeiger bei G wiederum weiter nach oben abgelenkt und verschwindet vom Registrierpapier. Der Vorteil der Verwendung einer Oszillographenschleife gegenüber dem Gebrauch eines Funkens liegt darin, daß der Zeitmaßstab unmittelbar durch die bekannte Frequenz der Wechselstromkurve gegeben wird. Dadurch wird das mit unvermeidlichen Fehlern behaftete Messen der Trommelgeschwindigkeit erübrigt.

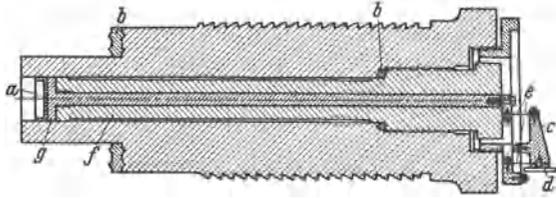


Abb. 97. Spiegelindikator nach Balfour (Versuchsanstalt der Britischen Artillerie-Abteilung, Woolwich) für Geschützuntersuchungen. a dünne kupferne Dichtungsscheibe; b b kupferne Dichtungsscheiben; c Hebelarm; d Spiegel; e Bandstahlstücke; f Meßfeder; g Kolben und Kolbenstange.

Aus dem Druck-Zeitdiagramm kann die Weg-Zeitfunktion des Geschosses im Rohr durch zweimalige Integration bestimmt werden aus dem Impulsprinzip:

$$v = \frac{\int P dt}{m}$$

und

$$s = \int v dt.$$

Im Geschützindikator von Balfour (Versuchsanstalt der britischen Artillerieabteilung, Woolwich) wird auch eine Rohrfeder als Meßfeder angewendet, welche auf Druck beansprucht wird (Abb. 97 und 98). Sie bewegt sich mit Gleitsitz in einem Stahlkörper, welcher in die Wand einer Explosionsbombe oder eines Geschützes eingeschraubt wird, wobei eine dicke Kupfer-Unterlegscheibe das Entweichen der Verbrennungsgase verhindert. An dem inneren Ende der Rohrfeder wird der Kolben durch ein kurzes Gewindeteil befestigt. Die mit dem Kolben ein Stück bildende Kolbenstange wird im Inneren der Rohrfeder geführt und ragt über deren Außenende hinaus. Der Gasdruck bewirkt eine Verkürzung der Rohrfeder; da aber die Länge der Kolbenstange unverändert bleibt, führt das Ende der Kolbenstange gegenüber dem äußeren Rohrfederende eine dem Druck proportionale Bewegung aus, solange die Elastizitätsgrenze der Feder nicht überschritten wird. Diese Bewegung wird durch Spiegel und Lichtstrahl vergrößert.

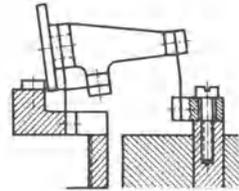


Abb. 98. Einzelheiten der Spiegelbefestigung.

Die Abmessungen der Rohrfeder sind: 22 mm Außendurchmesser, 6 mm Innendurchmesser, 200 mm Länge. Sie besteht aus „Vibrac“stahl von hoher Elastizitätsgrenze. Ein Druck von 4000 at verkürzt die Feder um etwa 0,5 mm, die optische Vergrößerung ist etwa 180fach. Die Eigenfrequenz ist etwa 3800 Hz.

Der Dichtigkeit gegen Entweichen von Explosionsgasen wird große Sorgfalt gewidmet, da die heißen Gase (etwa 3500° C) beim Entweichen den Stahl anfressen, und die Oberfläche härten, so daß sie schwer zu bearbeiten ist. Bis zu etwa 800 at wird die Kolbenfläche durch ein

plastisches, paraffinisches Gemisch geschützt, wobei sehr darauf zu achten ist, daß alle Luft ausgeschlossen bleibt. Bei höheren Drücken wird eine kleine kupferne Schale auf den Kolben gebracht und mit einem Dorn leicht auseinandergespreizt. Eine solche Schale kann nur einmal benutzt werden, wonach sie abgenommen, gereinigt und wieder ausgeglüht wird.

Die optische Einrichtung zur Vergrößerung ist auf einem Ring aufgebaut, welcher in eine Vertiefung am Vorderende des Stahlstückes eingeschraubt wird. Der Spiegel (aus rostfreiem Stahl von 19 mm \varnothing) wird mit dem Ring einerseits und mit der Kolbenstange andererseits durch ein kurzes Bandstahlstück, wie in Abb. 98 gezeigt, verbunden. Diese Befestigungsart ist frei von Reibung und totem Gang und bietet nur einen geringen Widerstand in der Bewegungsrichtung der Kolbenstange, besitzt aber eine beträchtliche Steifheit gegen Bewegungen in anderen Richtungen. Der größtmögliche Winkelausschlag ist $1/60$ Bogenmaß.

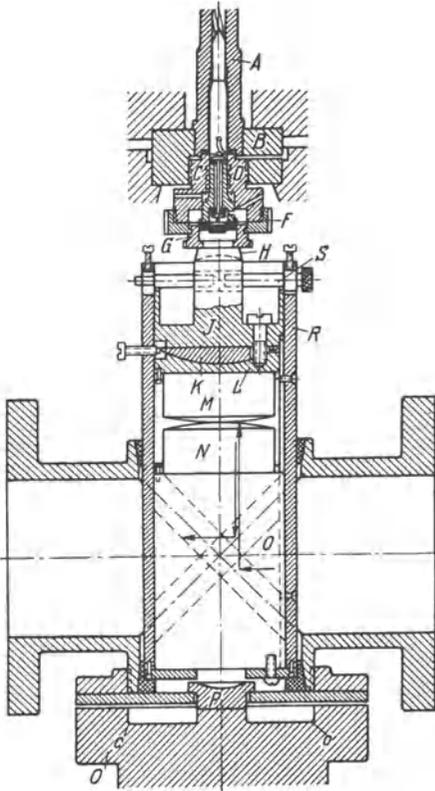


Abb. 99. Linsenindikator nach Kirner. *A* Gewehrlauf; *B* Hauptstück; *C* Verschlussstück; *D* Stempel; *F* und *G* Renkverschluß; *H* Stempelhalter; *J* Linsen-träger; *R* rohrförmiges Gehäuse; *O* Spiegelträger; *M* und *N* Glaslinsen (deren Krümmungsradius im Bilde übertrieben klein gezeichnet ist); *K* und *L* Stahllinsen; *S* Sicherungsstift, um das Stück *J* am Herausfallen zu hindern.

Ein anderer Indikator für Geschützuntersuchungen wurde von Kirner ausgearbeitet, der auf einem beachtenswerten Grundsatz beruht (Abb. 99—103).

Dieses Gerät fußt nämlich auf der Erscheinung der Newtonschen Farbenringe, welche in engen Keilräumen zwischen durchsichtigen Platten infolge der Interferenz des Lichtes auftreten. Das Gerät besteht aus zwei sich berührenden Glaslinsen, welche unter dem Einfluß der

Druckkräfte mehr oder weniger aneinandergedrückt werden. Eine der Linsen wird unbewegt gelagert, während die andere kleine Bewegungen ausführen kann unter dem Einfluß des Rückdruckes des Gewehres oder des Druckes, den ein in den Pulverraum reichender, gasdicht eingeschliffener Stempel ausübt. In dem keilförmigen Raum zwischen den

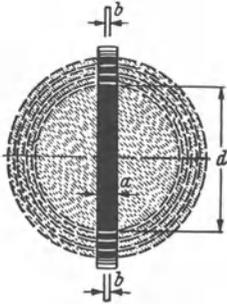


Abb. 100.

Abb. 100. Interferenzringe, woraus ein schmaler Streifen ausgeschnitten wird, welcher mittels einer Linse noch schmaler zusammengezogen wird.



Abb. 101.

Abb. 101. Kurvenbild eines Explosionsvorganges.

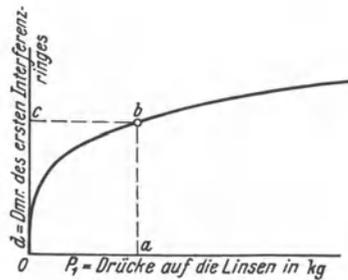


Abb. 102.

Abb. 102. Eichdiagramm.

beiden Linsen entstehen Newtonsche Farbenringe, deren Durchmesser sich vergrößern, wenn die Linsen zusammengedrückt werden. Eine äußerst kleine Bewegung der Linsen bewirkt eine beträchtliche Änderung des Durchmessers der Ringe. Dieses Verfahren zeichnet sich also durch einen sehr geringen Meßweg und daher durch eine vernachlässigbare Änderung des Druckraumes aus.

Die in Abb. 99 dargestellte erste Ausführungsform des Gerätes dient für die Bestimmung des Gasdruckes selbst (nicht der Reaktionskraft der Waffe). In dieser Abbildung ist *A* der Gewehrlauf. Das Hauptstück *B* hält den Gewehrlauf *A* in dem normalen Laufgewinde und das mit einer Bohrung für den Stempel *D* versehene Verschlußstück *C* fest. Unter dem Stempel befindet sich eine kräftige Schraubenfeder, die den Zweck hat, der Stempelreibung entgegenzuwirken und außerdem ein sattes Anliegen des Stempels an den Linsenträger zu sichern. Damit der Stempel beim Wegnehmen des Laufes samt den Stücken *B* und *C* vom Druckstück nicht herausgeschleudert wird, ist die Befestigung *F*, *G*, *H* vorgesehen, wobei *F* und *G* mit Renkverschluß verbunden sind. Unmittelbar vor Ausführung eines Versuches ist der Renkverschluß durch Drehen des Stückes *G* um 90 Grad außer Wirkung zu setzen. Der Stempel wird durch Stück *H* zurückgehalten. Dasselbe überträgt auch den Gasdruck durch seine kugelig gedrehte Unterseite auf den Linsenträger *J*. Um ein

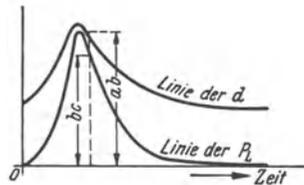


Abb. 103. Umzeichnung eines erhaltenen Diagrammes (*d*) in ein Druckdiagramm von gleichmäßigem Maßstab (P_L).

Undichtwerden des Stempels oder des Hülsenflansches sofort erkennen zu können und besonders um einer gefährlichen Beanspruchung der Verschlußteile vorzubeugen, sind die Teile *B* und *C* angebohrt. Es wird hierdurch etwa austretenden Gasen das Abfließen gestattet. In den Stempel *D* ist die elektrische Zündung eingebaut.

In ein oben und unten abgesägtes Rohrkreuzstück ist ein glattes Rohr *R* eingesetzt, in dem sich unten der aus einem massiven Flußeisenstück hergestellte und mit verschiedenen Schlitzten und Bohrungen versehene Spiegelträger *O* befindet. Durch eine lange Leiste ist *O* ebenso wie das Stück *J* an einer Verdrehung gegenüber *R* verhindert. Die Glaslinsen *M* und *N* sind durch Fassungen an den Stücken *L* und *O* befestigt. Um die Linsen so einstellen zu können, daß sie sich genau in der Mitte berühren, sind die Stahllinsen *K* und *L* vorgesehen. *L* ist an einer Drehung um seine Achse verhindert; wird *K* mittels der vier nach außen gehenden Schrauben verschoben, so ändert sich die Neigung der ebenen Fläche von *L*. Sind die Glaslinsen richtig eingestellt, so kann die Scheibe *L* gegen das Stück *J* mittels dreier Schrauben angezogen werden. Der oben eingesteckte Stift *S* verhütet ein Herausfallen des Stückes *J*. Zwecks satter Berührung der Glaslinsen wird der Stift *S* durch zwei Schrauben nach unten gedrückt. Um den Druck genau in der Achsenrichtung der Glaslinsen zu erzeugen, trägt der Stift *S* in seiner Mitte eine ballig gedrehte Verdickung.

Der Stempel *D* von 10 mm \varnothing ist sorgfältig mit etwa 0,01 mm Spiel eingeschliffen, welches Spiel noch unter einer Belastung von 2700 kg eine Verschiebung mit der Hand erlaubt. Drei in die Führung *C* eingedrehte Rillen dienen für Dichtung.

Der Zusammenbau der Glaslinsen *M* und *N* (welche im Bild mit übertrieben kleinem Abrundungshalbmesser gezeichnet sind) erfordert besondere Sorgfalt, insbesondere muß möglichst vermieden werden, daß sich Staub zwischen den Linsen sammelt.

Der untere Linsenträger *O* trägt sowohl den Spiegel für die eintretenden als auch für die austretenden Lichtstrahlen. Es empfiehlt sich nicht, die Interferenzringe zu benutzen, die im durchfallenden Licht erzeugt werden, weil sie nicht so klar und kontrastreich sind, wie die im reflektierten Licht erzeugten und weil man außerdem auch in dem Stück *G* einen Spiegel für die Lichtführung hätte einbauen müssen, wodurch die Masse dieses Stückes wesentlich vergrößert worden wäre. Es werden deshalb die im reflektierten Licht erzeugten Interferenzringe benutzt.

Die sehr langen, nur etwa 8 mm breiten Spiegel sind auf Eisenstäbe von halbkreisförmigen Querschnitt gespannt, die sich in zwei Bohrungen des Stückes *O* befinden, die ungefähr einen Winkel von 90 Grad miteinander bilden. Das Licht geht von dem ersten Spiegel durch einen schmalen Schlitz nach oben und auf dem Rückweg von den Linsen durch einen entsprechenden Schlitz zu dem Austrittsspiegel, welcher mit Oberflächenversilberung versehen ist, um eine doppelte Reflexion

(von der Vorder- und Hinterseite der Glasplatte) zu verhindern. Um die Auflagefläche für die untere Linse im Stück O möglichst wenig zu schwächen, sind die Schlitze, die durch die obere Fläche von O gehen, in der Mitte durch schmale Stege unterbrochen worden. Diese stören nicht, weil sie in den Bereich des dunklen Kernes des von der Linse erzeugten Bildes fallen. Es ist notwendig, zwischen den nach oben gehenden Schlitzten des Stückes O einen Damm stehen zu lassen, damit nur die an der Linsenberührungsfläche reflektierten interferierenden Strahlen nach der Kamera hin austreten können, aber nicht diejenigen, die an der untersten und obersten Linsenfläche reflektiert werden.

Von den zwischen den Linsen um ihre kreisförmige Berührungsfläche entstehenden Newtonschen Ringen wird nur ein schmaler radialer Streifen verwendet und der Rest abgedeckt, so daß an der Stelle der Ringe in der Mitte ein Strich, und nach außen eine Reihe von kurzen Strichen oder Punkten zu beobachten ist, die sich bei Änderung der Belastung radial auseinander oder gegeneinander bewegen. Von diesen Punkten gehören jeweils zwei zusammen, und zwar diejenigen, welche von dem gleichen Ring herrühren, also von dem Berührungsmittelpunkt der Linsen gleich weit entfernt sind. Diese Punkte oder Striche werden mit Hilfe eines Objektivs auf einer sich rasch drehenden photographischen Platte abgebildet. Ändert sich während der Aufnahme des Bildes der auf die Linsen ausgeübte Druck, so erhält man ein Diagramm von ähnlicher Gestalt wie in Abb. 101 gezeigt. Die Kurve wird nur dadurch scharf, daß man unmittelbar vor das photographische Negativ eine Zylinderlinse einschaltet, die den hellen Streifen der Breite a (Abb. 100) auf eine Breite b von höchstens $\frac{1}{4}$ mm zusammendrängt. Die Eichung kann statisch vorgenommen werden; die Eichlinie ist nicht gerade sondern parabelähnlich (Abb. 102), so daß das erhaltene Diagramm in ein Druckdiagramm von gleichmäßigem Maßstab umgezeichnet werden muß (Abb. 103).

Die Vorteile dieses Gerätes bestehen in der Abwesenheit jeglichen toten Ganges, in der Unabhängigkeit von einer Nulllinie und dem Fehlen elastischer Nachwirkungen. Der Weg oder die Federung des Indikators ist sehr gering, d. h. die Rückwirkung verschwindend klein. Die Eigenschwingungszahl ist äußerst hoch, so daß sehr schnell sich ändernde und sehr hoch ansteigende Drücke aufgenommen werden können.

Das optische Indizierverfahren ist aber auch für die Aufzeichnung sehr kleiner Kräfte geeignet, vorausgesetzt, daß die Änderungsgeschwindigkeit des Druckes nicht allzu hoch ist. Ein von Geiger entworfenes und gebrauchtes Gerät für die Aufzeichnung der Kraft der Luftströmung und des Stoßdruckes des Brennstoffstrahles im Inneren einer Einspritz-Dieselmachine wird in Abb. 104—111¹ angegeben.

¹ Entnommen aus den Mitteilungen des G-H-H-Konzerns Okt. 1931.

Die von Geiger zur Messung der Luftbewegungen im Zylinderinnern von Motoren verwendete Meßanordnung ist aus Abb. 104 ersichtlich:

Man erkennt im Verdichtungsraum (Abb. 105) des Motors die 5 Stellungen 1—5 für den radial nach außen gerichteten Flügel mit der Stau-

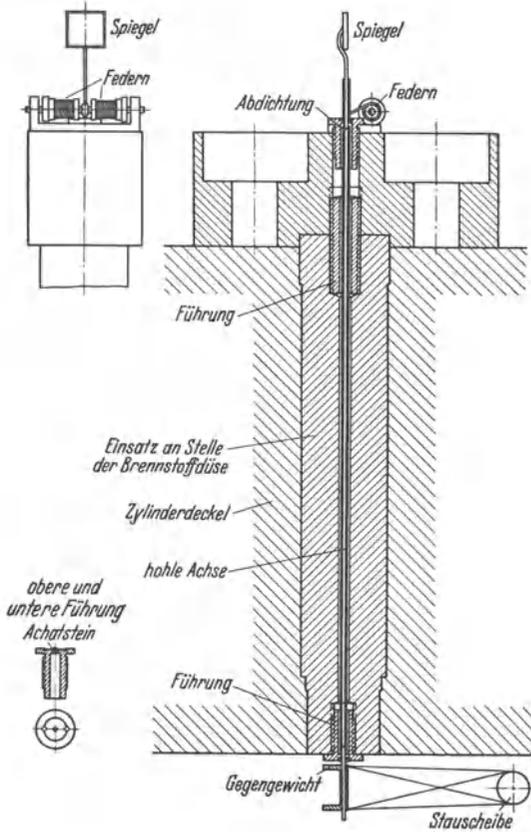


Abb. 104. Spiegelindikator nach Geiger für die Aufzeichnung von Strömungskräften der Luft und der Stoßkraft eines Brennstoffstrahles im Inneren einer Dieselmachine.

scheibe. Um die Wirbelbewegung der Luft nicht zu stören, besitzen die Stauscheiben nur einen Durchmesser von 12 mm. Die Ausführung der Flügel zeigt Abb. 108. Im Zylinderdeckel ist an Stelle der Brennstoffdüse bzw. in anderen Fällen an Stelle des Anlaßventils ein Einsatz angeordnet, durch welchen gut dichtend, aber mit möglichst geringer Reibung eine hohle Achse hindurchgeführt ist, welche auf außerhalb des Zylinderdeckels befindliche Rückführungsfedern einwirkt. Um die Reibung möglichst gering zu halten, ist nach Abb. 104 an der Stelle der Durchföhrung die hohle Achse durch eine massive Achse von nur $\frac{1}{4}$ so großem Durchmesser ersetzt, welche durch einen hohl gebohrten Achatstein hindurchgeht, auf welchem

auf den großen Durchmesser) ein auf der Achse sitzender Bund gegen den Gasdruck dadurch dichtet, daß das Gewicht der Achse samt Flügel und Spiegel größer als der Gasdruck ist. Daß die Reibung hierbei außerordentlich gering ist, zeigt das ohne Dämpfung aufgenommene Ausschwingdiagramm (Abb. 109). Eine auf dem Prinzip der Oberflächenreibung beruhende aus kreisbogenförmigen Lamellen bestehende Öldämpfung ist vorgesehen. Der Spiegel sitzt in der Verlängerung der Achse, besitzt also ein möglichst kleines Massenträgheitsmoment. Der Lichtstrahl geht von der elektrischen Bogenlampe über eine Blende und ein

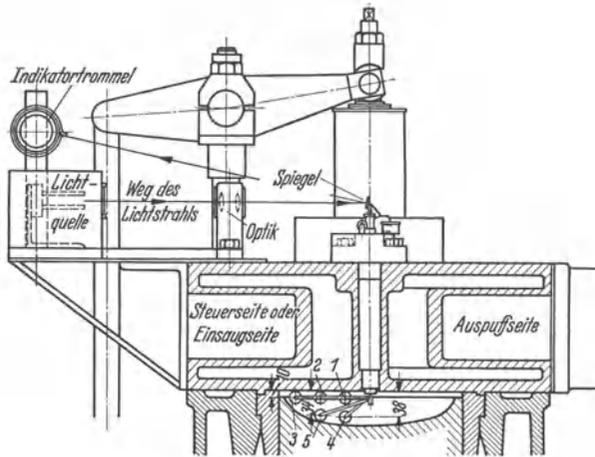


Abb. 105. Stauscheibenanordnung im Brennraum und Strahlengang.

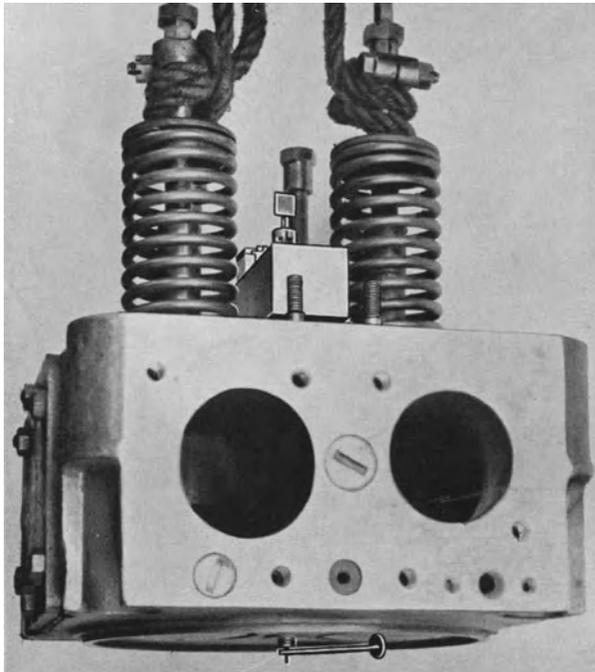


Abb. 106. Zylinderdeckel mit Stauscheibe und Spiegel.

Objektiv zu dem um die lotrechte Achse drehbaren Spiegel und von da auf das hochlichtempfindliche Papier in der Indikatortrommel. Dasselbe ist vor dem Belichten durch eine feststehende zylindrische Hülse geschützt,

welche einen für den Lichtdurchgang dienenden axial gerichteten schmalen Schlitz besitzt, der gewöhnlich durch eine federnde Klappe verdeckt und

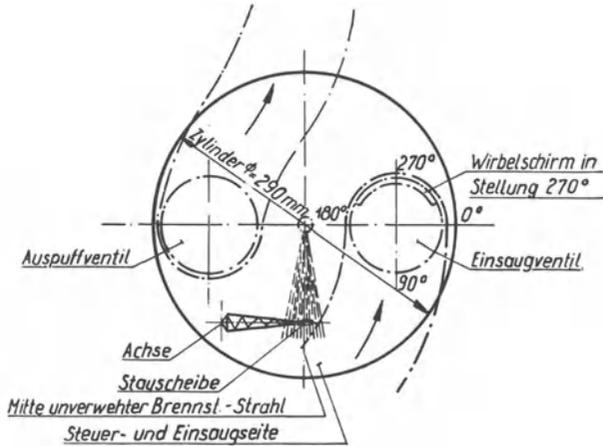


Abb. 107. Anordnung der Brennstoffstauscheibe im Brennraum.

von Hand für die Belichtungsdauer, d. h. einen oder mehr Arbeitstakte lang offengehalten wird. Auf unbedingt steife, durch Erschütterungen unbeeinflussbare Lagerung der genannten Teile wird besonderer Wert

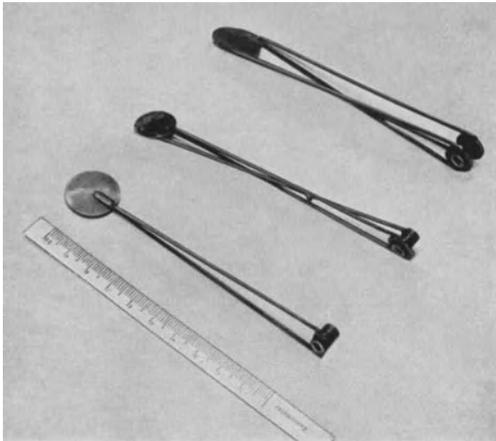


Abb. 108. Stauscheibenflügel.

gelegt, weshalb diese Teile unmittelbar auf dem an sich steifen Zylinderdeckel gelagert sind. Die Indikatortrommel wird in bekannter Weise durch einen von der Kurbelwelle angetriebenen Schnurzug hin- und herbewegt.

Aus dem Staudruck ergibt sich die Luftgeschwindigkeit nach der Formel

$$v = \sqrt{\frac{S}{F \cdot \gamma \cdot \psi \cdot g}}$$

Hierbei ist v die Geschwindigkeit, S der Staudruck, F die Fläche der

Stauscheibe, γ das spez. Gewicht des strömenden Mediums, g die Erdbeschleunigung und ψ ein von der Stauscheibenform abhängiger Beiwert, der sich für die verwendeten runden Scheiben zu $\psi = 0,708$ ergab.

Die Eigenfrequenz dieses Gerätes liegt bei etwa 75 Hz, ist also im Vergleich zu manchen der zuvor genannten optischen Indikatoren sehr

niedrig; das hängt damit zusammen, daß das Gerät noch ganz geringe Staudrücke in der Größe von ein paar Gramm einwandfrei aufzeichnen soll, ohne daß störende Fehler durch Reibung eintreten; da die Luftwirbelbewegungen im Zylinderinnern sich ohnehin nicht sehr rasch ändern, genügte diese niedrige Eigenfrequenz.

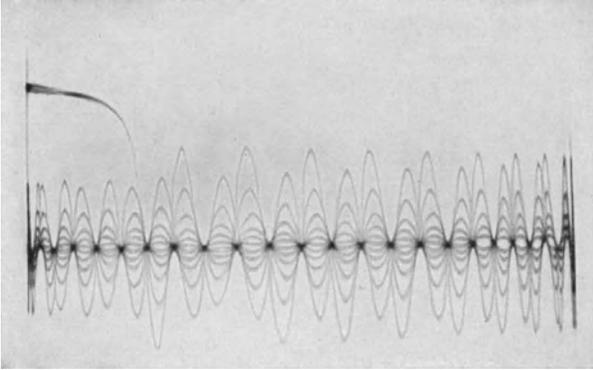


Abb. 109. Eigenfrequenzdiagramm, die sehr geringe Reibung der Meßeinrichtung darstellend.

Bei hohen Drehzahlen wurde die Hubbewegung nicht durch eine hin- und herbewegte Indikatortrommel, sondern durch einen zweiten beweglichen Spiegel erzielt, dessen Achse an der des ersten senkrecht stand.

Abb. 106 zeigt den Zylinderdeckel mit Stauscheibe und Spiegel; Abb. 110 ein damit bei $n = 250$ mm erhaltenes Staudruckdiagramm.

Mit dieser Einrichtung konnte man die Wirbelbewegung an jeder Stelle des Brennraumes ermitteln und den bedeutenden Einfluß der Größe derselben auf den Brennstoffverbrauch zahlenmäßig festlegen.

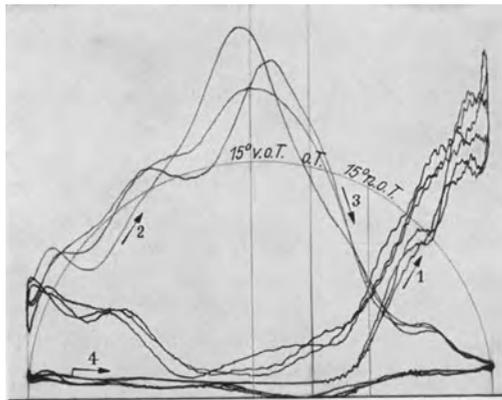


Abb. 110. Staudruckdiagramm.

Zur Ermittlung des Brennstoffstoßdruckes verwendet Geiger die in Abb. 107 dargestellte Anordnung, die der zuvor beschriebenen weitgehend gleicht. Infolge der höheren Drücke kann hier die Eigenfrequenz natürlich weit höher gelegt werden.

Die Versuche wurden von Geiger an laufenden Maschinen sowohl bei Betrieb mit Stickstoff, also ohne Zündung, als auch bei Betrieb mit

Luft und daran anschließender Zündung durchgeführt. Es ist bemerkenswert, daß sich auch hierbei die aus hochhitzebeständigem Baustoff angefertigten Stauscheiben gut bewährten. Die Versuche bezweckten nicht nur die Bestimmung des Stoßdruckes und seine Verteilung, sondern auch die Untersuchung der Beeinflussung des Brennstoffstrahles durch Luftwirbelbewegungen usw. Abb. 111 zeigt ein damit erhaltenes Stoßdruckdiagramm.

Die Genauigkeit und Empfindlichkeit der optischen Druckmeßverfahren läßt sich namentlich in solchen Fällen außerordentlich hoch

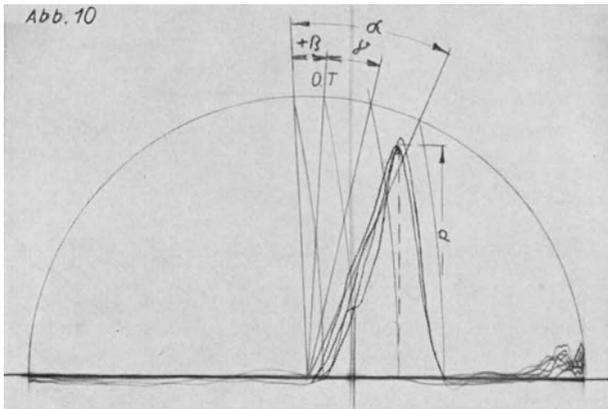


Abb. 111. Brennstoffstoßdruckdiagramm.

treiben, in welchen andere Bedingungen, wie hohe Eigenfrequenz, d. h. die Fähigkeit sehr raschen Druckänderungen zu folgen, nicht besonders wichtig sind. Das ist der Fall bei der Bestimmung der sekundlichen Wassermengen in Turbinenleitungen nach dem Gibson-Verfahren. Dieses besteht darin, daß der Wasserfluß durch irgendeine Absperrvorrichtung vollständig oder bis auf eine kleine, durch andere Mittel bestimmbare Leckwassermenge abgesperrt wird und während der Absperrung der Druckvorgang in der Rohrleitung genau gemessen wird. Der Zeitintegral der Verzögerungskraft ist gleich dem Moment der verzögerten Wassersäule, d. h.:

$$P dt = -m dv$$

$$\int_0^T P dt = m (v_0 - v_T).$$

Wenn wir den Rohrquerschnitt mit f und die Länge mit L bezeichnen, findet sich:

$$f \int_0^T p dt = \frac{f \cdot L \cdot \gamma}{g} (v_0 - v_{\text{leck}}).$$

Der Integral auf der linken Seite ist aus einem genauen Druck-Zeitdiagramm ermittelbar. Wegen der genauen Begründung und der Feinheiten dieses Wassermessverfahrens sei auf das angegebene Schrifttum hingewiesen; es interessiert hier nur das Verfahren und die Apparatur, mit deren Hilfe der Druckvorgang in der Rohrleitung mit der größtmöglichen Genauigkeit aufgezeichnet wird.

Der Urheber dieses Meßverfahrens, der Amerikaner Gibson, hat ursprünglich ein Quecksilbermanometer gebraucht, dessen Ausschläge photographisch aufgezeichnet wurden. Die bei großen Fallhöhen nötige große Höhe der Quecksilbersäule und deren beträchtliche Massenträgheit ergaben gewisse Nachteile. Um diese zu vermeiden, hat Thoma mit seinen Mitarbeitern Förderreuther, Volckhardt und Deckel einen

Spiegelindikator entwickelt, der den folgenden Gesichtspunkten entsprechen sollte:

1. höchsterreichbare Freiheit von Reibungsfehlern,
2. kleine Meßwege des Kolbens (zur Verminderung der Indikatorrückwirkung),

3. ziemlich hohe (aber nicht äußerst hohe) Eigenschwingungszahl.

Die letzte Ausführungsform des Gerätes zeigt

Abb. 112—115. Die Druckkammer *a* enthält den Meßkolben *b* und ist (um die Massenwirkungen herabzusetzen und eine möglichst kleine Eigenschwingungsdauer zu erzielen) durch einen reichlich bemessenen (50 mm Ø) Hochdruckschlauch an die Druckrohrleitung angeschlossen. Durch eine, an der höchsten Stelle des Meßzylinders angeordnete Schraube *k* kann dieser und auch der Anschlußschlauch nach Abschluß des Schiebers *d* durch ein Rohr *r* mit dünnflüssigem Öl gefüllt und vollkommen entlüftet werden; das leichte Öl verbleibt dann während der Messungen in dem Gerät und sorgt so für die Kleinhaltung der Kolbenreibung und Leckverluste an Kolben und Kolbenstange.

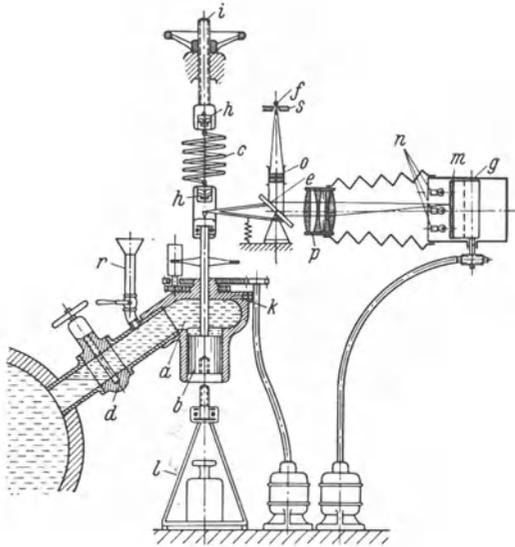


Abb. 112. Schema des Spiegeldruckschreibers nach Thoma, Förderreuther, Volckhardt und Deckel (Hydraulisches Institut der Technischen Hochschule München). *a* Druckkammer; *b* Meßkolben; *c* Meßfeder; *d* Absperrschieber; *e* Spiegel; *f* Lichtquelle; *g* photographisches Gehäuse; *h* kreuzgelenkartiges Schneidengelenk; *i* Federspannrad für die Einstellung der Nulllinie; *k* Entlüftungsöffnung; *l* Schalen­träger für Eichgewichte; *m* Abdeckplatte für die photographische Aufzeichnung von Bezugs­linien; *n* Glühlampen für die Bezugs­linien; *o* Astro-Objektivlinse; *p* Tessarobjektiv; *r* Rohr für die Auffüllung des Raumes *a* mit Öl; *s* Schlitz.

Der Meßkolben selbst wird an einer Meßfeder c durch ein nach Art eines Kreuzgelenkes ausgebildetes doppeltes Schneidengelenk h aufgehängt. Die Feder wiederum ist an ihrem oberen Ende an der zur Einstellung dienenden Spindel i mit einem ebensolchen Gelenk befestigt. Damit wird jede unerwünschte exzentrische Beanspruchung der Meßfeder verhindert. Die durch die Druckschwankungen verursachten axialen Bewegungen des Kolbens werden durch einen Fühlhebel auf

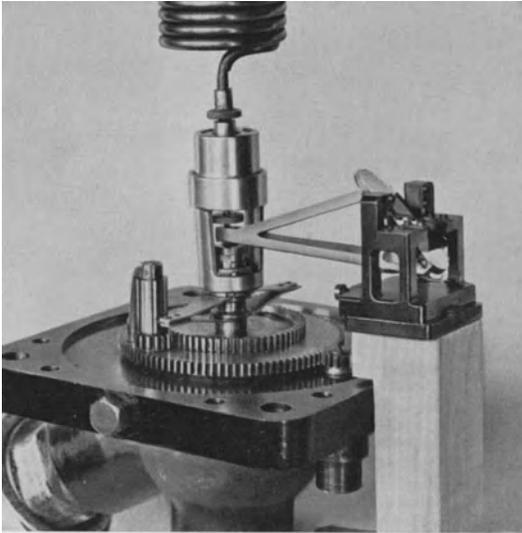


Abb. 113. Antrieb des Kolbens und Anordnung des Spiegels.

einen Drehspiegel e übertragen.

Zur Erzielung hoher Empfindlichkeit des Druckschreibers ist es von besonderer Wichtigkeit, die Reibung des Kolbens im Zylinder weitgehendst zu verringern. Aus diesem Grunde wird der Kolben während der Messung in Drehung (50 bis 120 U/min) versetzt. Um auch die letzten Reste der Reibung auszuschalten, wird auf der zu drehenden Kolbenstange (Abb. 112 und 113) ein Hebel befestigt, der zwecks Auswuchtung

symmetrisch ausgebildet ist. Die Enden dieses Hebels sind mit glasartigen und polierten Stahlschuhen versehen, von denen einer sich auf die treibende, ebenfalls harte und polierte Rolle stützt. Diese ist auf einem Stirnrad gelagert, das durch eine biegsame Welle über ein Ritzel von einem Reguliermotor angetrieben wird. Während des Umlaufes des Stirnrades wälzt sich die Rolle durch eine an ihrem unteren Ende befindlichen Verzahnung an dem festen Zahnrad ab und wird somit durch entsprechende Wahl der Zähnezahls der Rolle und des Rades in dauernde Drehung mit rund 400 U/min versetzt. Durch diese Anordnung wird eine schnelle Gleitung in radialer Richtung zwischen der treibenden Rolle und dem getriebenen Schuh des Hebel-paares erzeugt und damit erreicht, daß die in die Axialrichtung fallende Komponente der Reibung sehr klein ist.

Die optische Einrichtung (Abb. 112 und 114) besteht aus einer Nernstlampe f , deren Leuchtfaden einen Spalt von s einstellbarer Breite beleuchtet. Die von diesem Spalt kommenden Lichtstrahlen werden durch die Kollimatorlinse 0 parallel zu der Ebene gerichtet, die durch die Linsenachse

geht und senkrecht zur Bildebene der Abb. 112 steht. Das Licht fällt dann auf den Drehspiegel e und wird von diesem auf die Linse p geworfen, die es in der Ebene m zu einem Bild des Spaltes s vereinigt; je nach der Stellung des Meßkolbens und damit des Spiegels wird das Bild des Spaltes höher oder tiefer auf die Ebene m projiziert. In dieser befindet sich der zweite, senkrechte Spalt, welcher aus der leuchtenden Bildlinie einen Punkt absondert, der auf das unmittelbar hinter dem Spalt (Abb. 115) mit gleichmäßiger Geschwindigkeit vorbeiziehende lichtempfindliche Papier fällt und so die Drucklinie aufzeichnet.

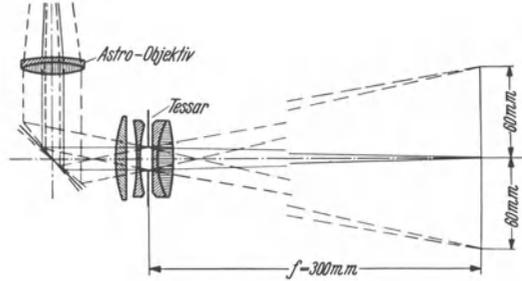


Abb. 114. Strahlengang des Druckschreibers.

Der Drehspiegel besteht aus nichtrostendem Kruppstahl und besitzt die aus Abb. 113 ersichtliche längliche Form, damit auch in den Grenzlagen der Ausschläge die ganze Blendenöffnung von Licht getroffen wird.

Die Papierführung in der Kamera wird in Abb. 115 gezeigt. Für die Festlegung des Zeitmaßstabes werden am Papier Zeitmarken im Abstand von je einer Sekunde aufgezeichnet. Eine Jaquet-Uhr u hebt zu diesem Zwecke sekundlich einen kleinen Hebel, der dann einem Lichtstrahl durch ein dreieckiges Loch im Spaltkörper den Durchtritt auf das Papier freigibt bzw. versperrt. Auf dem Papier werden außerdem drei Skalenlinien aufgezeichnet, um einen eventuellen Schwund desselben und unregelmäßige Führung infolge nicht immer gleicher Breite feststellen zu können. Die Aufzeichnung erfolgt mit Hilfe dreier Schlitze im Spaltkörper und entsprechender Beleuchtung derselben durch je eine kleine Glühlampe (Abb. 112); diese Skalenlinien dienen dann bei der Auswertung der Diagramme jeweils als Meßgrundlage.

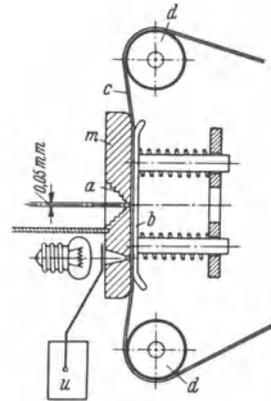


Abb. 115. Papierführung in der Kamera. m Spaltkörper, Rückseite poliert; a Abschrägung, zur Vermeidung von Lichtreflexen stufenförmig ausgebildet; b federnd angeordnete Führungsplatte, Vorderseite poliert; c lichtempfindliches Papier; d Umlenkrollen; u Sekundenuhr mit Abdeckhebel.

Es ist interessant, die Bedingungen für eine zufriedenstellende photographische Aufzeichnung des Diagrammes näher zu untersuchen. Falls beide Spalten 0,05 mm breit gemacht werden, ergibt sich für eine Papiergeschwindigkeit von 30 mm/s eine Belichtungszeit von $\frac{1}{600}$ s für gleichbleibenden Druck. Druckänderungen bedingen naturgemäß eine

Vergrößerung der Wanderungsgeschwindigkeit des Lichtfleckes auf dem Papier, so daß die Belichtungszeit auf $\frac{1}{2400}$ s oder noch mehr vermindert werden kann. An die Lichtempfindlichkeit des Papiers oder Films werden also ziemlich hohe Anforderungen gestellt.

Die Eichung der Meßfeder, die am zuverlässigsten kurz vor und nach jeder Meßreihe vorgenommen wird, erfolgt durch unmittelbares Anhängen von Gewichtsstücken an den Kolben mittelst einer Schale l (Abb. 112) und gleichzeitiges photographisches Aufzeichnen des Ausschlages.

Bei der Prüfung der Empfindlichkeit ergab sich, daß keine Spur von Eigenreibung zu entdecken war; bei einer Belastung des Kolbens mit 40 kg war eine Zunahme der Belastung von 10 g mit einer Lupe noch erkennbar.

Zwei Kolbengrößen, 4 cm² und 6 cm², wurden angewendet, mit der ersten wurde eine Feder mit einer Federkonstanten $c = 960$ kg/m, mit der letzteren eine solche mit $c = 480$ kg/m benutzt. Im ersteren Falle war die Eigenschwingungszahl 20 Hz, im letzteren 14 Hz, was für diesen Anwendungszweck vollkommen ausreicht.

Wegen der Verschiedenheit der Versuchsbedingungen war eine weitgehende Anpassungsmöglichkeit des Gerätes an die jeweils wechselnden Verhältnisse erforderlich. Durch Regulierbarkeit des Papiervorschubes, der Federspannung, Schlitzbreiten, Spiegelstellung, Lichtstärke und die Verwendung von Meßkolben verschiedener Querschnitte wurde dieser Anforderung Rechnung getragen.

b) Optische Indikatoren mit zwei Spiegeln von je einem Freiheitsgrad.

Bei den bisher beschriebenen Spiegelindikatoren wird nur ein einziger Spiegel angewendet, dessen Bewegungen vom Druck abhängig gemacht werden. Der andere Koordinatenwert, meistens der Zeitwert, wird durch eine umlaufende Filmtrommel erzeugt. Wenn die Achse der Trommel und auch der Lichtquelle in die Bewegungsebene des Spiegels fallen, so wird der Druckvorgang in einem geradlinigen, rechtwinkligen Koordinatensystem abgebildet, welcher Umstand die Auswertung des Diagrammes erleichtert. Ein Nachteil dieses Indizierverfahrens ist, daß das Diagramm nicht sichtbar und ohne Photographieren nicht erhältlich ist.

In der nächsten Gruppe von Indikatoren werden zwei Spiegel verwendet, d. h. beiden Koordinatenwerten wird je ein besonderer Spiegel zugeteilt; der Lichtstrahl fällt von einem Spiegel auf den anderen und dann auf eine Mattscheibe, wo das Diagramm beobachtet wird, oder auf einen Film, auf welchem es photographiert werden kann. Die Aufnahme geschieht also auf einem stillstehenden Film oder einer Platte. Das Diagramm erscheint aber an einem krummlinigen Koordinatensystem, dargestellt durch eine Kurvenschar, welche die Mattscheibe aus der

Vielheit von kegelähnlich gekrümmten Flächen ausschneidet, die die Lichtstrahlen bei konstanten Koordinatenwerten beschreiben. Um die dadurch verursachte Unbequemlichkeit und die Umzeichnung der

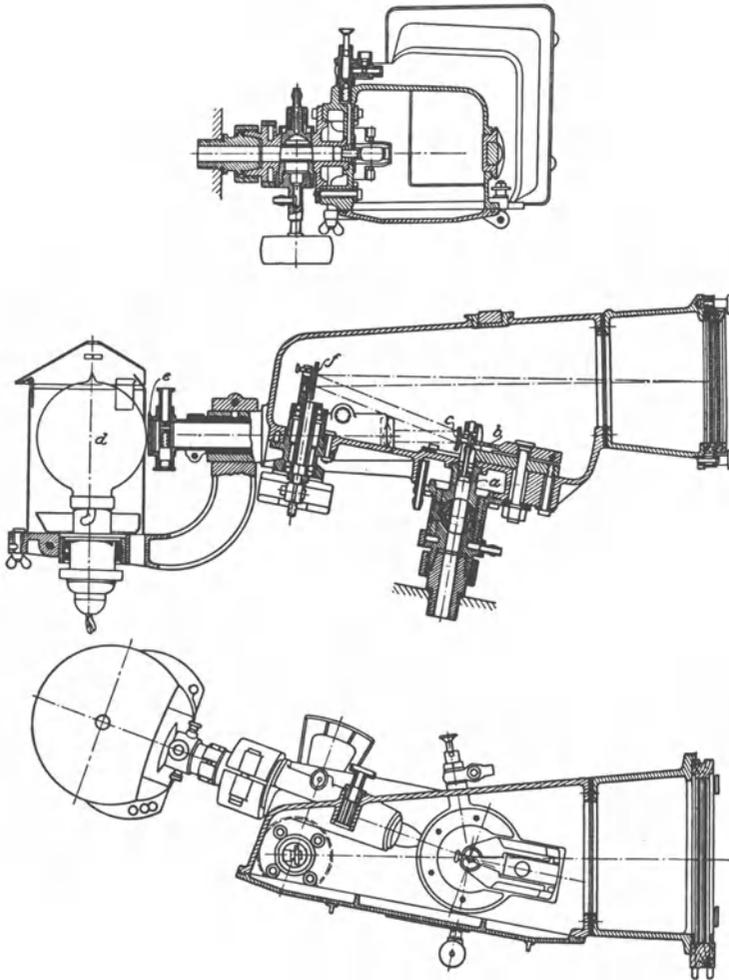


Abb. 116. Spiegelindikator nach Burstall. *a* Kolben (kugelig geschliffen); *b* Stabfeder; *c* Spiegel für die Druckaufzeichnung; *d* Lichtquelle; *e* Lochscheibe; *f* Spiegel für die Wegaufzeichnung. Bemerkenswert ist die Druckschmierung des Kolbens, und das Verschieberad für die Objektivlinse zur genauen Brennpunkteinstellung des Leuchtpunktes.

Diagramme zu vermeiden, müssen die Bewegungen beider Spiegel auf wenige Grade beschränkt werden. Um doch ein Diagramm von bequemer Größe zu erhalten, müssen die Länge des Lichtstrahles und folglich auch die Abmessungen des Gerätes eine ziemliche Größe erhalten, wodurch derartige Geräte ziemlich sperrig werden.

In diese Gruppe gehört der Indikator von Burstall (Abb. 116), welcher sich durch kräftige Bauweise, wohldurchgedachten Entwurf

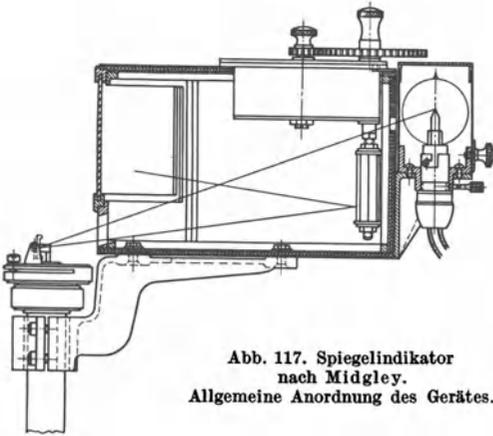


Abb. 117. Spiegelindikator nach Midgley.
Allgemeine Anordnung des Gerätes.

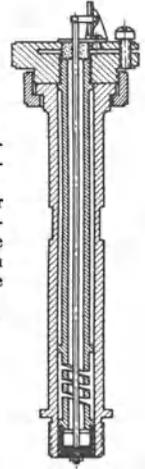


Abb. 120. Kolben und Federanordnung des Midgley-Indikators. Der Kolben schneidet glatt mit der inneren Wandfläche des Verbrennungsraumes und seine Bewegungen werden dem Spiegel durch eine lange Stange und einen Winkelhebel übertragen.

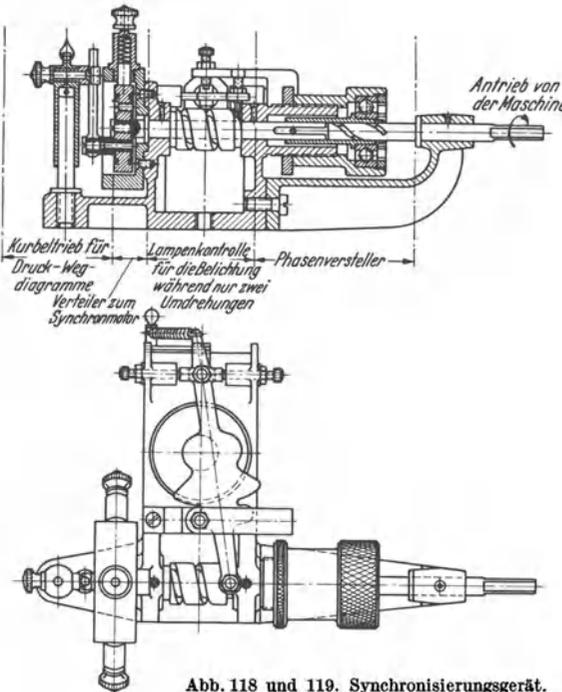


Abb. 118 und 119. Synchronisierungsgerät.

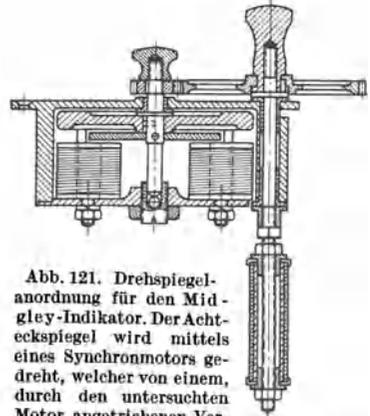


Abb. 121. Drehspiegelanordnung für den Midgley-Indikator. Der Achteckspegel wird mittels eines Synchronmotors gedreht, welcher von einem, durch den untersuchten Verteilergespeist und in Phasengleichheit gehalten wird. Wenn es erwünscht ist, ein Druck-Kolbenwegdiagramm aufzunehmen, wird nur eine Fläche des Spiegels benutzt. Die hin- und hergehende Bewegung wird dem Spiegel von einem kleinen Kurbetrieb erteilt, welcher am Ende der Synchronisierungsweile angeordnet ist. Die Bewegung wird durch einen feinen, durch eine Feder gespannten Stahldraht auf den Spiegel übertragen.

und eine weitgehende Funktionsteilung auszeichnet. Ein durch eine Stabfeder belasteter Kolben dient als Druckmeßelement; die Stabfeder

trägt an ihrem freien Ende den „Druck“spiegel. In die Bewegungsebene dieses Spiegels fällt die Drehachse des „Weg“spiegels, welcher von der Welle der zu untersuchenden Maschine zwangsläufig so angetrieben wird, daß seine Winkelausschläge dem Kolbenhub der Maschine verhältnismäßig sind. Andere bemerkenswerte Merkmale sind: Gerader, glatter Durchgangskanal ohne Einschnürungen vom Zylinderraum zum Indikatorraum; Druckschmierung für den Kolben; Wasserkühlung für den Indikatorzylinder und auch für den Absperrhahn; der Absperrhahn ist aus gehärtetem Stahl und frißt nicht an und bleibt nicht stecken, Kugellagerung für die Achse des Wegspiegels; Glühlampe von hoher Lichtstärke in einem verstellbaren Halter eingebaut; Einstellung der Leuchtfleckgröße (etwa $0,05 \times 0,05 \text{ mm}^2$) durch zwei aufeinander senkrecht angeordnete Schlitze von einstellbarer Breite; ein stabil gebautes Aluminiumgehäuse. Eine Glasplatte schützt die photographische Platte vor den Gasen und Öldämpfen, welche durch Undichtigkeit des Kolbens von der Maschine in die Indikatorraum eindringen können. Die Eigenfrequenz wird zu 1200 bis 1700 Hz angegeben, je nach der Federungszahl der benutzten Feder.

Im Indikator von Midgley (Abb. 117 bis 121) ist der Kolben tief in den Zylinder verlegt, damit er glatt mit der Zylinderwand abschneidet. Ein von der untersuchten Maschine durch Kontakte gesteuerter Synchronmotor treibt den Vieleckspiegel an, welche die Abszissenbewegung (Kurbelwinkel) bewirkt. Eine sinnreiche Einrichtung sorgt dafür, daß der Druckvorgang nur eines einzigen Kreisprozesses auf dem Film aufgenommen wird.

Beim Indikator von Huguenard, Magnan und Planiol (Service Technique et Industriel de l'Aéronautique) (Abb. 122) wird eine gekrümmte Rohrfeder aus Stahl (Bourdon-Rohr) von kleinen Abmessungen als Druckmeßelement angewendet. Die zwei freien Enden der Rohrfeder sind durch kurze Stahlblätter an einem Spiegel derart befestigt, daß die gegenseitigen Bewegungen der beiden Enden einen Winkelausschlag des Spiegels bewirken. Die Bewegungen sind äußerst klein, können aber einwandfrei vergrößert werden, da durch die Befestigung durch Stahlblätter jeglicher toter Gang und Reibung vermieden werden. Die Lichtstrahlänge ist etwa 1 m, die Eigenfrequenz etwa 3000 Hz.

Der Spiegelindikator mit zwei Spiegeln an einer Balkenfeder von P. G. Burman (Atlas-Imperial Diesel Engine Co., Oakland, California,

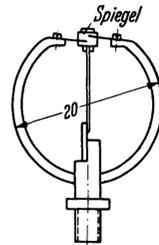


Abb. 122. Spiegelindikator nach Huguenard, Magnan und Planiol (Service Technique et Industriel de l'Aéronautique, Frankreich). Die beiden Enden des gekrümmten Rohres werden mittels zwei kurzer Stahlblätter an einem Spiegel befestigt. Der entstehende Hebelarmabstand ist etwa 1 mm, die Lichtstrahlänge ist etwa 1 m, wodurch eine 100-fache Vergrößerung erreicht wird.

USA.) wurde für die Untersuchung des Brennstoffdrucks in Düsen von Dieselmotoren entworfen und mit Erfolg verwendet (Abb. 123).

Der Indikator der „Proefstation Delft“ (Abb. 124—129), welcher von van Dyk und Broeze der Versuchsanstalt der Royal Dutch Shell Co. entwickelt wurde, stellt einen bedeutenden Fortschritt dar und zeichnet sich durch mehrere sinnreiche Merkmale aus.

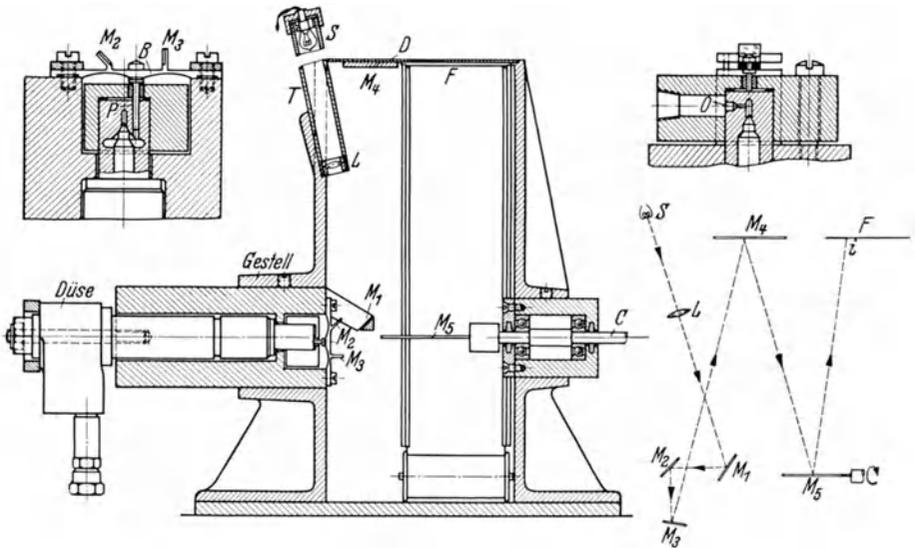


Abb. 123. Spiegelindikator nach Burman (Atlas-Imperial Diesel Engine Co.) für Einspritzdüsen. Eine Sonderdüse mit eingeschlifftem Kolben P und Abflußöffnung O wird angewendet. Die Kolbenkraft wird auf die Balkenfeder B übertragen, welche zwei Spiegel M_2 und M_3 trägt; diese erfahren eine Winkeländerung, wenn eine Kolbenkraft auf die Balkenfeder ausgeübt wird. Die Balkenfeder ist aus schwedischem Stahl (32 mm lang, 6 mm breit und am schmalsten Querschnitt 0,75 mm dick) angefertigt. Die Spiegel sind aus aluminiertem Glas, etwa $4,5 \times 4,5$ mm Oberfläche, 0,25 mm dick). Die Eigenschwingungszahl wird zu 2670 Hz angegeben. Der Spiegel M_5 wird durch die Welle C mit der Geschwindigkeit der Brennstoffpumpenwelle angetrieben. Die anderen Spiegel M_1 und M_4 sind feststehend und dienen zur Verlängerung des optischen Hebels. Strahlengang: Lichtquelle S (photomikrographische Projektorlampe), Kollektorlinse L , fester Spiegel M_1 , druckbewegliche Spiegel M_2 und M_3 , fester Spiegel M_4 , wegbeweglicher Spiegel M_5 , Film F (aus der für kardiographische Untersuchungen gebrauchten Sorte).

Abb. 124 zeigt das vollständige Gerät angebracht an einem Dieselmotor. Es besteht aus einem Druckmeßelement samt der dazugehörigen Optik, dem wegmessenden optischen System, der Lichtquelle und der Kassette für die photographische Platte. Die hauptsächlichsten Elemente sind auf einem kräftigen Stahlkörper angeordnet, welcher auf der Maschine befestigt wird, wie das Abb. 125 klar darstellt. (Die Abb. 125 entspricht einer etwas neueren Ausführung als Abb. 124.)

Das Druckmeßelement (Abb. 125) besteht aus einer gehärteten Stahlscheibe, welche zwischen zwei Stahlblöcken festgehalten wird. Der Körper B enthält die Druckkammer und ihre Verbindungen zum Maschinenzylinder. Er wird in ein Ventilgehäuse G eingeschlifft, welches unmittelbar im Zylinderkopf befestigt wird und das Absperrventil H

und Entlüftungsventil *J* enthält. Das letztere kann auch als Zuleitungsventil für Druckluft benutzt werden, wenn das Gerät geeicht wird. Falls notwendig, kann auf das Absperrventil verzichtet werden, da die benutzte Plattenfeder sehr widerstandsfähig und dauerhaft ist. Der freie Durchmesser der Plattenfeder *A* ist 30 mm für Maschinen mit verhältnismäßig niedriger Drehzahl und 28 mm für höhere Drehzahlen und höhere Drücke, wenn eine höhere Eigenfrequenz erwünscht ist. Der Kammerraum unter der Plattenfeder ist nur 0.1 mm tief. Der Verbindungskanal zwischen dem Indikatorraum und Verbrennungsraum ist trichterförmig und hat 5 mm \varnothing an der Zylinderseite und 1,5 mm an der Indikatorseite. Diese Form wurde angeblich zur Vermeidung von Gasschwingungen und zur Verringerung des zusätzlichen Rauminhaltes vorteilhaft gefunden. Der gesamte Zusatzraum beträgt etwa 700 mm³; davon entfallen 60 mm³ auf den Kammerraum unter der Plattenfeder. Wenn notwendig, kann der gesamte Zusatzraum durch ein kleineres Verbindungsrohr auf 300 mm³ verringert werden.

Der Block *C* trägt das Prisma *D*, welches zusammen mit dem auf der Plattenfeder befestigten Prisma *E* die Richtung des Lichtstrahles bestimmt.

Das Prisma *D*, auf welches eine Kondensorlinse mit Kanadabalsam gekittet ist, ist in einem einstellbaren Halter *F* gefaßt, welcher zwischen zwei Kugeln (von etwa 3 mm \varnothing) festgeklemmt wird. Diese Befestigung gestattet eine leichte Einstellung und eine doppelte Wirkungsweise des Indikators. Wenn das Druckventil *H* abgeschlossen ist (so daß die Plattenfeder stillsteht), kann der Halter des Prismas *D* mit einem Maschinenteil verbunden werden, dessen Bewegung von Interesse ist (z. B. dem Einspritzventil). In dieser Weise können das Eröffnungsdiagramm des Brennstoffventils und das Druckdiagramm auf derselben photographischen Platte aufgenommen werden.

Die Plattenfeder (Abb. 126) ist aus gehärtetem Stahl von den folgenden Eigenschaften und Abmessungen: Festigkeit: 80 bis 90 kg/mm², Dehnung (bezogen auf eine Länge gleich 10 \varnothing) etwa 12 bis 8%, 30 mm \varnothing , Dicke 0,9 mm. Sie wird auf zwei Blöcken *B* und *C* satt eingeschliffen.

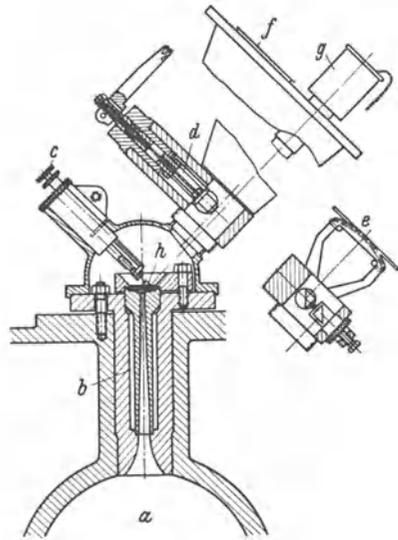


Abb. 124. Spiegelindikator nach van Dyck und Broeze (Proefstation „Delft“ der Bataafsche Petroleum Maatschappij. Gebaut von Kipp und Zonen, Delft, Holland), an einer Dieselmachine aufgebaut. *a* Verbrennungsraum; *b* Kühlwasserraum; *c* Stellschrauben für Prismen; *d* Blattfedern; *e* Hebelantrieb; *f* Schirm oder phot. Platte; *g* Lampe; *h* Plattenfeder.

Das rechtwinklige Prisma E von 6 mm Seitenlänge wird an der Plattenfeder in einer Entfernung von 8,5 mm von dem Mittelpunkt angeordnet. Ein Loch von 1,5 mm \varnothing wird in die Plattenfeder gebohrt, in welches der Stiel einer Platte unter Hartlötung eingepaßt wird, ohne daß die Plattenfeder verdreht wird. Das Prisma wird in einer Metallfassung so befestigt, daß die untere, reflektierende Seite des Prismas mit der Oberfläche der Fassung nicht in Berührung kommt. Dann wird diese Fassung an der Platte angelötet. Auf diese Weise nimmt das Prisma an den Bewegungen der Plattenfeder an der Stelle teil, wo die Winkel-

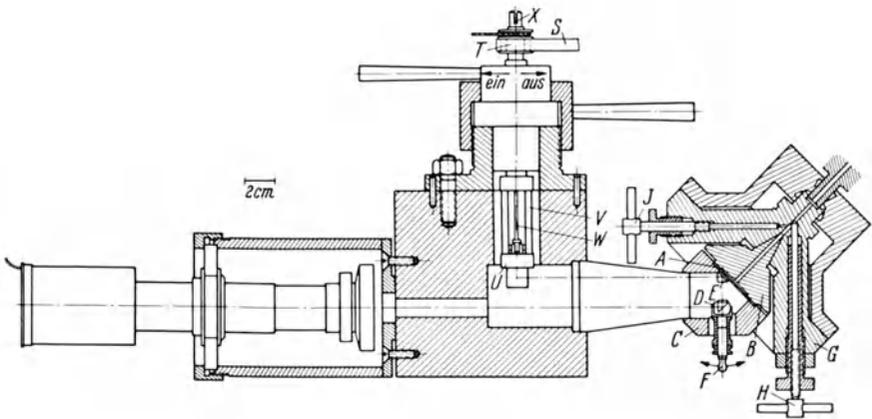


Abb. 125. Eine, von Abb. 123 etwas abweichende Ausführung des Spiegelindikators von van Dyck und Broeze. Einzelheiten des Spiegelindikators nach van Dyck und Broeze. Die Plattenfeder A wird zwischen die Stahlblöcke B und C eingeklemmt. Der Lichtstrahl fällt von der Lichtquelle auf das Prisma D , kommt von dort zu dem Prisma E auf der Plattenfeder und dann auf das Prisma U , dem eine, mit dem Maschinenkolben verhältnismäßige Bewegung mittels Stahlband S , Trommel T und Welle X erteilt wird. G ist das Gehäuse für das Absperrventil H ; J ist das Entlüftungsventil.

ausschläge am größten sind. Dadurch fallen jegliche Fehlerquellen weg, die bei anderen Indikatoren durch Gelenke, toten Gang und Unvollkommenheiten der Bewegungsübertragung von Plattenfeder zum Spiegel (oder Prisma) entstehen können.

Das wegmessende Element besteht aus einer kleinen Kröpfung, welche auf die Kurbelwelle oder die Nockenwelle der zu untersuchenden Maschine aufgesetzt wird. Die Bewegung der Kurbelkröpfung wird auf eine Rolle und einen Hebel übertragen, welcher mittels eines Stahlbandes S eine kleine Trommel T hin- und herbewegt. Die Bauweise des Antriebes zeigt Abb. 129.

Die Schwingungen dieser Trommel werden auf das „Weg“prisma U mit verkleinerten Winkelausschlägen in der folgenden Weise übertragen: Die Platte, auf welcher das Prisma sitzt, wird durch fünf Blattfedern V (40 mm hoch, 5 mm breit, 0,8 mm dick), deren Enden in den radialen Schlitzen zweier Endringe (9 mm hoch, 22 mm \varnothing) gesichert sind, gehalten (Abb. 127).

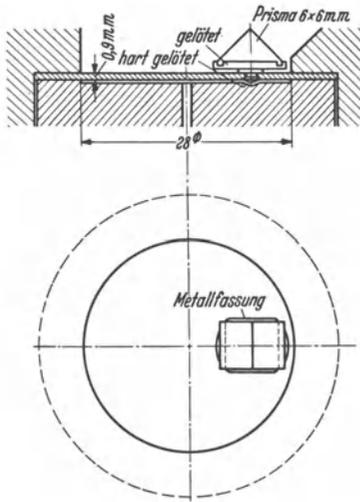


Abb. 126. Einzelheiten der Plattenfeder und des Prismas für die Druckmessung.

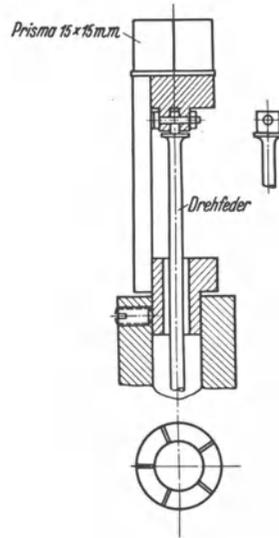


Abb. 127. Einzelheiten des Wegmeßprismas.

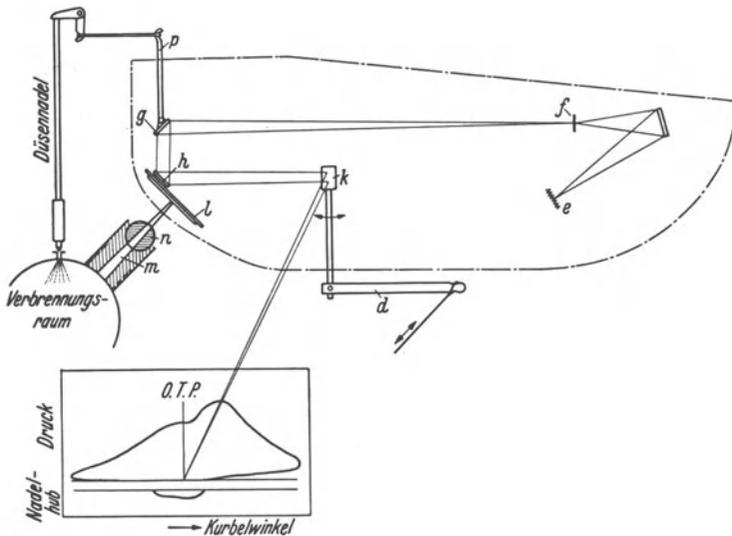


Abb. 128. Strahlengang des Spiegelindikators nach van Dyck und Broeze. *e* Lampe; *f* Lochscheibe, auf welche der Lampenfaden scharf eingestellt wird; *g* Spiegel, welcher gewöhnlich stehend ist, aber auch mittels des Hebels *p* geschwenkt werden kann; *h* Spiegel auf der Plattenfeder, welche durch die Bohrung *m* und Hahn *n* dem Druck der Verbrennungsgase ausgesetzt wird; *k* Spiegel, welcher mittels der Trommel und Hebel *d* eine hin- und herdrehende Bewegung, verhältnismäßig dem Kolbenwege der untersuchten Maschine, erhält.

Dieser Aufbau ist nachgiebig gegenüber Verdrehungen und steif gegenüber Biegungen. Die Bewegung der Trommel *T*, an welcher das Band

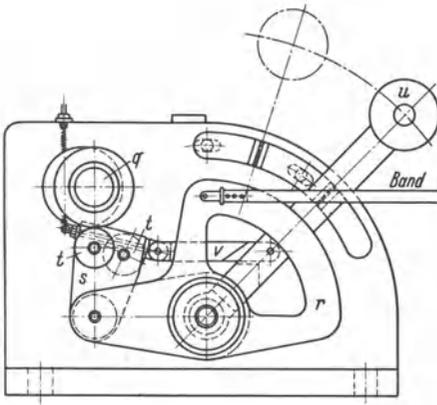
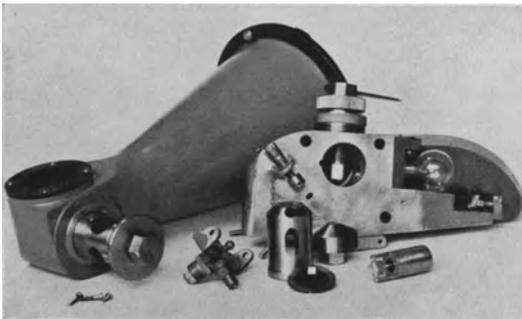


Abb. 129. Trommelantrieb. Auf die Welle q sind zwei Scheiben von gleichem Durchmesser aufgekeilt, die eine konzentrisch, die andere exzentrisch. Das Stahlband wird am Hebel r befestigt, welcher durch die Welle q mittels des Zwischenstückes s hin- und hergeschwenkt wird. Am Zwischenstück s sind zwei Rollen t gelagert. Mittels des Handgriffes u , welcher durch Stange v mit Stück s verbunden ist, kann eine der beiden Rollen entweder mit der konzentrischen oder mit der exzentrischen Scheibe in Berührung gebracht werden. Im ersten Falle bleibt das Band stehen; im zweiten Falle wird der Hebel r hin- und hergeschwenkt und dem Band diese Bewegung der Trommel übermitteln.

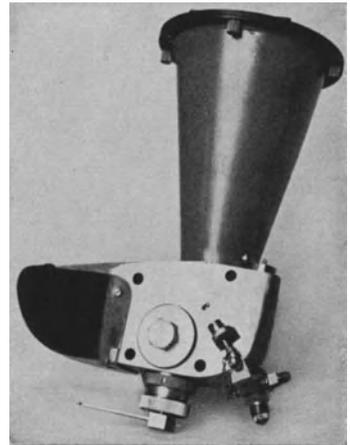
angreift, wird nun auf die Platte U mittels der Drehfeder W (2,2 mm \varnothing , 140 mm lang) übertragen (Abb. 125). Die Trommel T (24 mm \varnothing) sitzt auf einer kurzen Welle X , welche in zwei sich selbsteinstellenden Kugellagern gelagert ist. Der Ausschlag des Bandes (10 mm) entspricht etwa 48 Grad Winkelausschlag der Trommel, welcher durch die elastische Verdrehung auf einen Winkelausschlag der Platte von etwa 4,8 Grad vermindert wird. Der Prismenantrieb erfolgt durch einen Handgriff, durch den der die Plattform tragende Block um 180 Grad umgelegt wird. Dadurch wird das Band auf die Trommel aufgewickelt und die Drehfeder unter Spannung gesetzt. In dieser Weise

wird also auch in der Wegaufzeichnung jeder tote Gang vermieden. Eine Klemmutter sichert den Block in seinen zwei Stellungen, d. h. in



a

Abb. 130a und b. Neuere Ausführungsform des Spiegelindikators nach van Dyck und Broeze in auseinandergenommenem und in zusammengebautem Zustand.



b

der wirksamen und in der unwirksamen. Ein einstellbarer Anschlag dient zur Feststellung der Federspannung.

Der Faden einer 6-Volt-Glühlampe (Automobilscheinwerfertype) wird mittels einer Kondensorlinse in den Brennpunkt einer kleinen Öffnung gebracht. Diese Öffnung dient als Lichtquelle.

Das Diagramm füllt eine photographische Platte der Größe 9×12 cm ziemlich aus. Der Abstand der zwei Prismen ist 12 cm, derjenige zwischen dem Wegprisma und der Photoplatte 60 cm. Abb. 131 zeigt eine Eichkurve, die Abb. 130 und 132 zeigen die

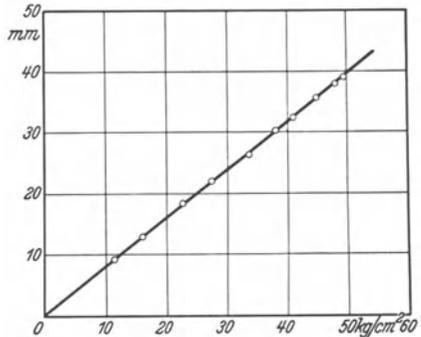


Abb. 131. Eichkurve zum Spiegelindikator nach van Dyck und Broeze.

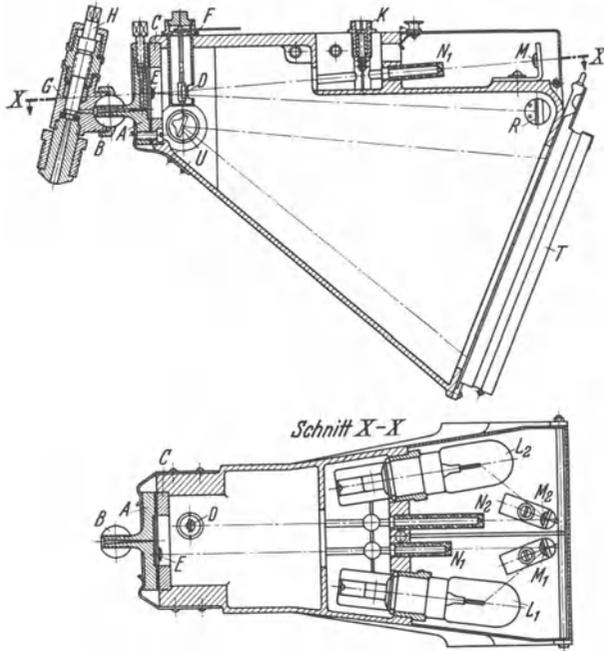


Abb. 132. Neuester Spiegelindikator der „Proefstation Delft“. Wegen Verringerung der Abmessungen wird ein stillstehender Ablenspiegel R verwendet. Übrige Teile: Die Blöcke A und C halten die Stahlmembran mit dem daran befestigten Druckspiegel E eingespannt. Die Kugel B wird am Block G festgehalten, welcher das Abschlußventil H enthält. Dem Wegspiegel U wird eine, mit dem Kolbenwege verhältnismäßige Bewegung erteilt. Letzterer ist in im Bilde nicht gezeigten Kugellagern gelagert. Der Spiegel D dient für die Aufzeichnung der Bewegung der Einspritzdüsenadel. Der Lichtverschluß K wird mittels Drahtauslöser betätigt. Die zwei Lichtstrahlen werden durch die beiden Lampen L_1 und L_2 erzeugt, durch die zwei Festspiegel M_1 und M_2 und durch die zwei Lichtöffnungen N_1 und N_2 den beiden Spiegeln E und D zugeführt. Die Diagramme werden auf 6×9 cm Kassettenfilmen T aufgenommen.

letzte etwas mehr gedrängte Ausführungsform dieses Gerätes, in welcher aber sämtliche oben aufgeführte Merkmale beibehalten worden sind.

c) Optische Indikatoren mit einem Spiegel
mit zwei Freiheitsgraden.

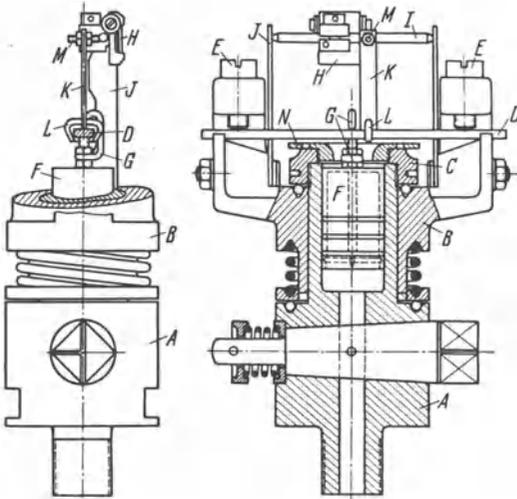


Abb. 133. Spiegelindikator nach Hopkinson (Hersteller: Dobbie McInnes and Clyde, Glasgow). *F* Druckkolben; *D* beiderseits eingespannte Balkenfeder; die Kolbenbewegung wird dem Spiegel *H* mittels Stange *K* und Hebelarm *M* übertragen; die Wegbewegung wird auf Rahmen *B* übertragen, welcher die Baugruppe von Feder, Spiegel usw. trägt und welcher um die Kolbenachse eine Drehbewegung ausführen kann; Kugellager dienen zur Vermeidung der Reibung und eine Schraubenfeder zur Aufhebung von totem Gang. Die Einspannung der Balkenfeder wird mittels Klemmschrauben bewirkt, welche eine Anfangsspannung auf die Feder ausüben, wodurch toter Gang vermieden wird.

In der anderen Gruppe von Spiegelindikatoren, bei welchen ein einziger Spiegel angewendet wird, ist der Spiegel um zwei aufeinander senkrecht stehende Achsen drehbar; die Bewegung um die eine Achse ist vom Druck, die Bewegung um die andere Achse vom anderen gewählten Koordinatenwert (Zeit, Kolbenweg) abhängig. Das so entstehende Diagramm kann sowohl beobachtet wie auch photographisch aufgezeichnet werden.

Ein Vertreter dieser Gruppe ist der Indikator nach Hopkinson (Abb. 133), bei welchem ein mit einer Balkenfeder belasteter Kolben als Druckmeßorgan angewendet

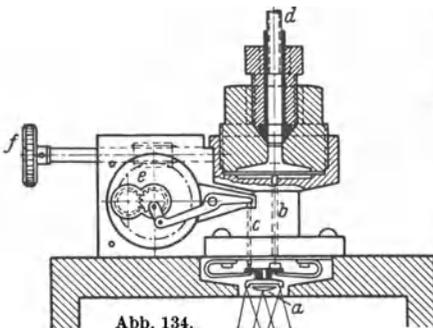


Abb. 134.

Abb. 134. „Manograph“ von Hospitalier und Carpentier. Die Druckgase werden durch das Rohr *d* in Abb. 134 zur Plattenfeder geführt, deren Bewegungen mittels Stange *b* auf den Spiegel *a* übertragen werden. Die Stange *c* übermittelt die Wegbewegung des von der untersuchten Maschine angetriebenen Planetengetriebes *e*; Das Kordelrad *f* dient zur Phaseinstellung.

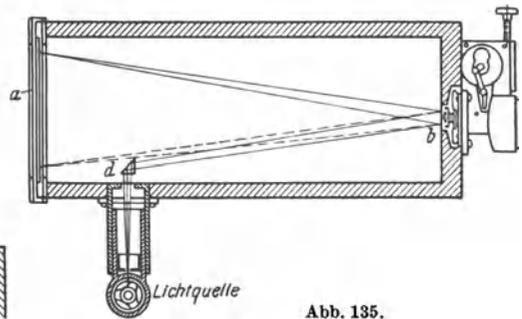


Abb. 135.

Abb. 135. Gesamtanordnung des „Manograph“ von Hospitalier und Carpentier. *a* Photographische Platte; *b* Druckmeßapparat; *d* Ablenkprisma für den Lichtstrahl.

wird, dessen Bewegungen auf den Spiegel übertragen werden. Der Spiegel ist um eine zur Kolbenbewegung senkrechte Achse in Spitzen

gelagert, während die aus Kolben, Feder und Spiegel bestehende Gruppe um die Kolbenachse drehbar angeordnet ist. Die Abszissenbewegung wird dieser Gruppe erteilt. Die so erhaltene kombinierte Bewegung des Lichtstrahles wird auf einer Mattscheibe aufgefangen oder auf einer lichtempfindlichen Platte festgehalten. Drei austauschbare Kolben werden mit dem Indikator geliefert, deren Flächen sich wie 1:2:4 verhalten. Zwei Balkenfedern werden mitgeliefert, deren Federzahlen im Verhältnis von 1:5 stehen. Durch eine passende Auswahl des Kolbens und der Feder kann der Diagrammaßstab in weiten Grenzen geändert werden. Die Einzelheiten der Konstruktion sind aus der Abbildung ersichtlich.

Im sog. „Manograph“ von Hospitalier und Carpentier (Abb. 134 und 135) wird eine Plattenfeder als Meßfeder und Abschlußorgan angewendet. Der kreisförmige Spiegel wird mittels kleiner Blattfedern gegen drei Stützpunkte gedrückt, welche die Spitzen eines gleichschenkligen, rechtwinkligen Dreiecks bilden. Der Stützpunkt bei dem rechten Winkel ist stillstehend; der zweite Punkt wird von der Plattenfeder proportional dem Druck verschoben; dem dritten Punkt wird mittels eines kleinen Kurbeltriebes eine dem jeweiligen Kolbenwege verhältnismäßige Bewegung erteilt. Der genannte Kurbeltrieb wird von der Maschinenwelle angetrieben. Durch ein kleines Planetengetriebe kann die nötige

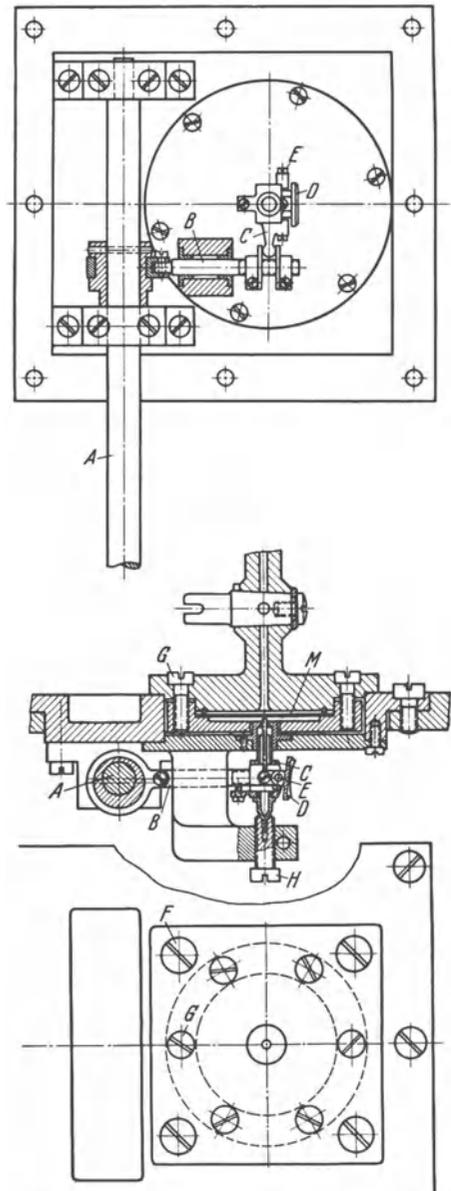


Abb. 136. Spiegelindikator der Société Genevoise (Genf, Schweiz). Die druck-proportionale Bewegung der Plattenfeder *M* und die weg-proportionale Bewegung der Stange *B* werden dem Spiegel *D* in der in der Abbildung dargestellten Weise übermittelt. Die Welle *A* wird von der zu untersuchenden Maschine mit Kurbelwelledrehzahl angetrieben. Eine daran sitzende Exzentrerscheibe bewirkt die Wegbewegung des Spiegels. Bemerkenswert ist die Dichtung der Plattenfeder mittels eines Ringes von rhombischem Querschnitt.

Phasengleichheit mit der Kolbenbewegung der zu untersuchenden Maschine eingestellt werden. Der Spiegel erhält so die erwünschte kombinierte Bewegung.

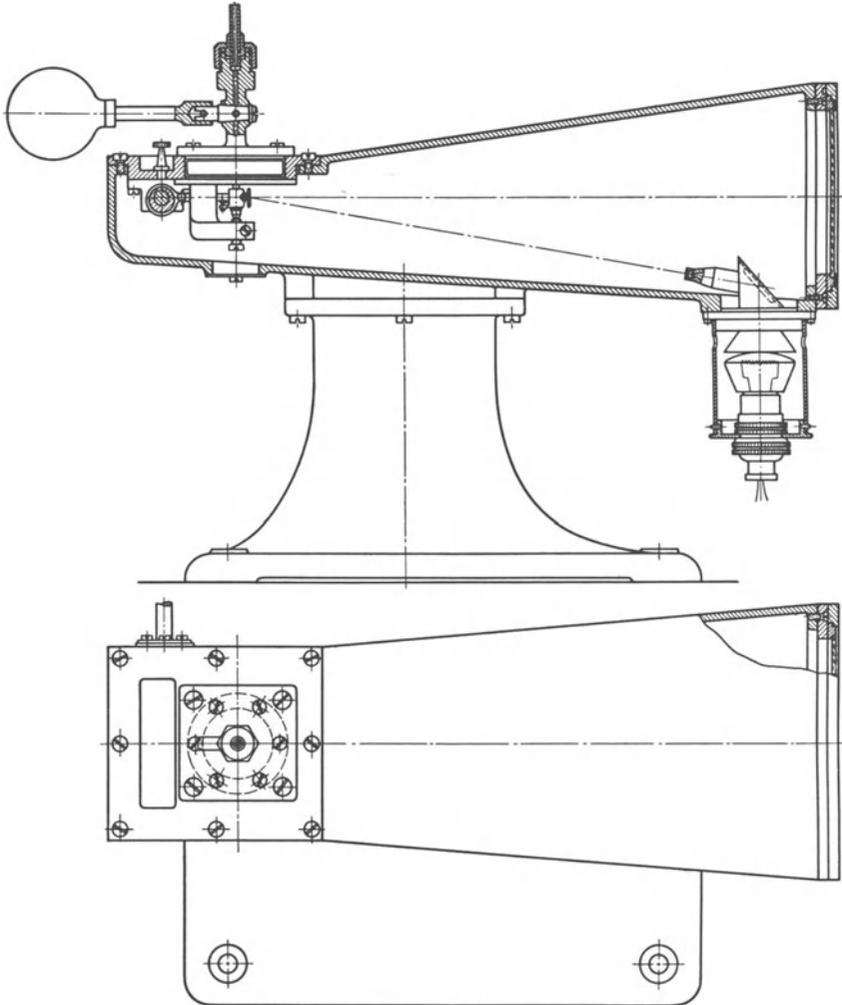


Abb. 137. Gesamtanordnung der Spiegelindicators der Société Genevoise. Elemente der Spiegelbewegung, Mattscheibe, Lichtquelle, Lochscheibe zur Erzeugung des Lichtstrahles.

Ähnlich im Grundsatz, aber von noch sorgfältigerer Bauweise ist der Indikator der Société Genevoise d'Instruments de Physique (Genf, Schweiz) (Abb. 136 und 137), in welchem ebenfalls eine Plattenfeder Verwendung findet, die gleichzeitig als Druckmeß- und als Abschlu organ dient.

Die Federungszahl einer Plattenfeder hängt von der Temperatur ab, deshalb ist der Diagramma stab der obigen beiden Geräte nicht konstant,

sondern wird von der Temperatur beeinflusst. Um diese Fehlerquelle auszuschalten, wird im Indikator von Schultze (Abb. 138) eine schwache Metallmembran angewendet, welche lediglich als Absperrorgan dient. Diese Membran wird mit einer außenliegenden Stabfeder belastet.

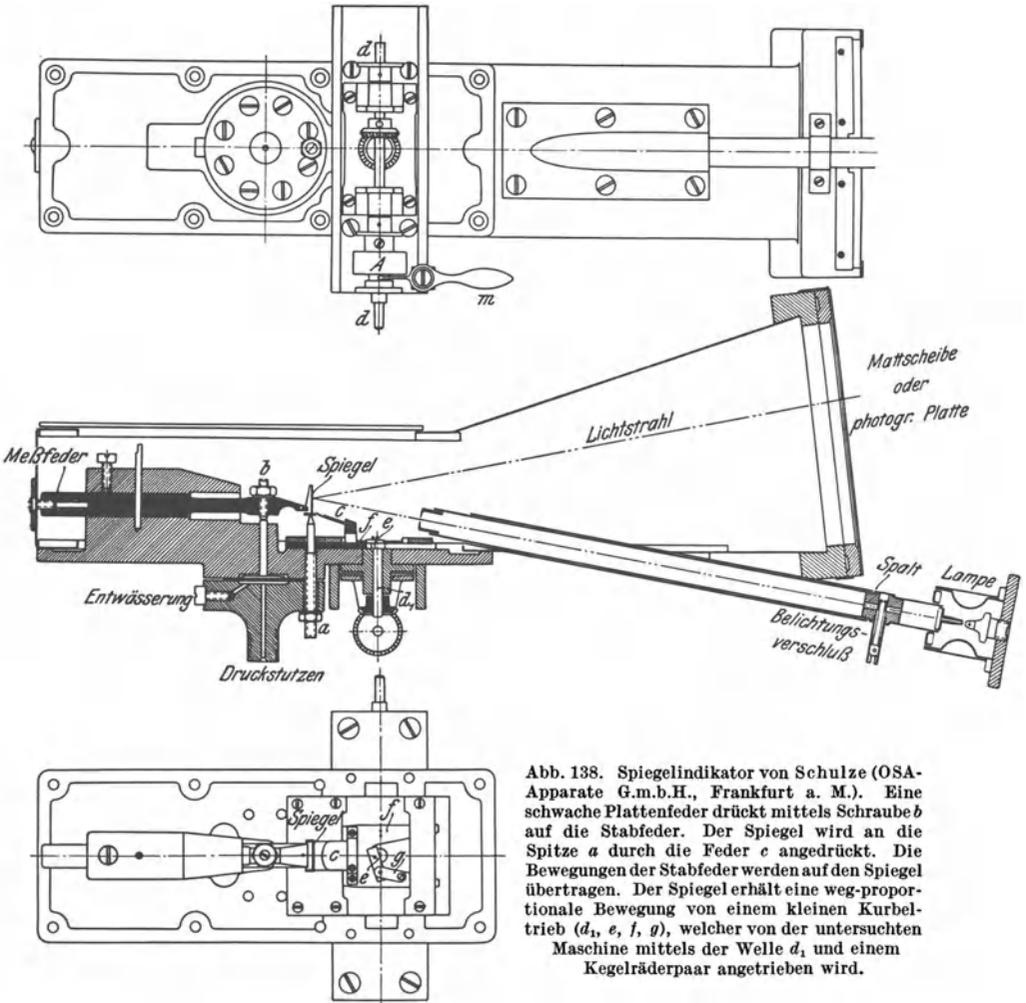


Abb. 138. Spiegelindikator von Schultze (OSA-Apparate G.m.b.H., Frankfurt a. M.). Eine schwache Plattenfeder drückt mittels Schraube *b* auf die Stabfeder. Der Spiegel wird an die Spitze *a* durch die Feder *c* angedrückt. Die Bewegungen der Stabfeder werden auf den Spiegel übertragen. Der Spiegel erhält eine weg-proportionale Bewegung von einem kleinen Kurbeltrieb (*d*₁, *e*, *f*, *g*), welcher von der untersuchten Maschine mittels der Welle *d*₁ und einem Kegelräderpaar angetrieben wird.

Der Indikator von Thring (in seiner neueren Ausführung von Rumpff auf S. 63 schon beschrieben) wendete in seinem ursprünglichen Entwurf eine doppelte Bewegung des Spiegels an, indem seine gesamten druckmessenden Teile (Kolben, Rohrfeder, Spiegel) um die Kolbenachse drehbar angeordnet wurden. (Amerikanische Patentschrift 1398608 von 1921.)

Der Spiegelindikator nach de Juhasz (Versuchsanstalt des The Pennsylvania State College) (Abb. 139) dient für die Aufzeichnung von kleinen Bewegungen, insbesondere des Nadelventils von Einspritzdüsen von Dieselmotoren. Die ganze Spiegelgruppe (Spiegel, Schneidenlager, Rückholfeder) ist in einem Drehkörper untergebracht, welcher von der

zu untersuchenden Maschine oder Pumpe angetrieben wird. Das Gerät wird gleichmäßig mit der zu untersuchenden Düse aufgebaut. Die Bewegungen der Nadel werden durch einen Winkelhebelarm auf den Spiegel übertragen.

Diese optischen Indikatoren sind mit dem Nachteil oder wenigstens der Unbequemlichkeit behaftet, daß das Koordinatensystem des Diagrammes nicht geradlinig und rechtwinklig ist, sondern aus zwei einander schneidenden Kurvenscharen besteht und infolgedessen der Diagrammaßstab sich von Punkt zu Punkt ändert. Dieser Umstand macht eine Umzeichnung des Diagrammes in ein rechtwinkliges Koordinatensystem notwendig, bevor dasselbe ausgewertet werden kann. Die geometrischen Verhältnisse sind in Abb. 140 schematisch dargestellt.

Der Lichtstrahl von der Lichtquelle L fällt auf den Spiegel M , welcher um die zwei miteinander einen rechten Winkel bildenden Achsen $a-a$ und $b-b$ geschwenkt wird. Die Anordnung ist so getroffen, daß der Lichtstrahl die Ebene der beiden Achsen in deren mittlerer Lage annähernd senkrecht trifft. Bei Auslenkung des Spiegels aus seiner mittleren Lage wird auch der Winkel zwischen Spiegel und Lichtstrahl geändert. In Abb. 140a ist die Verdrehung α um die Achse $a-a$ ein Maß für die Abszisse, die Verdrehung β um die Achse $b-b$ ein Maß der Ordinate. Die Spiegelsenkrechte

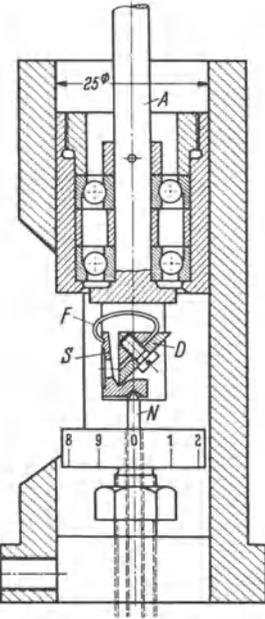


Abb. 139. Spiegelindikator nach de Juhasz für die Aufzeichnung von den Nadelbewegungen einer Brennstoff-Einspritzdüse. Der Spiegel S ist um die Schneide D schwenkbar. Die Bewegungen der Nadel N werden auf Spiegel übertragen. F ist eine Rückholfeder für den Spiegel. Die ganze Spiegelgruppe ist auf der Welle A aufgebaut und nimmt an deren Drehungen teil.

schneidet die zylindrische Schirmfläche S in Punkt N , und der zurückgeworfene Lichtstrahl schneidet den Schirm in Punkt P . Die geometrische Konstruktion ist leicht auszuführen, wenn man bedenkt, daß der Lichtstrahl, die Spiegelsenkrechte und der zurückgeworfene Strahl in einer Ebene liegen, und daß der Winkel $LMN = \gamma$ gleich dem Winkel $NMP = \gamma$ ist. In der angegebenen Weise kann zu jedem Winkelpaar α und β der entsprechende Punkt P gefunden werden. Das so erhaltene Koordinatensystem zeigt Abb. 140b auf der in die Ebene abgewinkelten Schirmfläche in Form von zwei Kurvenscharen. Daraus

folgt, daß der Diagrammaßstab sich von Punkt zu Punkt ändert und für eine Auswertung das Diagramm in ein rechtwinkliges Koordinatensystem gleichmäßigen Maßstabes umgezeichnet werden muß.

Um diese Fehlerquelle zu vermindern, ist es bei den bisherigen Indikatoren dieser Art notwendig, die Winkelausschläge des Spiegels in

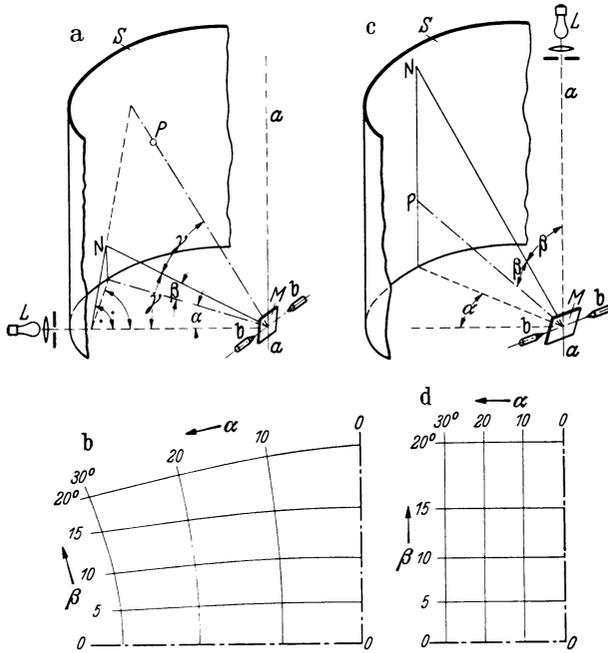
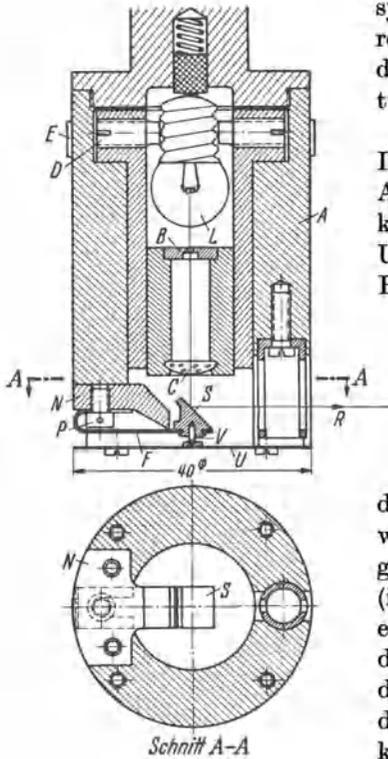


Abb. 140a–d. Strahlengang in Spiegelindikatoren, in welchen der Spiegel zwei Freiheitsgrade hat. a Lichtquelle außerhalb der Ebene der beiden Drehachsen. *L* Lichtquelle; *M* Spiegel; *S* Schirm; *b-b* Drehachse für die Ordinatenkomponente; β durch die Ordinatenkomponente verursachter Winkelausschlag des Spiegels; *a-a* Drehachse für die Abszissenkomponente; α durch die Abszissenkomponente verursachter Winkelausschlag des Spiegels; *N* Stoßpunkt der Spiegelsenkrechten; $LMN = \gamma$ Einfallswinkel des Lichtstrahles; $NMP = \gamma$ Rückwurfswinkel des Lichtstrahles; *P* Stoßpunkt des zurückgeworfenen Strahles auf die Schirmfläche. b Koordinatennetz an der abgewickelten Schirmfläche, entsprechend gleichem Abszissenwinkel α und Ordinatenwinkel β , gemäß Anordnung a. c Lichtquelle in einer der Drehachsen (in der Abszissenachse *a-a*) des Spiegels, Anordnung nach de Juhasz. *L, M, S* Lichtquelle, Spiegel, Schirm; *a-a* Drehachse für die Abszissenkomponente; *b-b* Drehachse für die Ordinatenkomponente; α Abszissenwinkel; β Ordinatenwinkel; *N* Stoßpunkt der Spiegelsenkrechten; *P* Treffpunkt des zurückgeworfenen Strahles auf die Schirmfläche. d Koordinatennetz auf der abgewickelten Schirmfläche, entsprechend gleichem Abszissenwinkel α und Ordinatenwinkel β , gemäß Anordnung c.

beiden Richtungen auf einige Winkelgrade zu beschränken. Dieser Umstand macht aber zur Erreichung eines genügend großen Diagramms eine große Entfernung zwischen Spiegel und Schirm notwendig, wodurch die Geräte groß und sperrig werden.

Um diesen Übelstand zu beheben, hat de Juhasz den Strahlengang nach Abb. 140 c gestaltet. Die Lichtquelle ist in eine der Drehachsen des Spiegels verlegt (in der Abbildung in die Achse *a-a*). Auf diese Weise fallen der Lichtstrahl, die Spiegelsenkrechte und der zurückgeworfene Strahl immer in eine Meridianebene des zylindrischen Schirmes, wodurch

die geometrischen Verhältnisse des Strahlenganges für alle Werte der Abszisse α gleich werden. Durch diese Anordnung wird das Koordinatensystem an der abgewickelten Zylinderfläche rechtwinklig und geradlinig (Abb. 140 d) und die Winkelausschläge können in beiden Richtungen groß gewählt werden.



Den nach diesem Grundsatz entworfenen Indikator zeigt Abb. 141. Er dient in dieser Ausführungsform für die Aufzeichnung von kleinen Bewegungen (insbesondere für die Untersuchung der Nadelbewegung einer Brennstoffdüse); in Verbindung mit irgendeinem Druckmeßelement läßt er sich aber als Druckmeßindikator verwenden. Das Gerät besteht aus einem Körper, welcher um eine Achse proportional dem gewünschten Abszissenwert (Kolbenweg oder Kurbelwinkel) geschwenkt oder gedreht wird. In diesen wird die Lichtquelle (in diesem Falle eine kleine Glühlampe) eingebaut, welche dann an den Bewegungen des Körpers teilnimmt. Die Lampe wird durch vier Schrauben so eingestellt, daß der Glühfaden genau in die Achse zu liegen kommt. Der elektrische Strom wird mittels

Abb. 141. Spiegelindikator nach de Juhasz für die Aufzeichnung von kleinen Bewegungen, insbesondere der Nadel von Brennstoffdüsen. *A* Drehkörper aus Isolierstoff; *L* Lichtquelle; *B* Lochplatte; *C* Kondensorlinse; *S* Spiegel; *R* Lichtstrahlregler; *F* Spiegelfeder; *U* Plattenfeder; *V* Stange; *N* Einstellblock für die Spiegelfeder; *D* Zentrierschrauben für die Lichtquelle; *E* Kollektorring für Stromzuführung; *P* Klemmschraube zum Einstellblock *N*.

eines Ringes und einer Bürste der Lampe zugeführt. Die Lampe beleuchtet die zentrisch liegende Öffnung, deren Bild dann durch die Sammellinse und den Spiegel *S* auf einen Schirm *T* geworfen wird. Die Lichtschärfe wird durch die genaue Einstellung der Sammellinse erreicht. Ein kleiner Zylinder, aus welchem zwei einander gegenüberstehende Schlitze ausgeschnitten sind, dient für die Regelung der Leuchtpunktgröße.

Liegen die beiden Schlitze in der Richtung eines Durchmessers des Körpers, dann lassen sie den Lichtstrahl in voller Breite durch. Wird aber der Zylinder etwas aus dieser Lage verschoben, so decken die Schlitzkanten einen Teil der Lichtstrahlbreite ab, und es wird dadurch der Leuchtpunkt verkleinert.

Das eigentliche Meßorgan ist der Spiegel, welcher zur Richtung des Lichtstrahles um ungefähr 45 Grad geneigt ist. Der Spiegel wird auf einer

Blattfeder angebracht, welche zwischen die Klemmschraube P und einen verstellbaren Stahlblock N geklemmt wird. Die zum Spiegel nahe stehende Schneidenkante des Stahlblockes dient als die Drehachse des Spiegels. Der Maschinenteil, dessen Bewegung untersucht wird, wird mit der Plattenfeder U in Berührung gebracht, welche die zu messende Bewegung mitmacht und diese mittels der kurzen Stange V auf die Blattfeder überträgt. Die geradlinigen Bewegungen werden in Winkelausschläge der Blattfeder und des von der Blattfeder getragenen Spiegels umgewandelt. Das Vergrößerungsverhältnis wird entweder durch die Verstellung des Schirmabstandes oder durch Verstellung des Stahlblockes N , d. h. der Drehachse des Spiegels geregelt. Das Gerät ist gedrängt gebaut, alle Einstellungen sind leicht zu bewirken; als Abszissenlänge kann der gesamte Umfang des Schirmkreises verwendet werden.

IV. Elektrische Indikatoren.

Im elektrotechnischen Meßwesen finden die Oszillographen für die Anzeige bzw. Aufzeichnung rasch veränderlicher Strom- und Spannungswerte umfangreiche Anwendung. Die hohe Eigenfrequenz und andere wertvolle Eigenschaften dieser Geräte gaben Veranlassung zum Bau von elektrischen Indikatoren, die als Anzeige- und Registriergerät für mechanische Kräfte und Gasdrücke benutzt werden. Für diesen Zweck ist es nötig: a) die zu messenden Druckwerte in Änderungen einer elektrischen Stromstärke oder Spannung umzuwandeln und dem Oszillograph zuzuführen, und b) den erwünschten Abszissenwert (Zeit, Kurbelwinkel, Kolbenweg) auch in eine zweckmäßige elektrische Form umzuwandeln und auf den Oszillographen einwirken zu lassen. Dementsprechend bestehen alle elektrischen Indikatoren aus den folgenden drei wesentlichen Elementen bzw. Elementgruppen: 1. dem eigentlichen Anzeige- und Registriergerät, 2. dem Druckgeber mit dem zugehörigen Verstärker- und Meßkreis, 3. dem Abszissengeber (Zeit-, Kurbelwinkel- oder Kolbenweggeber) mit dem zugehörigen Maschinenantrieb oder Meßkreis (Abb. 142). Zweck und Wirkung dieser Elemente und die Gesichtspunkte und Forderungen, welche deren Eignung für Druckmessung bestimmen, werden im folgenden kurz erörtert.

1. Als Anzeige- und Registriergerät dienen die verschiedenen Arten von Oszillographen, wie Schleifenzillographen, Saitengalvanometer, Kathodenröhre und Glimmlichtoszillographen. Das Diagramm erscheint auf einer Mattscheibe als eine leuchtende Kurve, welche beobachtet oder photographisch festgehalten werden kann. Zu fordern sind: dünne, scharfe Diagrammlinie; gerade und möglichst genau rechtwinklige Koordinaten im Bereich des Diagramms; möglichst gleichmäßiger Maßstab in beiden

Richtungen, Beständigkeit des Maßstabes und Freiheit von Verlagerung des Nullpunktes durch Nebeneinflüsse; beide Maßstäbe sollen möglichst regelbar sein; hohe Eigenfrequenz, welche ein Vielfaches der des aufzunehmenden Vorganges sein muß; bequeme und gefahrlose Handhabung und leichtes Umschalten von der Beobachtung zum Photographieren; kräftiger, gegen Beschädigung widerstandsfähiger Bau.

2. Der Druckgeber dient zur Umwandlung der Druckänderungen in Änderungen einer zweckmäßigen elektrischen Meßgröße. Er besteht aus einer Kammer, welche auf dem zu untersuchenden Raum (Verbrennungsraum) angebracht wird und einen Teil enthält, der den veränderlichen Drücken ausgesetzt, elastische Formänderungen erfährt. Dieselben bewirken die Änderung der Meßgröße. In den bisherigen Indikatoren wurden die folgenden Meßgrößen vorgeschlagen: a) Widerstand,

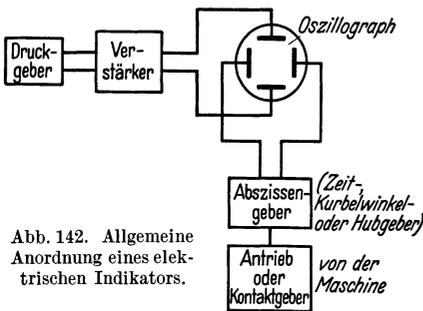


Abb. 142. Allgemeine Anordnung eines elektrischen Indikators.

b) Potential, c) photoelektrischer Strom, d) Impedanz, e) Kapazität, e) magnetisches Kraftfeld. Zu fordern sind: möglichst kleine Federwege und kleine bewegte Massen, d. h. hohe Eigenfrequenz, um sowohl die Eigenschwingungen des beweglichen Teiles als auch die Erschütterungen der Maschine vom Diagramm fernzuhalten; eindeutige und beständige

Abhängigkeit der Meßgröße vom Druck, d. h. Freiheit von Nullpunktverlagerungen und von Änderungen des Maßstabes durch Nebeneinflüsse, wie Änderung der Temperatur, Einwirkung von Öl, Nässe und Verbrennungsprodukten; Freiheit von Reibung und Hysteresis, Unabhängigkeit von der Vorgeschichte der Belastung; möglichst lineare Eichkurve; kleine Abmessungen und leichte Anbringung an der Maschine; der Druckgeber soll die Form und Größe des Verdichtungsraumes nicht verändern, sondern möglichst glatt mit dem Zylinderrand abschließen; andernfalls soll der Verbindungskanal möglichst kurz sein; erwünscht ist, daß mit dem Geber eine Zündkerze vereinigt wird, da dadurch in Zündermotoren die Notwendigkeit einer besonderen Zündkerze wegfällt; der Bau soll kräftig und den im Betriebe vorkommenden Beanspruchungen und Erschütterungen gewachsen sein; weiterhin sollen die hervorgerufenen elektrischen Änderungen groß genug sein, um deren genaue Messung ohne umständliche und mit Fehlermöglichkeiten behaftete Verstärkung zu ermöglichen; die Meßeinrichtung soll ferner eine elektrische Abschirmung der Zündkerzenkabel nicht erfordern.

Der Meßkreis ist eine, dem jeweiligen Falle angepaßte Brücken-anordnung, in deren einem Stromzweig die druckempfindliche Meßgröße und in deren Brücke das Anzeigegerät eingeschaltet wird. Die Anordnung

ist meistens so getroffen, daß die Brücke nahezu in den Gleichgewichtszustand gebracht wird, d. h. daß die Brücke nur wenig Strom leitet. In diesem Falle werden kleine Änderungen der Meßgröße verhältnismäßige Änderungen des Brückenstromes, d. h. verhältnismäßige Oszillographanzeigen verursachen. Falls die vom Druckelement hervorgerufenen Änderungen der Meßgröße gering sind, werden sie zuerst durch Röhrenverstärker vergrößert, bevor sie der Meßbrücke zugeführt werden, oder umgekehrt, die Brückenspannung kann verstärkt dem Oszillograph zugeführt werden.

3. Der Abszissengeber dient zur Bewegung des Lichtpunktes in der Abszissenrichtung und muß verhältnismäßig mit dem gewünschten Abszissenwert (Zeit, Kurbelwinkel, Kolbenweg) sein. In manchen Oszillographen wird die Abszissenbewegung durch Drehspiegel bewirkt (Schleifenoszillograph, Saitengalvanometer, Glimmlichtoszillograph). In diesen wird der Drehspiegel mittels Uhrwerk, Synchronmotor oder mechanischem Antrieb von der Maschinenwelle betätigt. Ähnliches gilt, wenn die Abszissenbewegung der Filmtrommel statt dem Lichtpunkt erteilt wird. Bei Anwendung von Kathodenröhren wird auch die gewählte Abszisse in einen proportionalen Strom- oder Spannungswert umgewandelt und dem Abszissen-Ablenk-Plattenpaar zugeführt. Hierbei muß der Ablenkungsweg genau verhältnismäßig der gewählten Veränderlichen sein, der Maßstab soll frei von ungewollten Änderungen durch Nebeneinflüsse und regelbar, die Anordnung einfach und betriebssicher sein.

Die elektrischen Indikatoren besitzen eine wertvolle Eigenschaft, welche keinem anderen Indikator eigen ist, nämlich: die räumliche Getrenntheit der Druckmeß- und Anzeigeelemente. Außerdem ist ihre Eigenfrequenz höher als bei den meisten anderen Indikatortypen. Sie sind aber auch mit Nachteilen behaftet, so ist der Druckmaßstab von Nebeneinflüssen abhängig, z. B. von der jeweiligen Spannung der Stromquelle, von den augenblicklichen Werten der Widerstände, der Kapazitäten, der Emission von Elektronenröhren, von den elektrischen und magnetischen Eigenschaften der Elemente, die wiederum durch die Temperatur, Feuchtigkeit und Vorgeschichte der Benutzung bedingt werden. Die Güte und Zuverlässigkeit der Messung ist also von einer Reihe von Meßgliedern abhängig, deren Fehler sich addieren können. Deshalb ist es sehr erwünscht, die elektrischen Indikatoren mit eigenen Eichvorrichtungen zu versehen, welche die sofortige Eichung vor und nach jedem Versuch möglichst an der Maschine selbst gestatten. Eine statische Eichung ist bei solchen Indikatoren, die die Änderungsgeschwindigkeit des Druckes messen, unmöglich. Die Handhabung elektrischer Indikatoren setzt ziemlich gründliche und umfangreiche elektrotechnische Fachkenntnisse voraus. Jedoch ist zu erwarten, daß die Fortschritte in der Elektrotechnik, insbesondere im Funkwesen, und die damit Hand

in Hand gehende Vertrautheit mit elektrischen Geräten mehr und mehr den Eingang elektrischer Meßverfahren auch im Maschinenwesen mit sich bringen werden.

Nach diesen allgemeinen Betrachtungen werden die Einzelheiten der elektrischen Indikatoren besprochen, und zwar zuerst die eigentlichen Anzeige- und Registriergeräte und die elektrischen Grundlagen und Einrichtungen, welche für alle Indikatoren mehr oder weniger ähnlich sind oder sein können. Daraufgehend werden die Besonderheiten und Anordnungen der bisher gebauten oder vorgeschlagenen Indikatoren erörtert.

A. Oszillographen.

Oszillographen sind Galvanometer von hoher Eigenfrequenz und aperiodischer Dämpfung, die geeignet sind, die Augenblickswerte eines veränderlichen elektrischen Stromes als Funktion einer anderen Veränderlichen (meistens der Zeit) anzuzeigen bzw. photographisch aufzuzeichnen. Die verschiedenen, für Druckmessung in Frage kommenden Arten sind:

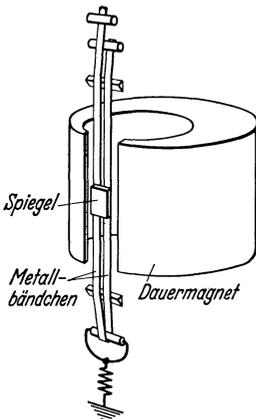


Abb. 143. Schematische Darstellung des Aufbaues der Meßschleife (Siemens & Halske A.-G., Berlin-Siemensstadt).

Der Schleifen-Oszillograph, der von Blondel (1893) erfunden und von Duddel und Abraham weiterentwickelt wurde, wird heute in Deutschland von mehreren Firmen (Siemens & Halske, Hartmann & Braun) mit vielen praktischen Verbesserungen hergestellt. Die wichtigen Teile werden in Abb. 143 und 144 gezeigt. Das eigentliche Meßwerk des Oszillographen, die „Meßschleife“, besteht aus einer bifilaren Schleife eines dünnen Metallbandes, die in einem kräftigen Magnetfeld ausgespannt ist. Fließt durch die Schleife ein Strom, so werden infolge der elektrodynamischen

Wirkung, die ein Magnetfeld auf stromdurchflossene Leiter ausübt, die beiden Bandhälften in entgegengesetzter Richtung abgelenkt. In der Mitte der beiden Drähte, an der Stelle der größten Ablenkung, ist ein Spiegelchen von etwa 1 mm^2 Größe aufgekittet, das durch die Ablenkung der Metallbänder eine kleine Drehbewegung macht (höchstens etwa 3 Winkelgrade). Diese wird durch ein optisches System zur photographischen Registrierung ausgenutzt und in manchen Oszillographen gleichzeitig auch der Beobachtung sichtbar gemacht. Maßgebend für die Beurteilung der Brauchbarkeit eines Meßgerätes zur Aufzeichnung schnell veränderlicher Vorgänge sind die Eigenschwingungszahl, Empfindlichkeit und Dämpfung. Um eine hohe Eigenschwingungszahl zu erreichen (welche 12000 und sogar 20000 Hz erreichen kann), wird die Schleife mittels einer kleinen Elfenbeinrolle stark gespannt, und die

Massen des Drahtes und des Spiegels nach Möglichkeit niedrig gehalten. Die Forderung der Empfindlichkeit wird durch ein großes Vergrößerungsverhältnis des Lichtstrahles erreicht (sie kann bis $0,02 \times 10^{-3}$ Amp. pro Millimeter Ablenkung betragen). Hohe Eigenschwingungszahl und hohe Empfindlichkeit sind einander entgegengesetzte Forderungen, und es muß ebenso, wie es bei den mechanischen Indikatoren der Fall ist, für praktische Zwecke ein Kompromiß getroffen werden. Zwecks Dämpfung wird das ganze Schleifenelement in Öl eingetaucht.

Die Aufteilung des gesamten vom Meßschleifenspiegel kommenden Lichtbündels auf die Registrier- und auf die Beobachtungsoptik bietet

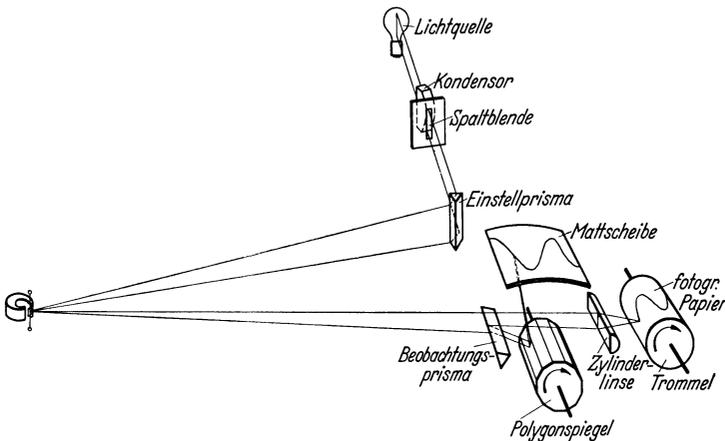


Abb. 144. Verlauf des Lichtstrahles einer Meßschleife durch die Optik des Oszillographen (Siemens & Halske A.-G.). Ein Teil des Lichtbündels wird für photographische Aufzeichnung verwendet, der andere Anteil mittels eines Polygonspiegels auf einer gebogenen Mattscheibe sichtbar gemacht.

den großen Vorteil, daß man jederzeit, auch während der Lichtbildaufnahme, den aufzuzeichnenden Vorgang beobachten und für die Aufnahme den günstigsten Zeitpunkt wählen kann wie bei einer photographischen Spiegelreflexkamera.

Es ist zwar möglich, wird aber selten ausgeführt, dem Drehspeigel nicht eine zeitproportionale Drehung, sondern eine hin- und hergehende Auslenkung zu geben, welche verhältnismäßig mit dem Kolbenweg ist (Kolbenwegdiagramme).

Die handelsüblichen Oszillographen vereinigen in sich mehrere (z. B. sechs) Schleifenelemente, so daß diese für die gleichzeitige Aufnahme mehrerer Vorgänge benutzt werden können. Eines der Schleifenelemente wird üblicherweise mit einem Wechselstrom von Normalfrequenz (50 oder 60 Hz) gespeist und zeichnet eine Sinuslinie auf, welche als Zeitmaßstab dient. Der Oszillograph enthält auch den Drehspeigel, die Filmtrommel, Motore und die verschiedenen Regelungselemente, die für die Handhabung nötig sind.

Das Saitengalvanometer, von Einthoven 1903 erfunden und von Edelmann konstruktiv weiterentwickelt, besitzt einen einzigen Draht (feiner Platindraht oder versilberter Quarzfaden) in dem sehr engen Spalt eines kräftigen Elektro- oder Dauermagneten (Abb. 145). Bei

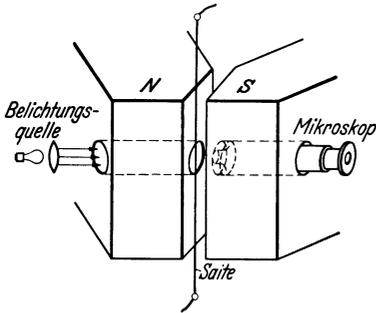


Abb. 145.

Allgemeine Anordnung eines Saitengalvanometers (Prof. Dr. M. Th. Edelmann und Sohn, München).

Stromdurchgang wird die Mitte des Drahtes dem Strom verhältnismäßig zur Seite gedrückt, welche Lagenänderung durch den durchbohrten Magnetpol mikroskopisch beobachtet oder mikrographisch festgehalten werden kann. Infolge Fehlens des Spiegels kann der Draht sehr dünn und schwach gewählt werden (z. B. bei 1000facher Vergrößerung $1 \text{ mm} = 10^{-11} \text{ Amp.}$), wodurch eine sehr hohe Empfindlichkeit erreicht werden kann. Die Eigenfrequenz der handelsüblichen, meistens für physiologische Unter-

suchungen dienenden Instrumente beträgt allerdings nur etwa 100 Hz, liegt also reichlich niedrig und unterhalb derjenigen der Schleifenoszillographen. Für technische Zwecke könnte aber die Eigenfrequenz auf Kosten der Empfindlichkeit gesteigert werden.

Der Glimmlampen-Oszillograph beruht auf dem Grundsatz,

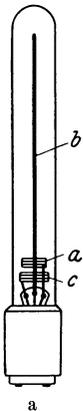
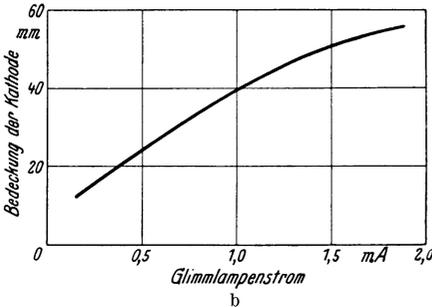


Abb. 146 a und b. Indikator-Glimmlampe von Osram-Gesellschaft. *a* Ringanode; *b* stabförmige Kathode; *c* Hilfsselektrode. Die Abb. 146 b zeigt die Glimmlichtlänge als Funktion des Glimmlampenstroms.



daß das Licht in einer Glimmlampe nur einen Teil der Kathode bedeckt, wenn die Lampe mit geringer Stromstärke gespeist wird. In der „Indikatorglimmlampe“ der Osramwerke (Abb. 146) wird eine stabförmige Kathode angewendet, deren Lichtbedeckung nahe verhältnismäßig mit der Stromstärke ist und die daher zur Anzeige von

Strom- oder Spannungsänderungen benutzt werden kann. Durch einen Drehspiegel oder einen bewegten Filmstreifen können Zeitdiagramme angezeigt oder aufgezeichnet werden. Zeitverzug und Eigenschwingungsdauer sind im mechanischen Sinne des Wortes nicht vorhanden. Ein wesentlicher Nachteil ist aber, daß die Begrenzungslinie des so erhaltenen Diagrammes ziemlich unscharf ist. Das Gerät erscheint jedoch entwicklungs-fähig, einfach in bezug auf Einbau und Handhabung und billig im Preis.

Das „Neobeam Oszilloskop“ der Sundt Engineering Company (Abb. 147) besteht aus einer ähnlichen Glimmlampe mit zwei stabförmigen Elektroden, welche mit einem Hochfrequenzstrom gespeist werden, wodurch beide Elektroden fortwährend ionisiert werden. Die zu messende Spannung überlagert sich dieser Hochfrequenzspannung. Beide Elektroden sind etwa 50 mm lang (wirksame Länge), so daß die Ordinatenlänge etwa 100 mm ausmacht. Die Änderungen der Ordinate werden an einem Drehspiegel beobachtet, welcher durch einen Elektromotor mit veränderlicher Geschwindigkeit angetrieben wird. Der Spannungsbereich kann von $1 \mu\text{V}$ bis 200 V geändert werden; die praktische Grenze der Frequenz ist etwa 10000 Hz, gleich der Ionisierungs- und Deionisierungszeit der Elektroden. Das Gerät ist für praktische Anwendung und bequeme Handhabung eingerichtet.

Der Kathodenstrahl-Oszillograph (kurz Kathodenröhre genannt), von Braun 1897 erfunden und seitdem durch mehrere Erfinder weiterentwickelt, findet infolge seiner Freiheit von Trägheitsfehlern, Abwesenheit von beweglichen Teilen, verhältnismäßig leichter und einfacher Handhabung, im maschinentechnischen Meßwesen mehr und mehr Anwendung.

Die Röhre besteht aus einer trichterförmigen hochevakuierten Glasflasche (Abb. 148), die mit zwei Elektroden versehen ist: der Glühkathode und der Anode, zwischen welchen eine Hochspannung angelegt wird. Die Glühkathode wird mit geringer Stromstärke (etwa 2,5 bis 3 V Wechselspannung) geheizt und sendet Elektronen aus, die auf die Anode aufprallen. Eine kleine Öffnung in der Mitte der Anode läßt einen dünnen Strahl von Elektronen durch, welcher auf den Schirm am Ende des Trichters geschleudert wird. Der Elektronenstrahl selbst ist unsichtbar, aber der Boden des Trichters ist mit einem Fluoreszenzstoff überzogen und bildet einen Schirm, auf welchem der Anprallpunkt des Strahles als ein Lichtpunkt sichtbar wird. (Der Fluoreszenzstoff ist eine Mischung von Zink-Orthosilikat und Kalzium-Wolframat. Das erstere gibt grüne sichtbare, die zweite blau aktinische Fluoreszenz: damit kann die Linie sowohl klar beobachtet als auch photographiert werden.) Der Kathodenstrahl ist nun nichts anders als ein elektrischer Leiter, welcher negative Elektronen von der Kathode zum Fluoreszenzschirm fördert; demgemäß kann er entweder statisch-elektrisch, oder elektromagnetisch abgelenkt werden. Beide Verfahren werden

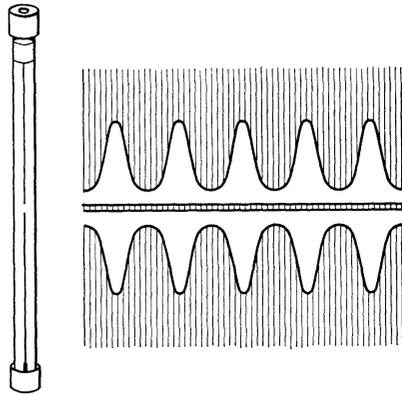


Abb. 147. Indikator-Glimmlampe der Sundt Engineering Co., Chicago, V. St. A. und das damit erhaltene Diagramm. Das Diagramm erscheint als ein symmetrisches Lichtfeld mit dunklem Hintergrund.

angewendet. Abb. 148 zeigt die elektrostatische Ablenkung, welche durch die zwei Elektrodenplatten P_1 und P_2 bewirkt wird, an welche die zu messende Spannung gelegt wird und zwischen welchen der Strahl auf seinem Wege zum Schirm hindurchgeht. Die positiv geladene Platte zieht die negativen Elektronen an und ändert dadurch die Richtung des Strahles und infolgedessen die Lage des Leuchtpunktes auf dem Schirm. Die

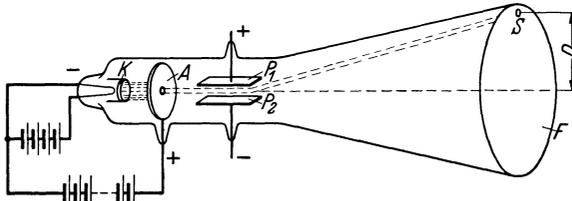


Abb. 148. Kathodenröhre mit einem Ablenkplattenpaar. K Kathode; A Anode; P_1 und P_2 Ablenkplattenpaar; F Fluoreszenzschirm; S Leuchtpunkt; D Ablenkung.

Ablenkung des Leuchtpunktes ist angenähert verhältnismäßig der an die Platten gelegten Spannung. Wenn ein elektromagnetisches Feld im Wege des Elektronenstrahles erzeugt wird, wird der Strahl senkrecht zur Kraftlinienrichtung abgelenkt, und die Ablenkung des Lichtpunktes wird annähernd verhältnismäßig der durch die Elektromagnetspule fließenden Stromstärke. In der Praxis wird meistens die elektrostatische

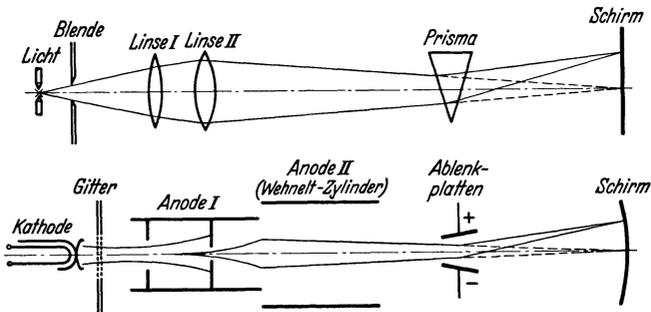


Abb. 149. Analogie zwischen optischem System und Kathodenröhre.

Ablenkmethode wegen ihrer leichteren Anwendung und schärferen Begrenzung des elektrischen Feldes im Vergleich mit dem magnetischen Feld vorgezogen. Bei Anwendung als Indikator sind Ablenkungen in zwei aufeinander senkrecht stehenden Richtungen nötig, deshalb werden zwei Plattenpaare, senkrecht zueinander angeordnet; an das eine Plattenpaar werden Spannungen verhältnismäßig dem zu messenden Druck, an das andere Spannungen verhältnismäßig dem Kolbenhub gelegt.

Die Geschwindigkeit der Elektronen ist der Quadratwurzel der Potentialdifferenz zwischen Anode und Kathode gemäß folgender Formel verhältnismäßig:

$$v = 5,95 \cdot 10^7 \sqrt{V}.$$

Demgemäß entspricht einem Potential von 300 V eine Geschwindigkeit von 10000 km pro Sekunde. Eine Röhre mit 20 cm Entfernung zwischen Ablenkplatte und Schirm wird also vom Elektronenstrahl in etwa $\frac{1}{50\,000\,000}$ s durchgelaufen. Die Änderung der Strahlrichtung wird demgemäß der Änderung des Plattenpotentials praktisch ohne Zeitverzug folgen und die Röhre ist für die Aufnahme von Frequenzen bis zu etwa 50000 Hz anwendbar.

Die Ablenkung ist um so größer, je langsamer der Elektronenstrahl, d. h. je niedriger die Anodenspannung, je größer das Potential der Ablenkplatten und je kleiner die Entfernung zwischen den gegenüberliegenden Ablenkplatten ist. Die Ablenkplatten dürfen aber die Bahn des Strahles nicht schneiden.

Bei den heutigen Kathodenröhren sind mehrere Verbesserungen angebracht, welche die Erhöhung der Empfindlichkeit und der Schärfe der Leuchtlinie bezwecken. 1905 schlug Wehnelt eine geheizte, mit Kalziumüberzug versehene Kathode vor, wodurch eine Elektronenemission von niedrigerer Spannung und daher größerer Empfindlichkeit erreicht wird. Die Ausbildung

der Anoden erfuhr auch eine im Wehnelt-Zylinder häufiger als Lichtsterelektrode bezeichnete Verfeinerung, wodurch aus dem Strahl ein solcher mit kleinerem Querschnitt herausgesiebt wird.

Die Anordnung einer modernen Kathodenröhre zeigt Abb. 149. Sie stellt die Funktionen der verschiedenen Teile mit denen eines optischen Systems in Vergleich.

Zur Betätigung der Kathodenröhre sind eine Anzahl verschiedener Stromquellen und Kontrollelemente notwendig, die vom Stadtnetz durch entsprechende Umformung durch Gleichrichterröhre erhaltbar sind. Eine typische Anordnung des Schaltkreises wird in Abb. 150 angegeben. Für die Heizung der Kathode ist eine Spannung von etwa 2,5 bis 3 V, entweder Gleich- oder Wechselstrom, nötig. Dann ist für die Anode eine Hochspannung von etwa 1500 V notwendig, aber nur ein Teil dieser Spannung (etwa 400 bis 500 V) wird in der Röhre tatsächlich angewendet. Die Heizspannung, Anodenspannung und die Spannung an dem Wehnelt-Zylinder müssen zur Einstellung der Intensität und Schärfe des Lichtpunktes regelbar sein.

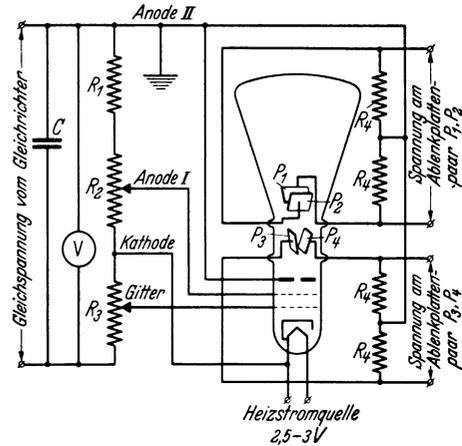


Abb. 150. Schaltkreis einer Kathodenröhre (Radio Corporation of America). C Siebkondensator 0,5 bis 2,0 μF ; R_1, R_2, R_3 Abzapsspannungsteiler ($R_1 = 0,5 \text{ M}\Omega$; $R_2 = 0,2 \text{ M}\Omega$; $R_3 = 0,02 \text{ M}\Omega$); $R_4 = 1$ bis $10 \text{ M}\Omega$; V Voltmeter.

Die Hochspannungen sind für das Personal mit Lebensgefahr verbunden. Deshalb sollen Vorbeugungsmaßnahmen getroffen werden, damit das Personal mit den Hochspannungsteilen nicht in Berührung kommt. Solche Maßnahmen sind die Bedeckung aller Hochspannungsklemmen sowie ein Schalter, welcher den Primärstrom unterbricht, wenn das Gerät geöffnet wird. Es ist auch erwünscht, die positive Anodenklemme zu erden. Man muß ferner sich immer bewußt sein, daß Hochspannungen unter unglücklichen Umständen auch an Niederspannungspunkten des Gerätes auftreten können (z. B. infolge Schadhafwerden eines Kondensators oder wegen fehlerhafter Verbindungen). Bevor im Röhrenkreis oder Hilfskreis irgend ein Teil berührt wird,



Abb. 151. Kathodenstrahl-Oszillograph der AEG. (Eon IV, für Netzanschluß 220 V, 50 Hz, Abmessungen: 300 × 290 × 350 mm³.)

müssen deshalb der Primärstrom abgeschaltet und die Kondensatoren entladen werden.

Die handelsüblichen Kathodenröhren enthalten alle nötigen Anschlußkontakte, Regelknöpfe und Stromkreise handlich in einem Kasten angeordnet, wobei der Sicherheit sowohl des Personals als auch der Apparatur große Sorgfalt gewidmet ist. Abb. 151 zeigt eine AEG-Kathodenröhre.

Die Aufgabe des Kathodenstrahloszillographen ist die Druckänderungen in Spannungsänderungen umzuwandeln und einem Ablenkplattenpaar zuzuführen. Gleichzeitig muß der gewählte Abszissenwert (Kurbelwinkel, Kolbenweg, Zeit) auch in Spannungsänderungen umgewandelt dem anderen Plattenpaar zugeführt werden. Die beiden Umformungen können auf verschiedene Weise verwirklicht werden. Es ist naheliegend und meistens vorzuziehen, für beide Veränderliche ein und dasselbe Umwandlungsverfahren anzuwenden, insbesondere wenn die gewählte Abszisse der Kurbelwinkel oder Kolbenweg ist. In vielen Fällen ist aber die gewählte und zweckmäßigste Abszisse die Zeit, und die meisten Kathodenstrahloszillographen besitzen schon eine Einrichtung für die Aufzeichnung der Zeit in regelbaren linearem Maßstab. Diese Aufgabe ist auf verschiedene Weise lösbar, aber am einfachsten durch zwei thermionische Röhren (Abb. 152), welche die Ladung eines Kondensators beeinflussen. Eine der Röhren ist eine Zweielektrodenröhre T_1 , welche den

Die Aufgabe des Kathodenstrahloszillographen ist die Druckänderungen in

Ladungsstrom des Kondensators begrenzt, so daß die Kondensatorspannung linear mit der Zeit steigt:

$$V = C i.$$

Die andere Röhre T_2 ist gasgefüllt und läßt einen Strom nur durch, wenn die Spannung einen bestimmten Wert übersteigt, welcher wiederum durch die Gitterspannung geregelt wird. Sowie dieser kritische Wert erreicht ist, entlädt sich der Kondensator sehr schnell und die gleichmäßige Auffüllung fängt von neuem an. Läßt man die Kondensatorspannung auf das eine Plattenpaar einwirken, dann wandert der Lichtfleck über den Schirm mit gleichmäßiger Geschwindigkeit in der einen Richtung und kehrt in der anderen Richtung sehr rasch zurück. Dieser Vorgang kann einmal oder mehrere tausendmal je Sekunde vollführt werden, je nach den Konstanten des Stromkreises. Diese der Zeit proportionale Ladung und die plötzliche Entladung wiederholen sich periodisch und können mit dem aufzunehmenden Vor-

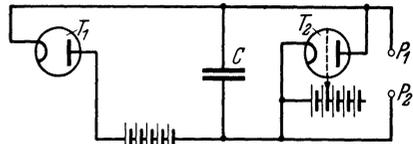


Abb. 152. (Orig. De J.). Schaltbild einer elektrischen Zeitablenkung. C Kondensator; T_1 Zwickelröhre; T_2 gittergesteuerte Gasentladungsröhre.

gang synchronisiert werden. Durch das fortgesetzte Schreiben derselben Kurve erhält man auf dem Leuchtschirm stets ein hell geschriebenes Bild.

Die elektrostatische Ablenkung stellt ein gegen Überlastungen sehr widerstandsfähiges Meßsystem dar. Gefährlich werden erst Spannungen, die zum Überschlag von Platte zu Platte führen, was aber nur oberhalb von etwa 500 V zu befürchten ist. Die zur Ablenkung benötigte Leistung ist nur ein Bruchteil von 1 mW.

Natürlich lassen sich die Zeitplatten auch für andere Veränderliche anwenden, so daß z. B. zyklische Kurven (Druck-Kolbenweg-Diagramme) aufgenommen werden können. Schließlich ist die Aufnahme einmaliger, langsam verlaufender Vorgänge (Frequenzen bis etwa 200 Hz) auf einem bewegten Registrierstreifen möglich.

Die Weiterentwicklung der Kathodenstrahl-Oszillographen strebt die Verbesserung der Geradlinigkeit der Koordinaten und Gleichmäßigkeit des Maßstabes in beiden Richtungen, dünnere Diagrammlinie, größeren Schirm und Erniedrigung des Preises an. Es sind auch Bestrebungen im Gange, Kathodenröhren mit mehreren Ablenkplattenpaaren herzustellen, zwecks gleichzeitiger Aufzeichnung mehrerer Größen.

B. Indizierverfahren mittels druckveränderlichen Widerstandes.

Die Wirkung dieser Gattung von Indikatoren beruht auf der Umwandlung von Druckänderungen in Änderungen eines elektrischen Widerstandes. Diese Umwandlung kann in verschiedener Weise verwirklicht werden.

Es wurde vorgeschlagen, durch die Kolbenbewegung des Indikators die Stufenkontakte eines Widerstandes zu betätigen und dadurch einen größeren oder kleineren Teil des Widerstandes kurzzuschließen. Die nicht gut beherrschbare Änderung des Kontaktwiderstandes und die Abnutzung der Kontakte sind Nachteile dieser Methode.

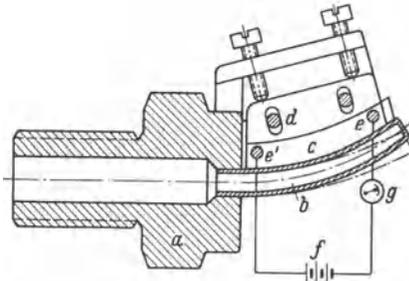


Abb. 153. Druckmesser für rasch verlaufende Druckstöße (Brown-Boveri-Ges.). *a* Anschlußkörper; *b* federndes gebogenes Metallrohr; *c* Widerstandsdraht; *d* Isolierstück; *e, e'* Anschlußbolzen; *f* Batterie; *g* Galvanometer.

Die Patentschrift von H. Heimann, D.R.P. 157212 — 1903 beschreibt einen Indikator mit druckveränderlichem Widerstand, dessen Momentanwert durch einen in bestimmten Phasen des Kreisprozesses bewirkten Kontakt und durch eine Meßbrücke gemessen wird. Als druckveränderlichem Widerstand schlägt Heimann eine Reihe von elastischen Kugeln oder eine Reihe von Kohlenstiften vor. Obwohl über eine tatsächliche Ausführung dieses Gerätes in dem Fachschrifttum keine Erwähnung zu finden ist, kann diese Erfindung als der Vorgänger sowohl von Widerstandsindikatoren, als auch von phasenweisen Indikatoren betrachtet werden.

Der Leistungsmesser von Frisch (S.196) beruht auf diesem Prinzip, aber der Kontakt wird nicht durch Gleiten, sondern durch Abwälzen bewirkt.

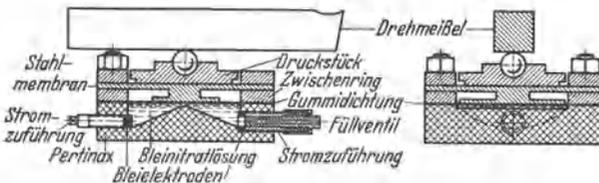


Abb. 154 a.

Abb. 154 a. Druckmeßdose für elektrische Widerstandsmessung.

Abb. 154 b. Brückenschaltung für Gleichstrom mit Stromausgleich $m.A.$ = Milliampéremeter.

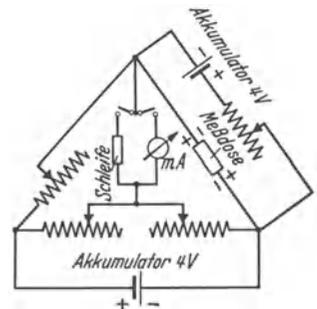


Abb. 154 b.

Der Indikator von Brown-Boveri arbeitet nach einem ähnlichen Grundsatz, aber mit einem nicht stufenweise, sondern stetig veränderlichen Widerstand. Die kurze, gebogene Bourdon-Röhre (Abb. 153) wälzt sich unter dem Einfluß der Druckänderung auf einem stromdurchflossenen Widerstandsband ab, welches mit zwei Anschlußbolzen auf einem Isolierstück befestigt ist. An die beiden Anschlußbolzen werden eine Batterie und ein Oszillograph angeschlossen. Im Ruhezustand liegt das druckmessende Rohr satt an dem Widerstandsband an: der Widerstand

ist somit kurzgeschlossen. Je höher der Druck ist, um so größer wird der Krümmungshalbmesser des Rohres, so daß ein um so größerer Anteil des Rohres sich vom Band abhebt. Es entsteht also ein Spannungsabfall, welcher der freigelegten Länge verhältnismäßig ist. Das Gerät wurde für die Untersuchung von plötzlich auftretenden Druckstößen in Ölschaltern angewendet. Für hohe Temperaturen, wie bei der Indizierung von Verbrennungsmotoren, ist das Bourdon-Rohr nicht geeignet.

Der Widerstand eines Drahtes ändert sich mit dessen Dehnung. Auf diesem Prinzip hat Nernst einen Indikator konstruiert, in welchem ein auf Zug beanspruchter Widerstandsdraht als Meßfeder verwendet wird. Die Änderung des Widerstandes ist wohl gering, genügt aber für oszillographische Aufzeichnung.

Im Druckmesser von Schmalz, Wallich und Opitz wird eine leitende Flüssigkeit, d. h. ein Elektrolyt angewendet, dessen wirklicher Querschnitt und damit dessen Widerstand vom Druck bzw. der Kraft abhängig ist (Abb. 154). Das Gerät

ist als eine Meßdose ausgebildet, welche den Elektrolyt (in diesem Falle Bleinitrat) enthält. Dieses Gerät wurde für Messung von Kräften an Werkzeugmaschinen angewendet. Eine ähnliche Einrichtung wurde von Prof. Nägel, Dresden auch für die Messung rascher, kleiner Bewegungen (Nadelventil einer Brennstoffdüse) benützt (Abb. 155).

Das Gerät besteht aus einem Pertinax-Gehäuse *c*, in das eine feste *d* und eine bewegliche Bleielektrode *a* eingebaut sind. Der Raum zwischen den beiden Elektroden ist mit Bleinitratlösung gefüllt und gegen die Führung der beweglichen Elektrode durch eine Gummimembran *b* abgedichtet. Die bewegliche Elektrode *a* ist durch ein Joch mit einem auf die Düsenadel aufgesetzten Verlängerungsstift verbunden und macht die Bewegungen der Düsenadel mit. Die durch die Abstandsänderung hervorgerufene Widerstandsänderung zwischen den beiden Elektroden kann durch eine Oszillographenschleife aufgezeichnet werden. Da diese Widerstandsänderungen im Verhältnis zum Gesamtwiderstand gering sind, wendet man zweckmäßig eine Kompensationschaltung an. Für Abstandsänderungen, die im Vergleich zum Elektrodenabstand klein sind, werden die Stromänderungen praktisch proportional

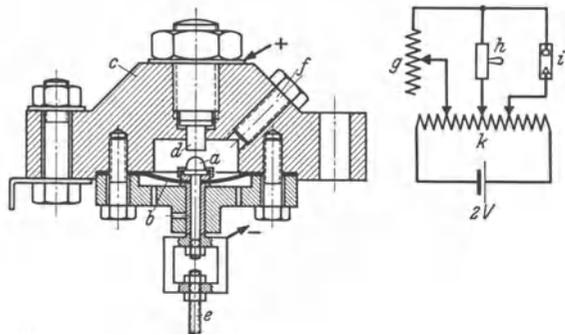


Abb. 155. Flüssigkeitswiderstand zur Anzeige der Düsenadelbewegung nach Prof. A. Nägel, Technische Hochschule Dresden. *a* Bewegliche Bleielektrode; *b* Gummimembran; *c* Pertinax-Gehäuse; *d* feststehende Bleielektrode; *e* Verlängerung der Düsenadel; *f* Füllöffnung; *g* Kompensationswiderstand; *h* Oszillographenschleife; *i* Flüssigkeitswiderstand; *k* Spannungsteiler.

den Nadelausschlägen. Wegen der Gefahr der elektrolytischen Zersetzung arbeitet dieses Gerät mit Wechselstrom.

Mit der Bleinitratlösung dürfen nur mit Blei überzogene Metallteile in Berührung kommen. Es empfiehlt sich, bei längerem Betrieb die Elektroden von Zeit zu Zeit umzupolen.

Dieses Verfahren eignet sich aber nur für solche Untersuchungen, in welchen die Meßdose Temperatureinflüssen nicht ausgesetzt ist.

Das meistens verwendete Widerstandsverfahren beruht auf der Eigenschaft von Kohle, daß sich der Übergangswiderstand zweier, sich berührender Kohlenstückchen mit dem Anpreßdruck ändert. Diese Eigenschaft ist seit langem bekannt, sie wurde schon in den ersten Fernsprechern angewendet. Ihre Anwendung für Druckmessung und im

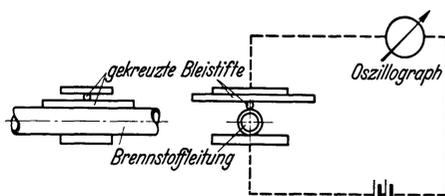


Abb. 156. Druckindikator mit gekreuzten Bleistiften (Eichelberg, Technische Hochschule Zürich).

allgemeinen für Verschiebungsmessung stammt aber erst etwa aus dem Jahre 1920. Diese Eigenschaft läßt sich dadurch erklären, daß sich die sich berührenden Oberflächen unter dem Druck mehr oder weniger ineinanderpressen, wodurch die elektrische Übergangslitfähigkeit

entsprechend geändert wird. Auch im Innern der Kohle tritt eine Änderung der Leitfähigkeit ein, die aber nur etwa 10% der Gesamtänderung ausmacht. Auch andere Stoffe, sog. Halbleiter besitzen diese Eigenschaft, für technische Zwecke wurde aber Kohle als zweckmäßigster befunden.

Eine einfache und sinnreiche Anwendung dieses Grundsatzes rührt von Eichelberg her, der mit diesem Verfahren die Drücke in einer Brennstoffleitung untersuchte (Abb. 156). Dem Brennstoffrohr entlang wurde ein Stück Bleistift gelegt, darüber gekreuzt ein anderes Stück, und die beiden wurden durch eine Klemme miteinander und mit dem Rohr in Berührung gehalten. Der Berührungsdruck zwischen den beiden Bleien ändert sich mit dem „Atmen“ des Rohres; dies verursacht eine entsprechende Änderung des Widerstandes. Die so entstandene Änderung eines elektrischen Stromes wird nach der notwendigen Verstärkung durch ein Edelmann-Saitengalvanometer aufgezeichnet.

In der Erforschung der Kohlewiderstandswirkung und in deren Anwendung für Druckmessung haben mehrere Forscher sich verdient gemacht; in Deutschland hauptsächlich Bernhard, Glamann, Triebnigg und Rumpff. In den praktisch ausgebildeten Indikatoren dieser Art werden Plättchen oder Ringe angewendet, die aufeinandergestapelt eine Säule bilden. Durch die Karbonisierung von Harz gewonnene Kohle (künstlicher Graphit) entsprach infolge ihrer Härte und elastischen Eigenschaften am besten den Anforderungen. Die Plättchen werden mit

optischer Genauigkeit plangeschliffen; seitliche Verschiebung der Plättchen und exzentrische Belastung muß peinlichst vermieden werden. Solche Plättchen ertragen bis etwa 30 bis 40 kg/cm² Belastung mit einer linearen Weg-Belastungskurve (Abb. 157). Der Widerstand ist aber nicht linear von der Belastung abhängig, sondern nähert sich hyperbelartig einem Grenzwert. Da Kohle für die Aufnahme von zu großen Kräften nicht geeignet ist, muß für deren Aufnahme ein besonderes Federungselement vorgesehen werden, so daß auf das Kohlenelement nur ein, aber immer verhältnismäßiger Bruchteil der Gesamtbelastung kommt. Der Temperatureinfluß ist bis zu 50^oC vernachlässigbar, höhere Temperaturen müssen durch Wasserkühlung vermieden werden. Tränken der Säule mit Flüssigkeit (Benzol, Xylol, Benzin, Alkohol) erhöht die Empfindlichkeit um das Mehrfache, aber diese Wirkung ist unsicher und unbeherrschbar.

Die wichtigsten Fehlerquellen der Kohlen säule sind: Nullpunktverschiebung und zeitunabhängige Nachwirkung, die Hysteresese, infolge deren der Säulenwiderstand auf der Kurve für abnehmende Belastung kleiner wird; die zeitabhängige Nachwirkung, welche ein Kriechen des Meßpunktes während einiger Minuten nach jeder Einstellung, erst schnell dann immer langsamer, verursacht. Es ist natürlich außerordentlich schwer, bei der feinen Oberflächenstruktur der an sich schon sehr spröden Kohle sicher im Gebiet der elastischen Deformation zu bleiben.

Die verschiedenen Ausführungsformen bezwecken die Unterdrückung dieser Fehler, welche bei schnellem Druckwechsel weniger störend auftreten. Daher ist eine dynamische Eichung einer statischen vorzuziehen.

Ein Vorteil dieser Gattung von Indikatoren ist, daß die Stromänderungen im Brückenkreis keine Verstärkung benötigen, sondern auch ohne Verstärkung zur Speisung der Schleife eines Oszillographen oder der elektromagnetischen Spule in einer Kathodenröhre ausreichen. Falls aber eine Kathodenröhre mit elektrostatischen Platten angewendet wird, müssen die Spannungsänderungen verstärkt werden, bevor man sie dem Ablenkplattenpaar zuführt.

Die wesentlichsten Vorzüge dieser Indikatoren sind ziemliche Billigkeit, Einfachheit und Übersichtlichkeit, weil man in der Regel mit einfacher Meßbrücke ohne jede Verstärkereinrichtung auskommt.

Das sog. Telemeter von Peters, McCollum und Johnston (Abb. 158) besteht aus einer Säule von etwa 50 Kohleringen, von 10 mm Außen- und 5 mm Innendurchmesser und etwa 0,5 mm Dicke, angeordnet

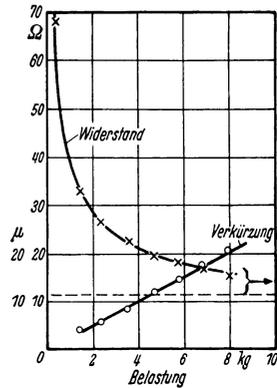


Abb. 157. Kennlinie des Gla-mann-Triebnigg-Kohlen-elementes: Belastungs-, Verkürzungs- und Widerstands-Verkürzungskurve für eine Säule von 5 mm Dmr. aus 10 Plättchen von je 1 mm Dicke.

zwischen zwei kupfernen Kontaktscheiben, zwei Isolierringen (Glimmer) und zwei Endplatten aus oberflächengehärtetem Stahl. Dieses Gerät wurde hauptsächlich für die Fernmessung kleiner Bewegungen (Dehnungen in Brückengliedern, in Dämmen u. dgl.) angewendet. In einem starren Gehäuse werden unter Vorspannung zwei solche Säulen vereinigt, deren eine durch die zu untersuchende Bewegung entlastet, während die andere belastet wird. In der Versuchsabteilung der General Motors Co. haben die Forscher Martin und Caris das Telemeter den Anforderungen der Druckmessung in Verbrennungskraftmaschinen angepaßt. Den Druckgeber dieses Indikators und den angewendeten Stromkreis zeigen Abb. 159—161. Der Druckgeber wird, ähnlich wie eine Zündkerze, in den Motorzylinder eingeschraubt. Der Zylinderdruck wirkt auf eine dünne Stahlmembran, die lediglich zur Abdichtung dient und nur eine vernachlässigbar kleine Federkraft besitzt. Diese Membran liegt möglichst flach in der Wandoberfläche, damit die Strömungs- und Verbrennungszustände im Zylinder so wenig wie möglich durch die Anbringung des Gerätes gestört werden. Ein

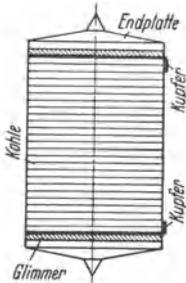


Abb. 158.
Bauweise der
Kohlsäule des
„Telemeters“
nach
McCollum
und Peters.

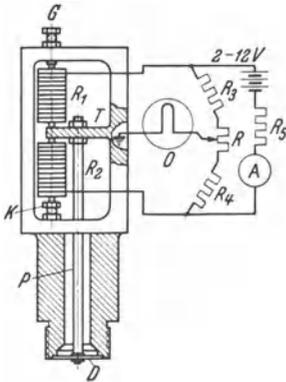


Abb. 159.

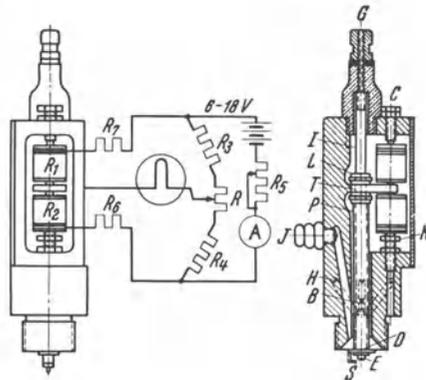


Abb. 160.

Abb. 159 und 160. Elektrischer Indikator nach Martin und Caris (Versuchsabteilung der General Motors, Detroit). Abb. 159 zeigt die frühere Ausführung, Abb. 160 die spätere Ausführung, die gleichzeitig als Zündkerze dient und daher keine besondere Bohrung im Zylinderkopf benötigt. *B* Luftdrossel; *C* und *K* Vorspannungsschrauben; *D* Membran; *E* und *S* Funkenstrecke; *G* Mittelelektrode; *H* Kühlluftaustrittslöcher; *J* Kühllufttritt; *L* Mutter an der Druckstange *P*; *T* Meßfeder; *R*₁ und *R*₂ Kohlsäule; *R*₃ und *R*₄ Zweigwiderstände; *R*₅, *R*₆ und *R*₇ Temperaturausgleichswiderstände.

Invarstab überträgt die Druckkraft auf die Stabfeder, welche zungenartig aus dem Geräterahmen herausragt und mit demselben zur Vermeidung von Lockerung und totem Gang ein Stück bildet. Das Ende der Stabfeder liegt zwischen den beiden Kohlsäulen, welchen durch zwei Schrauben eine Vorspannung gegeben werden kann. Die beiden

Säulen bilden die zwei Zweige einer Wheatstone-Brücke; ihre Widerstandsänderungen rufen eine entsprechende Änderung des Brückenstromes hervor, welcher dann durch einen Oszillographen angezeigt und aufgezeichnet wird. Die Verbiegung der Stabfeder bewirkt die Entlastung der einen Säule (Vergrößerung des Widerstandes) und die Mehrbelastung der anderen (Verminderung des Widerstandes). Dadurch wird die Abweichung der Druckwiderstandskurve von der geraden Linie weitgehend ausgeglichen und ein gleichmäßiges Eichdiagramm erreicht. Die Gesamtdurchbiegung der Membran soll im Betriebe (Benzinmotor) etwa 0,01 bis 0,02 mm betragen und die Eigenfrequenz etwa 3500 bis 11000 Hz erreichen, so daß die Trägheitsfehler auch in der Untersuchung von sehr hochtourigen Motoren vernachlässigbar sind. Die neuere Ausführungsform dieses Indikators vereinigt in sich auch die Zündkerze, wodurch die oft schwer erfüllbare Forderung nach einer besonderen Indikatorbohrung wegfällt. Es wird auch für Luftkühlung gesorgt, um die Temperatur möglichst unverändert zu erhalten und dadurch Kriecheffekte zu vermeiden.

Der Indikator von Glammann und Triebnigg (Versuchsabteilung von Humboldt-Deutz A.-G., Abb. 162 bis 166) enthält nur eine einzige Säule als Druckelement. Auf Grund ihrer sehr ausführlichen Untersuchungen haben die genannten Forscher eine Säule mit nur drei Platten (5 mm \varnothing , 2 mm dick) am zweckmäßigsten gefunden. Die mittlere Platte ist Graphit und wirkt als Halbleiter (Widerstand etwa 20 Ω). Die beiden äußeren Platten sind elektrisch gut leitende Kohleplatten, die an den äußeren Flächen, an welchen sie mit den Kontaktplatten in Berührung stehen, galvanisch verkupfert sind. Eine einfache Brückenschaltung mit etwa 4 V Batteriespannung wird angewendet. Der Brückenstrom und der Ausschlag des Oszillographen sind der Belastung bzw. der Verkürzung der Säule verhältnismäßig. Es erklärt sich dies dadurch, daß der Widerstand hyperbelartig

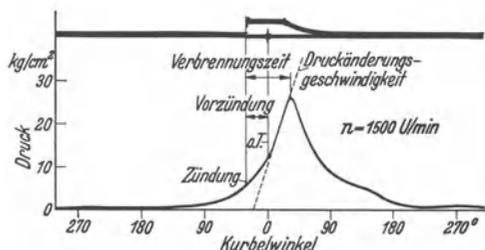


Abb. 161. Mit dem Martin- und Caris-Indikator aufgenommenes Diagramm (Rabazzana und Kalmar: Versuche an der Gemischverteilung im Verbrennungsmotor. Automotive Industries, 19. März 1932.)

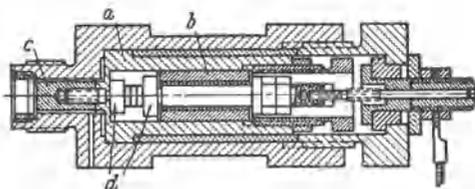


Abb. 162. Widerstands-Indikator nach Glammann-Triebnigg. Die austauschbare Hülse *a* enthält die Kohlesäule; ihr Boden dient als Druckmembran. Die Büchse *b* wird in die Hülse eingeschliffen und enthält den elektrisch isolierten Kopf *d*; der andere Kopf wird in der Membran befestigt. Der Druckübertragungsstempel *c* sitzt an der Zylinderseite an einer 0,2 mm dicken Abschlußmembran aus Messing an.

verläuft und daß daher die Leitfähigkeit (der reziproke Wert des Widerstandes) linear von der Verkürzung abhängig ist. (Die im Schrifttum angeführte Forschungsarbeit gibt die genaue theoretische Ableitung.) Die Eigenfrequenz des Druckelementes wird zu etwa 62000 Hz angegeben.

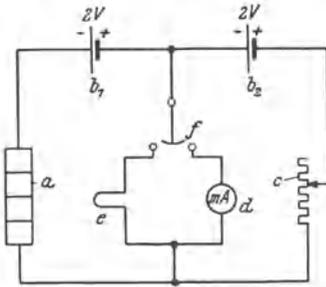


Abb. 163. Schaltbild der Druckmessung nach H. Rumpff und W. Lueg (Kaiser Wilhelm-Institut für Eisenforschung). *a* Kohlesäule; *b*₁, *b*₂ Sammlerbatterien (2 V); *b*₁ für den Meßkreis; *b*₂ für den Ausgleich des Ruhestromes; *c* Abgleichwiderstand; *d* Strommesser; *e* Meßschleife; *f* Umschalter.

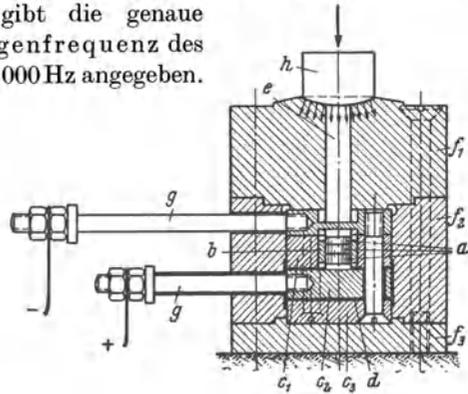


Abb. 164. Kohle-Druckmeßdose nach Rumpff und Lueg für 5000 kg Höchstlast. 50 mm \varnothing , 60 mm Höhe, Widerstandsänderung bei Höchstlast rd. 0,2 Ω . *a* Kohleplättchen; *b* Isolierring; *c*₁ Ring; *c*₂ Bodenplatte (allseitig isoliert); *c*₃ Gegenplatte; *d* Isolierung von *c*₂; *e* Druckstempel; *f* äußere Fassung; *f*₁ Deckplatte; *f*₂ Abstandring; *f*₃ Bodenplatte; *g* Anschlüsse; *h* Druckstempel (Druckfläche in *f*₁ eingeschliffen).

Der Indikator von Glamann und Triebnigg wurde von Rumpff weiter entwickelt und verschiedenen Meßbereichen und den Bedürfnissen von technischen Problemen angepaßt (Dynamometer für Zug und Druck, Messung von Schwingungen,

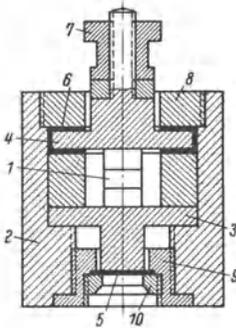


Abb. 165.

Abb. 165. Druckelement nach Rumpff. *1* Kohleplättchen; *2* Fassung; *3* und *4* Stahlmembrane; *5* Vormembrane; *6* Isolierstücke; *7* Klemmen; *8*, *9*, *10* Schraubringe.

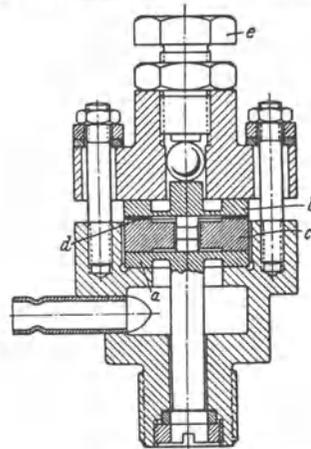


Abb. 166.

Abb. 166. Widerstands-Indikator nach Glamann-Triebnigg. Die Kohlesäule aus drei Platten wird zwischen den zwei kräftigen Membranen *a* und *b* untergebracht, welche durch den Distanzring *c* auseinandergehalten werden. Die obere Membran *b* ist von den übrigen Teilen des Gerätes durch den 0,01 mm dicken Glimmerring *d* isoliert. Die beiden Membranen sind in ihrer Mitte mit zylindrischen Ansätzen versehen, wodurch ein ebenes Anliegen der Kohleplatten gewährleistet wird. Mittels der oben angebrachten Druckschraube *e* kann die Vorspannung der Säule wunschgemäß eingestellt werden. Das Gerät ist mit Wasserkühlung versehen, um die Temperatur unterhalb 50° C zu halten.

Gebirgsdruck in Gesteinen. Indizieren von Verbrennungsmotoren und Schießwaffen, Achsdruckmessungen an Lokomotiven, Drehmoment-schwankungen eines Walzwerkes.) Die grundsätzliche Anordnung des Druckelementes zeigt Abb. 165. Es wird eine einfache Brückenordnung (Abb. 163) angewendet. Der überwiegende Anteil der zu messenden Kraft wird durch eine Membran aufgenommen, wodurch die Zusammen-drückung selbst bei den höchsten Drücken nur auf einige Tausendstel von Millimeter beschränkt wird.

Wegen der elastischen Nachwirkung in der Kohlsäule ist es vorzuziehen, das Gerät dynamisch zu eichen. Für diesen Zweck haben Glamann und Triebnigg eine Eichmethode mit raschem Druckwechsel ausgearbeitet (Abb. 167). Durch

einen Drehschieber wird das Druckelement in rascher Reihenfolge vorher eingestellten Drücken ausgesetzt, die nur sehr kurzzeitig andauern. In

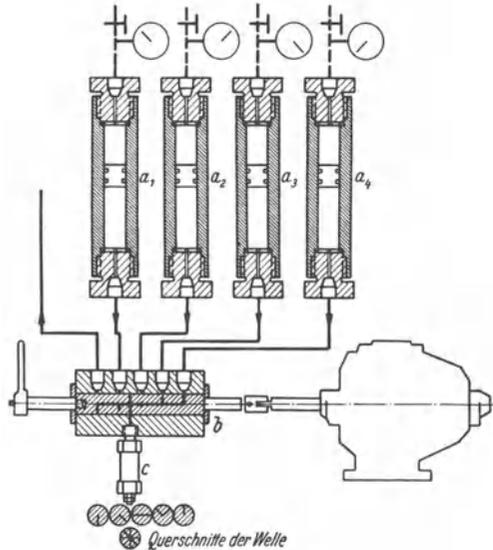


Abb. 167. Eichvorrichtung mit plötzlich wechselndem kurzzeitigem Druck. a_1 bis a_4 Luftpufferflaschen; b umlaufender Schieber; c Halbleiter-Indikator.

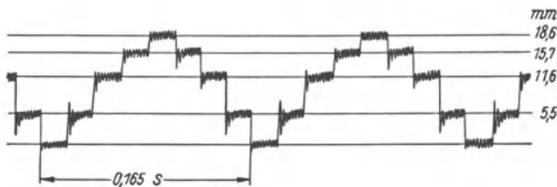


Abb. 168. Aufnahme mit der Eichvorrichtung nach Abb. 167 (bei 364 U/min des Verteilschiebers).

dieser Weise wird eine Eichkurve mit treppenförmigem Ansteigen und Abfallen der Drücke erhalten (Abb. 168).

Der Indikator von Dodds, Sprake und Garner (Versuchsanstalt der Anglo-American Oil Co. und Metropolitan-Vickers Electrical Co.) enthält auch eine einzige Kohlsäule als Druckgeber (Abb. 169 und 170). Das Gehäuse ist nichtrostender Stahl, dessen untere Wand eine Membran bildet, 16 mm \varnothing , 1 mm dick. Die Mittelelektrode ist aus nichtrostendem Stahl hergestellt, deren unteres Ende für die Aufnahme der Kohleplättchen (3 mm \varnothing , 0,5 mm dick) ausgehöhlt ist. Diese sind von der

Elektrode durch ein Glasrohr isoliert, das aber um etwa 0,25 mm kürzer als die Kohlsäule ist, um deren Zusammendrückung nicht zu verhindern. Ein Gummiring unter der Mittelelektrode dichtet die Kohlsäule nach außen ab, so daß die Elektrode mittels Wasserkühlung auf einer gleichbleibenden Temperatur gehalten werden kann. Das oberste und das unterste Kohleplättchen sind verkupfert, das oberste ist an die Elektrode, das unterste an die Membran angelötet. Das Druckelement kann einen Strom ertragen, welcher für die elektromagnetische Betätigung des Oszillographen durch Ablenkspulen ohne jede Verstärkung ausreicht.

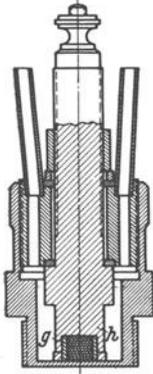


Abb. 169. Druckelement von Dodds, Sprake u. Garner. *g* Kohlsäule; *h* Elektrode.

Die genannten Forscher haben auch ein Hochwiderstands-Druckgeberelement entwickelt, in welchem die Kohleplättchen durch Plättchen aus einem zusammengesetzten Stoff von hohem Widerstand ersetzt werden. In diesem Falle reguliert der Geber nicht die Stromstärke, sondern die Spannung, deren Änderungen dann dem Ablenkplattenpaar zugeführt werden. Bei der Kohlsäule mit ihrem niedrigen Widerstand wird die Schaltanordnung nach Abb. 171, bei Verwendung der Hochwiderstandsäule die Schaltanordnung nach Abb. 172 angewendet. Beide Systeme haben ihre Vorteile und die genannten Forscher haben,

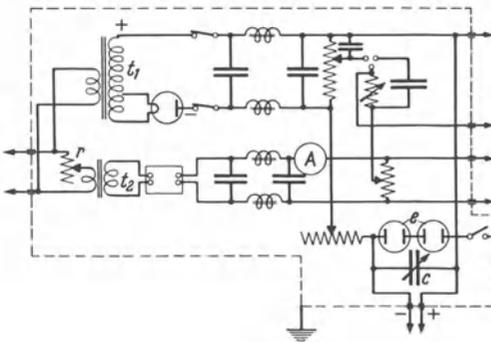


Abb. 170. Schaltschema zum Netzanschlüßgerät des Indicators von Dodds, Sprake und Garner. *t*₁ Hochspannungs-Transformator; *t*₂ Niederspannungs-Transformator; *A* Amperemeter; *e* Neonlampen; *c* regelbarer Kondensator; *r* Kontrollwiderstand für Zeitablenkung.

je nach der Art der Untersuchung, das eine oder das andere System vorteilhafter gefunden.

Die Anordnung der Kathodenröhre ist die übliche. Der Stromkreis für die Speisung des Oszillographen (Abb. 170) besteht aus einem Hochspannungstransformator *t*₁ und einem Niederspannungstransformator *t*₂. Die Sekundärströme werden gleichgerichtet und geglättet und die Hochspannung an

die Anode und Kathode der Röhre, die Niederspannung als Heizung an die Glühkathode angeschlossen. Der Heizstrom wird durch einen Widerstand geregelt und der Leuchtpunkt wird durch den Schildwiderstand scharf auf dem Schirm abgebildet. Zu diesen Einrichtungen der Röhre kommt der Zeitablenkungskreis, an welchem die ganze 2500-V-Spannung zur Verfügung steht.

Dieser Kreis besteht aus einem Kondensator, welcher mit beliebiger durch einen Widerstand regelbarer Stromstärke gespeist, auf eine bestimmte Spannung gebracht und bei jeder Umdrehung des Unterbrechers kurzgeschlossen wird. Da der Unterbrecher von der Kurbelwelle oder von der Nockenwelle angetrieben wird, ist der Synchronis-

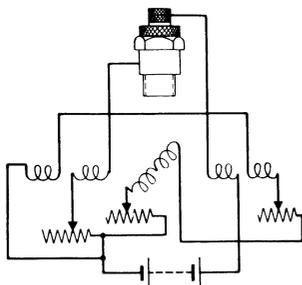


Abb. 171. Druckelement Stromkreis für Kohlesäule (niedriger Widerstand).

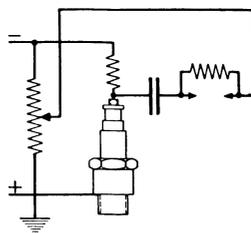


Abb. 172. Druckelement Stromkreis für Kompositionsäule (hoher Widerstand).

mus zwangsläufig gesichert. Das Ansteigen der Kondensatorspannung kann in dem Anfangsbereich als linear betrachtet werden. Diese Kondensatorspannung wird dem Abszissenplattenpaar zugeführt.

Die beiden Neonlampen *e* spielen keine Rolle in der Betätigung der Kathodenröhre, sondern dienen nur für die Sicherheit des Bedienungspersonals, falls bei dem Unterbrecher die Kontakte geöffnet bleiben. In diesem Falle kann das Potential zwischen den Unterbrecherkontakten nicht die Durchschlagsspannung der Neonröhre übersteigen.

Das ganze Unterbrechergerät kann gedreht und dadurch die gewünschte Phase in die Mitte des Diagrammes gestellt werden. Wie aus Abb. 173 ersichtlich, beeinflusst der Nocken *h* einen Kontaktarm *l*, welcher an beiden Seiten je einen Kontakt *o* oder *p* betätigen kann, je nach der Lage, in welcher der Rahmen *n* durch die Schraube *m* befestigt wird. Wenn der Kontakt *o* wirksam ist, dauert der Kontakt eine kurze Zeit, z. B. 20 Grad, und die Unterbrechung eine lange Zeit, d. h. 340 Grad Nockenbewegung. Demgemäß wird die Füllung des Kondensators eine lange Zeit andauern, und im Diagramm wird ein Phasenbereich von 340 Grad erscheinen. Wenn der andere Kontakt *p* wirksam ist, ist die Lage umgekehrt: Kontakt für eine lange Zeit, Unterbrechung für eine kurze Zeit, und das Diagramm wird nur einen

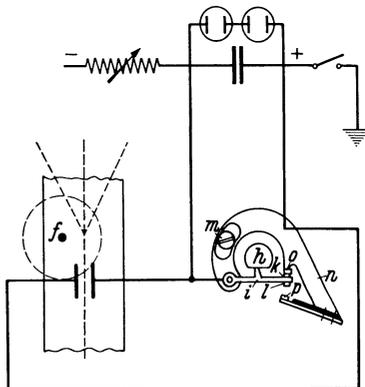


Abb. 173. Abszissengeber für Kolbenweg. Unterbrechergerät zum Indikator von Dodds, Sprake und Garner. *f* Ablenkspule; *h* Nocken; *l* Unterbrecherarm; *k*, *l*, *o*, *p* Kontakte; *m* Halteschraube; *n* Rahmen.

Phasenbereich von 20 Grad zeigen, aber dafür diesen zu einem größeren Maßstab ausgezogen. Dadurch können einzelne interessierende Phasenbereiche mit erhöhter Genauigkeit untersucht werden, z. B. der Zündverzug in Dieselmotoren. Der Unterbrecherrahmen n ist mit einer Gradeinteilung versehen. Wenn nun ein Punkt des Kreisprozesses im Diagramm (z. B. der Einspritzbeginn) durch Drehung des Unterbrecherrahmens an eine markierte Ordinate am Schirm und dann, durch Verstellung des Unterbrecherrahmens ein anderer Kreisprozeßpunkt (z. B. der Zündbeginn) auf dieselbe Ordinate gebracht wird, so kann der Phasenunterschied zwischen den beiden Kreisprozeßpunkten (in unserem Beispiel der Zündverzug) an der Gradeinteilung des Rahmens abgelesen werden.

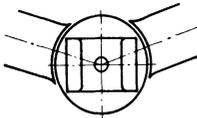


Abb. 174. Anordnung der Zweipol-Dynamo für die Erzeugung einer, mit der tatsächlichen Kolbenbewegung verhältnismäßigen Spannung.

Für die Aufnahme von Kolbenwegdiagrammen wird an das Abszissenplattenpaar eine Spannung gelegt, deren Wert sich entweder rein sinusförmig oder entsprechend der tatsächlichen Kolbenbewegung ändert. Das kann durch eine Zweipoldynamo erzielt werden (Abb. 174). Durch zweckmäßigen Entwurf

läßt sich eine rein harmonisch wechselnde Spannung erzielen, wenn die Pole um 180 Grad gegeneinander versetzt sind. Durch Verstellung der Pole auf einen Winkel von weniger als 180 Grad kann eine Proportionalität mit dem Kolbenweg für einen Kurbeltrieb mit endlicher Treibstangenlänge erreicht werden. Hierbei muß der Polwinkel dem Winkel gleich sein, welchen die den beiden mittleren Kolbenstellungen entsprechenden Kurbelstellungen miteinander einschließen. Die Einrichtung wird von der Motorwelle angetrieben. Die so entstehende elektrische Spannung ist verhältnismäßig dem jeweiligen Kolbenweg. Bei einer anderen Methode für die Kolbenweganzeige wird ein Streifen aus Widerstandsmaterial durch einen Kurbeltrieb zwischen zwei Kontakten bewegt. Dieses Verfahren bewirkt eine wegproportionale Widerstandsänderung, wenn der Kurbeltrieb von der Kurbelwelle der zu untersuchenden Maschine betätigt wird. Auch der Einfluß der endlichen Treibstangenlänge kann dadurch berücksichtigt werden, daß das Verhältnis Kurbelradius-Pleuelstangenlänge gleich demjenigen in der Maschine gewählt wird.

C. Indizierverfahren mittels druckveränderlichem Potential.

Die Wirkung dieser Gattung von Indikatoren beruht auf der sog. piezo-elektrischen Eigenschaft einiger Kristalle (Quarz, Turmalin, Natronweinstein, Kieselzinkerz, Zinkblende), durch welche eine elektrische Ladung an deren Oberflächen unter dem Einfluß einer Änderung der mechanischen Beanspruchung entsteht. Die Ladung ist proportional der Beanspruchung, also bei gleichbleibender Kraft unabhängig von der

Größe des gedrückten Querschnittes. Die Beanspruchung kann Druck, Zug oder Torsion sein. Diese Wirkung wurde von Curie 1880 entdeckt und wird neuerdings für die Messung von schnellen Druck- oder Kraftänderungen angewendet. Auch die umgekehrte Wirkung, Erregung mechanischer Schwingungen durch Hochfrequenzspannung, findet in der Experimentalphysik Anwendung, insbesondere für Schwingungen oberhalb der Hörbarkeitsgrenze.

Diese Meßmethode eignet sich für sehr hohe Druckfrequenzen, da der Meßweg verschwindend klein und daher die Eigenfrequenz sehr hoch ist; weiterhin sind die Ladungen und die dadurch erzielbaren Spannungen mit hoher Genauigkeit verhältnisgleich dem Druck. Ein Nachteil ist, daß die elektrischen Ladungen sehr gering sind, daher ist eine peinliche Isolation und eine umfangreiche und kostspielige Apparatur für die Verstärkung und Messung notwendig, welche für die Handhabung ziemlich hohe Fachkenntnisse voraussetzt.

Infolge seiner guten elektrischen und mechanischen Eigenschaften findet Quarz eine ausschließliche Anwendung in technischen Meßgeräten. Der Quarz kristallisiert in hexagonalen Prismen mit aufgesetzten hexagonalen Pyramiden. Man unterscheidet die optische Achse O in der Längsachse des Prismas (Abb. 175), die elektrische Achse E in der Diagonale des Sechsecks und die neutrale Achse N in der Richtung der Verbindungslinien der Mittelpunkte zweier gegenüberliegender Hexagonseiten. Es gibt also drei elektrische und drei neutrale Achsenrichtungen. Die piezoelektrische Ladung tritt an der Fläche senkrecht zur elektrischen Achse auf, wenn die aus dem Kristall ausgeschnittene Quarzplatte (parallel zu O und senkrecht zu E) in der Richtung von E oder N (aber nicht O) mechanisch auf Zug oder Druck beansprucht wird. Die piezoelektrische Druckkonstante beträgt etwa 2×10^{-11} Coulomb/kg, der Elastizitätsmodul etwa 10^6 kg/cm². Die Quarzplatten können bis zu etwa 2000 kg/cm² beansprucht werden; Temperaturen bis etwa 200° C ergeben eine Abnahme der Empfindlichkeit um über 3%, die im Quarz selbst begründet ist. Da die Druckübertragungsglieder eine kleine Masse

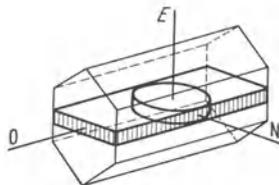


Abb. 175. Kristallachsen des Quarzes. O optische; E elektrische, N neutrale Achse.

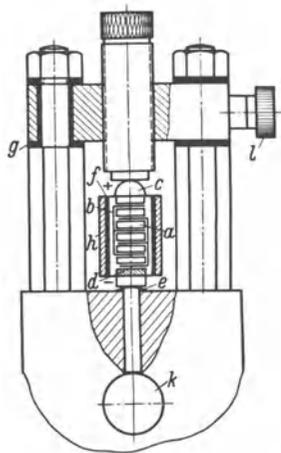


Abb. 176. Piezoelektrischer Indikator nach Ervin, für Schießwaffen. (Peters Cartridge Co.) a Quarzscheiben; b Silberfolien; c Halbkugel aus Stahl; d Stahlplatte; e Feder; f und g Bakelite-Isolierung; h Messinghülse; k Kammer des Gewehres; l Pol der isolierten Brücke.

haben, und unter hoher Vorspannung stehen, entstanden nach Meurer auch bei stoßenden Motoren keine Störungen durch Massenschwingungen.

Es ist ferner notwendig, den Quarzkristall sorgfältig gegen Feuchtigkeit zu schützen.

Die piezoelektrische Druckmessung wurde zuerst für ballistische Untersuchungen an Kanonen und Feuerwaffen angewendet. In diesem Gebiet sind die Arbeiten in USA. von G. F. Hull, H. O. Wood, J. C. Karcher,

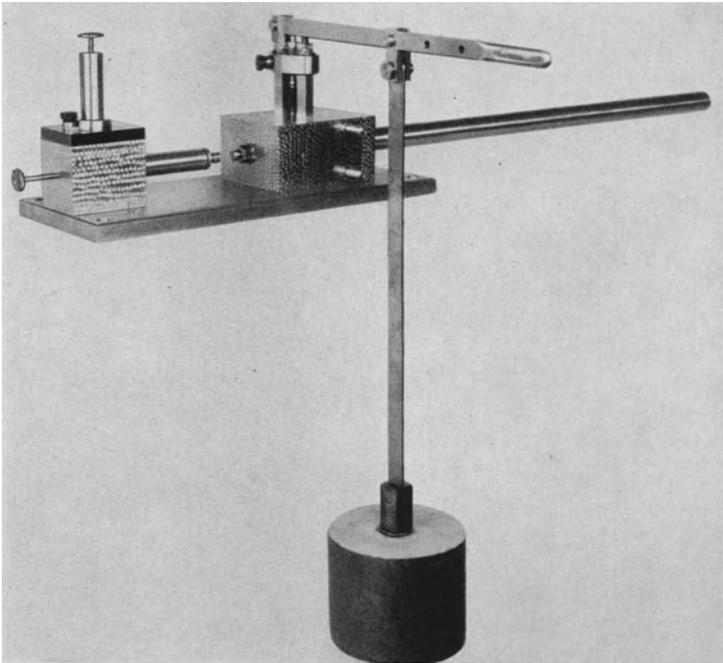


Abb. 177. Allgemeine Anordnung und Eichvorrichtung des Indikators nach Ervin.

R. H. Kent (1927), C. T. Erwin (1932) und in Deutschland von Joachim und Illgen (1932) beachtenswert. Die deutschen Forscher J. Kluge und H. E. Linckh haben (1930—31) in der Phys.-Techn. Reichsanstalt auf diesem Gebiet eingehende Forschungen geleistet und die Druckmessung auf eine hohe Stufe der Vollkommenheit gebracht. Sie haben das piezoelektrische Meßverfahren auch für die Messung von Stoßkräften, Erschütterungen, Beschleunigungen und kleinen Dehnungen aller Art angewendet und Sonderausführungen der Druckmeßkammer für diese Sonderzwecke entwickelt. Anlehnend an die Arbeiten von Kluge und Linckh hat E. Kallhardt (1934) mit diesem Verfahren sorgfältige Versuche an einem Verbrennungsmotor ausgeführt, und Klaus Karde hat 1936 die Verbrennungs- und Einspritzvorgänge in einer Dieselmachine gründlich untersucht. Willy

Marti hat das Verfahren zur Klärung von Federschwingungserscheinungen angewendet. E. Blaum (1936) hat mit dem Verfahren gründliche Untersuchungen an Einspritzsystemen von schnelllaufenden Dieselmotoren ausgeführt. Im Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren der T. H. Stuttgart haben Prof. Kamm, Rickert und v. Kienlin und an der T. H. Dresden Meurer um die Entwicklung von Indikatoren dieser Gattung sich verdient gemacht.

Während die ersten Forschungen an einzelnen, im Laboratorium gebauten Apparaten ausgeführt wurden, haben schon einige Firmen die fabrikgemäße Herstellung solcher Instrumente unternommen. Unter

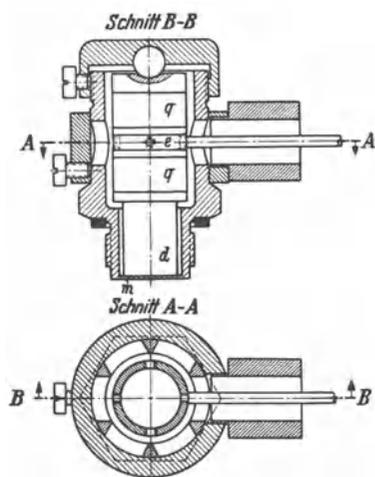


Abb. 178. Druckkammer nach Kluge und Linckh.
 q Quarze; e Elektrode; m Membran;
 d Druckstempel.

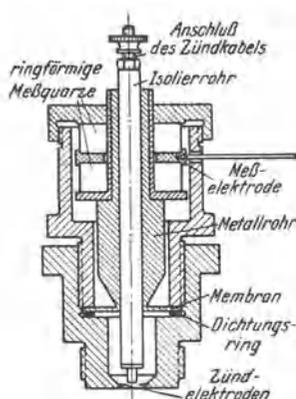


Abb. 179. Druckkammer nach Kluge und Linckh,
 mit eingebauter Zündkerze.

diesen sind zu nennen: Zeiss-Ikon A.-G., Dresden (nach Dr. Illgen), Firma Radio-Loewe A.-G., Berlin-Steglitz (nach Kluge und Linckh) und die Radio Corporation von Amerika, Camden, USA.

Die piezoelektrischen Indikatoren bestehen aus drei Hauptteilen, dem Druckmeßelement oder Quarzkammer, dem Röhrenvoltmeter und dem Anzeigerät.

Einige Quarzkammern, wie sie von verschiedenen Forschern angegeben werden, sind in den Abb. 176—186 gezeigt. Im wesentlichen bestehen diese aus einem Stahlgehäuse, welches in die Wand des zu untersuchenden Raumes geschraubt wird und die Quarzsäule enthält. Der zu messende Druck wirkt auf eine abdichtende Membran oder einen Kolben und wird so genau wie möglich axial auf die Säule übertragen. Die Säule ist aus 2 bis 9 aufeinandergestapelten, genau plangeschliffenen Quarzscheiben (10 bis 25 mm \varnothing . 3 bis 6 mm dick) aufgebaut, zwischen welche dünne Scheiben von leitendem Material (Stanniolscheiben) gelegt sind. Die Scheiben berühren die Seiten der Quarzplatten von gleicher Polarität

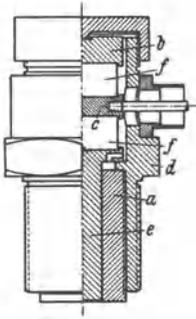


Abb. 180. Kolben-Quarzdruckkammer nach Kallhardt. *a* Zylinderbüchse aus Rotguß; *b* Druckstück; *c* Meßelektrode; *d* Gehäuse; *e* Kolben; *f* Quarze.

und werden abwechselnd miteinander verbunden. Dadurch werden die Quarze parallelgeschaltet. Die entstehenden Elektrizitätsmengen werden zu zwei Polen geführt, deren einer durch das Gehäuse geerdet, während der andere isoliert und aus dem Gehäuse zu einem Kontaktknopf herausgeführt wird. Die im Druckelement entstehenden Ladungen werden mittels eines Kabels auf das Röhrenvoltmeter übertragen. Je größer die Anzahl der Quarzplatten und daher die belastete Oberfläche ist, um so größer ist die entstandene Ladung, daher die Empfindlichkeit. Dann müssen aber die Scheiben dünner hergestellt werden, und die Druckmeßkammer wird größer, kostspieliger und ist leichter zu beschädigen. Da die Ladungen, d. h. die entstandenen Spannungen, mit hoher Genauigkeit verstärkt werden können, wenden mehrere Konstrukteure der Einfachheit und Billigkeit wegen nur zwei Quarzscheiben an und sehen eine entsprechend höhere Verstärkung im Röhrenvoltmeter vor.

Die Quarzplatten stehen unter einer Vorspannung, welche durch eine Schraube geregelt werden kann. Infolge der Kleinheit des Meßweges der Quarzsäule ist es äußerst wichtig, deren Auflagefläche

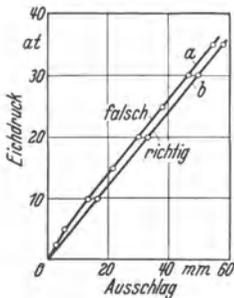


Abb. 181. Mit der Membrankammer (*a*) und der Kolbenkammer (*b*) aufgenommene Eichkurven (nach Kallhardt).

derart auszuführen, daß daran keine mit Reibung behaftete Schlüpfungen in der Belastungsrichtung zustande kommen können. Auf solche, durch Schlüpfungen verursachte Fehler hat J. Broeze hingewiesen und diese nach der geologischen Analogie „tektonische“ Schwingungen genannt. Diese Erscheinung ist der Hysterese ähnlich, aber unterscheidet sich von letzterer dadurch, daß die Auflagefläche nicht allmählich, sondern ruckweise nachgibt und nach Aufhören der Belastung wiederum ruckweise ihre vorherige Lage annimmt. Diese tektonischen Schwingungen kommen im Indikatordiagramm als Frequenzen sehr hoher Ordnung (weit oberhalb

10000 Hz) zum Ausdruck. Wenn auch solche Schlüpfungen mikroskopisch klein sind, so können dadurch doch beträchtliche Fehler in der Druckanzeige entstehen, wie es die folgende Überlegung (nach Broeze) zeigt:

Es sei angenommen, daß ein Quarzkristall von 0,5 cm Höhe, einem Elastizitätsmodul von 10^6 kg/cm² und mit einer doppelt so großen Fläche als der Druckkolben (d. h. 1 kg/cm² Gasdruck ruft 0,5 kg/cm² Druckspannung im Quarz hervor) eine plötzliche Verlängerung von 1 Mikron

(10^{-4} cm) infolge der ruckweisen Schlüpfung der Auflagefläche erfährt. Der dadurch verursachte Fehler in der Druckanzeige beträgt

$$\frac{10^6 \text{ kg/cm}^2 \cdot 10^{-4} \text{ cm}}{0,5 \text{ cm} \cdot 0,5} = 400 \text{ kg/cm}^2.$$

Aus diesem Grunde verwirft Broeze eine Abstützung der Auflagefläche durch Schrauben von dreieckigen Gewinde oder durch Kegel oder Kugel und empfiehlt eine Lagerung ohne Nachgiebigkeit oder Einstellbarkeit der oberen Auflagefläche (Abb. 187). Auf einem ähnlichen Gedankengang beruht die von Meurer entwickelte hülsenartige Einspannung der Quarzsäule (Abb. 189).

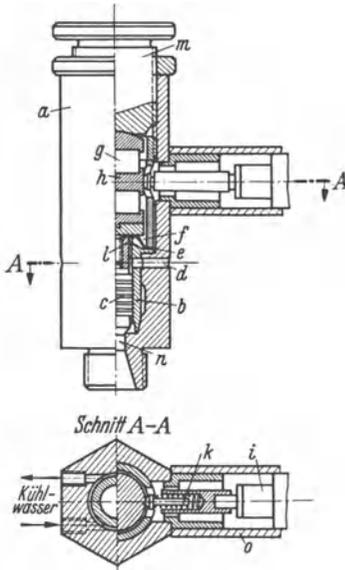


Abb. 182. Quarzkammer von Radio-Loewe, wie von Karde benutzt. *a* Kammermantel; *b* Zylinderbüchse; *c* Kolben; *d* Entlastungsöffnungen; *e* Gummimembran; *f* zylindrischer Raum; *g* Quarz; *h* Mittelelektrode; *i* Verbindungsleitung; *k* federnder Stift; *l* Feder; *m* Druckschraube; *n* Verbindungskanal; *o* Verbindungsrohr.

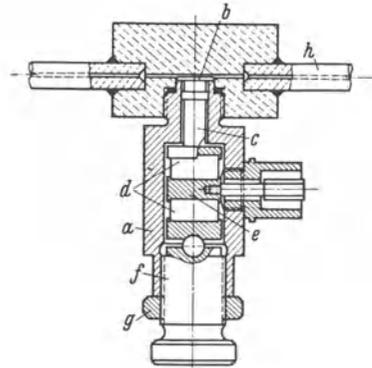


Abb. 183. Quarzkammer von Radio-Loewe, wie von Karde für Brennstoffleitungen benutzt. *a* Kammermantel; *b* Membran; *c* Stempel; *d* Quarz; *e* Mittelelektrode; *f* Druckschraube; *g* Gegenmutter; *h* Brennstoffleitung.

Auch Druckelemente mit Halbleitersäule sind mit dieser Fehlerquelle behaftet. Die Druckmeßelemente mit Membranen (d. h. in welchen die Membran als Meßfeder wirkt) wie die später zu besprechende Kondensator- und Induktivitätsmeßdosen sind durch diese Fehlerquelle weniger beeinflusst, da diese bedeutend größere Meßwege haben.

Wegen der außerordentlich geringen Ladungen sind die Quarze und die anschließenden Leitungen vor jedem Leckverlust zu schützen und peinlich sorgfältig zu isolieren. Deshalb ist es vorteilhaft, die Kammer luftdicht einzukapseln und auch den Abschluß gegen den Zylinderraum mit einer Membran vorzunehmen. Es wurde aber gefunden, daß die abwechselnde in Verbrennungsmotoren auftretende Erwärmung und Abkühlung der Abschlußmembran und die sich infolge-

dessen ändernde Vorspannung der Quarze eine Abweichung von dem erwünschten linearen Verhalten der Eichkurve verursacht und daß daher eine Abdichtung mit einem Kolben vorteilhafter ist und eine höhere Genauigkeit ergibt (Abb. 181, Kallhardt). Diese Anordnung

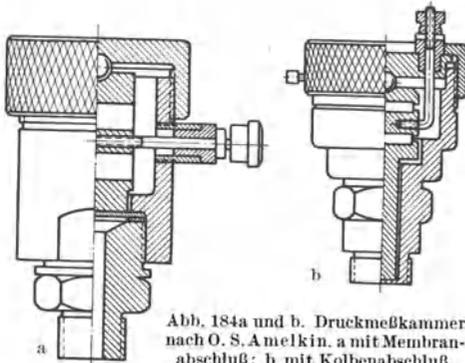


Abb. 184a und b. Druckmeßkammer nach O. S. Amelkin. a mit Membranabschluß; b mit Kolbenabschluß.

ermöglicht aber ein Eindringen von Öl und Wasserdämpfen in das Innere der Quarzkammer, dadurch eine Beeinträchtigung der Isolierung und daher einen Leckverlust. Beide Forderungen werden befriedigt durch die Verlegung der Membran etwas entfernt von der heißen Zylinderwand (Zeiss-Ikon) in die verhältnismäßig kühleren Gebiete der Kammer oder durch

die Anwendung eines Kolbens mit einer sehr weichen Membran oberhalb des Kolbens (Radio-Loewe). In ihren späteren Arbeiten veröffentlicht Kluge und Linckh eine Konstruktion mit einer in dem kühlen Bereich angeordneten Membran (Abb. 179), wobei in der Bohrung auch

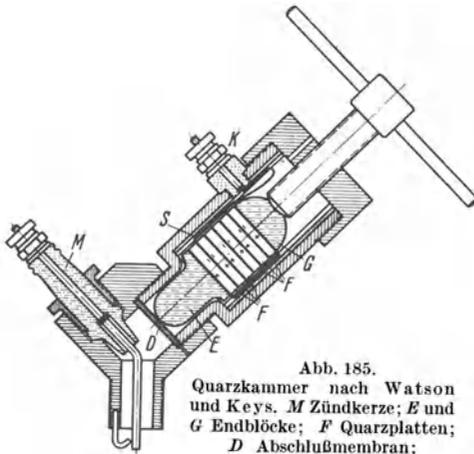


Abb. 185. Quarzkammer nach Watson und Keys. *M* Zündkerze; *E* und *G* Endblöcke; *F* Quarzplatten; *D* Abschlußmembran; *S* Bakelite-Isolation.

gleichzeitig die Zündkerze untergebracht ist. Die Zündzuleitung wird durch die durchbohrten Quarze dem Zündraum zugeführt und ist durch ein geeignetes wärmebeständiges Isolierrohr und durch ein Metallrohr, das am unteren Ende mit der Membran fest verbunden ist, gegen die Quarze abgeschirmt.

Die Quarzladungen werden durch einen (etwa 2 mm \varnothing) starken Neusilberdraht von geringem Widerstand, der frei aus der Druckkammer herausgeführt wird, auf das Steuer-

gitter einer Doppelgitterröhre übertragen. Hochpolierte Bernsteinisolatoren werden überall an den Durchführungsstellen angewendet und dazu wird noch die Meßleitung wegen der elektrostatischen Abschirmung (insbesondere bei Zündung eines Zündermotors) in ein eisernes Rohr eingeschlossen. Auch der Verstärker wird in einem eisernen Schutzkasten eingebaut. Um die Veränderung des Meßbereiches des Voltmeters zu

ermöglichen, wird parallel zu den Quarzen ein Drehkondensator (von etwa 500 cm Kapazität nach Kallhardt) geschaltet. Als Verbindungsleitung zwischen Quarzelement und Verstärker wendet Zeiss-Ikon ein sorgfältig isoliertes Kabel an. Die Verbindungsleitung wirkt auch als ein Kondensator: je länger die Leitung ist, um so größer ist die Kapazität und um so kleiner sind die durch die Quarzladung erreichbaren Höchstspannungen. Es kann also durch Verkürzung des Leiters eine höhere Empfindlichkeit erreicht werden. Kallhardt hat gefunden, daß sogar diese Abschirmung der Verbindungsleiter nicht genügend ist, um äußere Störungen durch die Zündanlage eines Zündermotors fernzuhalten, sondern es ist auch eine Abschirmung des Verteilers der Zündleitung und Zündkerze notwendig.

Es wäre denkbar, die durch die Quarzladungen entstandenen Spannungsschwankungen unmittelbar auf die elektrostatischen Ablenkplatten eines Kathodenstrahl-Oszillographen einwirken zu lassen. Die notwendige Steuerleistung führt aber zu einem Ladungsverlust und damit zu einer Fälschung des Meßergebnisses. Aus diesem Grunde haben Kluge und Linckh einen elektrostatisch arbeitenden Vorverstärker benutzt, der von den piezoelektrischen Ladungen gesteuert wird und seinerseits die notwendige Steuerleistung für den Kathodenstrahl-Oszillograph liefert.

Die grundsätzliche Schaltung (Abb. 190) zeigt das Röhrenvoltmeter, den Kathodenstrahl-Oszillograph und die Kippschaltung zur Zeitablenkung. Das Röhrenvoltmeter besteht aus einer Eingangsröhre, die infolge ihres hohen Gitterisolationswiderstandes durch die piezoelektrische Spannung U verlustfrei gesteuert wird, und einer Widerstandsverstärkerröhre in galvanischer Kopplung. Der Spannungsabfall am Anodenwiderstand R_{A2} der Verstärkerröhre wird dem einen Ablenkplattenpaar des Kathodenstrahl-Oszillographen zugeführt, wobei der Spannungsabfall des Anodenruhestromes durch

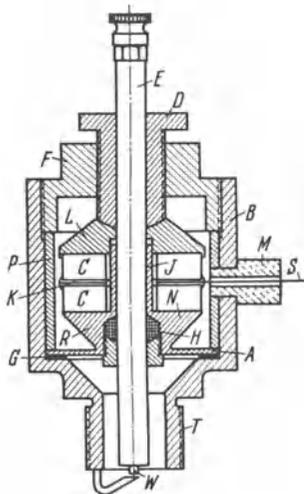


Abb. 186. Quarzkammer mit dünner Membran nach Paul und Eldredge, mit Zündkerze vereinigt. B Gehäuse; C Quarze; A Abschlußmembrane; G Dichtungsring; H Asbeststoffbüchse; J Hülse; D Vorspannungsmutter; K Silber-Sammelleiter; S Verbindungsleiter.

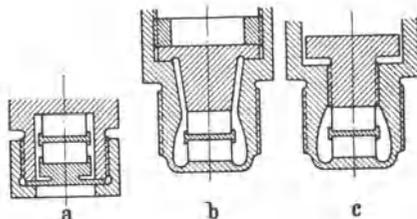


Abb. 187. Vergleich von verschiedenen Anordnungen der Fassung des Quarzelementes (nach J. Broeze). a und b Starre obere Auflagefläche: richtig; c obere Auflagefläche mit Gleitmöglichkeit: unrichtig.

eine Gegenspannung U_{K1} kompensiert wird. Der so erhaltene Lichtfleckausschlag am Leuchtschirm kann dann in einem Drehspiegel beobachtet oder auf einer umlaufenden Filmtrommel photographiert werden. (Joachim und Illgen haben bei ihren ballistischen Untersuchungen durch Verwendung eines endlosen Filmes Filmgeschwindigkeiten von 16 m/s verwendet.)

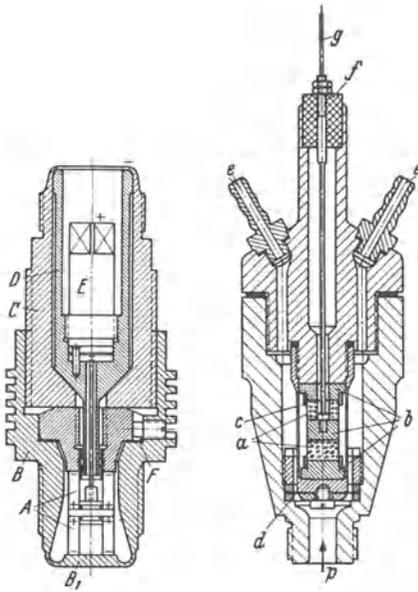


Abb. 188.

Abb. 189.

Abb. 188. Quarzkammer der Prüfstation Delft (Boerlage, Broeze, van Driel, Peletier). *A* Quarze (rohrförmig, 6 mm \varnothing , 5 mm hoch); *B* Stahlgehäuse; *B*₁ Membran mit Verdickung in der Mitte; *C* eiserne Hülse; *D* Ebonit-Isolation; *E* positiver Drahtanschluß (Bronze); *F* Stahlscheibe für die Einstellung der Anfangsspannung.

Abb. 189. Hülse-Quarzindikator nach S. Meurer (T. H. Dresden). *a* Quarzscheiben; *b* Stahlzwischenstücke; *c* Hülse als Vorspannfeder; *d* Gasabdichtungsmembran; *e* Kühlwasserein- und -austritt; *f* Bernsteinisolierung; *g* Ladungsabführung.

Den zeitlichen Druckverlauf von periodischen Vorgängen erhält man durch eine periodische Zeitablenkung, für die eine Spannung mit sägeförmigem Verlauf benutzt wird, welche unter Zwischenschaltung einer geeigneten Gegenspannung $U_{K2} \approx U_Z + 1/2 U_P$ dem zweiten Ablenkplattenpaar des Oszillographen zugeführt wird. Diese sog. Kippschaltung wurde bei der Besprechung des Kathodenstrahl-Oszillographen behandelt.

In der praktischen Ausführung der Schaltung (Abb. 192) wird die Anzahl der nach Abb. 191 erforderlichen Spannungsquellen nach Möglichkeit verringert. Der Kathodenstrahl-Oszillograph und die Kippschaltung werden dabei in ein gemeinsam geerdetes Gehäuse eingebaut, während das Röhrenvoltmeter als gesondertes Gerät ausgeführt ist und nur durch eine zweipolige Meßleitung mit dem Oszillographen verbunden wird. Im Röhrenvoltmeter wird an Stelle der Widerstandsverstärkerröhre eine

Schirmgitterröhre verwendet, die eine etwa 10mal größere Spannungsverstärkung liefert.

Die Anodenspannungen U_{A1} und U_{A2} und die Schirmgitterspannung U_S werden von einer gemeinsamen Anodenbatterie geliefert. Die Kompensationsspannung U_{K1} wird einem Spannungsteiler entnommen. Für den Oszillograph und für die Kippschaltung ist ebenfalls nur eine Anodenspannungsquelle U_{A3} erforderlich. Die Heizbatterie U_{H2} speist gemeinsam den Oszillograph und die Aufladeröhre. Nur für die Thyatronröhre ist eine besondere im Gerät eingebaute Gitterbatterie und eine besondere

Heizbatterie erforderlich. Die Blendenspannung U_B für den Oszillograph und die Gegenspannung U_{K_2} für die Zeitablenkung werden den Potentio-

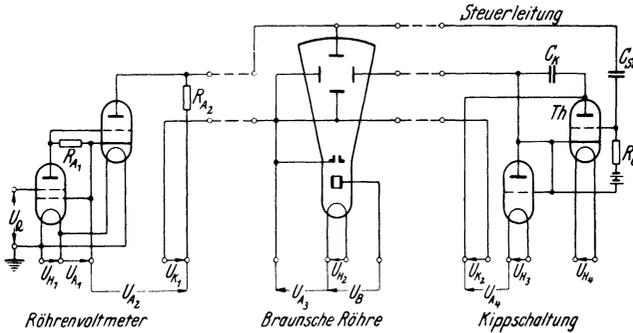


Abb. 190. Grundsätzliche Schaltung der Meßanordnung, nach Kluge und Linckh. U_{H_1} , U_{H_2} , U_{H_3} , U_{H_4} Heizspannungen; U_{A_1} , U_{A_2} , U_{A_3} , U_{A_4} Anodenspannungen; U_B Blendenspannung; U_{K_1} , U_{K_2} Kompensationsspannungen; U_Q piezoelektrische Spannung der Meßkammer; R_{A_1} , R_{A_2} Anodenwiderstände; R_G Gitterableitwiderstand der Thyatronröhre; C_K Kondensator der Kipperschaltung; C_{St} Steuerkondensator; Th Thyatronröhre.

metern R_B und R_{K_2} entnommen. Parallel zu R_B ist eine Glühlampe Gl geschaltet, über die der Kippstrom abfließen kann, so daß die Blendenspannung durch den Kippstrom nicht beeinflusst wird.

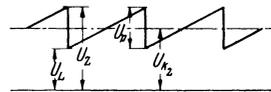


Abb. 191. Schema des Spannungsverlaufes am Kondensator C_K der Kipperschaltung. U_Z Zündspannung; U_L Löschspannung; U_P Spannungsamplitude der Zeitablenkung; $U_{K_2} = U_L + \frac{1}{2} U_P$ erforderliche Kompensationsspannung.

Der Zeiss-Ikon-Indikator (Abb. 197–201) ist als Vollnetzapparat ausgebildet (220 V, 50 Hz) und benötigt keine Batterien. In einem $25 \times 30 \times 50 \text{ cm}^3$ großen Kasten sind folgende Apparate vereinigt:

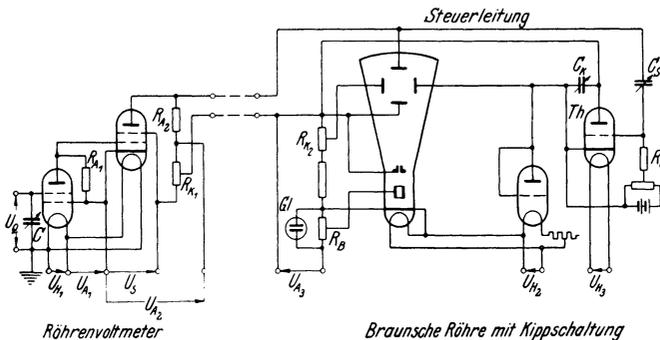


Abb. 192. Praktische Ausführung der Schaltung, nach Kluge und Linckh. U_S Schirmgitterspannung; R_{K_1} , R_{K_2} , R_B Potentiometer für Kompensations- und Blendenspannung; Gl Glühlampe; C Kondensator zur Empfindlichkeitsreglung; die übrigen Bezeichnungen wie in Abb. 182.

1. Ein zweistufiges Röhrenvoltmeter, das die vom Druckelement erzeugten Ladungen etwa 100fach verstärkt und in Spannungen umsetzt, die durch den Kathodenstrahl-Oszillograph aufgezeichnet werden.

2. Ein Hochspannungsgleichrichter, der eine Spannung von etwa 1500 V zum Betrieb des Oszillographen liefert.

3. Spannungsquellen für das Röhrenvoltmeter sowie für den Wegübertrager und Kontrollinstrumente, ferner ein Regler für die Einstellung der richtigen Betriebsspannungen und der Größe des Diagrammes.

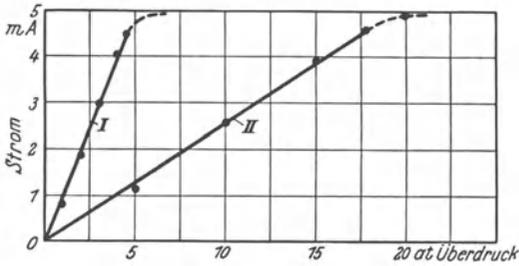


Abb. 193. Eichkurven des piezoelektrischen Indikators nach Kluge und Linckh. I Ohne Kondensator; II mit Kondensator.

Der Kathodenstrahl-Oszillograph wird in eine Trommel aus Leichtmetall eingebaut. An der Stirnseite des Gehäuses ist eine abschwenkbare Haltevorrichtung

für eine Kamera angebracht, mit deren Hilfe das Diagramm zunächst beobachtet und sodann schnell photographiert werden kann. Die waagerechte Ablenkung wird durch eine Spannung verursacht, die der Bewegung des Kolbens verhältnismäßig ist und deren Erzeugung später beschrieben wird.

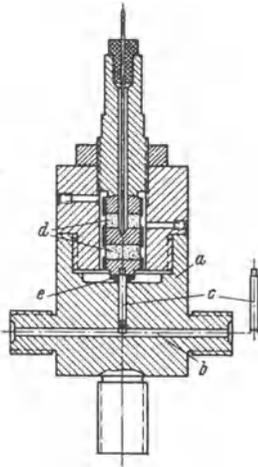


Abb. 194. Quarzkammer zur Druckmessung in der Brennstoffleitung nach Blaum (T.H. Dresden). a Gehäuse; b Brennstoffbohrung; c Druckstempel; d Quarzplatten; e Kupferring.

Die beiden Anschlußkabel zum Oszillograph werden an Steckdosen im Boden des Beobachtungsgerätes angeschlossen. Durch den Anschluß eines dritten Kabels an eine der Ablenkplatten können in die Diagrammlinie wesentliche Kennpunkte wie Totpunkt, Zündpunkt, Ventilöffnungszeiten usw. eingeschrieben werden. Bei der Lichtbildaufnahme von Druckwegdiagrammen kann die Öffnungszeit der Kamera so eingestellt werden, daß nur ein einziges Diagramm photographiert wird, oder es können eine Anzahl von Diagrammen übereinander geschrieben werden.

Der Druckmaßstab der Diagramme ist in weiten Grenzen veränderlich und kann auch während des Betriebes durch Einsetzen von größeren oder kleineren Kondensatoren geändert werden, die beim Eintritt in das Röhrenvoltmeter dem Druckelement parallelgeschaltet werden. Für die Messung besonders niedriger Drücke kann auch unter Fortfall sämtlicher zusätzlicher Kondensatoren mit der Kabelkapazität allein gearbeitet werden.

Der Kolbenwegüberträger Abb. 199 dient zur Umwandlung der Kolbenbewegung in verhältnismäßige Spannungsschwankungen, die zur Steuerung des Kathodenstrahles in horizontaler Richtung benutzt werden. Der Wegüberträger wird aus dem Netzgerät mit Gleichstrom gespeist und ist im wesentlichen ein Spannungsteiler, auf dessen Widerstand ein

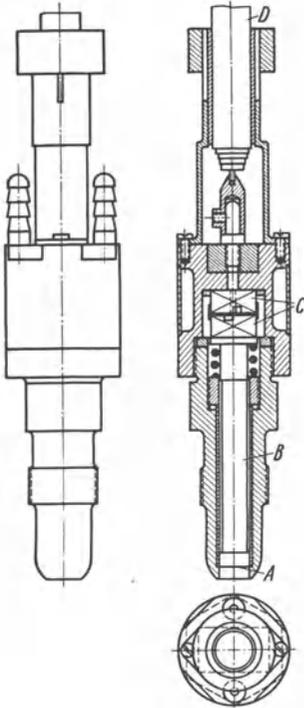


Abb. 195. Schnitt durch den Geber des Quarzindikators von Kamm, Rieckert und v. Kienlin (Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Flugmotoren, T.H. Stuttgart). Um Temperatureinflüsse vom Quarzelement fernzuhalten, wird ein langer Kolben angewendet und die Quarze mit einem wassergekühlten Raum umgeben.

rotierender Schleifer Spannungen abgreift, die der jeweiligen Entfernung des Kolbens vom Totpunkt verhältnismäßig sind. Der Widerstandsdraht ist auf eine ebene Platte aufgewickelt, so daß in der Richtung senkrecht zu den Drähten eine Widerstandszunahme entsprechend der zunehmenden Windungszahl vorhanden

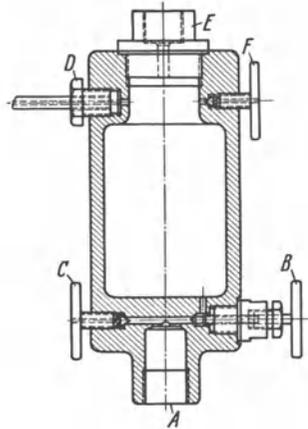


Abb. 196. Schnitt durch die Eichvorrichtung zum Geber des Quarzindikators von Kamm, Rieckert und Kienlin. Die Druckkammer wird auf den gewünschten Druck eingestellt und gleichzeitig mit der Öffnung des Druckventils der Ausschlag am Oszillogramm abgelesen. Diese Einrichtung ermöglicht den Druckanstieg schnell (etwa in 0,4 Sek.) vorzunehmen.

ist, während in der Richtung der Drähte selbst keine merkliche Widerstandsänderung vorhanden ist. Die Kurbelwelle der zu untersuchenden Maschine ist mit der Achse des den Weg übertragenden Gerätes starr gekuppelt. Am Ende dieser Achse sitzt ein Flügel, an dem der Schleifkontakt als federnder Stift angebracht ist. Dieser Stift beschreibt bei seinem Lauf auf der Widerstandsplatte einen Kreis und es entsteht infolgedessen zwischen dem einen Ende des Widerstandes und dem Schleifkontakt eine sinusförmig schwankende Spannung. Um das endliche Verhältnis Kurbelradius zu Pleuelstangenlänge zu berücksichtigen,

ist die Widerstandsplatte an den beiden zu den Windungen senkrecht liegenden Seiten trapezförmig abgeschrägt. Durch diese Anordnung

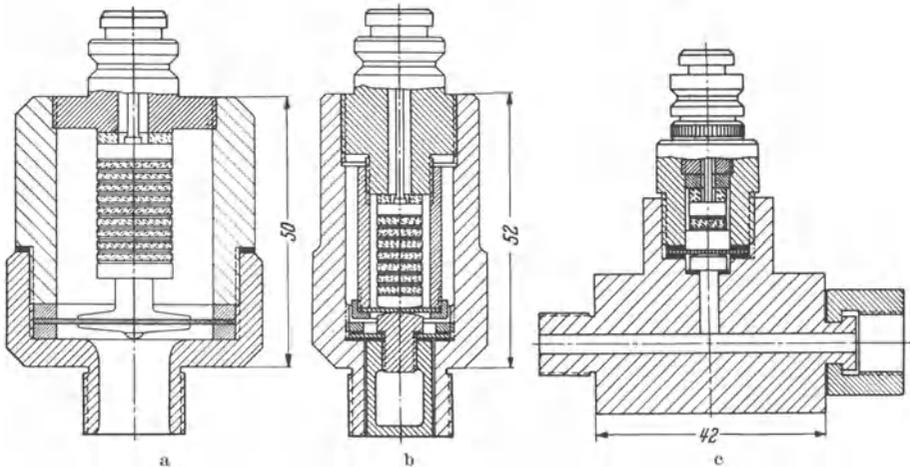


Abb. 197a—c. Quarzkammer zum Zeiss-Ikon-Indikator. a für niedrige Drücke; b für mittlere Drücke; c für hohe Drücke (Brennstoffleitung).

entsteht bei der Drehung des Schleifers eine Spannung, die der Kolbenbewegung genau entspricht. Das Kurbelverhältnis kann durch

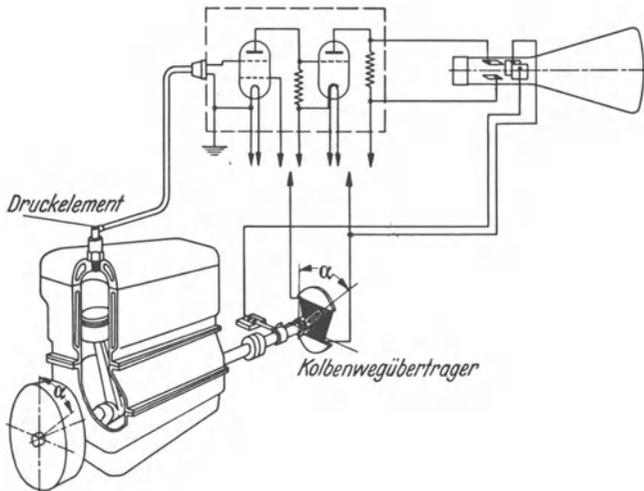


Abb. 198. Allgemeine Anordnung des Zeiss-Ikon-Indikators.

Veränderung des Schleiferradius innerhalb gewisser Grenzen verstellt werden. Durch Verdrehung der Widerstandsplatte kann die Phase zwischen der Bewegung des Kolbens und der Schwingung des Kathodenstrahles verändert werden, so daß versetzte Diagramme erhalten werden.

Ein interessantes Verfahren für die Kolbenwegübertragung wird von A. Watzinger und R. Schnell-Larsen (T. H. Trondheim, Norwegen) angegeben, wobei die Kapazität eines Zylinderkondensators verhältnismäßig zum Kolbenweg dadurch geändert wird, daß eine durch einen Hilfskurbeltrieb betätigte zylindrische Stange dem Kolbenweg entsprechend, mehr oder weniger in das Innere einer zylindrischen Hülse hineinragt.

Zur Aufnahme von Druck-Zeitdiagrammen dient der „Tremograph“ (Abb. 200), der an Stelle des Beobachtungsgerätes angeschlossen wird. Der Kathodenstrahl wird nur senkrecht abgelenkt, entsprechend den Schwankungen des Druckes. Die Ablenkung, d. h. die sich ändernde

Punktlage des Fluoreszenzpunktes wird auf einer rotierenden Trommel photographiert. Als Antrieb dient ein Elektromotor mit veränderlicher Drehzahl, die an einem Tachometer ablesbar ist. Sorgfältig durchdachte Einrichtungen, wie Möglichkeit der Auswechslung der Kassette bei Tageslicht, veränderliche Einstellung des Verschlusses mit elektrischer

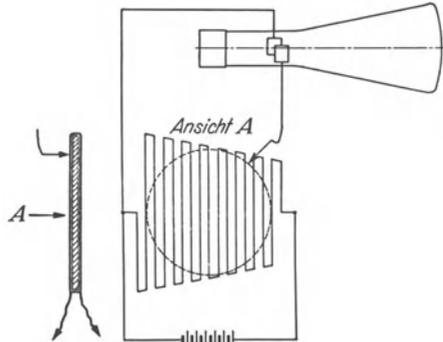


Abb. 199. Kolbenwegübertragung zum Zeiss-Ikon-Indikator.

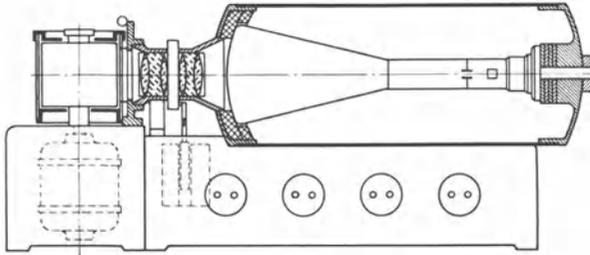


Abb. 200. Tremograph zum Zeiss-Ikon-Indikator.

Auslösung desselben dienen zur Erleichterung des Arbeitens mit dem Tremographen. Zur Aufzeichnung von Zeitmarken kann der Tremograph durch eine Glühlampeneinrichtung ergänzt werden, die durch eine Röhrenstimmgabel betätigt wird. Die Zeitmarken haben einen Abstand von je $\frac{1}{1000}$ s und erscheinen als scharf begrenzte Striche auf dem Diagramm.

Die Eichung von piezoelektrischen Indikatoren kann, ähnlich wie bei mechanischen Indikatoren, durch Preßluft unter Anwendung eines genauen Manometers vorgenommen werden. Zweckmäßig kann die Druckmeßkammer über einen Dreiweghahn in den Maschinenzylinder eingeschraubt werden, dessen dritter Weg mit einer Preßluftflasche in

Verbindung steht. Nach dem Verfahren von Meurer und Kallhardt wird ein bestimmter Druck, z. B. 10 at am Manometer der Preßluftflasche eingestellt. Das Gitter der ersten Röhre wird geerdet: die entstehende Ladung fließt sofort zur Erde ab. Die Erdleitung wird jetzt unterbrochen, so daß das Gitter nun mit der Meßelektrode der Quarzkammer und mit dem Kondensator in Verbindung steht. Die Eichleitung wird plötzlich entlüftet und die im Anodenkreis des Endrohres nun auftretende Anodenstromänderung durch den Oszillographen aufgezeichnet. Dies wird von 10 zu 10 at über den gesamten Meßbereich wiederholt und die Abhängigkeit des Oszillographausschlages vom Druck in einem Eichdiagramm aufgetragen. Bei genauen Versuchen soll die Eichung vor und nach jedem

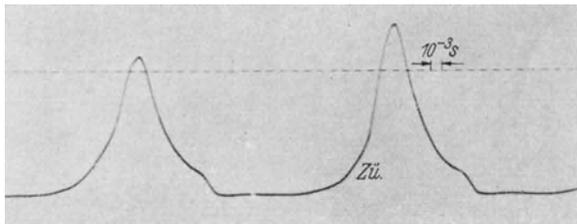


Abb. 201. Druckdiagramm von einem Automobilmotor, aufgenommen mit Zeiss-Ikon-Piezo-Indikator.

Versuch durchgeführt werden. Dieses Verfahren hat den Vorteil erhöhter Genauigkeit, denn man kann nicht so schnell einen gewünschten Druck einstellen wie den Druck auf Null verringern. Dadurch werden Leckfehler in der Anzeige vermieden. Bei gut eingestellter Apparatur ist die Eichkurve eine Gerade.

Es ist aber zu betonen, daß ein Quarzelement grundsätzlich nicht in der Lage ist, die atmosphärische Linie anzuzeigen, da die Linie vom Null-Potential sich infolge der Leckage der elektrischen Ladung auf den zeitlichen Mittelwert des Druckes einstellt, welcher keine konstante Größe ist, sondern von der Maschinenart, Belastung usw. abhängig ist.

Ferner ist es sehr schwierig, Indikatoren mit gleicher oder auch nur proportionaler Empfindlichkeit herzustellen, so daß schon die Indikatoren selbst Unterschiede von $\frac{1}{4}$ — $\frac{1}{2}$ at ergeben. Hierzu kommt noch die Ungenauigkeit durch die Verstärkerschaltung.

D. Indizierverfahren mittels der lichtelektrischen Wirkung.

Dieses Verfahren beruht auf dem Grundsatz, daß die Änderungen des Druckes in Änderungen einer Lichtintensität oder Lichtmenge, und diese wiederum in Änderungen einer elektrischen Stromstärke oder Spannung umgewandelt durch einen Oszillograph aufgezeichnet werden.

Licht hat mehrere elektrische Wirkungen: Photoemission, in welcher Elektronen aus der belichteten Oberfläche ausgesendet werden (Photozellen); Photokonduktivität, bei der die elektrische Leitfähigkeit durch das Licht beeinflußt wird (Selenzelle); photovoltaische Wirkung, bei welcher elektromotorische Kraft unter der Einwirkung des Lichtes entsteht. Grundsätzlich ist jede dieser Wirkungen für das Indizieren verwendbar, aber wegen ihrer gleichbleibenden Wirkung und ihrem sofortigen Ansprechen ist die Photoemission am besten geeignet.

Die Photoemission wurde von Herz entdeckt und später von Hallwachs eingehend

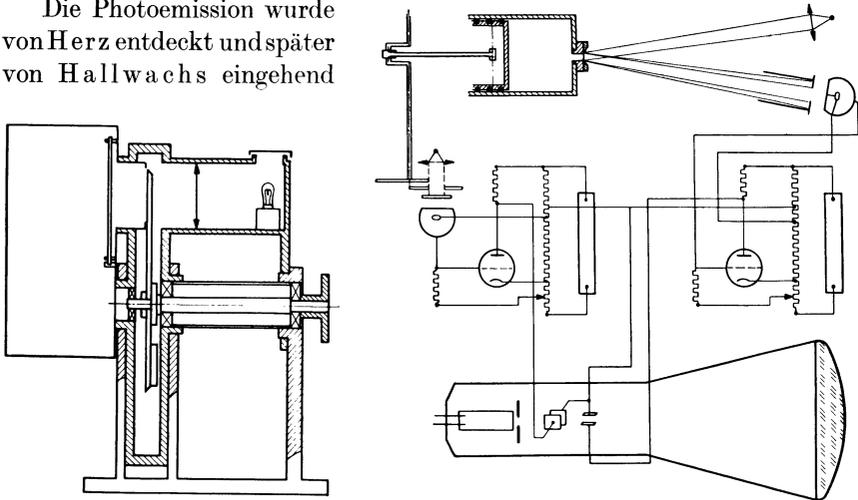


Abb. 202. Schaltschema und allgemeine Anordnung des lichtelektrischen Indikators von Labarthe und Demontvignier.

erforscht. Sie besteht darin, daß einige Stoffe, insbesondere Alkali-metalle wie Lithium, Natrium, Kalium, Rubidium, Caesium, Elek-tronen aussenden, wenn sie belichtet werden. Die Zahl der ausge-lösten Elektronen ist der Intensität des erregenden Lichtes innerhalb weiter Grenzen verhältnismäßig. Sie hängt aber von der Wellenlänge des Lichtes ab: sie ist am größten bei ultravioletten, am kleinsten bei infra-roten Strahlen. Die Elektronenemission hängt auch von der Reinheit des Metallüberzuges, von der Höhe des Vakuums oder vom Gasinhalt der Röhre ab. Diese sog. Photozelle besteht aus einer Glasbirne mit Gas-füllung unter sehr niedrigem Druck, welche zwei Elektroden enthält. Eine von ihnen, die Kathode, ist lichtempfindlich (Alkalimetall, z. B. Kalium). Die andere Elektrode, die Anode, ist dagegen nicht licht-empfindlich. Eine der Elektroden ist als Metallüberzug an der inneren Oberfläche der Glasbirne ausgeführt, die andere ist eine in der Mitte der Glasbirne angeordnete Platte. Ein Teil des Metallüberzuges wird von der inneren Oberfläche entfernt und bildet ein Fenster, durch welches die Zelle das Licht empfängt. Es gibt verschiedene Abarten und Größen solcher Zellen. Der photoelektrische Strom beträgt etwa 5 Mikroampere

je Lumen bei hochvakuierten Zellen, und etwa 50 Mikroampere je Lumen bei gasgefüllten (Argon-) Röhren. Ein Zeitverzug zwischen Belichtung und Entstehen des Photostromes tritt nicht auf. Vakuumröhren sind dauerhafter als gasgefüllte Röhren, deshalb werden sie trotz ihrer geringeren Stromleistung für Indizierzwecke vorgezogen. Da der lichtelektrische Strom sehr schwach ist, ist zu dessen Wahrnehmung und Aufzeichnung durch einen Oszillographen eine beträchtliche Verstärkung notwendig.

Die erste veröffentlichte Anwendung dieses Prinzips zum Indizieren rührt von A. Labarthe und M. Demontvignier her (Abb. 202 und 203). Das Druckmeßelement ist eine hochglanzpolierte Stahlmembran

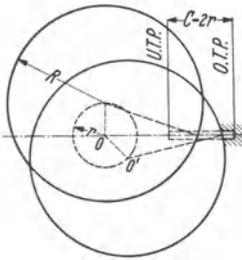


Abb. 203. Abszissengeber für Kolbenweg nach Labarthe und Demontvignier. Die Abblendscheibe öffnet und schließt ein schmales Lichtfenster im Verhältnis zum Kolbenweg. Das Nebenbild zeigt die Verhältnissegleichheit.

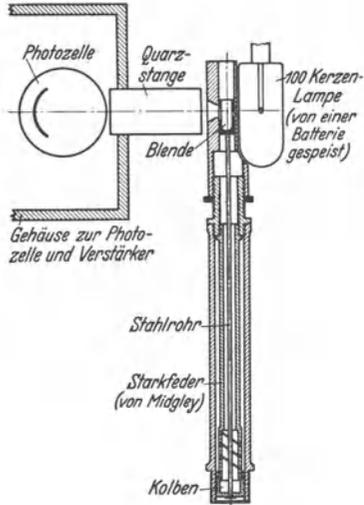


Abb. 204. Lichtelektrischer Indikator nach Rose, Wilson und Benedict (Universität von Wisconsin, USA.). Das Licht einer 100 Kerzenlampe, die der Gleichmäßigkeit wegen von einer Batterie gespeist wird, wird durch eine Blende gesteuert, welche von einem federbelasteten Indikator Kolben betätigt wird. Der Lichtstrahl wird durch eine Quarzstange zu einer lichtelektrischen Zelle geleitet, deren Strom nach Verstärkung einem Oszillograph zugeführt wird.

(Elinvar) von 1 mm Dicke und etwa 6 mm freiem \varnothing , welche im Zylinderkopf eingebaut ist. Auf sie wird ein Lichtstrahl aus einer möglichst beständigen Lichtquelle gerichtet und von ihr reflektiert. Die reflektierten Strahlen fallen durch das Fenster auf die Photozelle, deren Stromänderungen durch einen Verstärker vergrößert auf das eine Ablenkplattenpaar eines Kathodenstrahl-Oszillographen einwirken. Die Druckänderungen ändern die Krümmung des Membranspiegels, dadurch die Lichtstärke des Lichtbündels und damit den lichtelektrischen Strom. Wenn nun der Auffall- und Rückwurfswinkel des Lichtbündels nur wenig von dem normalen abweicht und der Verstärker im linearen Verstärkungsbereich arbeitet, so wird auch die Ablenkung des Kathodenstrahles sich linear mit der Druckänderung ändern. Wenn noch dazu das Fenster F kleiner ist als der Querschnitt des Lichtbündels, dann wird eine ungewollte Verlegung des Lichtbündels (etwa durch Motorschütterungen) auf die

Druckanzeige ohne Einfluß bleiben. Die hohe Empfindlichkeit dieses Verfahrens gestattet die Anwendung einer Membran mit hoher Eigenschwingungszahl (im oben angegebenen Falle etwa 100000 Hz). Diese Einrichtung ermöglicht die Aufnahme eines Zeitdiagrammes auf einer sich drehenden Filmtrommel. Die Wiedergabe des Kolbenweges ist ebenfalls durch das lichtelektrische Verfahren möglich: für diesen Zweck muß die Lichtmenge eines Strahles sich im gleichen Verhältnis wie der Kolbenweg ändern. Diese Aufgabe kann durch ein schmales Lichtfenster verwirklicht werden, welches durch eine, an einer sich drehenden Welle exzentrisch angeordnete Kreisscheibe mehr oder weniger bedeckt wird. Wenn dieses „Abblendexzenter“ synchron und phasengleich mit der Kurbelwelle angetrieben wird, wenn ferner das Verhältnis Scheibenradius/Exzenterradius gleich dem Verhältnis Pleuelstangenlänge/Kurbelradius gewählt wird und wenn die Lichtstärke über die ganze Länge des Fensters gleichmäßig ist, dann wird die durch das Fenster durchgelassene Lichtmenge verhältnismäßig dem jeweiligen Kolbenwege, d. h. dem jeweiligen Zylinderinhalt. Die so erhaltene, sich verändernde Lichtmenge kann man auf eine andere Photozelle einwirken lassen und zur Steuerung des anderen Abszissenplattenpaares des Oszillographen anwenden. Eine dem Kurbelwinkel verhältnismäßige Abszisse kann mit einer ähnlichen Einrichtung erzielt werden, wenn man statt der kreisförmigen Exzenterplatte eine Scheibe von der Form einer archimedischen Spirale anwendet. Dadurch wird die Phasengleichheit zwischen Kurbelwelle und Abszisse zwangsläufig eingehalten. Statt dieser läßt sich aber auch zweckmäßig eine Kipp-schaltung wie im Abschnitt über Oszillographen beschrieben, anwenden. Diese letztere Einrichtung hat den Vorteil der Abwesenheit jeglicher mechanischer Verbindung mit der Kurbelwelle, aber auch den Nachteil, daß die Phasengleichheit nicht zwangsläufig gesichert ist, weshalb das Diagramm am Schirm nicht stehen bleibt, sondern vorwärts oder rückwärts wandert.

Das lichtelektrische Verfahren wurde von W. Döring für die Konstruktion eines Arbeitszählers angewendet, welcher in einem späteren Abschnitt näher beschrieben wird.

In ihrer Forschungsarbeit über Verbrennungsanalyse haben Rose, Wilson und Benedict Photozellen für die Messung der Strahlungs-

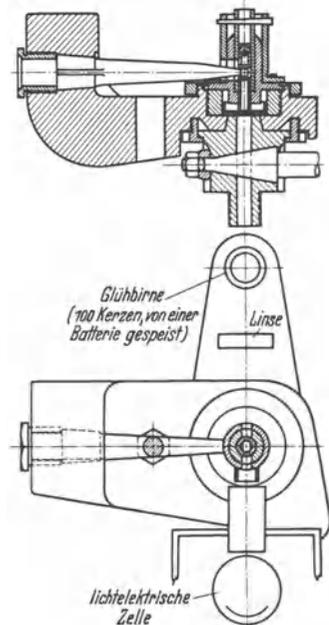


Abb. 205. Anpassung eines Maihak-Stabfeder-Indikators für das lichtelektrische Verfahren (nach Roge, Wilson und Benedict).

energie, des Druckvorganges und der Düsenadelbewegung angewendet (Abb. 204 und 205). Für die Druckmessung diente ein Stabfederindikator, von welchem das Schreibzeug entfernt wurde. Die Öse am Kolbenstangenende des Indikators diente als Blendenöffnung für einen Lichtstrahl und steuerte dadurch eine Photozelle. Der Photostrom wurde nach Verstärkung einem Schleifenzillograph zugeführt. In späteren Versuchen wurden Kathodenstrahl-Oszillographen angewendet.

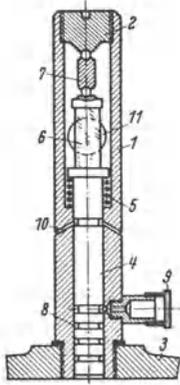


Abb. 206. Druckmeßelement des photoelektrischen Indikators nach Marboux. Franz. Patent 728632, Marboux. 1 Gehäuse; 2 Vorspannschraube; 3 Zylinderkopf des Motors; 4 Indikatorkolben; 5 Vorspannfeder; 6 Prisma aus optischem Glas; 7 Zwischenstück zur Sicherung axialer Belastung; 8 Dichtungsrippen; 9 Schmierbüchse; 10 Abführlöcher für Leckgase; 11 Lichtfenster für das Lichtbündel.

Ein etwas abweichendes photoelektrisches Verfahren wird in der französischen Patentschrift 728632, 1932 von G. Marboux angegeben (Abb. 206 und 207), in welchem auch photoelastische Erscheinungen in Anwendung gebracht werden. Das druckmessende Element ist in diesem Falle ein Prisma oder Zylinder aus optischem Glas (Borsilikatglas), auf welches der zu messende Zylinderdruck mittels Kolben und Kolbenstange übertragen wird. Unter dem Einfluß der Druckspannungen wird das Glasprisma doppelbrechend; infolgedessen spaltet sich eine einfache Lichtschwingung im Prisma in zwei aufeinander senkrechtstehende Schwingungskomponenten, die sich mit verschiedener Geschwindigkeit fortpflanzen. Der Geschwindigkeitsunterschied zwischen den den beiden Schwingungsrichtungen angehörenden Komponenten ist eine Funktion der Spannung und daher des Druckes. — Wird nun das aus dem Glasprisma austretende Licht-

komponentenpaar wiederum durch eine Polarisationsvorrichtung vereinigt, so tritt eine Interferenz zwischen den zwei Komponenten ein,

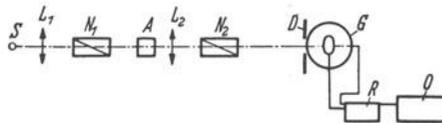


Abb. 207. Schematische Anordnung des photoelektrischen Indikators nach Marboux. S Lichtquelle; L_1 Kondensorlinse; N_1 Polarisator-Nicolprisma; A Druckelement aus optischem Glas; L_2 Objektivlinse; N_2 Analysator-Nicolprisma; D Fenster; G photoelektrische Zelle; R Verstärker; O Oszillograph. Die zwei Nicolprismen N_1 und N_2 bilden einen 45° Winkel mit der Längsachse des Druckelementes A. (Statt Nicolprismen könnte das neulich erfundene „Polaroid“, das ein künstliches Polarisiermaterial darstellt, angewendet werden.)

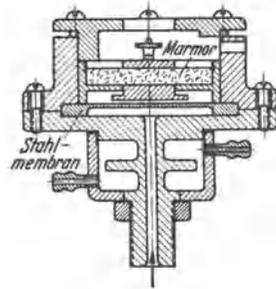
infolge deren die austretende Gesamtlichtmenge geringer ist als die eingetretene. Die Schwankung der Lichtmenge ist ein Maß für die Schwankung des Druckes. (Falls der einfallende Lichtstrahl in einer Ebene von 45° zur Richtung des Druckes an dem Glasprisma polarisiert ist, ist die austretende Lichtmenge eine Sinus-Quadratfunktion

des Druckes.) Durch eine bestimmte Vorspannung am Glas kann ein angenähert lineares Verhalten zwischen Druck und Lichtmenge erzielt

werden. Die Zuführung dieses Lichtbündels zu einer Photozelle und die Übertragung der Änderungen des Photostromes auf einen Oszillograph geschieht ähnlich wie in der vorher beschriebenen Einrichtung.

Dieses Verfahren ist wegen der geringen Schwingungsamplituden des Kolbens dem piezoelektrischen Verfahren ähnlich, aber es ist frei von der Empfindlichkeit des letzteren Verfahrens gegenüber unbeabsichtigten Kapazitätsänderungen im Zuführungsstromkreis des Verstärkers.

An der Vervollkommnung und Verbilligung der Photozellen wird eifrig gearbeitet, da diese für andere Anwendungen (Fernsehen, Sicherheitseinrichtungen, industrielle Kontrollzwecke) große Wichtigkeit haben. Es ist deshalb die Möglichkeit nicht von der Hand zu weisen, daß aus den erwähnten Laboratoriumsindikatoren ein anspruchloser, genauer, betriebsbrauchbarer Apparat entstehen wird.



E. Indizierverfahren mittels druckveränderlicher Kapazität.

Die elektrische Kapazität eines aus zwei parallelen Platten gebildeten Kondensators, deren Abstand klein im Vergleich zu den Plattenabmessungen ist, kann wie folgt ausgedrückt werden:

$$C = 0,08842 \cdot 10^{-6} \cdot k \cdot A/l \text{ Mikrofarad,}$$

in welcher Formel

k die dielektrische Konstante ($k = 1$ für Luft),

A die Fläche einer Platte in cm^2 ,

l den Abstand der Platten in cm bedeutet.

Läßt man die zu messende Kraft den Luftspalt und daher die Kapazität eines Luftkondensators verändern, der in einen Schwingkreis eingebaut ist, so können durch die im Schwingkreis hervorgerufenen Änderungen (Änderung des Stromes, der Resonanzfrequenz oder der Phasenverschiebung) die Druckänderungen gemessen werden. Die für diesen Zweck dienenden sog. „Kondensatormessdosen“ können den verschiedenen Untersuchungszwecken angepaßt werden und wurden für die Messung von Kräften in Werkzeugmaschinen, von Drehmomenten in Wellen und von Drücken in Motoren angewendet. Bei diesem Verfahren ist fast immer eine Röhrenverstärkung notwendig, dagegen gereicht ihm zum Vorteil, daß es auch bei sehr hohen Frequenzen anwendbar ist.

Abb. 208. Geber des Obata-Indikators. Die Verbrennungsgase wirken unmittelbar auf die Stahlplatte von 50 mm \varnothing , welche mit einer feststehenden, von den übrigen Apparateilen durch eine Marmorplatte isolierten Metallplatte einen Kondensator bildet. Die Eigenfrequenz wird mit einer 2 mm dicken Platte zu 8000 Hz, mit einer 3 mm Platte zu 12000 Hz angegeben. Wachsende Drücke vermindern den Plattenabstand, vergrößern daher die Kapazität und den Federmaßstab. Temperaturzuwachs verringert die Federkonstante der Membran und den Luftspalt, daher auch die Kapazität und die Empfindlichkeit.

Im Geberkondensator von Obata, Joshida und Munetumo (Aeronautische Versuchsanstalt von Tokyo) wird die druckmessende Stahlmembran unmittelbar den Zylindergasen ausgesetzt. Die Temperaturfehler werden durch Wasserkühlung vermindert (Abb. 208). Ein Saitengalvanometer dient als Anzeigegerät. Im Meßkreis wird eine Senderschaltung angewendet, in welcher die Frequenz und daher die Spannung eines im Gitterkreis einer Röhre liegenden Schwingkreises durch die Kapazitätsänderungen des Geberkondensators verändert wird. Die

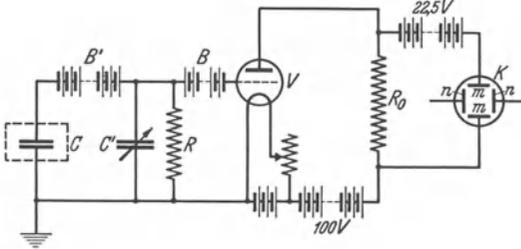


Abb. 209. Schaltbild des Obata-Indikators. Eine Änderung der Kapazität des Meßkondensators C ändert die Gitterspannung in der Verstärkerröhre V , deren Anodenspannung die Ablenkschleifen $m-m$ der Kathodenstrahl-Oszillographen K steuert. $R_0 = 40\,000$ Ohm; $B = 3$ Volt; $B' = 180$ Volt; $R = 25$ Megohm.

dadurch entstehenden Stromänderungen werden verstärkt und dem Galvanometer zugeführt.

Die späteren Veröffentlichungen der genannten japanischen Forscher weisen einen Kathodenstrahl-Oszillographen als Anzeigegerät auf. Die Schaltanordnung für die Ordinatenablenkung (Druck) zeigt Abb. 209. Um eine Abszissen-

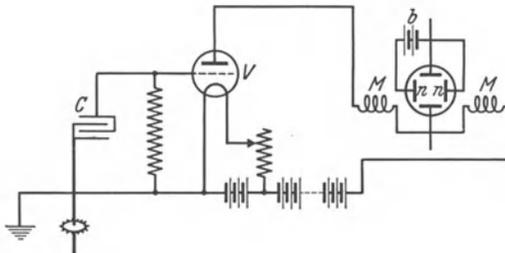


Abb. 210. Schaltbild des Obata-Indikators für die Kolbenwegmessung. C Luftkondensator mit harmonischer Kennlinie, durch die zu untersuchende Maschine angetrieben; V Verstärkerröhre, deren Anodenstrom die Ablenkschleifen $M-M$ des Kathodenstrahl-Oszillographen steuert.

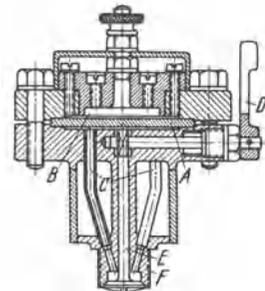


Abb. 211. Kondensator-Druckmeßelement nach Kiyoshi Tomizuka. A Membrane; B Elektrode; C Kupferröhre; D Ventilhebel; E Abschlußventil; F Anschlußgewinde.

ablenkung verhältnismäßig dem Kolbenweg zu erzielen, wird ein von der Motorwelle angetriebener Drehkondensator angewendet, dessen Kapazität sich mit dem Kurbelwinkel gemäß dem Sinusgesetz ändert. Dieser Kondensator beeinflusst einen zweiten Schwingkreis; die darin entstehenden Spannungsschwankungen werden nach Verstärkung dem Abszissenplattenpaar zugeführt (Abb. 210).

Im Kondensator-Meßelement nach Kiyoshi Tomizuka (Luftfahrt-Versuchsanstalt der Universität Tokyo) kann der Meßraum vom

Zylinderraum mittels eines Ventiles abgeschlossen werden, wodurch die Membran der schädlichen Einwirkung der Verbrennungsgase nur während des Messens ausgesetzt wird (Abbildung 211).

Im Meßkondensator von Schnauffer (Deutsche Versuchsanstalt für Luftfahrt) wird die als Meßmembran dienende Kondensatorplatte vor dem Einfluß der Zylindergase durch eine biegunsschwache Abschlußmembran geschützt, wodurch Temperatureinflüsse, allerdings unter geringer Vergrößerung der Massen, weitgehend beseitigt werden (Abb. 212). Mit wachsendem Druck wächst der Luftspalt; daher wird die Kapazität vermindert. Der Maßstab wird also mit wachsendem Druck kleiner. Die Eigenfrequenz soll je nach der Stärke der angewendeten Meßmembran 2000 bis 10000 Hz betragen; der Meßkondensator wurde bis zu Drücken von 150 at und bis Drehzahlen von 3000 U/min angewendet. Es wurden auch Klopfdiagramme aufgenommen, bei welchen die zeitliche Drucksteigerung etwa 100000 at/s betrug. Die angewendete Schaltung (Abb. 213) ist die sog. „Methode der halben Resonanzkurve“ und wurde zuerst von H. Riegger angewendet.

Der Meßkondensator bildet den wesentlichen Teil eines Primärschwingkreises, der in einer Selbst-erregungsschaltung liegt und von einer Glühkathodenröhre mit Energie gespeist wird. Die Selbstinduktion wird konstant gehalten, daher hängt die Frequenz nur von der Kapazität des Geberkondensators ab. Der so in seiner Frequenz von der Meßkapazität abhängig gemachte Schwingkreis ist mit einem Sekundärschwingkreis gekoppelt, welcher mit dem Primärkreis annähernd auf Resonanz abgestimmt ist. Die Hochfrequenzströme können mittels einer Gleichrichterröhre zur Beeinflussung eines Gleichstrom-Millivoltmeters oder einer Oszillographenschleife

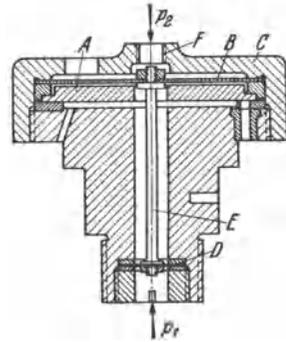


Abb. 212. Geberkondensator von Schnauffer. *A* Isolierte Kondensatorplatte; *B* Membranfeder 0,1 bis 0,15 mm stark; *C* Klemmring; *D* Abschlußmembran, geglähte Messingfolie, 4–6 \varnothing , 0,03 mm dick; *E* Verbindungsstab; *F* Gewinde für Hubbegrenzung. Wachsende Drücke vergrößern den Plattenabstand, vermindern daher die Kapazität und den Federmaßstab. Diese Anordnung ermöglicht einen kleinen Nullabstand (da Kurzschluß nicht eintreten kann), daher hohe Empfindlichkeit. Eigenfrequenz etwa 2500 Hz.

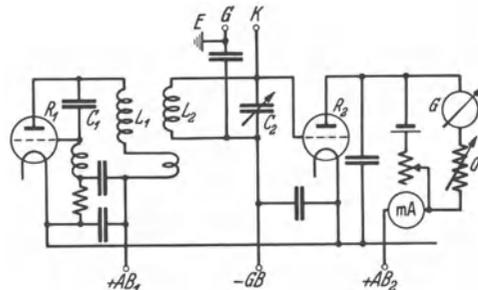


Abb. 213. Schaltbild für den Schnauffer-Indikator. *R*₁ Senderröhre; *R*₂ Gleichrichterröhre; *C*₁, *L*₁ Schwingungskreis 1; *C*₂, *L*₂ Schwingungskreis 2; *G* Geberkondensator; *AB*₁ Anodenbatterie für *R*₁; *AB*₂ Anodenbatterie für *R*₂; *GB* Gitterbatterie; *KB* Kompensationsbatterie; *mA* Milliamperemeter; *G* Galvanometer; *O* Oszillograph; *E* Erde.

benutzt werden. Das Arbeitsgebiet ist in den steilsten Teil der Resonanzkurve verlegt, in welchem einer kleinen Kapazitätsänderung eine große Stromänderung entspricht.

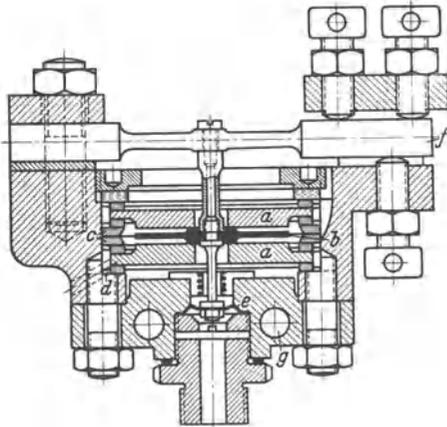


Abb. 214. Druckmeßdose von Fieber für die Aufnahme von Verbrennungsdrücken. Luftspalt 0,15 mm, Meßweg etwa 0,01 mm, Eigenschwingungszahl je nach Meßbereich von 2000–10000 Hz. *a* Kondensator-Außenplatten; *b* Kondensator-Mittelplatte, Stahlmembran (0,1 mm) mit beiderseits aufgeschraubten Elektronscheiben (50 \varnothing \times 0,9 mm); *c* Stahlringe; *d* Glasklötzchen in dünnem Pertinaxkäfig zur Isolation und Abstützung von *a*; *e* Gasabschlußmembran aus 0,08–0,15 mm Messingblech, halbhart; *f* Stabfeder; *g* Wasserkühlung.

Eine noch weitergehende Funktionsteilung wird in dem sorgfältig entworfenen Meßkondensator von Fieber (Techn. Hochschule Wien) durchgeführt (Abb. 214), in welchem eine biegunsschwache Abschlußmembran, eine biegunsschwache Kondensatormembran und eine steife Meßfeder (Stabfeder) vorgesehen sind. Dadurch wird ein drosselfreier Gaszutritt, Schutz vor Festbrennen und Vermeidung mechanischer Hysterese erzielt. Der Meßkondensator ist als ein symmetrischer Dreiplattenkondensator ausgebildet, welcher die vom Hochfrequenzerzeuger *b* über den Umspanner \bar{G} gelieferte Spannung teilt und sie einer,

aus zwei Gitterröhren *A*, *R* und aus zwei ohmschen Widerständen *r* gebildeten Wheatstoneschen Brücke zuführt. In den Galvanometerkreis kann abwechselnd ein Überwachungs-

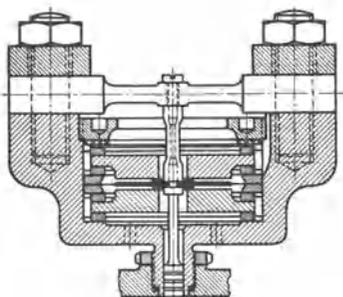


Abb. 215. Ausführung für Flüssigkeiten (Brennstoffleitungen). Luftspalt 0,04 mm, Meßweg 0,0025 mm, Eigenschwingungszahl je nach Meßbereich 6000–30000 Hz.

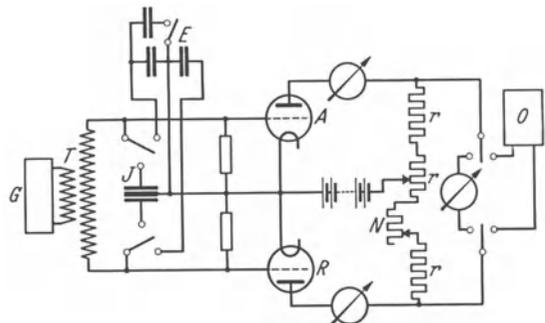


Abb. 216. Schaltbild zum Indikator von Fieber. *J* Indikator; *T* Umspanner; *O* Oszillograph; *E* Eichvorrichtung; *A*, *R* Verstärkerröhre; *r* Brückenwiderstände; *N* Nullpunkteinstellung.

meßgerät zum Einstellen des Nullpunkts und der Empfindlichkeit oder eine Meßschleife des Oszillographen *O* gelegt werden. Dieses Spannungs-

teilungsverfahren rührt von S. Reisch her. Die Spannungsteilung und damit auch der im Meßkreis der Brücke fließende gleichgerichtete Strom sind der Verschiebung der Kondensatormittelplatte verhältnismäßig, vorausgesetzt, daß die an der Meßbewegung nicht oder nur wenig teilnehmenden parallelgeschalteten Kapazitäten (Plattenlagerung und Zuleitungen) klein gegen die Meßkapazität sind und die Meßbewegung selbst klein gegenüber dem Luftspalt bleibt. Dies erfordert eine sichere Parallelführung, Ebenbleiben und Feineinstellung der Mittelplatte und eine starre Lagerung der Außenplatte bei geringer schädlicher Kapazität.

Das Abschlußglied kann entweder eine biegschwache Membran (Abb. 214 für Gasdrücke) oder ein eingeschliffener Kolben (Abb. 215 für Brennstoffdrücke) sein. Die Druckkraft wird durch ein Druckstäbchen auf die auswechselbare Meßfeder unter Mitnahme der geerdeten Mittelplatte übertragen. Die zwei Außenplatten sind auf Glasklötzen gegen Gehäuse und Mittelplatte isoliert gelagert. Die Mittelplatte ist zwecks guter Parallelführung und leichten Zusammenbaues aus einer am Rand eingespannten Stahlmembran und beidseitig aufgesetzten Elektronenscheiben aufgebaut. Eine Wasserkühlung erhält den Verbrennungsindikator auch bei Dauerbetrieb praktisch kalt. Zentral angeordnete Glimmerblättchen schützen bei Überbeanspruchung vor Kurzschluß.

Die Eichkurve ist praktisch linear. Eine wertvolle Eigenschaft dieses Indikators ist die Möglichkeit einer rein elektrischen Vergleichseichung, ohne den Meßkondensator von der Maschine zu lösen, da die Eichkurve bei bekanntem Nullpunkt durch einen einzigen Meßpunkt bestimmbar ist.

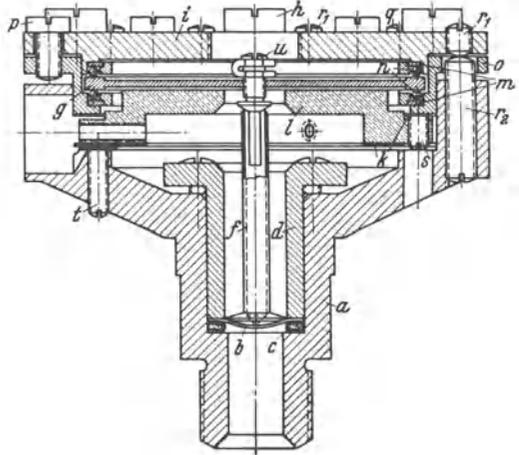


Abb. 217. Kondensator-Meßdose nach Wilberg. *a* Gehäuse; *b* Abdichtungsmembran aus Federstahlblech von 0,05 mm Stärke; *c* Dichtungsring aus Kupfer-Asbest; *d* Buchse für die Einpressung der Abdichtungsmembran; *f* Stempel zur Übertragung der Druckkräfte auf die Kondensatormembran *g* (aus gehärtetem Stahl); *u* Einstellschraube für die Regelung der Spannung der Kondensatormembran; die 6 Schrauben *h* befestigen den Deckel am Gehäuse *a*; die Glimmerringe *k* isolieren die feststehende Kondensatorplatte *l* (aus Messing) von übrigen Gehäuseteilen; die Stellschrauben *s* ermöglichen die genaue Einstellung des Plattenabstandes zwischen *g* und *l*; ein zwischen den beiden Führungsrings *m* eingebetteter Kugelring *n* dient dazu, daß die Membran *g* sich den durch Temperaturänderung und Belastung hervorgerufenen radialen Spannungen durch entsprechende Verschiebung ihrer Einspannlinie ausgleichen kann; die 6 Schrauben *p* verbinden den Deckel mit der Platte *l* und dienen für die Einstellung des Anpreßdruckes der Kugel; die 12 Madenschrauben *q* sichern die ursprüngliche Lage zwischen Deckel *i* und Membrangehäuse *o*; die Schrauben *r*₁ und *r*₂ dienen für die Einstellung des Membrangehäuses *o* gegenüber dem Kondensatorgehäuse *a*; die Schrauben *s* und *t* gewährleisten die Einstellbarkeit der isolierten Platte *l* gegenüber der Meßmembran *g*.

Das Gerät wird wenige Sekunden vor und nach jedem Diagramm durch Umlegen zweier Schalter auf die Eichvorrichtung *E* (Abb. 216) geeicht. Der größte Fehler ist angeblich $\pm 2\%$ des Meßbereiches. Im Oszillogramm werden auch Zeitmarken, der Zündzeitpunkt und Totpunkt aufgezeichnet. Bei Einspritzmotoren läßt sich auch die Nadelbewegung der Brennstoff-

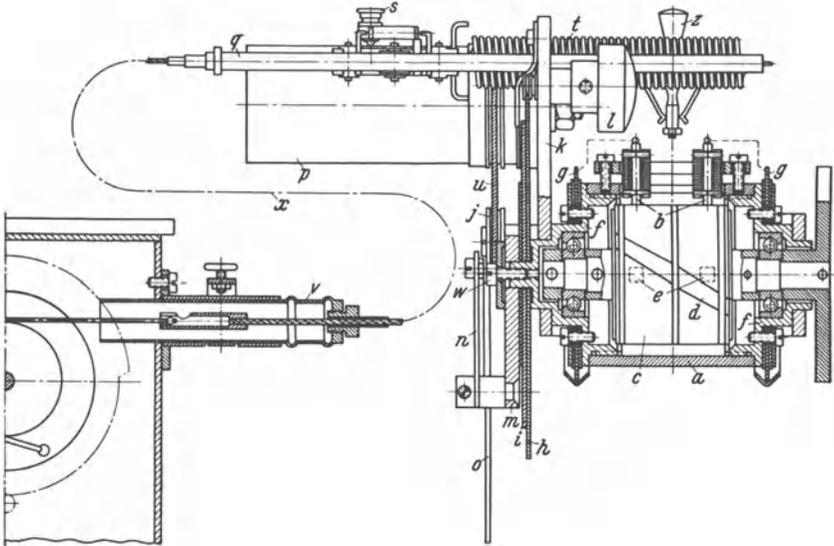


Abb. 218. Phasenwählschalter nach Wilberg. Im Gehäuse *a* ist die aus Isoliermaterial hergestellte Schalttrommel *c* drehbar gelagert und wird von der Motorwelle angetrieben. Die beiden Pole werden an die zwei Schleifbürsten *b* angeschlossen, die auf einer Mantellinie des Schaltergehäuses axial verschieblich und festklemmbar sind. Die leitende Verbindung zwischen den beiden Schleifbürsten wird durch einen Streifen Messingblech *d*, welcher in die Schalttrommel eingelassen ist, bei jeder Motorumdrehung einmal hergestellt. Die Dauer der Verbindung ist durch den Steigungswinkel des Streifens und durch den Abstand der Bürsten regelbar. Das Gehäuse *a* ist beiderseitig durch Deckel *f* verschlossen, welcheisolierte Schleifringe *g* tragen. Das Gehäuse *a* ist auch drehbar gegen die feststehende Lagerplatte *k* mittels der Scheibe *h* und dem daran angeklebten Einstellknopf *l*. Durch dessen Drehung kann die untersuchte Phase geändert werden. Die Schreibtrommel *p* wird von dem vom Gehäuse *a* betätigten Kurbel und Pleuelantrieb *m* und *n* mittels der Schnur *u* entsprechend der Kolbenbewegung der untersuchten Maschine hin und her gedreht. Die Verbindung des Schreibstiftes *s* mit dem Meßkondensator erfolgt durch einen Bowdenzug *x*, der durch einen dünnen Litzenzdraht mit dem drehbaren Plattensatz des Kondensators gekuppelt ist. Bei zweckmäßiger Gestaltung der Plattentform (Archimedische Spirale) wird die Verschiebung des Schreibstiftes der Änderung der Kapazität des Meßkondensators, daher der Druckänderung, verhältnismäßig.

düse aufzeichnen. Die Fehlergrenze der Totpunktanzeige wurde durch oszillographische Sonderversuche mit $2 \cdot 10^{-5}$ Sekunde festgestellt, was bei einer Maschinendrehzahl von $n = 1000$ U/min etwa 0,1 Grad Kurbelwinkel entspricht, es ist also eine zuverlässige Umzeichnung ins p-V-Diagramm ermöglicht.

Ein eigenartiges stroboskopisches Indizierverfahren wurde von Wilberg (Techn. Hochsch. Braunschweig) ausgearbeitet, welches das punktweise Indizierverfahren mit der Anwendung einer Kondensatormeißdose vereinigt.

Prinzip: Die Frequenz eines Hochfrequenz-Schwingkreises wird einerseits durch den zu messenden Druck — mit Hilfe einer Kondensatormeßdose —, andererseits durch einen, als Meßmittel benutzten Drehkondensator beeinflusst. Mit dem Schwingkreis ist ein Quarzresonator gekoppelt, der bei Durchgang der Schwingkreisfrequenz durch seine Eigenfrequenz eine scharfe Resonanz-Spannungsspitze ergibt. Diese wird mittels Audion und Verstärkereinrichtung durch ein Telephone abgehört.

Die Messung erfolgt mit der Einrichtung so, daß der durch Druckänderung verstimimte Schwingkreis durch den Drehkondensator auf die

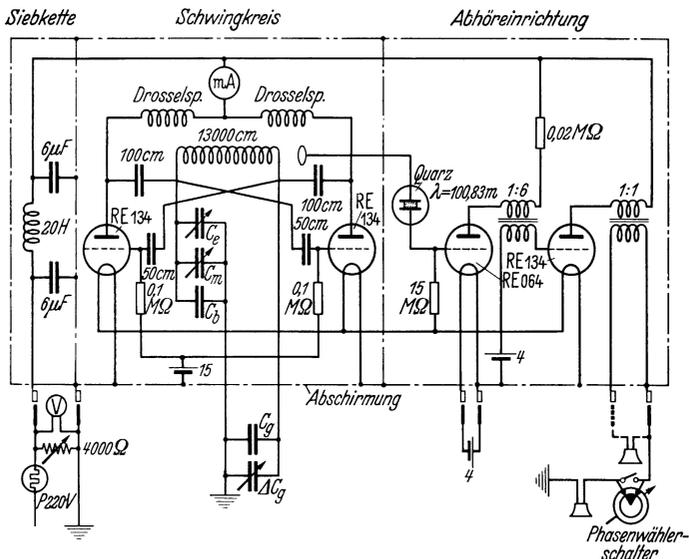


Abb. 219. Schaltbild zum Indikator nach Wilberg.

Quarzfrequenz als Bezugsmittel wieder abgestimmt wird. Mithin ergibt die zur Wiederabstimmung nötige Verstellung des Drehkondensators ein Maß für die Druckgröße.

Die Kondensatormeßdose besteht aus zwei Platten, deren eine sich unter der mittelbaren Einwirkung des zu messenden Druckes von der zweiten, isoliert gelagerten Platte entfernt. Die Bauart und Einzelheiten der Kondensatormeßdose zeigt Abb. 217.

Bei Verfolgung der periodischen Druckschwankungen im Zylinder eines Verbrennungsmotors wird bei jedem Durchgang des Druckes durch den der Stellung der Kondensatormeßdose entsprechenden Wert die Quarzresonanz hörbar werden.

Um auch die zu den Drücken gehörigen Kurbelwinkel messen zu können, wird in die zum Abhörtelefon führende Leitung ein Phasenwählerschalter gelegt (Abb. 218). Dieser ist mit der Motorwelle gekuppelt und schließt bei jedem Umlauf einmal kurzzeitig den Stromkreis. Der

Schaltpunkt kann durch Drehen des Schaltergehäuses an jeden Punkt des Kurbelkreises verlegt werden.

Die Quarzresonanzspannung gelangt mit dieser Einrichtung also nur dann zum Kopfhörer, wenn der Schalter in derjenigen Kurbelstellung den Stromkreis schließt, die zu dem am Drehkondensator eingestellten Druckmeßwert gehört. Im praktischen Gebrauch wird der Phasewählerschalter zunächst auf einen festen Wert eingestellt und dann der Meßkondensator nachgestellt, bis die Quarzresonanz hörbar wird. Aus einer genügenden Anzahl so ermittelter zusammengehöriger Werte von Druck und Kurbelstellung kann das Indikatordiagramm zeichnerisch zusammengesetzt werden. Diese Zusammensetzung wird halb selbsttätig eingerichtet durch eine Vorrichtung, bei der die Einstellbewegung des Meßdrehkondensators auf einen längs einer Trommel geführten Schreibstift übertragen wird. Von der Einstellbewegung des Phasewählerschalters aus wird über ein Kurbelgetriebe die Schreibtrommel proportional dem Kolbenweg gedreht. Somit kann jeder durch die Verstellung des Drehkondensators und des Schaltergehäuses nach der Quarzresonanz eingestellte Punkt durch Niederdrücken des Schreibstiftes auf dem Diagrammpapier festgehalten werden.

F. Indizierverfahren mittels druckveränderlicher Induktivität.

Bildet eine druckbelastete Membran den Anker eines Elektromagneten, und besteht ein Luftspalt zwischen dem Elektromagneten und der Membran, dann ändern die Druckänderungen den Luftspalt, und damit die Induktivität der Elektromagnetenspule. Die Änderung der Induktivität kann für die Messung des Druckes in verschiedener Weise ausgenützt werden. Wenn die Spule mit Gleichstrom gespeist wird, so wird die Änderung des Luftspaltes einen dem Gleichstrom überlagerten Wechselstrom induzieren. Dieser induzierte Strom wird zweckmäßig in einer besonderen Spule (welche auf dem Eisenkern des Elektromagneten aufgewickelt wird und in demselben magnetischen Feld liegt) erzeugt. Die so erzeugte Stromstärke ist nicht dem Druck selbst, sondern der Geschwindigkeit der Membran und daher der Geschwindigkeit der Druckänderung (d. h. dp/dt) verhältnisgleich und kann nach der nötigen Verstärkung mit einem Oszillograph aufgezeichnet werden. Für manche Untersuchungen, z. B. Klopfversuche, ist gerade dieser Wert von Interesse und ist sogar dem Druckdiagramm vorzuziehen. Falls aber der Druckwert selbst erwünscht ist, kann er auch durch solche Geräte bestimmt werden, und zwar entweder durch eine später näher zu beschreibende elektrische Integrierung oder dadurch, daß statt Gleichstrom ein Wechselstrom der Magnetenspule zugeführt wird. In letzterem Falle wirkt der Elektromagnet wie eine Drosselspule; eine Verminderung des Luftspaltes

erhöht die Induktivität und vermindert daher die Stromaufnahme. Ein Strommesser kann also nach entsprechender Eichung als Druckmesser dienen. Irgend eine Verstärkung durch Röhren ist bei diesem Verfahren meist nicht notwendig. Verschiedene Kompensations- und Brückenschaltungen sind hierbei zur Erhöhung der Genauigkeit und Ausschaltung von Fehlerquellen möglich. Eine Anzahl solcher Schaltungen wurde von Keinath beschrieben, dem selber die Durchbildung der sog. Doppeldrosselmethode zuzuschreiben ist. Nach dieser allgemeinen Erörterung werden einige in diese Gruppe gehörige Indizierverfahren beschrieben.

Für die Indizierung eines kleinen Kompressors für Haushaltskühlmaschinen hat Fiene eine Anordnung ausgearbeitet (Abb. 220), in welcher die Spule in den Kolben selbst eingebaut wird und der Kolbenboden als Druckmeßmembran ausgebildet ist. Durch diese Anordnung wird jegliche Änderung der Form und Größe des Verdichtungsraumes vermieden, welcher Umstand bei den kleinen Abmessungen des Verdichters (25 mm Bohrung, 16 mm Hub, 1750 U/min) sehr wichtig war. Die Membran ist aus Werkzeugstahl, etwa 0,3 mm dick, hergestellt; die Durchbiegung der Membranmitte unter dem Höchstdruck beträgt nur etwa 0,018 mm. Die Stromzuführung erfolgt hierbei durch zwei federnde, einer Sicherheitsnadel ähnliche Anschlußstücke, von denen die eine Klemme zum hin- und hergehenden Kolben, die andere zum feststehenden Gehäuse führt. Die in der Spule infolge der Durchbiegung der Membran entstehenden Impedanzänderungen werden durch einen Differentialumformer gemessen (Abb. 221). Der Umformer enthält zwei gegeneinander geschaltete Primärwindungen; jede von ihnen besteht aus einer Impedanz (Spule mit Eisenkern), einem Widerstand und einer regelbaren Selbstinduktion. Die Impedanz in dem einen Primärzweig ist in den Kolben, d. h. die oben beschriebene Membran-Eisenkern-Spulenordnung verlegt. In der Ruhestellung des Kolbens werden die beiden Zweige so genau wie möglich in das Gleichgewicht gebracht. Da die beiden Primärzweige von derselben Wechselstromquelle (500 Hz, 14 V) gespeist werden, heben sich die Kraftlinien im Umformer gegenseitig auf. Die Sekundärspule des Umformers enthält einen regelbaren Kondensator, eine Selbstinduktion und den Oszillograph. Wenn der Verdichter angetrieben wird, erfährt durch die Durchbiegungen der Kolbenmembran die Impedanz in dem einen

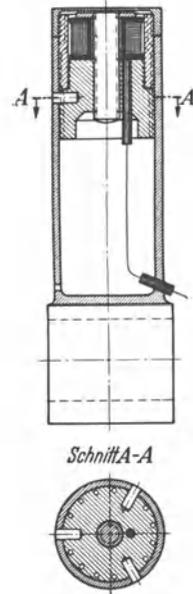


Abb. 220. Druckmeßkolben nach Fiene, angewendet an einem Kühlmachineschraubenverdichter. Der Boden dient als Meßmembran, die aus Werkzeugstahl von etwa 0,3 mm Dicke hergestellt ist. Der magnetische Kreis besteht aus dem Kern, dem Luftspalt, der Membran, der Kolbenwand und dem eisernen Einsatzstück.

Primärzweig entsprechende Änderungen, welche im Sekundärkreis Stromschwankungen verursachen, die durch den Oszillograph aufgezeichnet werden.

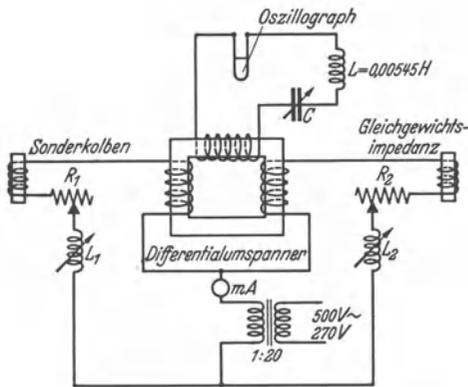


Abb. 221. Meßmikrometerschaltung nach Fiene, mit Differentialtransformator.

Maschinenfrequenz sein. Die Eichung kann während des Laufes der Maschine vorgenommen werden. Die Unterseite der Membran steht mit

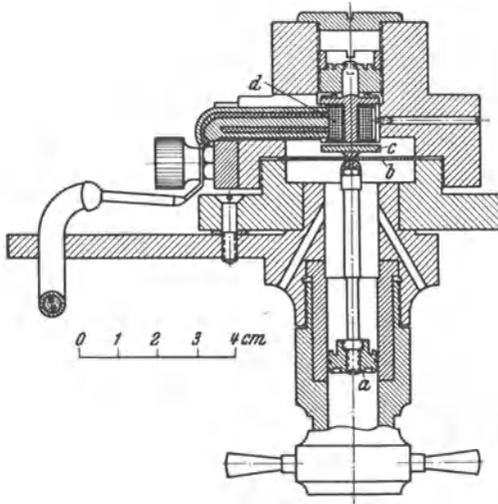


Abb. 222. Druckmeßelement nach Sawyer. *a* Indikator-kolben; *b* Druckmeßmembran; *c* Anker; *d* Spule.

dem Kurbelkasten in Verbindung. Wenn der Kurbelkastendruck auf einen bestimmten Wert gebracht und gleichzeitig der Zylinderraum unter Vakuum gesetzt wird, zeichnet der Oszillograph diese bekannte Druckdifferenz auf. In dieser Weise können durch Änderung des Kurbelkastendruckes verschiedene Eichpunkte aufgenommen werden. Die Nullage wird dadurch gemessen, daß sowohl der Kurbelkasten als auch der Zylinderraum unter Vakuum gesetzt werden, so daß kein Druckunterschied auftritt. Mittels eines Kontaktgebers wird der Zeitpunkt aufgezeichnet, in welchem der Kolben sich im äußeren Totpunkt befindet. Der Zeitmaßstab ist durch die Frequenz des Wechselstromes bekannt. Diese Daten genügen für die Auswertung des Diagrammes, d. h. für die Bestimmung des Kolbenweg-Druckdiagrammes.

Die veränderliche Kapazität im Sekundärkreis dient für die Einregelung auf Resonanz, so daß nur der Widerstand des Kreises zum Ausdruck kommt. Der Oszillograph zeigt dann die Spannungskurve mit der gleichen Frequenz wie die des Primärstromes und die Umhüllungskurve ergibt die Druckwerte. Jede Schwingung des Oszillographen ergibt einen Punkt der Druckkurve, daher soll die Wechselstromfrequenz ein Vielfaches der

dem Kurbelkasten in Verbindung. Wenn der Kurbelkastendruck auf einen bestimmten Wert gebracht und gleichzeitig der Zylinderraum unter Vakuum gesetzt wird, zeichnet der Oszillograph diese bekannte Druckdifferenz auf. In dieser Weise können durch Änderung des Kurbelkastendruckes verschiedene Eichpunkte aufgenommen werden. Die Nullage wird dadurch gemessen, daß sowohl der Kurbelkasten als auch der Zylinderraum unter Vakuum gesetzt werden, so

Im Druckmeßelement von Sawyer (Abb. 222) wird die Druckkraft durch Kolben und Kolbenstange auf eine Meßmembran übertragen und ein besonderes Ankerstück angewendet.

Eine besonders sorgfältige Durchbildung zeigt der Standard-Sunbury-Indikator von Beale und Stansfield (Versuchsanstalt der Anglo-Iranian Oil Co.), welcher für die Aufzeichnung sowohl der Druckänderungsgeschwindigkeit in dem Maschinenzylinder oder in der Einspritzpumpe als auch der Druckwerte selbst sich eignet. Auch die Bewegung der Düsennadel kann aufgezeichnet werden. Die verschiedenen Meßgrößen können nacheinander, durch einfache elektrische Umschaltung von einem Meßelement zum anderen, gemessen werden, wobei ein einziger Kathodenstrahl-Oszillograph angewendet wird.

Das Druckmeßelement (Abb. 223) besteht aus einem Gehäuse, welches in die Kerzenöffnung der zu untersuchenden Maschine eingeschraubt wird und die druckempfindliche Stahlmembran (von etwa 1 mm Dicke und von etwa 42000 Hz Eigenfrequenz), den feststehenden Elektro- oder Dauermagneten und darauf gewickelt die Induktionsspule enthält. Die Durchbiegung der Membran ist in der Mitte etwa $\frac{1}{100}$ mm. Für hohe Drücke (Einspritzpumpen) wird eine dickere Membran von etwa 60000 Hz Eigenfrequenz, für geringe Drücke (Schwachfederdiagramme) eine dünnere Membran von etwa 10000 Hz Eigenfrequenz angewendet. Der Rauminhalt des Elementes ist nur etwa $\frac{1}{20}$ cm³, daher ist dessen Einfluß sogar an kleinen Maschinen vernachlässigbar.

Auf starre Befestigung des Magneten und der Spule ist besonders geachtet, um Erschütterungen und Relativbewegungen zwischen der Spule und dem Membranrand zu vermeiden. Eine etwa 25 mm lange Bohrung von kleinem Durchmesser verbindet den Membranraum mit dem Zylinderraum; dadurch wird die Kühlung des Elementes erübrigt, und es entsteht nur eine vernachlässigbare — und durch Rechnung ermittelbare — Zeitverzögerung in der Druckangabe. Die in der Spule entstehenden Induktionsspannungen werden durch zwei Klemmen dem Verstärker zugeführt und dann zu den Ordinatenplatten des Kathodenstrahl-Oszillographen geleitet. Mit diesem Indikator hat Stansfield eingehende Untersuchungen über Klopferscheinungen ausgeführt, für welche insbesondere das dp/dt -Diagramm von Interesse ist. Infolge des raschen Druckanstieges treten im Verbrennungsraum heftige Gasschwingungen auf (Stansfield berechnete diese zu etwa 6300 Hz), und es war von Wichtigkeit, diese frei von Verzerrung durch die Luftschwingungen im

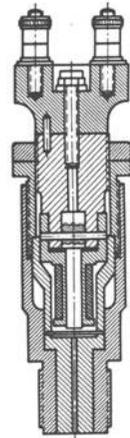


Abb. 223. Druckelement des Standard-Sunbury-Indikators. Membran 1 mm dick, aus Silikon-Eisen, etwa 25 mm lange Zuführungsbohrung; starr befestigte Spule und Eisenkern.

Verbindungsrohr zu bestimmen. Die Luftsäule in der einfachen Bohrung hatte aber eine Eigenschwingungszahl, die in der Nähe der zu untersuchenden Gasschwingungen im Verbrennungsraum lag; dadurch entstanden im Diagramm Schweberecheinungen, welche den zu untersuchenden Vorgang verdeckten. Auch die trichterförmige Ausbildung des Verbindungsrohres (Abb. 224a) hat diese Störungen nicht beseitigt. Schließlich wurde ein Verbindungskanal nach Abb. 224b ausgebildet, in welchem zwei Sätze Bohrungen: ein Satz von 5 Bohrungen von $\frac{1}{16}$ " (1,6 mm) und der andere von 15 Bohrungen zu $\frac{1}{32}$ " (0,8 mm) angewendet

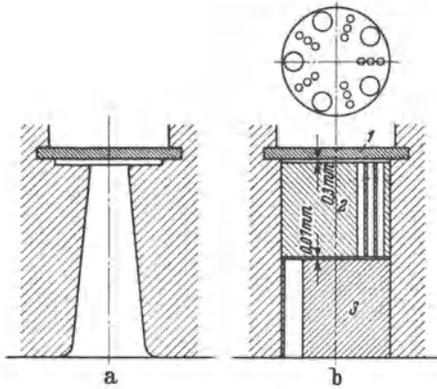


Abb. 224 a u. b. a Verbindungsrohr zum „Sunbury“-Druckmeßelement (nicht ganz befriedigend). b Verbindungsrohr zum „Sunbury“-Druckmeßelement, durch welches die Störungen durch die Eigenschwingungen der Luftsäule beseitigt worden sein sollen. 1 Stahlmembran; 2 Einsatzstück mit 15 Bohrungen von 0,8 mm \varnothing ; 3 Einsatzstück mit 5 Bohrungen von 1,6 mm \varnothing .

wurden, und zwar so, daß zwischen den beiden Sätzen ein Richtungswechsel und auch ein Geschwindigkeitswechsel (durch den eingeschalteten Zellenraum) der Gase stattfand. Dadurch wurde angeblich einerseits die Eigenschwingungszahl der in der Verbindungsleitung enthaltenen Luftsäule gegenüber der Schwingungszahl des Verbrennungsraumes verstimmt und andererseits eine wirksame Dämpfung erreicht, so daß im Diagramm nur die Gasschwingungen im Verbrennungsraum zum Ausdruck kommen. Dieses Verbindungsrohr habe völlig zufrieden-

gestellt: es arbeitete eine lange Zeit ohne Reinigung, die Reinigung konnte leicht vorgenommen werden und es trat keine Erhitzung der Stahlmembran auf. Diese Angaben sind allerdings mit Vorsicht aufzunehmen, da durch eine solche Dämpfung auch die Gasdruckänderungen stark abgedämpft und zeitlich verschoben werden.

Wie oben erwähnt, ist die Spannung verhältnismäßig der Änderungsgeschwindigkeit des Druckes (oder der Hubbewegung), und für viele technische Untersuchungen sind die so erhaltenen Geschwindigkeitsdiagramme anwendbar oder sogar den gewöhnlichen Diagrammen der Druckwerte (oder Hubwerte) vorzuziehen. Dieser Indikator ermöglicht aber auch die Aufnahme von Druckwerten oder Hubwerten durch eine elektrische Integriereinrichtung, welche in den Verstärkerkasten eingebaut ist und durch entsprechende Schalter wirksam oder unwirksam gemacht werden kann. Der Abszissenmaßstab kann vergrößert oder verkleinert werden. Das Umschalten von einem Meßelement zum andern läßt sich leicht durchführen, der genaue Kurbelwinkel wird

ebenfalls angegeben und schließlich läßt sich der Indikator auch für sehr niedrige Drehzahlen (etwa unter 250 U/min) verwenden.

Eine vereinfachte Schaltordnung ist aus Abb. 225 ersichtlich. Ein Dreiröhrenverstärker mit Widerstands- und Kapazitätskopplung wird mit einer Brückenverbindung zu den Ordinatenablenkplatten des Kathodenstrahl-Oszillographen angewendet. Zwei Sonderkreise sind vorhanden: 1. der Integrierkreis bestehend aus Widerstand R_1 , Kapazität C_1 , welcher auf das Gitter der Röhre V_2 einwirkt, und 2. der Rückkopplungskreis, welcher vom Rückkopplungs-Spannungsteiler R_6 durch den Koppelkondensator C_2 zum Anschluß der Spule führt. Diese beiden Kreise werden ausgeschaltet, wenn die

Integrierung nicht erwünscht ist; dann wirkt der Verstärker als ein einfacher Zweiröhrenverstärker mit Widerstands- und Kapazitätskopplung.

Im Integrierkreis (Abb. 226) sind Widerstand R_1 und Kapazität C_1 hintereinandergeschaltet. Die zu integrierende Spannung wird auf die Klemmen an der linken Seite geleitet; die Ladung des Kondensators, gemessen durch die Spannung an den rechtseitigen Klemmen, ist ein Maß des Zeitintegrals der auferlegten Spannung. Für die Genauigkeit der Integrierung sind folgende Gesichtspunkte maßgebend:

1. Der Integrierkreis soll eine hohe Impedanz haben, damit die Form der auferlegten Spannung nicht verzerrt wird.
2. Der Meßkreis für die Messung der integrierten Spannung darf nur einen geringen Strom in Anspruch nehmen.
3. Der Widerstand R_1 soll möglichst ein rein ohmscher sein, d. h. keine Selbstinduktion oder Kapazität besitzen.

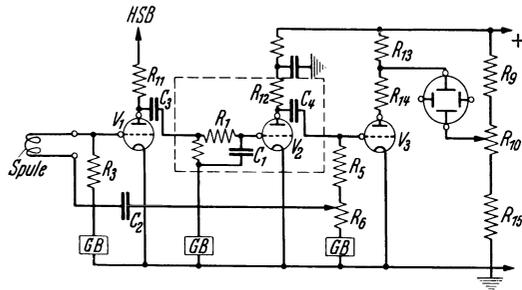


Abb. 225. Vereinfachtes Schaltbild des Standard-Sunbury-Indikators. Weggelassen wurden der Kipp Schaltkreis für die Zeitabszisse, die Hochspannungs-Siebkreise und die Heizstromquellen. Der gestrichelt umgrenzte Teil des Kreises ist der Integrierkreis, welcher ausgeschaltet wird, wenn Geschwindigkeits-Diagramme aufgenommen werden. R_3 ist ein Hochwiderstands-Gitterablaß, um die negative Spannung am Gitter von V_1 aufrecht zu erhalten, wenn die Verbindungen zur Spule gelöst werden. Die Anode von V_1 wird durch den Widerstand R_{11} , Koppelkondensator C_3 und Gitterablaß, durch den Integrierkreis R_1 und C_1 mit dem Gitter von V_2 gekoppelt. Die Anode von V_2 wird durch den Anodenwiderstand R_{12} , Koppelkondensator C_4 und Gitterablaß R_5 mit dem Gitter von V_3 gekoppelt. In der Leitung von R_5 zum Gitterablaß wird der Rückkopplungsspannungsteiler R_6 eingeschaltet. Die Anode von V_3 wird durch eine Brücke mit den Vertikalplatten des Kathodenstrahl-Oszillographen verbunden. Die Anodenwiderstände R_{14} und R_{13} werden so gewählt, daß die Potentiale von den Oszillographenplatten Y_2 und Y_1 annähernd gleich sind. Der Widerstand R_{14} kann kleiner sein als R_{13} , so daß über die Hälfte der Verstärkungskoeffizient von V_3 benutzt werden kann. Änderung der Lage des Abzappfunges von V_1 am Spannungsteiler R_{10} bewirkt die Kontrolle für die Lage von Y .

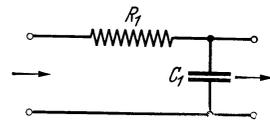


Abb. 226. Vereinfachte Schaltung des Integrierkreises des Standard-Sunbury-Indikators.

4. Die integrierte Spannung soll ein möglichst geringer Bruchteil der auferlegten Spannung sein. Falls die integrierte Spannung beträchtlich ist, ist der den Widerstand R_1 durchfließende Strom nicht verhältnismäßig der auferlegten Spannung; die Kondensatorspannung liefert dann nicht mehr ein genaues Zeitintegral der Spannung.

Der obenerwähnte und in Abb. 225 gezeigte Rückkopplungskreis dient für die Aufhebung der letztgenannten Fehlerquelle. Dabei wird ein Bruchteil der verstärkten Spannung (von der Lage des Spannungsteilers R_6 bestimmt) durch den Kondensator C_2 der Spule zurückerstattet, wodurch die Spannung im Integrierkreis um den Wert der integrierten Spannung erhöht wird. Dadurch wird die Gegenwirkung der integrierten Spannung ausgeglichen.

Die Erfinder heben übrigens mit vollem Recht hervor, daß man von Kathodenstrahl-Oszillographen keine vollkommen genauen Angaben verlangen darf, wie das von anderer Seite behauptet worden sei. Insbesondere sei es unmöglich, eine vollkommen lineare Abhängigkeit zu erhalten, auch habe jede Röhre ihre eigenen Abweichungen.

Der beschriebene Indikator soll auch für die Aufzeichnung der Bewegungen unzugänglicher Teile, z. B. des Druckventils einer Einspritzpumpe, anwendbar sein. Für diesen Zweck werden diejenigen Eisenteile, welche in der Nähe des Ventils liegen, wie z. B. die Ventilsfeder usw., entfernt und durch Bronzeteile ersetzt. Der Stahlventilkegel wird natürlich, so wie er ist, belassen. Ein kräftiger Elektromagnet umgibt den oberen Teil der Pumpe in der Nähe des Ventils; auf diesen Elektromagnet werden zwei Induktionsspulen an den Enden der Magnetpole aufgewickelt. Die Bewegung des Stahlventils im Kraftfeld des Magneten erzeugt Spannungen in den Windungen der Induktionsspulen, welche dann, wie oben beschrieben, verstärkt und angezeigt werden.

Für Klopfuntersuchungen an einer Brennstoffprüfmaschine wurde von Hetzel (The Pennsylvania State College, USA.) ein Verfahren ausgearbeitet, in welchem gewöhnliche im Handel erhältliche Lautsprechergeber als Induktionselemente angewendet werden. Der Zweck ist, den Zündverzug zu bestimmen, d. h. die Zeitdauer, welche zwischen der Einspritzung des Brennstoffes und dem Anfang der Verbrennung vergeht. Beide Zeitpunkte werden durch Lautsprechergeber bestimmt. Im Zylinderkopf wird eine Membran angebracht, deren Bewegung mittels eines kurzen steifen Drahtes auf den Anker des Lautsprechergebers übertragen wird. Die induzierte Spannung wirkt auf eine gittergesteuerte Gleichrichterröhre (Thyratron). Wenn die Membrangeschwindigkeit einen vorbestimmten Wert übersteigt, wird durch die Röhre eine Neonlampe zum Aufleuchten gebracht. Die Neonlampe läuft mit dem Schwungrad herum; den Zeitpunkt der Zündung kann man an einer neben dem Schwungrad angebrachten Gradteilung ablesen. Ähnlich

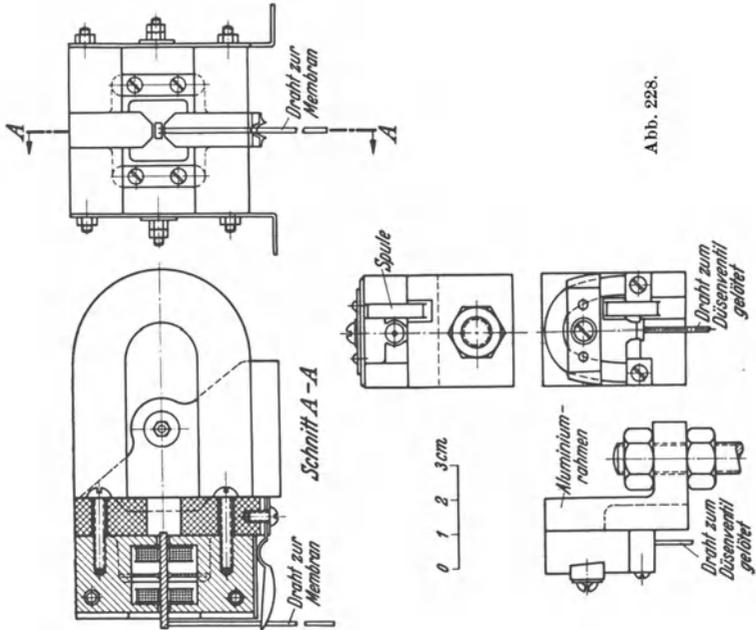


Abb. 228.

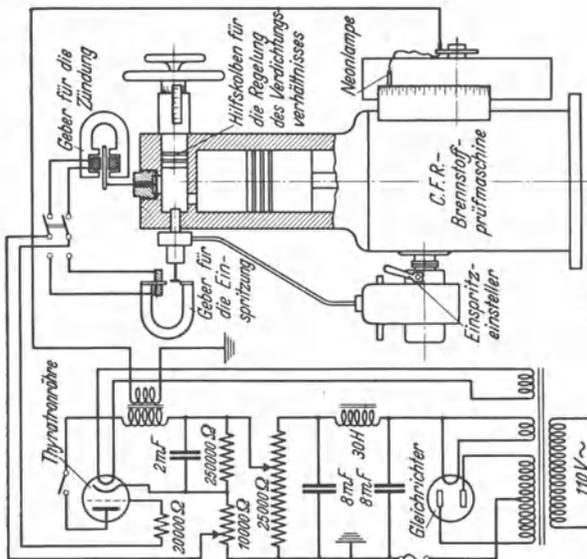


Abb. 227.

Abb. 227 und 228: Schaltschema und Einzelheiten des Gerätes für die Bestimmung des Zündverzuges, nach Hetzel (The Pennsylvania State College, USA.).

wird die Einspritzzeit mit einem zweiten Lautsprechergeber bestimmt, welcher durch das Nadelventil der Einspritzdüse betätigt wird. Durch

Umschalten von dem einen Geber zum anderen werden die beiden interessierenden Phasenpunkte nacheinander abgelesen und dadurch der Zündverzug bestimmt. Der Schaltkreis und die Lautsprechergeber sind in Abb. 227 und 228 dargestellt.

In dem Indikator von Taylor, Draper und Williams, entwickelt im Massachusetts Institute of Technology, USA., wird ein

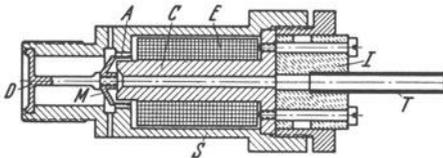


Abb. 229. Druckelement von Taylor, Draper, Taylor und Williams. Die leichte Drahtspule *A* ist auf den Magnesiumrahmen *M* aufgewickelt, welcher im Magnetfeld durch die Stahlmembran *D* gehalten wird. Das Magnetfeld wird durch die auf den Weicheisenkern *C* aufgewickelte Spule *E* aufrecht erhalten. Die magnetischen Kraftlinien schließen sich durch das Gehäuse *S*. Der Strom wird durch das Bakelitstück *I*, die Kühlluft durch das Rohr *T* zugeführt.

Geberelement angewendet, das eine bewegliche Spule enthält, welche durch die Bewegungen einer druckmessenden Membran beeinflusst wird. Die in der Spule induzierten Spannungswerte werden nach Verstärkung einem Oszillograph zugeführt und dadurch wird die Geschwindigkeit der Druckänderung angezeigt (Abb. 229).

Allgemein eignen sich Indikatoren mit druckveränderlicher Induktivität für die Bestimmung der Geschwindigkeit der Druckänderung. Deshalb ist deren Anwendung in erster Linie bei Verbrennungsuntersuchungen, insbesondere bei Zündverzug- und Klopfversuchen angezeigt. Sie sind zwar auch für die Bestimmung der Druckwerte anwendbar, aber ihre genaue Eichung verursacht erhebliche Schwierigkeiten, da sie dynamisch, bei genau gleichbleibender Motorzahl, und zwar genau derselben wie im Versuch, vorgenommen werden muß. Ein leicht anwendbares Eichverfahren ist aber für die bisherigen Indikatoren dieser Art nicht veröffentlicht worden.

Für sehr hohe Frequenzen eignet sich die induktive Methode nicht, da hierbei die Wirbelstromverluste zu groß werden.

G. Magneto-elektrisches Indizierverfahren.

1837 wurde von Wiedemann entdeckt, daß ein durch ein Solenoid in der Längsrichtung magnetisierter Stab aus ferromagnetischem Material sich beim Stromdurchfluß von einem Ende zum anderen verlängert und gleichzeitig eine Verdrehung erfährt. Umgekehrt treten, wenn man einen längsmagnetisierten Stab rekt, drückt oder verdreht, Änderungen in dem magnetischen Feld auf, die von der Änderung der Drehung abhängig sind und in einer den Stab umhüllenden Spule Ströme induzieren. Dieser sog. „umgekehrte Wiedemann-Effekt“ wurde von japanischen Forschern, insbesondere von Nagaoka und später von Kobayashi für die Messung von Drehmomenten in Wellen und für die Indizierung von schnellen Druckvorgängen angewendet. Die Eignung

dieser Grunderscheinung für die Messung rascher Druckänderungen wird durch folgende Eigenschaften begründet: der Zeitverzug zwischen Drehmoment und Längsmagnetisierung ist sehr klein; dasselbe gilt für die Hysterese; der Zusammenhang zwischen Drehmoment und Längsmagnetisierung ist mit guter Annäherung linear; eine geringe Änderung des Stromes ändert die Längsmagnetisierung nicht, vorausgesetzt, daß der Längsstrom einen bestimmten Wert übersteigt.

Den Indikator nach Kobayashi zeigen Abb. 230 und 231.

Als Strom kann entweder Gleich- oder Wechselstrom angewendet werden; der erstere eignet sich für rasche, der letztere für langsame Druckänderungen. Wenn ein Gleichstrom verwendet wird, ergibt das Diagramm nicht die Drücke selbst, sondern das Differential nach der Zeit, d. h. die Druckänderungsgeschwindigkeit, aus welcher die Druckkurve durch graphische Integration ermittelt wird. Für die Bestimmung des Maßstabes ist ein besonderer Eichversuch nötig.

Bei Verwendung von Wechselstrom entsteht in der den Stab umgebenden Spule ein Wechselstrom, dessen Amplitude sich mit guter Annäherung verhältnismäßig mit dem Drehmoment ändert. Voraussetzung ist aber, daß es sich um kleine Spannungsschwankungen im Stabe handelt. In diesem Falle ist also die Umhüllungskurve des

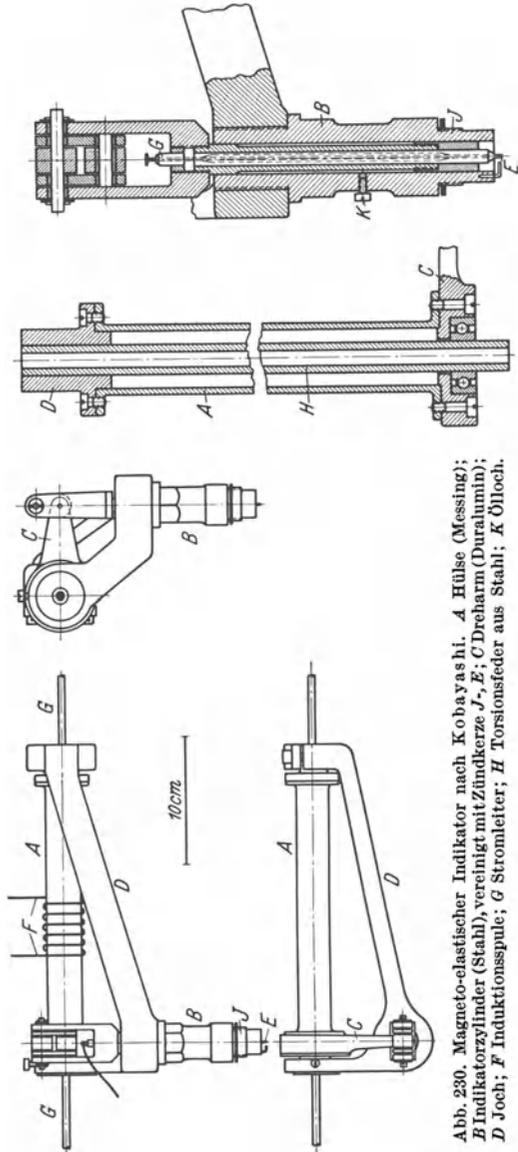


Abb. 230. Magneto-elastischer Indikator nach Kobayashi. A Hülse (Messing); B Indikatorzylinder (Stahl), vereinigt mit Zündkerze J, E; C Drehaarm (Duralumin); D Joeh; F Induktionsspule; G Stromleiter; H Torsionsfeder aus Stahl; K Ölloch.

Oszillogrammes die Druckkurve. Um möglichst viele Punkte der Druckkurve zu erhalten, ist es notwendig, einen Hochfrequenzstrom anzu-

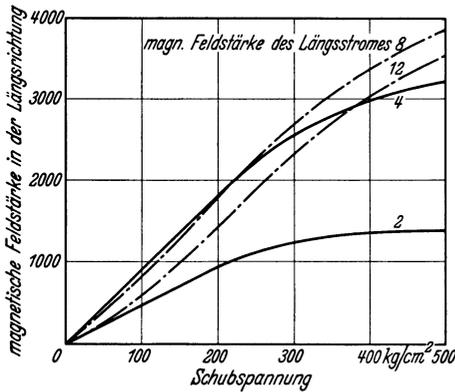


Abb. 231. Abhängigkeit der Längsmagnetisierung von der Schubspannung bei verschiedenen Längsströmen (Kobayashi).

wenden (Kobayashi benutzte einen Wechselstrom von 600 Hz und 35 A). Die Wellenform ändert sich, wenn die Stromstärke oder die Frequenz des Stromes sich ändern. Zur Aufzeichnung hochfrequenter Schwingungen eignen sich magnetoelastische Verfahren nicht, da sich die Frequenz der Wirbelstromverluste wegen nicht beliebig steigern läßt. Dagegen ist die Methode sehr unempfindlich gegen Feuchtigkeits- und Temperaturschwankungen.

V. Punktweise anzeigende Indikatoren.

Es wurde festgestellt, daß die in einer Kolbenkraftmaschine aufeinander folgenden Kreisprozesse voneinander etwas abweichen, auch wenn die Belastung, Drehzahl, Zündzeitpunkt und andere Daten mit der größten Sorgfalt konstant gehalten werden. In Verpuffungsmaschinen weist insbesondere die Verbrennungslinie eine bedeutende Streuung auf, welcher Umstand auch in den Flammenphotographien der Verbrennung (s. Withrow und Rassweiler¹) klar in Erscheinung tritt. In den anderen Teilen der Diagrammlinie kommen weit geringere Abweichungen vor. Wegen dieser Abweichungen ist es notwendig, mehrere Diagramme nacheinander aufzunehmen, um ein mittleres Diagramm bilden und zuverlässige Schlußfolgerungen ziehen zu können.

Ein mittleres Diagramm entsteht selbsttätig durch diejenigen Indiziereinrichtungen, welche nicht einen einzigen Kreisprozeß aufzeichnen, sondern das Diagramm punktweise aus einer großen Anzahl von Kreisprozessen bestimmen. Natürlich führt dieses Verfahren nur dann zu einem wirklichen mittleren Diagramm, wenn die Abweichungen zwischen den einander folgenden Kreisprozessen nur gering und für den Zweck der Untersuchung vernachlässigbar sind. Bei der Anwendung dieses Indizierverfahrens sind daher die Betriebsverhältnisse nach Möglichkeit unverändert zu halten, welche Bedingung in schnelllaufenden Maschinen gewöhnlich leicht erfüllbar ist: Je höher die Maschinendrehzahl, um so

¹ J. Soc. automot. Engr., New York Bd. 39 (Juli-Aug. 1936) Nr. 2.

eher kann man die Gleichheit der einander folgenden Kreisprozesse erreichen.

Diese Indizierverfahren können in zwei Gruppen unterteilt werden, d. h.:

1. Der Kurbelwinkel wird bestimmt, in welchem ein im voraus gewählter Druck herrscht. — 2. Der Druck wird bestimmt, welcher in einer voraus gewählten Kurbelstellung herrscht.

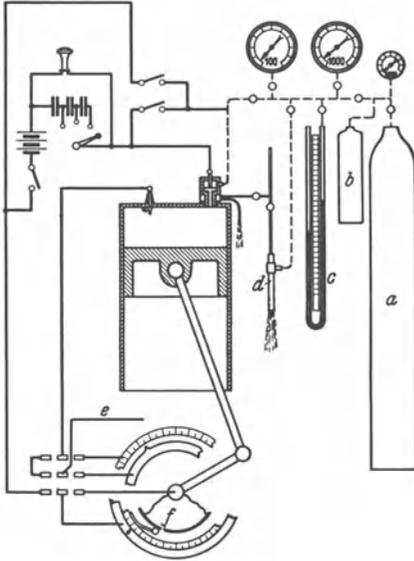


Abb. 232. Allgemeine Anordnung der Indiziereinrichtung des Bureau of Standards nach dem Druckvergleichsmembranverfahren. *a* Druckgasflasche; *b* kleine Vorratsflasche; *c* Quecksilbersäule; *d* Wasserstrahl-Vakuumpumpe; *e* Zündstrom; *f* Phasensucherkontakt.

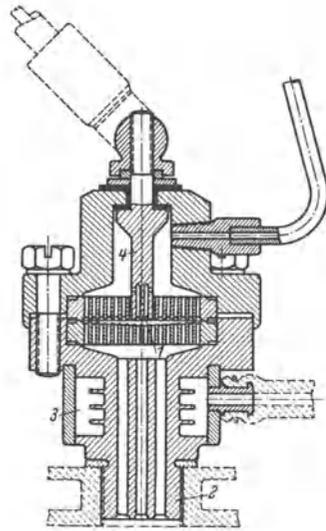


Abb. 233. Druckvergleichselement zum Bureau of Standards Indikator. *1* Membran, angeordnet zwischen zwei Stützwänden; *2* Kerzen-gewindeanschluß; *3* Kühlwasserraum; *4* isolierte Elektrode.

Zu der ersten Gruppe gehört der Indikator mit Druckvergleichsmembran, ursprünglich entwickelt im amerikanischen Normenbureau (Bureau of Standards, Washington) und hergestellt von der American Instrument Company, Washington (Abb. 232 — 234). Seine Wirkungsweise beruht auf zwei Grundsätzen: a) auf die eine Seite einer Membran von vernachlässigbarer Federkraft läßt man den sich ändernden Zylinderdruck und auf die andere Seite einen genau meßbaren einstellbaren Gasdruck einwirken, b) durch eine elektrische Anzeigevorrichtung bestimmt man den Kurbelwinkel, bei welchem beide Drücke gleich groß sind. Dementsprechend besteht die Einrichtung aus zwei Elementengruppen: a) dem Druckvergleichselement samt den dazugehörigen Apparaten für die Herstellung und Messung des einstellbaren Druckes und b) dem Kurbelwinkelsucher mit dem zugehörigen Anzeigerät.

Das Druckvergleichselement (Abb. 233) ist eine dünne, biegsame Metallmembran, welche ein Gehäuse in zwei Kammern unterteilt. Die untere Kammer ist mit dem Zylinderraum der Maschine durch ein kurzes, wassergekühltes Rohr verbunden, so daß darin in jedem Augenblick der gleiche Druck herrscht wie im Zylinder. Die obere Kammer wird mit Gas oder Luft gefüllt, deren Druck genau einstellbar und meßbar ist. Als Druckquelle dient für Hochdruck eine Flasche mit verdichteter Luft oder inertem Gas (Stickstoff) und für Drücke unterhalb dem Atmosphärendruck eine Vakuumpumpe. Der Druck wird mit einem

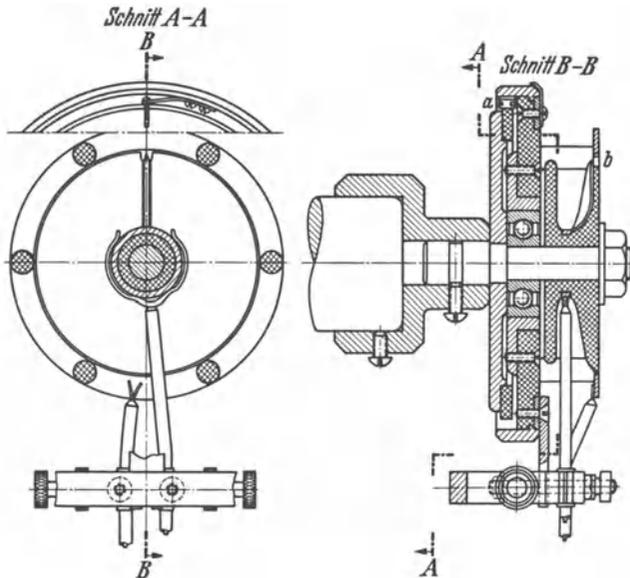


Abb. 234. Phasensucher zum Bureau of Standards Indikator. Es sind zwei Kontaktgeber angeordnet. *a* für das Aufsuchen der Phase der Druckgleichheit, und *b* für das Aufsuchen der Zündphase.

genauen Manometer gemessen und der gewünschte Wert mit feinregelbaren Ventilen eingestellt. Die Auslenkungen der Scheidewand sind auf beiden Seiten durch je eine gelochte Stützwand begrenzt. Je nachdem der Zylinderdruck höher oder niedriger als der eingestellte Druck ist, lehnt sich die Scheidewand gegen ihre obere oder untere Stützwand. Infolge der geringen Masse der Scheidewand und deren geringer Auslenkung (die beiden Stützwände erlauben nur eine Bewegung von etwa 0,07 mm) entsteht ein vernachlässigbar geringer Zeitverzug zwischen dem Augenblick der Entstehung eines Druckgleichgewichtes und der Bewegung der Scheidewand. Der Kurbelwinkel, bei welchem der Druckausgleich stattfindet, wird elektrisch bestimmt. In der oberen Kammer ist eine von dem übrigen Gehäuse isolierte Elektrode angeordnet, welche in die Mitte der oberen Stützwand hereinragt. In dem Augenblick, in welchem die Scheidewand die obere Stützwand berührt, wird zwischen

dem Gehäuse und der Elektrode ein elektrischer Kontakt hergestellt; in dem Augenblick, in welchem die Scheidewand sich von der oberen Stützwand abhebt, wird der elektrische Kontakt unterbrochen. Es wird nun ein Stromkreis gebildet, in welchem in Reihe geschaltet werden: die Maschine, die isolierte Elektrode, eine Stromquelle (Batterie), ein Telefon und der Winkelsucher, welcher auch mit der Maschine (und daher der Membran) leitend verbunden ist und dadurch den Stromkreis schließt. Der Winkel- oder Phasensucher (Abb. 234) besteht aus einer Scheibe aus Isoliermaterial, in deren Umfang ein schmaler, etwa 1 Grad oder weniger breiter leitender Streifen eingebettet ist. Diese Scheibe wird an ein passendes Wellenende (Kurbel- oder Nockenwelle) der Maschine in der Weise angebaut, daß der leitende Streifen mit der Maschine elektrisch verbunden ist. Eine elektrische Kontaktbürste, deren Winkelstellung einstellbar ist, gleitet auf dem Umfang der Scheibe und schließt den obengenannten Stromkreis einmal während jeder Umdrehung, für die Dauer einer Winkelbewegung von 1 Grad. Dieses Schließen findet in derselben Kreisprozeßphase statt, wo die Bürste sich in derselben Winkelstellung befindet. Wird die Bürste verstellt, so wird dadurch die Schließphase des Stromkreises entsprechend geändert. Durch die Verstellung der Bürste kann der Zeitpunkt des Schließens in jede beliebige Kreisprozeßphase verlegt werden.

Wenn der Stromkreis an dem betreffenden Kontaktpunkt geschlossen ist, d. h. wenn

a) die Scheidewand an der oberen Stützwand anliegt, wenn also der Zylinderdruck den Einstelldruck übersteigt;

b) der Phasensucherkontakt geschlossen ist, fließt ein Strom in dem Stromkreis, und es wird im Telefon ein Knacken hörbar.

Durch Verstellung der Bürste können die Grenzen des Phasenbereiches aufgesucht werden, in welchem die Bedingung a) erfüllt ist. Diese Grenzphasen sind auf einer feststehenden Gradteilung ablesbar. Im allgemeinen gehören zu jedem Einstelldruck zwei Grenzwinkel, einer bei wachsendem, einer bei sinkendem Druck. Durch Aufsuchen der Grenzwinkel, welche zu einer zweckmäßig gewählten Reihe von Einstelldrücken gehören, kann eine Tabelle aufgestellt und damit das Diagramm aufgezeichnet werden.

Dieses Gerät liefert genaue Werte, benötigt aber eine ziemlich umfangreiche Einrichtung und geübtes Personal für seine Betätigung. Für die Aufnahme eines Diagrammes ist ein Zeitaufwand von einer Viertelstunde oder mehr nötig. Der Kopfhörer ist etwas unbequem, und er wurde bei einigen neueren Untersuchungen durch eine Neon-Glimmlampe ersetzt, welche ein Sichtzeichen ergibt, was bequemer wahrzunehmen ist.

Für die Untersuchung der Druckerscheinungen während des Auspuff- und Ladevorganges einer Zweitaktmaschine hat Gasterstaedt (Versuchsanstalt der Junkers-Werke) nach einem ähnlichen Grundsatz einen

Indikator entwickelt (Abb. 235), in welchem ein leichtes Plattenventil als Druckvergleichselement angewendet wird. Die Bewegung beträgt nur etwa 0,1 mm. Zwei Goldblattelektroskope zeigen an, ob das Plattenventil an der einen oder der anderen Sitzfläche anliegt. Der Phasensucher ist auch hier eine einstellbare Bürste, ähnlich wie in der oben beschriebenen Anordnung. Aus den erhaltenen Zahlenwerten für Kurbelwinkel und Druck kann das Druckdiagramm aufgezeichnet werden, wie in Abb. 236 und 237 gezeigt wird.

Der englische „Farnborough“-Indikator (Abb. 238 u. 239) entwickelt durch die Royal Aircraft Establishment (hergestellt von Dobbie McInnes & Clyde, Glasgow) beruht auf demselben Grundsatz wie der Bureau of Standards Indikator. Er ist aber als ein aufzeichnendes Gerät ausgebildet und weist bedeutende Entwurfsunterschiede auf. Das

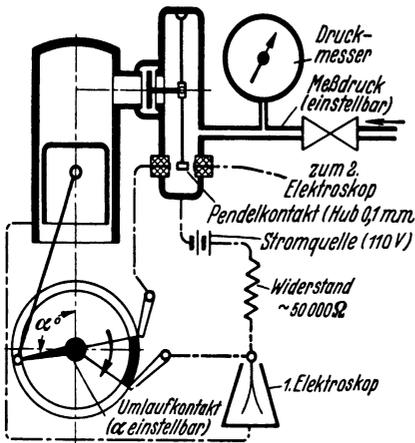


Abb. 235. Indiziereinrichtung nach Gasterstaedt (Versuchsanstalt Junkers).

Das Druckvergleichselement ist keine Membran, sondern ein leichtes Tellerventil, auf dessen obere Fläche der meßbare Einstelldruck, und auf dessen untere Fläche der veränderliche Zylinderdruck einwirkt. Das Ventil besitzt zwischen seinen beiden Sitzen ein Spiel von etwa 0,1 mm und wird im Augenblick des Druckgleichgewichtes abgehoben und auf den gegenüberliegenden Sitz gedrückt. Hierdurch wird ein elektrischer Stromkreis unterbrochen. In diesen Kreis ist die Primärwicklung einer Hochspannungsspule geschaltet. Bei jeder Öffnung des Primärkreises entsteht ein Funke im Sekundärkreis, welcher von der Schreibspitze über einen Luftspalt auf eine Schreibtrommel überspringt, die von der untersuchten Maschine mit der Kurbelwellendrehzahl (oder Nockenwellendrehzahl) angetrieben wird. Die Schreibspitze wird von einem Kolben, der unter dem gleichen Luftdruck wie das Ventil steht und von einer geeichten Meßfeder belastet wird, dem Einstelldruck entsprechend in der Achsrichtung der Indikatortrommel verschoben. Wenn der Einstelldruck allmählich erhöht wird, zeichnen die Funkenlöcher im Papier ein Druckdiagramm, abhängig vom Kurbel- oder Nockenwinkel, auf.

Die Fehlerquellen dieses Gerätes sind: a) der Zeitverzug des Ventilhubes infolge seiner Masse und Weges; b) die Breite des Ventilsitzes; durch letzteren Umstand wirkt der Einstelldruck auf eine größere Fläche als der Zylinderdruck. Es ist also erwünscht, sowohl die Ventilmasse

als auch die Ventillänge zu verkleinern. Der Druckmesser ist ein Einstelldruckmesser (Meßdruck einstellbar). Die Stromquelle ist eine 110 V Wechselstromquelle. Der Widerstand beträgt $\sim 50000 \Omega$. Die Pendelkontakt-Hubhöhe beträgt 0,1 mm. Die Winkelstellung α ist einstellbar.

als auch die Sitzbreite nach Möglichkeit zu vermindern. Weiterhin ist es erwünscht, die Stromdichte zu vermindern, um eine Beschädigung der Sitze durch Abbröckelung zu vermeiden. Durch Beachtung dieser Gesichtspunkte erzielten mehrere Forscher wesentliche Verfeinerungen im Entwurf des Farnbo-

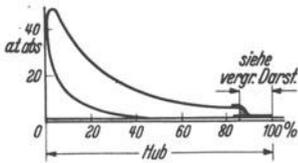


Abb. 236. Volldiagramm mit unsicherer Aufzeichnung des Spülvorganges.

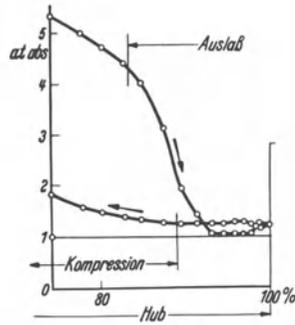


Abb. 237. Genaues Teildiagramm mit dem Gasterstaedt-Indikator aufgenommen.

rough-Gerätes und erhöhten dadurch dessen Empfindlichkeit und Genauigkeit erheblich.

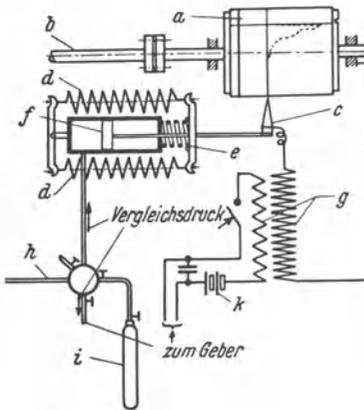


Abb. 238. Schematische Darstellung des Farnborough-Indikators. *a* Indikatortrommel; *b* Antrieb von der Motorwelle; *c* Funken-schreibstift; *d* Überdruckfeder; *e* Unterdruckfeder (je nach gewünschtem Druckbereich und Empfindlichkeit auszuwechseln); *f* Vergleichsdruck-Meßkolben zum Einstellen des Funken-schreibstiftes; *g* Induktionsspule; *h* Leitung zur Vakuum-pumpe; *i* Druckluftflasche; *k* 6 V-Akkumulatorbatterie.

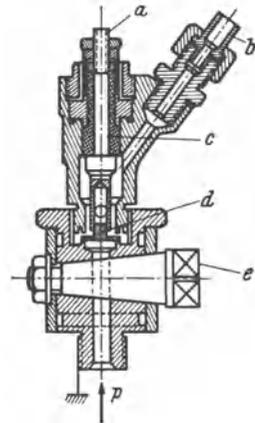


Abb. 239. Geber des Farnborough-Indikators. *a* Anschluß der Erst-spule; *b* Anschluß für den Vergleichs-druck; *c* isolierte Zuleitung zum Ventil; *d* Ventil von 13 Ø, etwa 0,1 bis 0,3 mm Hub; *e* Abschlußbahn.

Die ursprüngliche Ventilanordnung zeigt Abb. 240 a, während die durch die National Advisory Committee for Aeronautics ausgearbeitete Ventilanordnung in Abb. 240 b dargestellt ist. Die wichtigeren Angaben sind folgende (s. Tabelle 4, S. 160).

In der verbesserten Ausführung werden das Ventil und der Sitz aus nichtrostendem Stahl hergestellt. 12 bis 18 Diagramme sollen aufgenommen werden können, bis Neupolierung nötig ist. Ein Ventil verträgt

etwa 15 Neupolierungen, bis es so stark abgenutzt ist, daß es für weitere Benutzung nicht mehr geeignet ist.

Tabelle 4.

	A Ursprünglicher Entwurf	B Verbessertes Entwurf	Verhältnis beim verbesserten zum Original- entwurf
Gewicht	—	—	1 : 5
Sitzbreite, mm	0,85	0,125	1 : 7
Hub, mm	0,32	0,10	1 : 3
Fläche/Gewicht cm ² /g	0,6	0,3	4 : 1

In der Originalausführung wird der elektrische Stromkreis durch einen Gleitkontakt an der Führungsstange geschlossen. Dieser Kontakt ist nicht zuverlässig, da dadurch Funken entstehen, welche das Ventil

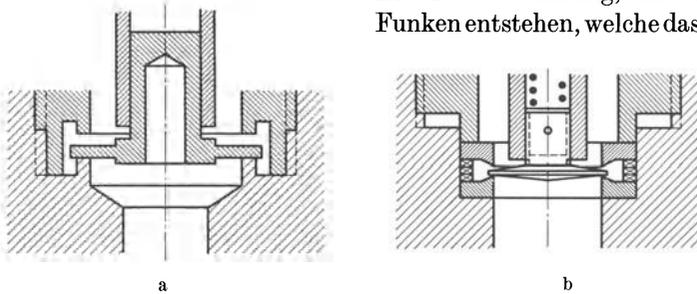


Abb. 240 a u. b. Druckvergleichsventil zum Farnborough-Indikator. a Ursprungsform; b von der N.A.C.A. verfeinerte Ausführungsform.

mit der Führungsstange verschweißen und dadurch seine Wirksamkeit aufheben. In der von N.A.C.A. verbesserten Ausführung wird eine leitende Verbindung durch einen dünnen Kupferdraht erreicht (5 Drahtwindungen 0,25 mm dick), dessen eines Ende an den Führungsstift gelötet wird, während das andere Ende an die Ventilscheibe angenietet wird. Die Bildung eines Lichtbogens zwischen Scheibe und Sitz wird durch einen zum Sitz parallel geschalteten Kondensator von 0,2 mf vermindert. Um die zerstörende Wirkung der Bogenbildung zu unterdrücken, wurde ein inertes Gas (Helium oder Stickstoff) statt Luft als Druckmedium angewendet. Die verbesserte Wirkung zeigt Abb. 241, welche die Notwendigkeit eines sorgfältigen Entwurfs bei Meßinstrumenten beweist.

Eine weitere Verbesserung des Gerätes wurde durch die Verfeinerung des Aufzeichnungsverfahrens von Hemmeter (National Advisory Committee of Aeronautics) ausgearbeitet. In der ursprünglichen Aufzeichnung wurde ein verhältnismäßig dickes schwarz gefärbtes Papier angewendet, welches durch die elektrischen Funken durchlocht wurde. Dieses Papier erfordert eine beträchtliche Intensität des Funkens, außerdem ist es für die Betrachtung des Diagramms nicht gut geeignet, sondern dient nur

als ein Negativ, von dem positive Pausen auf weißem Grund angefertigt werden können. Nach dem Verfahren von Hemmeter wird das Diagramm auf einem dünnen, durchsichtigen, dem Zigarettenpapier ähnlichen, aber etwas dickeren Fließpapier aufgenommen und erscheint als eine schwarze Punktreihe. Das Diagramm kann schon auf der Trommel beobachtet und auf Vollständigkeit geprüft werden. Ein Vergleich zwischen mehreren Diagrammen ist durch Aufeinanderlegen möglich, da das Papier durchsichtig ist. Das Originaldiagramm kann durch Lichtpausen vervielfältigt werden. Das elektrische Schaltschema zeigt Abb. 242. Der Funken muß die richtige Polarität haben und von der Trommelfläche auf die Schreibspitze überspringen. An der Trommel wird ein Papierblatt befestigt (Abb. 243), welches mit einer schwarzen Farbschicht von besonderer Zusammensetzung getränkt wird.

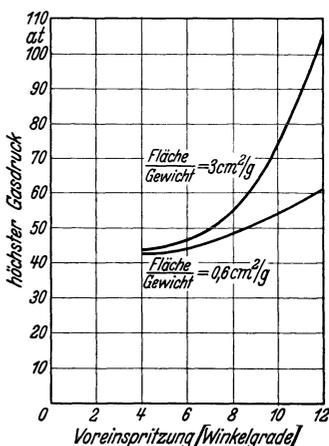


Abb. 241. Einfluß der Sitzbreite und des Ventilgewichtes auf den aufgezeichneten Höchstdruck beim Farnborough-Indikator.

Diese Schicht besteht aus einer Mischung von Ruß, einer Anilinfarbe, Kasein, Bienenwachs und Talkpulver und hat die Eigenschaft, daß sie den elektrischen Bogen aufrechterhält und gegen das Überspringen des Funkens nur einen geringen Widerstand leistet, vorausgesetzt, daß derselbe die richtige Polarität hat.

Wenn nun der Funke von dieser Farbschicht durch das darübergelegte Diagrammpapier zur Schreibspitze wandert, nimmt er verdampfte Rußteilchen mit sich und hinterläßt diese auf dem Diagrammpapierblatt. Die Befestigungsmethode der geschwärzten Papierschicht und des Diagrammpapiers ist in Abb. 243 dargestellt.

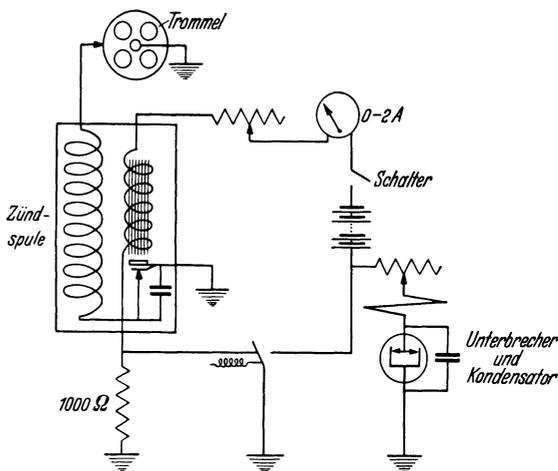


Abb. 242. Verbesserte Aufzeichnungsmethode von Hemmeter (N.A.C.A.). Elektrisches Schaltbild.

Die geschwärzte Papierschicht kann für viele Diagramme benutzt werden, da nur eine sehr kleine Fläche durch den Funken beeinflusst wird. Es ist bemerkenswert,

daß dieses Verfahren bei umgekehrter Polarität des elektrischen Stromkreises nicht anwendbar ist.

Für hohe Drücke, wie sie in den Einspritzsystemen von Dieselmotoren vorkommen, wurde von Ricardo ein Sonderentwurf eines Druckvergleichsventils ausgebildet (Abb. 244), welches in die Brennstoffleitung eingebaut werden kann. Bei dieser Bauweise wird die Kontaktscheibe durch zwei Kolben betätigt; ein kleiner Kolben wird dem Brennstoffdruck ausgesetzt, ein großer Kolben (mit 10facher Fläche) dem einstellbaren Luftdruck. Das Brennstoffdruckdiagramm hat also einen 10fach kleineren Maßstab als der tatsächliche Einstelldruck. Die $\frac{1}{4}$ Zoll-Rohrverbindung führt zur Einstelldruckleitung, und die $\frac{3}{8}$ Zoll-Rohrverbindung zu einer Rohrabzweigung, welche mit der Brennstoffleitung verbunden ist.

Um die Notwendigkeit einer besonderen Indikatorbohrung zu vermeiden, wurde von der Versuchsanstalt der Continental Motors Corporation,

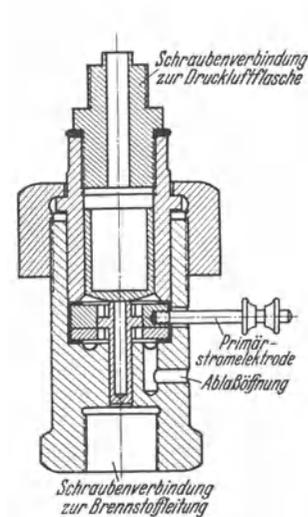


Abb. 244.

Druckvergleichsventil für hohe Drücke (für Brennstoffleitungsuntersuchungen) nach Ricardo.

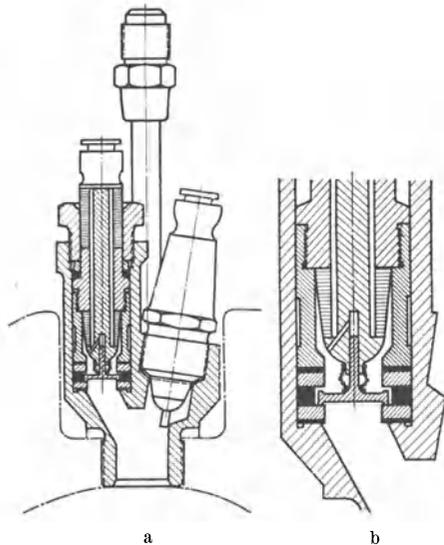


Abb. 245 a u. b. a Mit einer Zündkerze vereinigt Druckvergleichsventil der Continental Motors Corp.-Versuchsanstalt. b zeigt das Ventil in größerem Maßstab.

Detroit, ein Entwurf ausgearbeitet, welcher in sich eine Zündkerze und ein Druckvergleichsventil vereinigt (Abb. 245a und b). Das Ventil hat 8 mm \varnothing und einen Rand von 0,2 mm Breite und Dicke. Die Ventilsitze sind aus Stellite angefertigt und werden durch einen kupfernen Distanzring so auseinandergehalten, daß die Ventilbewegung auf etwa 0,15 mm beschränkt ist. Auch bei dieser Bauweise wird die elektrische Ver-

bindung zwischen Ventil und Ventilfehrung durch eine Drahtspirale, wie in Abb. 245 b gezeigt, hergestellt.

Ein Trägheitsfehler tritt auch in diesem Gerät auf, da das Ventil sich erst dann von seinem Sitz abhebt, wenn eine beschleunigende Kraft infolge eines Überdruckes vorhanden ist. Für den dadurch entstehenden Zeitverzug haben Serruys und auch Meurer Berechnungen aufgestellt. Der Rechnungsgang von Meurer wird im folgenden wiedergegeben. Setzt man: den Schaltweg des Ventils zur Unterbrechung des Primärstromkreises $s = 0,001$ cm, die wirksame Fläche des Ventils $F = 1,0$ cm²,

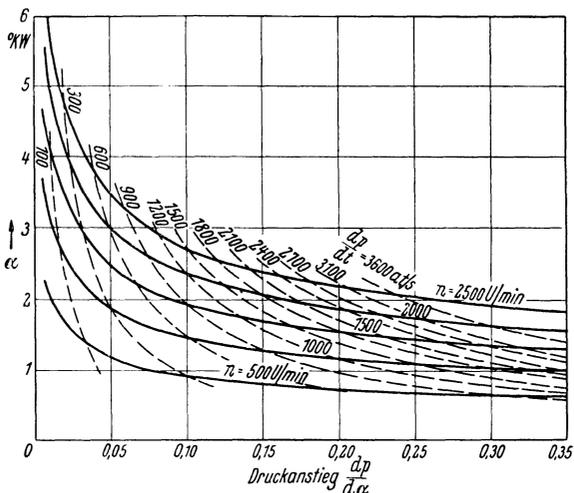


Abb. 246. Phasenwinkelfehler α infolge von Trägheitseinflüssen beim Farnborough-Indikator (nach Meurer). Die Fehler steigt mit der Steigerung der Drehzahl und der Verminderung der $dp/d\alpha$ -Werte (Schwachfederdiagramme) rasch an.

das Gewicht des Ventils $G = 0,0015$ kg, die Drucksteigerungsgeschwindigkeit $dp/dt = c$, welche während des Schaltweges als gleichbleibend angenommen wird, so erhält man die Zeit t zur Bewältigung des Schaltweges aus:

$$Ftc = Ft \frac{dp}{dt} = \frac{G}{g} \cdot \frac{d^2s}{dt^2} = \frac{G}{g} \cdot b,$$

wobei b die Beschleunigung beim Anheben und g die Fallbeschleunigung bedeuten;

$$s = \frac{Fg}{G} c \int_0^t \int_0^t t dt^2;$$

$$t = \sqrt[3]{\frac{6sG}{gFc}}.$$

Die Schaltzeit wird also um so kürzer und damit der Phasenwinkelfehler um so kleiner,

1. je kleiner das Verhältnis der Masse des Ventils zu seiner wirksamen Druckfläche ist,

2. je kleiner der Schaltweg ist und

3. je größer die Drucksteigerungsgeschwindigkeit ist.

Dieser Zusammenhang ist in Abb. 246 graphisch dargestellt.

Leider fehlen bei dem Aufzeichnungsverfahren mit elektrischem Funken oft die Punkte in der Nähe der Diagrammspitze, weil die Zeitspanne, während welcher das Ventil mit seinem oberen Sitz in elektrischer Verbindung ist, nicht ausreicht, den Primärstrom zu einer zur Funkenbildung genügenden Höhe zu bringen. Dieser Mangel zeigt sich um so mehr, je kürzer die Dauer der hohen Drücke ist, d. h. beim Klopfen oder

bei sehr hohen Drehzahlen. Diese Ursachen wurden auch von Seruys (Französisches Institut für Luftfahrtforschung) untersucht.

Eine weitere Fehlerquelle wird durch die Leckgase verursacht, die von dem Einstellgasbehälter in den Maschinenzylinder strömen. Daß ein Lecken tatsächlich auftritt, bewies ein Unfall, wobei irrtümlicherweise Sauerstoff als Druckmedium angewendet wurde und der Zylinderkopf durch die entstehende Explosion zerstört wurde. Das Lecken erhöht oder erniedrigt die Zylinderdrücke und verfälscht bis zu einem gewissen Grade den zu untersuchenden Vorgang.

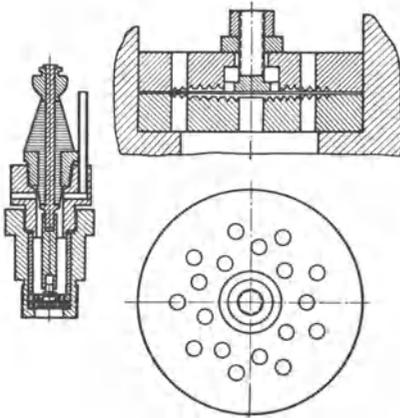


Abb. 247. Druckvergleichselement zum Indikator von Taylor und Draper (Massachusetts Institute of Technology). Die Membrananordnung ist rechts oben in größerem Maßstab wiedergegeben.

In der Versuchsanstalt für Luftfahrt des Massachusetts Institute of Technology haben Taylor und Draper ein Druckvergleichselement entwickelt, welches sowohl die Möglichkeit des Leckens beseitigt als auch das obenerwähnte Fehlen der Diagrammspitze vermeidet. Das Druckvergleichselement (Abb. 247) besteht, ähnlich wie im Indikator des Bureau of Standards, aus einer Membrane, deren Gehäuse mit Kerzengewinde versehen ist und unmittelbar in den Zylinderkopf eingeschraubt werden kann. Eine wichtige Verfeinerung besteht darin, daß der, von der Membran geschlossene und unterbrochene Strom nicht unmittelbar die Erzeugung des Funkens bewirkt, sondern nur als ein Relais für die Steuerung des Primärstromes dient. Dadurch wird eine weitgehende Verkleinerung des durch den Membrankontakt fließenden Stromes bewirkt, so daß Funken, Schweiß- und Zerstörungerscheinungen an den Kontaktpunkten nicht auftreten. Dieser außerordentlich schwache Strom steuert ein elektrisches Relais, eine „Thyratron“ genannte Vakuumröhre.

Das Thyatron ist eine gasgefüllte Dreielektrodenröhre, welche zwei wertvolle Eigenschaften besitzt. 1. Das Gitter kann nur die Entstehung des Stromes verhindern, aber es kann ihn nicht wieder abstellen, nachdem er schon zustande gekommen ist. Es ist dann notwendig, den Strom zu unterbrechen, bevor das Gitter wiederum zu wirken beginnt. 2. Das Thyatron kann bedeutende Ströme mit sehr geringem Spannungsverlust in der Röhre steuern. Als weitere Verbesserung werden zwei Stromkreise angewendet (Abb. 248), einer für den steigenden Ast der Druckkurve (zunehmende Drücke), der andere für den sinkenden Ast (ab-

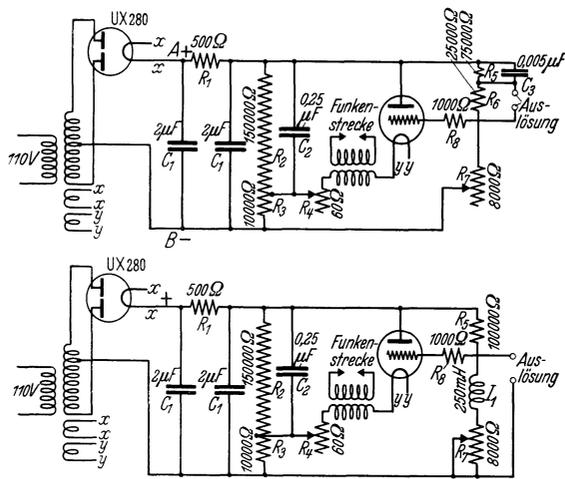


Abb. 248. Stromkreise im Indikator von Taylor und Draper (Massachusetts Institute of Technology). Zwei Kreise werden benutzt: bei dem einen Kreise entsteht ein Funken bei zunehmenden Drücken, bei dem anderen Kreise entsteht ein Funken bei abnehmenden Drücken. Mit einem Dreipol-Schalter schaltet man von dem einen Stromkreis zu anderen über.

nehmende Drücke). Dadurch wird die obenerwähnte Lücke in der Nähe der Diagrammspitze vermieden. Besondere, sorgfältig ausgearbeitete Einrichtungen verhindern jeglichen toten Gang und die Elastizität in dem Trommelantrieb und vermeiden so eine Streuung der Punkte.

Die Umschaltung vom Stromkreis *a* auf Stromkreis *b* geschieht durch einen Dreipolumschalter.

Eine weitere und verfeinerte Entwicklungsstufe von Indikatoren dieser Gattung bedeutet der von der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt ausgearbeitete Glimmlampenindikator, welcher statt Funken Lichtbildaufzeichnung anwendet. Das Prinzip und eine Versuchsausführung dieses Indikators stammen von R. Brandt und H. Viehmann her, während die Entwicklung zum betriebsbrauchbaren Gerät der Zusammenarbeit von F. A. F. Schmidt, W. Bauer, W. Geh, B. Popp, M. Scheuermeyer und E. Urbach zuzuschreiben ist. Die Arbeitsweise ist aus Abb. 249—252 ersichtlich. Eine Glimmlampe mit punktförmiger Lichtquelle (etwa 0,5 bis 1.0 mm \varnothing), welche durch eine Sammellinse noch

mehr zusammengezogen wird) und hoher Flächenhelligkeit wirft durch ein Objektiv einen Lichtpunkt auf das lichtempfindliche Papier einer Aufzeichentrommel, die mit Kurbelwellendrehzahl angetrieben wird. Die Glimmlampe wird durch das Druckvergleichselement so lange eingeschaltet, wie der Druck im

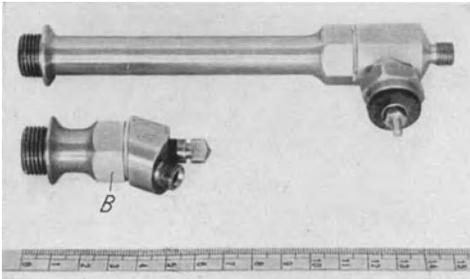


Abb. 249. Druckvergleichselemente zum DVL-Glimmlampenindikator.

Zylinder den durch das Regelventil einstellbaren Gegendruck übersteigt, und beleuchtet während dieser Zeit die umlaufende Trommel. Der Lichtstrahl wird auf der Trommel mittels eines drehbaren Spiegels durch eine Bourdon-Röhre verhältnismäßig dem eingestellten Gegendruck verschoben, wodurch der Druckmaßstab des

Diagrammes eindeutig festgelegt ist. Bei jeder Umdrehung der Kurbelwelle wird also ein Strich gezeichnet, dessen Abstand von der Abszissenachse verhältnismäßig dem jeweils eingestellten Gegendruck ist und dessen Länge angibt, während welchem Bruchteil der Kurbelumdrehung

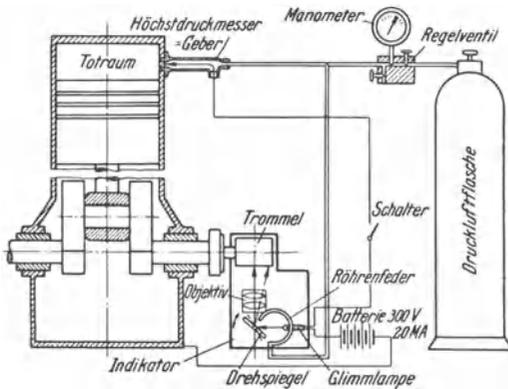


Abb. 250. Anordnung des Glimmlampenindikators der DVL.

der Druck im Motor größer als der Gegendruck war. Ändert man im Bereich der im Motor auftretenden Drücke den Gegendruck von Umdrehung zu Umdrehung um ein Geringes, so erhält man eine aus Strichen zusammengesetzte Fläche, deren Umgrenzung den Mittelwert aus einer Anzahl von Zeit-Druckdiagrammen darstellt. Die Kennzeichnung der aufgeschriebenen Drücke geschieht in einfacher Weise durch Eichlinien, die durch Betätigung einer Drucktaste in das Diagramm eingezeichnet werden. Die Aufzeichnung des Totpunktes auf dem Diagramm erfolgt durch eine Kontaktscheibe, die unmittelbar auf der Kurbelwelle des Verbrennungsmotors angebracht ist. Die Bedienungsvorrichtungen wie Druckregelventil, Schalter, Eich-taste und Manometer sind in einem Schaltkasten zusammengefaßt. In diesem sind gleichzeitig Überwachungslampen eingebaut, um das Arbeiten der Höchstdruckmesser und der Totpunktgebung beobachten

zu können. Damit ist die Möglichkeit geschaffen, die auftretenden Höchstdrücke jedes einzelnen Zylinders während des Betriebes auch ohne Diagrammaufnahme unmittelbar festzustellen.

Das Druckvergleichselement enthält ein Membran von 9 mm \varnothing und 0,1 mm Dicke, deren Eigenschwingungszahl etwa 1000 Hz ist. Bis zu

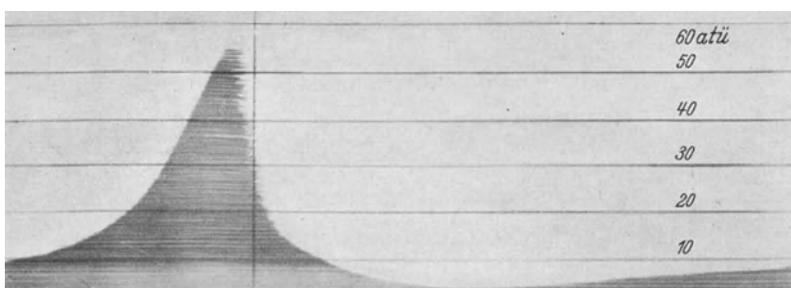


Abb. 251. Ein mit dem DVL-Indikator aufgenommenes Diagramm.

50 at hat sich Berylliumbronze vorzüglich erwiesen, oberhalb dieser Drücke wurde in Dieselmotoren eine Stahlmembran angewendet. Der für die Kontaktgebung notwendige Druckunterschied beträgt nur etwa 0,1 bis 0,3 at und bleibt bei den vorkommenden Betriebstemperaturen und -drücken annähernd gleich. Das Element wird mit Kerzengewinde versehen und kann in eine Kerzenöffnung im Zylinderkopf eingeschraubt werden. Mit Rücksicht auf die jeweilige Einbaumöglichkeit wurden verschiedene Ausführungsformen des Druckvergleichselementes entwickelt.

Der Ausbildung des Gerätes als Mehrzylinderindikator wurde besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Während im Einzylinderindikator die Trommel unmittelbar von der Kurbelwelle angetrieben wird (wobei es erforderlich ist, die Trommel nahe bei der Maschine aufzustellen), wird in der Mehrzylinderanordnung die Trommel von der untersuchten Maschine getrennt aufgestellt und durch einen elektrischen Fernantrieb angetrieben. Dadurch werden die Erschütterungen der Maschine von der optischen Einrichtung ferngehalten.

Der elektrische Fernantrieb besteht aus einem Drehstromgenerator, welcher am Versuchsmotor angebaut ist, und aus einem Drehstrommotor, welcher die Trommel antreibt. Große Maschinen von 0,5 bis 1,0 PS Leistung werden angewendet, um einen einwandfreien Gleichlauf der Anlage sicherzustellen. Durch Gleichstromerregung der Anlage wird erreicht, daß der Antriebsmotor für die Indikatortrommel jederzeit während des Laufes des Versuchsmotors ein- und ausgeschaltet werden kann und eine bequeme Bedienung der Indikatortrommel während der Versuche möglich ist.

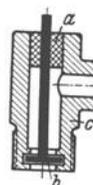


Abb. 252.
Schema des Ventilgebers.
a Isolation;
b Unterbrecherventil;
c Druckluftanschluß.

Bei der Aufnahme der Diagramme wird zunächst ein Gegendruck eingestellt, der etwa 10 at über den Höchstdrücken des Motors liegt. Durch gleichmäßiges Senken des Gegendruckes auf 0 atü (etwa 1 at in 1 s) wird das Diagramm gezeichnet. Beim Absinken des Druckes werden — zweckmäßig von 10 at zu 10 at — durch kurzes Drücken der Eichtaste die entsprechenden Eichlinien in das Diagramm eingezeichnet. Der Druckmaßstab des Diagrammes kann weitgehend verändert werden. Er wird damit den Höchstdrücken verschiedener Motoren (Diesel- und Vergasermotoren mit oder ohne Aufladung) angepaßt. Der Indikator ist auch für die Aufnahme von Niederdruckdiagrammen eingerichtet. Der Druckmaßstab für die Schwachfederdiagramme kann in weiten Grenzen verändert werden, so daß einerseits die Aufzeichnung des

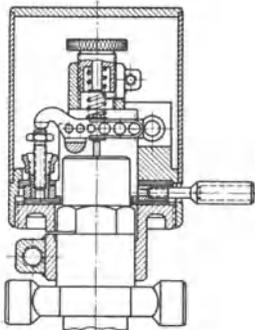


Abb. 253.
DVL-Spritzzeitmeßgerät.

eigentlichen Gaswechselforganges im Zylinder in großem Maßstab (etwa von $-0,5$ bis $+1,0$ atü) möglich ist und andererseits bei größerem Druckbereich die Vorgänge beim Öffnen der Auslaßorgane mit erfaßt werden können. Infolge des obenerwähnten Druckunterschiedes, welcher zur Bewegung der Membran notwendig ist, wird für Schwachfederdiagramme zweckmäßig der DVL-Ventilgeber (Abb. 252) verwendet.

Bei Motoren mit unterteiltem Brennraum (Vorkammer, Wirbelkammer, Luftspeicher) ist die Aufnahme von Differenzdruckdiagrammen wünschenswert; dieselbe kann in verschiedener Weise erfolgen. Der Druckverlauf der Teilbrennräume kann bei gleichen Betriebsverhältnissen nacheinander auf das Diagramm aufgezeichnet werden; infolge der verschiedenen Schwärzung der übereinander gezeichneten Diagramme erhält man den Verlauf der Differenzdrücke innerhalb eines Arbeitsspieles. Es kann der Druckunterschied bei entsprechender Schaltung aber auch unmittelbar aufgenommen werden.

Der Spritzbeginn und die Spritzdauer bei Einspritzmotoren können am laufenden Motor in Verbindung mit der Aufnahme von Indikator-diagrammen mit dem DVL-Einspritzzeitmeßgerät (Abb. 253) aufgezeichnet werden. Die Düsenfühlnadel wirkt auf einen Kontakthebel, der den Strom der Indikatorlampe während des Spritzvorganges ausschaltet.

Ohne die optische Einrichtung kann das Gerät als ein einfacher Höchstdruckindikator benutzt werden; tatsächlich ist auch der beschriebene aufzeichnende Indikator aus einem solchen einfachen Gerät entwickelt worden.

Es wurde schon erwähnt, daß die punktweise aufzeichnenden Indikatoren hauptsächlich für die Untersuchung von periodisch wiederkehrenden Kreisprozessen anwendbar sind. Es ist jedoch möglich, wenn

auch etwas umständlich, mit diesem Verfahren nur einmal auftretende, sog. Übergangsvorgänge zu untersuchen, z. B. Verbrennungsdruckvor-

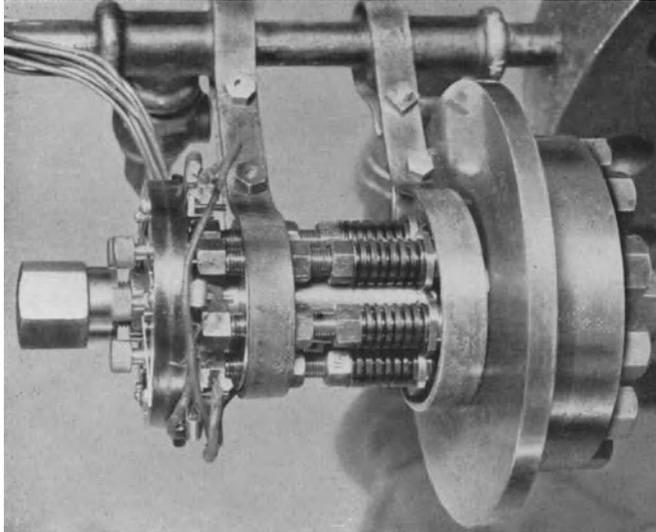


Abb. 255. Druckelement zum Indikator nach Schweitzer, The Pennsylvania State College, für Einspritzleitungen.

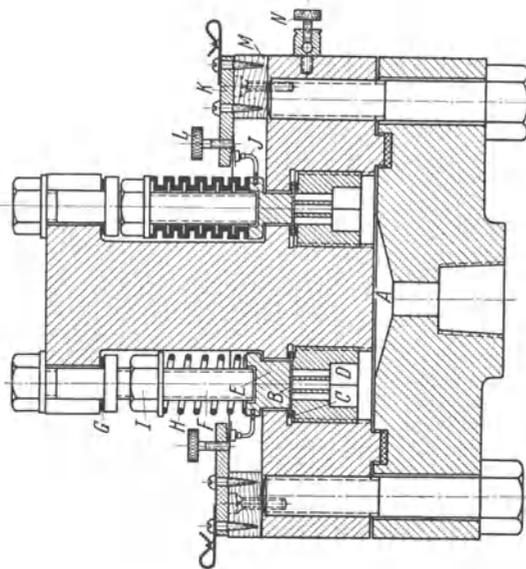


Abb. 254.

A Brennstoffraum; B Stahlmembran; C Dichtungsring; D Klemmschraube; E Stempel; F Bolzen für die Begrenzung der Stempelbewegung; G Unterlegscheibe; H Feder (für niedrige Drücke werden Schraubenfedern, für hohe Drücke Scheibenfedern nach Hesselman angewendet); I Federspannmutter; J elektrischer Kontakt; K Isolierplatte; L Einstellschraube für J; M Isolierring; N geerdete Klemme.

gänge, welche in einer Verbrennungsbombe sich abspielen. Es ist denkbar, auf einer Verbrennungsbombe eine Anzahl Druckvergleichselemente anzubringen, von denen jedes stufenweise, durch je einen verschiedenen Gegendruck belastet wird. Durch eine geeignete Schaltung von Licht-

indikatoren wird es dann möglich, auf einer sich drehenden Trommel die Zeitpunkte aufzuzeichnen, in welchen diese Drücke beim Druckanstieg überschritten und beim Druckabstieg unterschritten werden. Man würde also im allgemeinen von jedem Druckvergleichselement zwei Diagrammpunkte erhalten, welche für die Bestimmung des Vorganges als Anhaltspunkte dienen könnten. Eine derartige Anwendung wurde im Fachschrifttum noch nicht veröffentlicht.

Ein ähnliches Verfahren wurde aber für die Untersuchung von Einspritzdruckvorgängen von Schweitzer (The Pennsylvania State College)

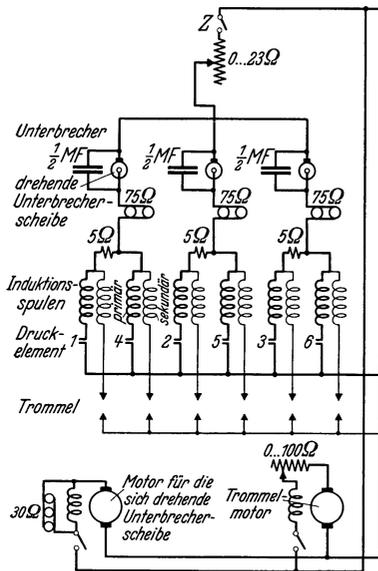


Abb. 256.

Schaltbild für den Indikator nach Schweitzer.

ausgearbeitet. Die Druckvergleichselemente sind in diesem Falle federbelastete Stahlmembranen, wie diese in Abb. 254 bis 256 dargestellt werden. Wenn der der jeweiligen Federkraft entsprechende Druck überschritten wird, wird die Membran samt dem daran sitzenden Kolben um einen kleinen Betrag (etwa 0,15 mm) verschoben, was aber genügt, einen elektrischen Kontakt zu betätigen und zwischen einer Schreibspitze und einer rotierenden Trommel eine andauernde Funkenreihe zustande zu bringen, welche solange anhält, bis der Öldruck höher als der eingestellte Gegendruck ist.

Zu jedem Druckvergleichselement gehört eine Schreibspitze, welche neben der Trommel, parallel zu deren Achse, in den Gegendrücken verhältnismäßigen Abständen eingestellt wird. Während einer Druckänderung wird also auf einem auf der Trommel befestigten Papierband durch jede Schreibspitze je eine Funkenlochreihe erzeugt, deren Anfangs- und Endpunkte die Zeitspanne angeben, während welcher der Einspritzdruck höher als der Gegendruck für das betreffende Druckvergleichselement eingestellt war. Das elektrische Schaltschema zeigt Abb. 256. Das häufige Reißen der Stahlmembran ist ein Nachteil dieses Gerätes. Versuchsergebnisse wurden nicht veröffentlicht.

Mittels der bisher beschriebenen punktweise aufzeichnenden Indikatoren erhält man die Druckwerte als Funktion des Kurbelwinkels. Das Druckvolumendiagramm kann man daraus zeichnerisch bestimmen, wobei natürlich die genaue Totpunktstellung und das Verhältnis Kurbel-

radius zu Pleuelstangenlänge berücksichtigt werden muß. Die Umzeichnung kann aber auch maschinell, mit Hilfe eines Umzeichnungsgerätes durchgeführt werden. Ein derartiges, von de Courcy angegebene Gerät wird in Abb. 257 dargestellt.

Indiziereinrichtungen mit phasenweiser Aufzeichnung des Diagrammes sind auch mit mechanischer Betätigung des Schreibhebels (statt elektrischer Aufzeichnung) denkbar. Obwohl bis jetzt keine tatsächliche Ausführung solcher Indikatoren in dem Fachschrifttum veröffentlicht wurde, sei ein derartiger Entwurf kurz beschrieben.

Das DRP. 274935 (1913) von Ernst Spohrleder beschreibt einen Indikator, in welchem der federbelastete Druckmeßkolben dem eingestellten Gegendruck ausgesetzt ist (also einem gleichbleibenden oder sich langsam ändernden Druck), während ein Hilfskolben auf der einen Seite durch den erwähnten Gegendruck, auf der anderen Seite durch den veränderlichen Zylinderdruck belastet wird.

Der Hilfskolben kann nur eine geringe, begrenzte Bewegung ausführen; diese Bewegung findet immer in demjenigen Augenblick statt, in welchem der Zylinderdruck den eingestellten Gegendruck eben über- oder unterschreitet. Durch eine Hebelanordnung wirkt der Hilfskolben so auf den Schreibstift ein, daß bei jeder Bewegung des Hilfskolbens derselbe für einen Augenblick an die Trommel angedrückt wird. Durch allmähliche Änderung des Gegendruckes wird also das Diagramm punktweise aufgenommen.

In der anderen Gruppe von punktweise aufzeichnenden Indikatoren wird das Diagramm von Phase zu Phase aufgebaut, d. h. die Phase ist die unabhängige Variable und der dazu gehörige Druck die abhängige, gesuchte Veränderliche. Im Vergleich mit den Indikatoren der ersten

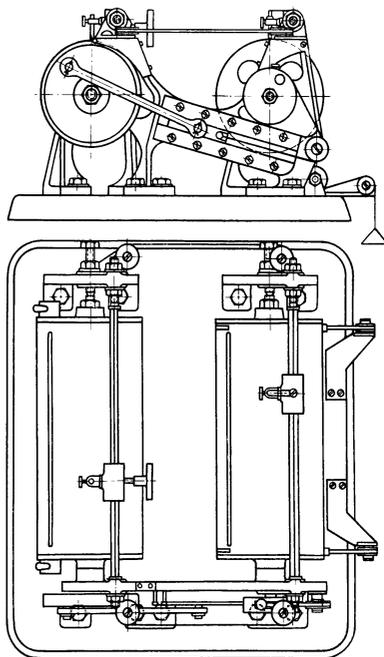


Abb. 257. Gerät für die Umzeichnung eines Druck-Kurbelwinkeldiagrammes in Druck-Volumen-Diagramm, nach de Courcy, hauptsächlich für den Farnborough-Indikator bestimmt. An der linken Trommel wird das Druck-Kurbelwinkeldiagramm, auf der rechten Trommel wird das Druck-Kolbenwegdiagramm erhalten. Die beiden Trommeln werden miteinander durch einen Kurbeltrieb und ein Antriebsband verbunden. Durch ein Gewicht, welches eine um die Trommel geschlungene Schnur anspannt, wird das Stahlband in gespanntem Zustand gehalten. Die Schlitten für die Schreibspitzen werden miteinander durch ein endloses Band verbunden, das über vier Rollen geführt wird.

Gruppe benötigen diese Geräte keinen Hilfsvorrat eines Druckmediums und keine elektrische Hilfsapparatur für die Aufzeichnung. Das Druckdiagramm kann entweder als Funktion des Kurbelwinkels oder des Kolbenweges aufgezeichnet werden. Der Ausgleichsdruck wird von der untersuchten Maschine selbst geliefert; ein normaler, mechanisch aufzeichnender Indikator kann zum Aufzeichnen dienen. Der wesentliche

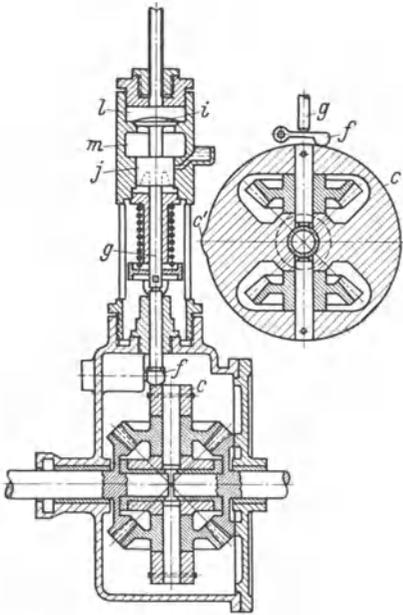


Abb. 258. Indikator von de Dion-Bouton. Der auf das Ventil *i* wirkende Druck wird durch den auf den Entlastungskolben *j* wirkenden Druck ausgeglichen. Wenn das Ventil geöffnet wird, treten die Räume *l* und *m* in Verbindung; einer von diesen ist an den Zylinderraum der untersuchten Maschine, der andere an den Druckindikator angeschlossen. Das Ventil wird durch den am Käfig angebrachten Nocken *c'* betätigt. *g* Ventilstange; *f* Nockenhebel; *C* Käfig.

Bestandteil der Indikatoren dieser Art ist der Phasenwählschalter, auch stroboskopisches Ventil genannt, welches von der zu untersuchenden Maschine selbst zwangsläufig angetrieben wird und in der vorausbestimmten Phase der aufeinanderfolgenden Kreisprozesse die Verbindung zwischen dem Maschinenzylinder und dem Druckmeßgerät herstellt. Diese Verbindung dauert nur einen kleinen Bruchteil des Kreisprozesses, während dessen der Gasdruck genügend genau als gleichbleibend angesehen werden kann. Das Druckmeßgerät wird dann den in dem Maschinenzylinder in der betreffenden Phase herrschenden Druck aufzeichnen. Durch Änderung der Öffnungsphase des Phasenwählschalters in bezug auf den Kreisprozeß der untersuchten Maschine kann ein anderer Druckwert bestimmt und in dieser Weise können nach und nach die Drücke in allen Kreisprozeßphasen ermittelt werden. Die Änderung der Öffnungsphase des Phasenwählschalters kann durch ein Planetengetriebe bewirkt werden, das ähnlich wie das

Differentialgetriebe eines Kraftwagens gebaut ist. Durch eine entsprechende kinematische Verbindung zwischen dem Phasenwählschalter und der Indikatortrommel kann der Druckvorgang als die Funktion entweder des Kurbelwinkels oder des Kolbenweges der Maschine aufgezeichnet werden. Da die Bewegung sowohl des Indikatorkolbens als auch der Trommel von der Änderung der untersuchten Phase abhängig ist, daher beliebig verlangsamt werden kann, wird durch dieses Druckmeßverfahren ein Trägheitsfehler vollkommen ausgeschaltet.

Dieses Verfahren ist mit der stroboskopischen Beobachtung von periodisch wiederkehrenden Hochfrequenzerscheinungen vergleichbar,

welche in der Elektrotechnik (Wechselstromerscheinungen) und auch in anderen Gebieten der Physik und Mechanik viel angewendet wird. Es kann als deren mechanische oder besser pneumatische Analogie angesehen werden.

Ein auf dieser Grundlage beruhendes Indizierverfahren wurde schon 1904 in der amerikanischen Patentschrift 754287 (auch DRP 16900 vom Jahre 1906) von A. de Dion und G. Bouton beschrieben (Abb. 258). Ein Tellerventil wird hierbei durch einen Nocken betätigt, welcher an dem Gehäuse eines Planetengetriebes angebaut ist. Jedoch findet sich im technischen Schrifttum keine Erwähnung von Untersuchungen, die mit dieser Indiziereinrichtung ausgeführt wurden.

Die Indiziereinrichtung nach de Juhasz wurde 1915 erfunden und zum ersten Male 1919 erbaut. Dieses Gerät beruht auch auf dem Prinzip des Stroboskops, es wurde aber unabhängig von jeglichen Vorläufern erdacht und ist in seiner Bauweise hievon ganz verschieden. Da dieses Gerät die erste Verwirklichung des stroboskopischen Druckmeßverfahrens darstellt, mit welchem auch Untersuchungen an Schnellläufermaschinen ausgeführt worden sind, sei es im folgenden beschrieben.

Der ursprüngliche Gedanke der de Juhasz-Indiziereinrichtung wird in der Patentschrift DRP 365636 von 1919 eingehend dargestellt. Als Steuerorgan dienen zwei ineinander angeordnete zylindrische Drehschieber (Abb. 259, 260), deren einer — *I* — von der untersuchten Maschine zwangsläufig angetrieben wird, während der andere — *II* — von Hand bewegt wird. Die Bewegung der Indikatortrommel wird von dem Schieber *II* in der in Abb. 259, 260 angegebenen Weise abgeleitet.

Im folgenden wird die voll entwickelte Ausführungsform des Gerätes beschrieben, welches in zahlreichen Versuchsanstalten für eine Reihe von Untersuchungen laufend benutzt wird (Abb. 260).

Das Gerät besteht aus den folgenden vier Bestandteilen:

1. Einem Schreibhebelindikator normaler Ausführung, mit austauschbarem Zylinder, Kolben, Federn und mit der normalen Trommel. Da

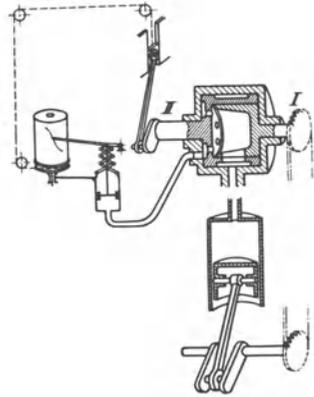


Abb. 259. Indiziereinrichtung nach de Juhasz, mittels doppeltem Drehschieber. Welle *I* wird von der untersuchten Maschine angetrieben, Welle *II* wird von Hand gedreht; von der Welle *II* wird auch die Trommelbewegung abgeleitet.

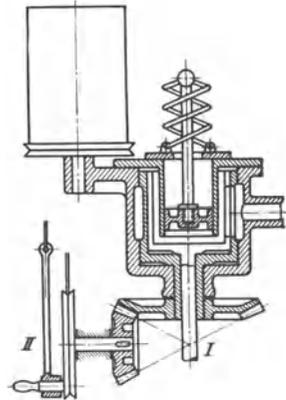


Abb. 260. Abänderung, bei welcher der Druckindikator in das Gehäuse des Drehschiebers eingebaut ist.

eine Trägheitswirkung nicht auftritt, wird zweckmäßig eine Indikator-type benutzt, welche möglichst große Diagramme ergibt.

2. Das stroboskopische Steuerorgan (Abb. 261), welches als Doppelrohrschieber ausgebildet ist. Diese Bauweise wurde gewählt, um rasche Eröffnung und Schluß, d. h. kurze Öffnungsdauer und während der Öffnungsdauer einen ausreichenden Öffnungsquerschnitt zu erreichen. Leckverluste werden durch peinlich genaue Werkstattarbeit vermieden, das Spiel zwischen den Schieberelementen ist in der Größenordnung

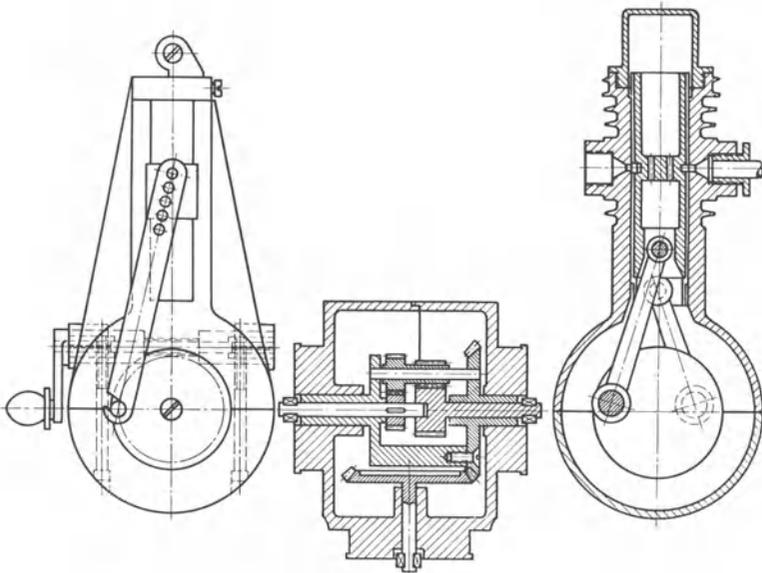


Abb. 261. Phasenwähler der de Juhasz-Indiziereinrichtung. Steuerorgan (rechts), Phasenverstellorgan (Mitte), Trommelantrieb (links).

von 0,005 mm, dazu kommt noch die dichtende Wirkung der Schmierölschicht. Die beiden Schieber (der äußere Hülsenschieber und der innere Kolbenschieber) erhalten ihre Bewegung durch je eine Pleuelstange von einer gekröpften Welle, welche von der „Sekundärwelle“ des Phasenverstellorganes angetrieben wird. Wenn die beiden Kurbeln miteinander einen Winkel von 180 Grad einschließen, finden während jeder Umdrehung der gekröpften Welle zwei Öffnungsperioden statt. Wenn beide Kurbeln miteinander einen kleineren Winkel als 180 Grad einschließen, ergibt sich je Umdrehung der gekröpften Welle nur eine einzige Öffnungsperiode. Beide Anordnungen können angewendet werden. Die beiden Schieber bewegen sich in einem mit Kühlrippen versehenen luftgekühlten Zylinder, welcher zwei Anschlußöffnungen besitzt, deren eine mit dem Zylinderraum der zu untersuchenden Maschine in Verbindung steht, während die andere an den Indikatorzylinder angeschlossen wird. Die

erste Rohrleitung soll möglichst kurz und weit sein, um Gasschwingungen zu vermeiden. Die zweite Rohrleitung kann beliebig lang sein; ihre Länge beeinflusst nicht die Richtigkeit des Diagrammes, sondern lediglich die Zeitdauer für die Auffüllung des Indikatorraumes.

3. Das Phasenverstellorgan (Abb. 261) ist ein Planetengetriebe, das in ein Gehäuse eingebaut ist, aus welchem drei Wellenenden herausragen, die Primär-, Sekundär- und Tertiärwelle. Die Primärwelle wird unmittelbar von der Kurbelwelle der zu untersuchenden Maschine zwangs-

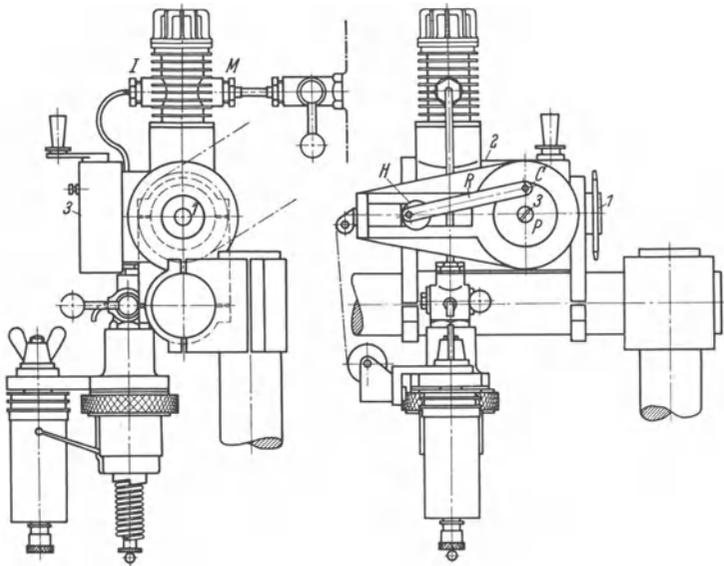


Abb. 262. Allgemeine Anordnung der de Juhasz-Indiziereinrichtung. *I* Anschluß zum Indikator; *M* Anschluß zur Maschine; *1* Primärwelle; *2* Sekundärwelle; *3* Tertiärwelle; *H* Kreuzkopf; *C* Kurbel; *R* Pleuelstange; *P* Phasenscheibe.

läufig durch Ketten, Stirn- oder Kegelräder angetrieben. Die Sekundärwelle wird, wie oben erklärt, mit der Kurbelwelle des Steuerorganes gekuppelt. Der Tertiärwelle kann durch eine Handkurbel und ein Schneckengetriebe eine Bewegung erteilt werden. Die Sekundärwelle führt eine Drehbewegung aus, welche der Summe der Bewegungen der Primär- und der Tertiärwelle entspricht. Wird also die Tertiärwelle nicht bewegt, so bleiben Sekundärwelle und Primärwelle, d. h. also auch die Maschinenwelle, dauernd in Phase, die Öffnungsperiode findet dann immer in derselben Phase der aufeinanderfolgenden Kreisprozesse statt. Wird aber die Tertiärwelle um einen bestimmten Winkel verdreht, so findet die Öffnung des Steuerorganes in einer um demselben Winkel geänderten Kreisprozeßphase statt.

4. Der Trommelantrieb (Abb. 261) wird von der Tertiärwelle abgeleitet. Er besteht aus einem Kurbeltrieb von veränderlicher Pleuel-

stangenlänge. Das Verhältnis Kurbelradius zu Treibstangenlänge wird so eingestellt, daß es mit dem Verhältnis bei der zu untersuchenden Maschine übereinstimmt. Die Indikatortrommel erhält ihre Bewegung vom Kreuzkopf dieses Kurbeltriebes durch einen Schnur- oder Drahtantrieb.

Die drei Elemente 2, 3 und 4 bilden den Phasenwählschalter und sind in eine Einheit so zusammengebaut, daß die Lage der Elemente gegeneinander geändert werden kann, um das Gerät verschiedenen Anord-

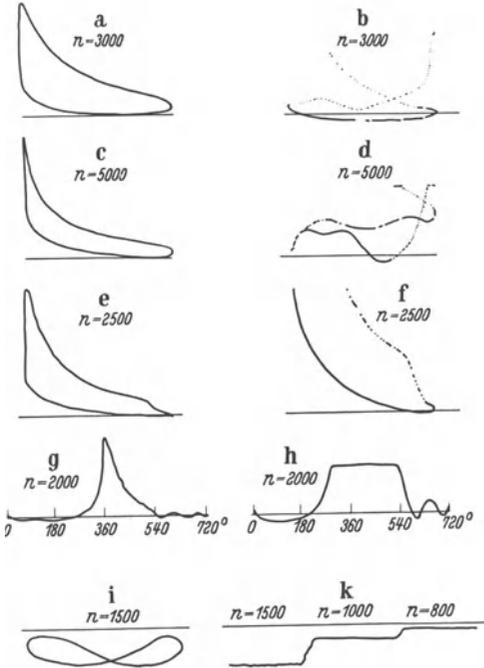


Abb. 263.

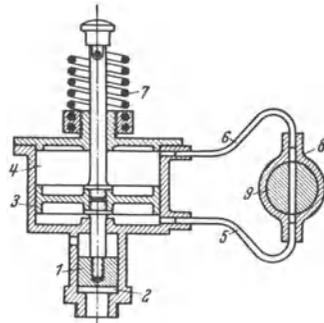


Abb. 264.

Abb. 263 a—k. Mit der de Juhasz-Indiziereinrichtung aufgenommene Diagramme (Maßstab etwa 1 : 4). a und b Starkfeder- und Schwachfeder-Diagramme von einem normalen Kraftwagenmotor. c und d Starkfeder- und Schwachfeder-Diagramme von einem Motor mit Überladung. e und f Starkfeder- und Schwachfeder-Diagramme von einem Zweitaktmotor. g und h Starkfeder- und Schwachfeder-Diagramme mit Kurbelwinkel als Abszisse. i Diagramm von einem Vergaser, mit einer sehr schwachen Feder aufgenommen. k Diagramm von der Saugleitung eines Motors, mit unveränderter Phase (Totpunktstellung), unter drei verschiedenen Betriebsbedingungen.

Abb. 264. Indikator nach de Juhasz mit hydraulischem Verschuß. Auf den Druckmeßkolben wirkt der zu untersuchende Zylinderdruck und die Federkraft der Meßfeder 7. Auf der Kolbenstange sitzt der hydraulische Kolben 3, welcher im Zylinder 4 sich bewegt. Der Zylinder 4 ist an beiden Seiten des Kolbens 3 mit Flüssigkeit gefüllt; die beiden Seiten sind miteinander durch den Phasenwählschalter 8, 9 und die Rohrleitungen 5, 6 in Verbindung. Eine Bewegung des Kolbens 3 (und daher auch Kolbens 1) wird so lange verhindert, als der Phasenwählschalter geschlossen ist; der Kolben wird nur für die Zeitdauer freigegeben, während der der Phasenwählschalter geöffnet ist.

nungen der zu untersuchenden Maschinen anpassen zu können (Abb. 262). Auch ist es möglich, die drei Elemente voneinander getrennt aufzustellen, falls dies für die Maschinenanlage vorteilhaft ist. Dieser hohe Grad von Anpassungsfähigkeit ist wertvoll, weil beim Entwurf der Motoren auf bequemes Indizieren meistens nicht geachtet wird. Der Indikator selbst kann entfernt von der Maschine aufgestellt werden. Dieses Gerät wurde bis zu 6000 U/min (der Höchstdrehzahl der unter-

suchten Rennmaschine) und auch für Gasprobenentnahme mit Erfolg angewendet. Einige Diagramme zeigt Abb. 263.

Die Patentschriften von de Juhasz beschreiben auch Abänderungen die Indiziereinrichtung. In DRP. 417073 wird eine Anordnung

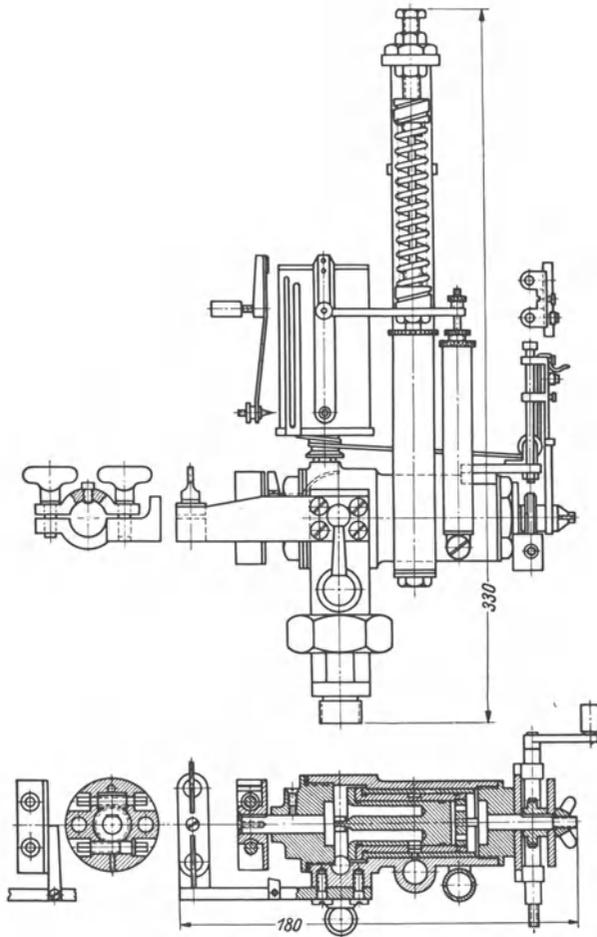


Abb. 265. Steuerorgan des Indikators nach Gale, mit Doppeldrehschieber und einstellbarer Kupplung.

beschrieben, in welcher der Zylinderdruck unmittelbar auf den Indikator-
kolben einwirkt, aber die Bewegung des Indikator-
kolbens durch einen hydraulischen Verschluß verhindert wird. Der Verschluß wird durch ein
Steuerorgan, wie oben beschrieben, in einer verstellbaren Phase frei-
gelassen (Abb. 264). Jedoch entspricht die einfache Ausführung mit der
oben beschriebenen Doppelschieberanordnung, wie sie in Patentschrift

DRP. 413368 ausführlich dargestellt ist, den meisten praktischen Anforderungen.

Es gibt auch andere Arten von Phasenwählerschaltern. Das DRP. 458772 von Jan Szal beschreibt ein Steuerorgan, das aus zwei flachen

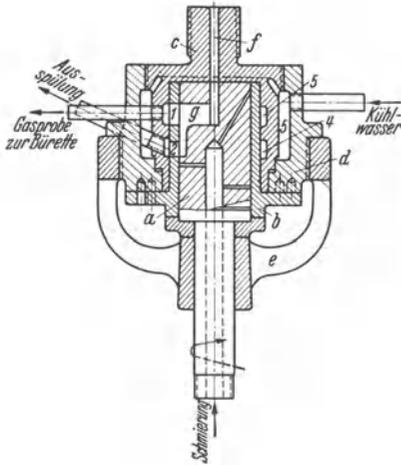


Abb. 266. Doppeldrehschieberanordnung von Geissler (T.H. Dresden) für Gasprobenentnahme. *a* Drehkolben, von der Maschine angetrieben; *b* Büchse, mit der Hand von 5° zu 5° verstellbar; Körper *c* wird mit Stück *d* verschraubt, wodurch der Kühlraum 5 gebildet wird; das Stück *e* bildet den Rahmen und dient für die Lagerung der Welle *a*. Der Körper *c* wird in den Zylinderkopf eingeschraubt und führt das Gas durch Bohrung *f* zum Kanal *g* und zu den Schlitten 1 und 2, von dort gelangt das Gas zu den Ringräumen 4; in einer angeschlossenen Bürette werden die Proben gesammelt. Vor jeder Probenentnahme wird der schädliche Raum des Gerätes durch den Schlitz 2 ausgespült, welcher um Schlitzbreite entgegengesetzt der Drehrichtung gegen den Schlitz 1 versetzt ist. Die Kühlung dient auch zum Abschrecken der Gase und zum Vermeiden des Nachbrennens.

einrichtung dieser Art ist z. B. in der USA.-Patentschrift 1349346 von D. G. Roos beschrieben.

Ein Steuerorgan mit doppeltem Rohrschieber wurde von Geissler (Techn. Hochsch. Dresden) auf den Vorschlag von Prof. Pauer (Abb. 266) für die Entnahme von Gasproben bei einer Untersuchung eines schnelllaufenden Zweitaktmotors mit Erfolg angewendet. Die Einzelheiten der Schieberanordnung sind aus der Abbildung zu ersehen. Eine interessante Besonderheit dieser Anordnung ist die Möglichkeit der Ausspülung vor jeder Probeentnahme, die sie für den obengenannten Zweck besonders geeignet macht. Um Abnutzung und Heißwerden der Apparatur zu vermeiden, empfiehlt es sich, diese Vorrichtung nur bei

Kegeldrehschiebern besteht und das britische Patent 303274 von C. R. Arcus beschreibt ein flaches Drehscheibenventil, bei welchem zur Abdichtung die Schieberflächen durch Federkraft aufeinandergepreßt werden. Das DRP. 347840 der „Liebra“ Motorenengesellschaft bezieht sich auf einen den Motor Kolben umgebenden Rohrschieber, in welchem eine Anzahl Öffnungen angeordnet sind. Diese Öffnungen überdecken eine andere Reihe von Öffnungen, welche in der Zylinderwand derart angeordnet sind, daß die Überdeckungen in verschiedenen Phasen erfolgen. An jede Öffnung in der Zylinderwand ist ein besonderes Druckmeßgerät angeschlossen. Auf diese Weise werden vom Kreisprozeß eine Anzahl Stichproben genommen; eine Phasenverstellung ist nicht vorgesehen.

Eine Indiziereinrichtung mit zwei zylindrischen Drehschiebern wurde C. H. Gale patentiert (Britisches Patent 192, 551 — 1928) und auch in den Handel gebracht (Abb. 265). Eine weitere Indizier-

Vornahme einer Messung einzuschalten. Da der Schieber in einem bestimmten Phasenverhältnis mit der Maschine laufen muß, kann die

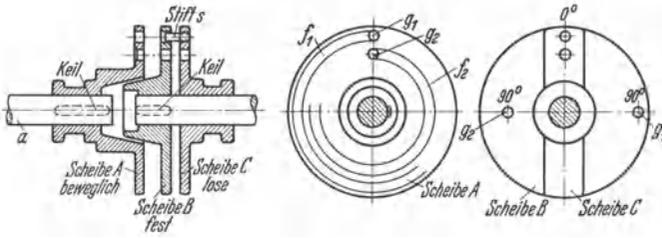


Abb. 267. Stellungs-kupplung nach Geissler. Erst wird Scheibe A eingerückt, dadurch wird B und mit dieser durch Stift s, der in das in B befindliche Loch g_1 eingreift, auch C mitgenommen; um die beiden Wellen in bestimmter Winkelstellung zueinander kuppeln zu können, wird die Scheibe C nach links gerückt; dadurch drückt der Stift, der aus der Scheibe B heraustritt, auf die Scheibe A und hebt die Pressung zwischen A und B zum Teil auf, wodurch A und B eine geringe Relativdrehung gegeneinander erfahren. Bei weiterem Einrücken der Scheibe C nach links dringt der Stift s, geführt in der konzentrischen, schraubenförmig verlaufenden Führung f_1 allmählich in die Scheibe A ein, bis zum Anschlag im Loch g_1 , womit die gewünschte Kupplung erreicht ist.

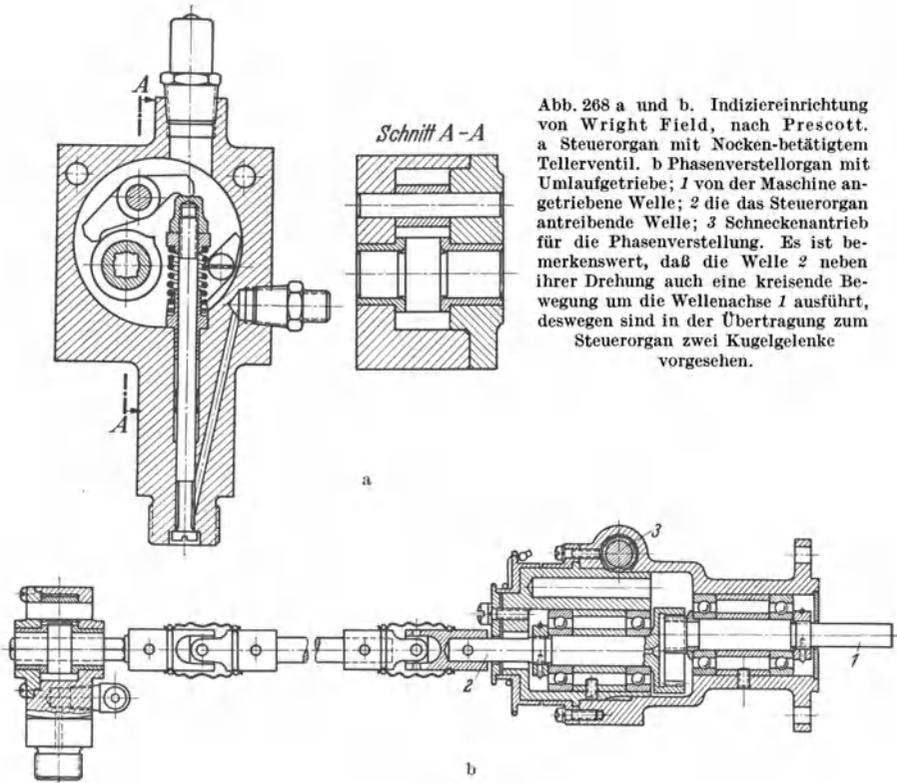


Abb. 268 a und b. Indiziereinrichtung von Wright Field, nach Prescott. a Steuerorgan mit Nocken-betätigtem Tellerventil. b Phasenverstellorgan mit Umlaufgetriebe; 1 von der Maschine angetriebene Welle; 2 die das Steuerorgan antreibende Welle; 3 Schneckenantrieb für die Phasenverstellung. Es ist bemerkenswert, daß die Welle 2 neben ihrer Drehung auch eine kreisende Bewegung um die Wellenachse 1 ausführt, deswegen sind in der Übertragung zum Steuerorgan zwei Kugelgelenke vorgesehen.

Ein- und Ausschaltung nicht durch eine gewöhnliche Reibkupplung geschehen; für diesen Zweck wurde von Geissler eine sog. Stellungs-

Abb. 269. Gasproben-Entnahmevorrichtung nach Klüsener. *a* Gasprobenventil; *a* Wassergekühltes Gehäuse; *b* Tellerventil; *e* Ventillfeder; *d* Winkelhebel; *e* verstellbare Druckschraube; der Hals des Deckels *f* und die Gummihülse *g* dichten den Gaskanal ab. Ein Stahlband verbindet das Ventil mit seiner Antriebsvorrichtung.

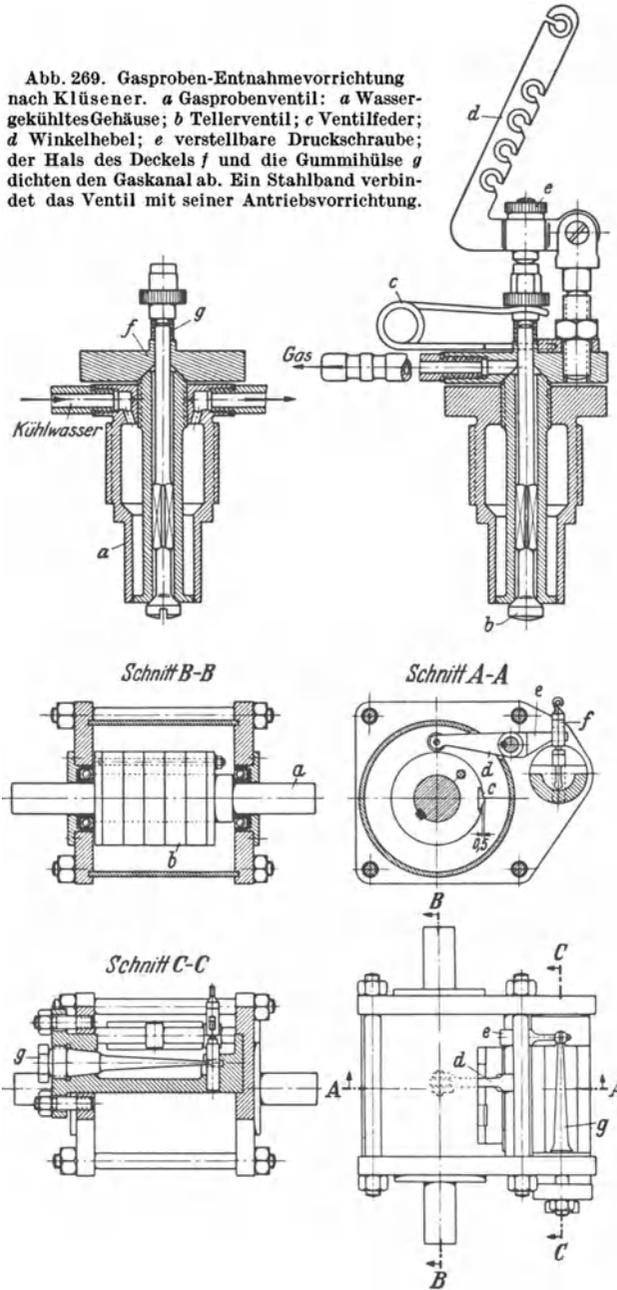


Abb. 270. Antriebsvorrichtung zum Gasprobenventil (entworfen von Mehlig). Auf den Bolzen *a* sind mehrere Scheiben *b* aufgekeilt, auf denen die versetzten Nocken *c* angebracht sind. Der verschiebbare Hebel *d* kann somit bei verschiedenen Kurbelwinkeln betätigt werden. Der feste Hebel *e* überträgt die Hubbewegung auf den Antriebsbolzen *f*, in den das zum Gasprobenventil führende Stahlband eingehängt ist. Die Stabfeder *g* eines Maihak-Indikators holt den Bolzen und die Hebel zurück. Die Nocken *c* sind etwa 0,5 mm hoch; eine Änderung des Hubes ermöglicht der Bolzen *f*.

kupplung ausgearbeitet (Abb. 267), die es gestattet, die Verbindung zwischen Maschinenwelle und Entnahmeschieberwelle so vorzunehmen, daß die Totpunktlage beider übereinstimmt. Diese Stellungskupplung wird auch für den Antrieb von Schreibhebelindikatoren, z. B. für den Antrieb des Stabfederindikators von Maihak angewendet und ist schon früher beschrieben.

Die Indiziereinrichtung von Jacklin (USA.-Patent 1781013 — 1930) enthält ein Tellerventil als Steuerorgan, ähnlich dem Gerät von de Dion-Bouton. Ein Steuerorgan mit einem kleinen Tellerventil, welches in den Zylinderraum der untersuchten Maschine hereinragt, wurde in der amerikanischen Versuchsanstalt Wright Field von Prescott ausgearbeitet (Abb. 268a und b).

Ein wassergekühltes Tellerventil wurde von Klüsener (Techn. Hochsch. Hannover) für Gasproben benutzt, wobei das Ventil durch einen Winkelhebel und Schnurzug betätigt wird. Eine Anzahl Nocken in verschiedenen Phasenstellungen bewirken die Öffnung des Ventils in der jeweils gewünschten Phase (Abb. 269 und 270). Ein derartiges Gerät ist natürlich auch für Druckindizierung anwendbar.

Eine ähnliche Anordnung wurde auch von Withrow, Lovell und Boyd, General Motors Versuchsanstalt, für Verbrennungsuntersuchungen, benutzt.

Es gibt ferner Indiziereinrichtungen, in welchen das Steuerorgan elektromagnetisch betätigt wird. Der sog. „Pressure Detector“, d. h. Druckbestimmer, entwickelt von N. Y. Young in Verbindung mit Elliott Bros. Ltd. London, fällt in diese Gruppe. Der Strom wird durch eine an der Maschinenwelle angebrachte Kontaktscheibe gesteuert (Abb. 271a und b).

Eine weitgehend verbesserte Indiziereinrichtung dieser Art wurde von Cox entwickelt (USA.-Patent 1890601 — 1932), in welcher das

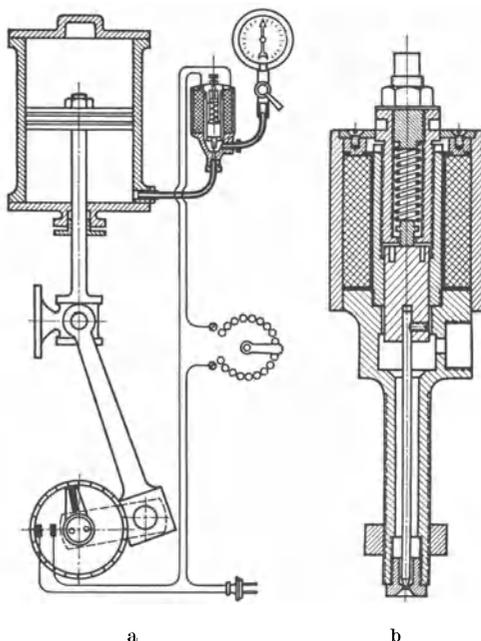


Abb. 271a u. b. Indiziereinrichtung nach Young (Elliott Bros., London) mit elektromagnetisch betätigtem Nadelventil. Eine Feder drückt das Ventil auf seinem Sitz; ein Solenoid wirkt auf den Eisenkern, welcher an der Ventilstange befestigt ist, und hebt dadurch das Ventil auf. Der Ventilhub wird mittels der in den Gehäusedeckel eingeschraubten Anschlagschraube geregelt.

elektromagnetisch betätigte Nadelventil mit einer Zündkerze vereinigt ist, wodurch die Notwendigkeit einer besonderen Bohrung am Zylinderkopf wegfällt (Abb. 272). Dieses Gerät wurde für die gleichzeitige Indizierung mehrerer Zylinder ausgebildet, wobei die Druck-Zeitdiagramme

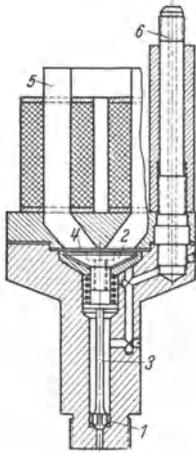


Abb. 272.

Abb. 272. Elektromagnetisch betätigtes Nadelventil zur Indiziereinrichtung nach Cox. 1, 3 Nadelventil; 2 Eisenkern; 4 Membran aus nicht-magnetischem Material; 5 Elektromagnet; 6 Anschlußrohr zum Druckmeßorgan.

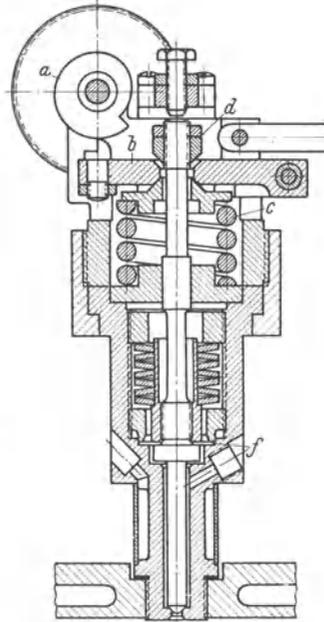


Abb. 273.

Abb. 273. Gasproben-Entnahmeventil der Langley Field Versuchsanstalt. Der Nocken *a* wird von der zu untersuchenden Maschine angetrieben; er drückt den Hebelarm *b* gegen die Spannkraft der Feder *c* nieder, wodurch in der Feder Energie aufgespeichert wird. Wenn der Hebelarm freigelassen wird, wird er nach oben geschleudert, er schlägt auf die untere Seite der mit der Ventilstange verschraubten Mutter *d* und hebt das Ventil. Eine Anzahl Scheibenfedern drücken das Ventil auf seinen Sitz nieder. Die Membran *f* bewirkt die Abdichtung gegen die Atmosphäre. Der untere Teil des Ventils ist mit einem Kühlmantel umgeben, um die Gasproben abzukühlen. Ventilhub etwa 0,1 mm.

auf ein breites Papierband aufgezeichnet werden. Diese Aufzeichnungsweise erleichtert den Vergleich der Druckvorgänge in den einzelnen indizierten Zylindern. Vorkehrungen wurden getroffen, um die Öffnungsdauer kurz und doch genügend für einen Druckausgleich zu machen, ferner um die Phase mit einer bestimmten Geschwindigkeit ändern zu können oder auch um sie zu halten und um eine bestimmte Papiergeschwindigkeit einstellen zu können. Diese Maßnahmen machen das Gerät zu einem wertvollen Hilfsmittel für motorische Untersuchungen.

Von der Langley Field Luftfahrt-Versuchsanstalt der N.A.C.A. wurde ein sinnreiches Gasentnahmeventil entwickelt, welches auch für Druckmessungen anwendbar ist (Abbildung 273). Das Nadelventil wird von einem

federbelasteten Hebel geöffnet. Leckverluste werden durch eine Membran verhindert. Die Einzelheiten des Entwurfes sind aus der Abbildung ersichtlich.

In diese Gruppe von Indiziereinrichtungen kann noch die von Heinrich (Versuchsanstalt von Robert Bosch, A.-G.) für die Untersuchung von Einspritz-Druckvorgängen benutzte Anordnung eingereiht werden,

obwohl in diesem Gerät kein Steuerorgan angewendet wird. Das Druckmeßelement ist ein mit einer Plattenfeder belasteter Kolben von 2 mm \varnothing , welcher in einem Zylinder eingeschliffen wird (Abb. 274). Das Druckmeßelement wird in die Brennstoffleitung eingebaut und der Kolben wird dem jeweiligen Brennstoffdruck ausgesetzt. Er trägt eine Verlängerungsnadel, welche in das Gesichtsfeld eines Mikroskopes hineinragt (Abb. 275). Die Auslenkungen der Nadel können an einem im Gesichtsfeld des Mikroskops aufgestellten Maßstab abgelesen werden. Da eine steife Plattenfeder von 0,2 bis 0,6 mm Dicke angewendet wird, sind die Auslenkungen sehr gering; die Eigenschwingungszahl ist hoch, da der Kolben mit keinem mechanischen oder optischen Vergrößerungsgerät belastet ist. Das Druckmeßelement wird statisch in normaler Weise geeicht. Für die genaue Bestimmung der Phase, in welcher der Druckanstieg beginnt, verwendet Heinrich eine schwache Plattenfeder; eine durch-

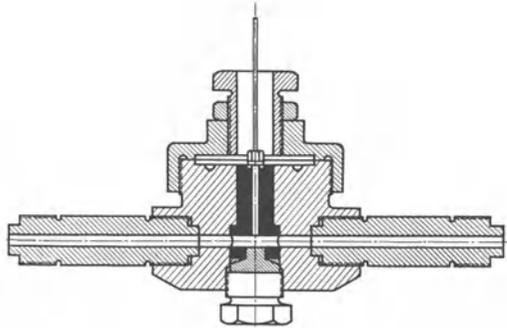


Abb. 274. Indiziereinrichtung nach Heinrich (Robert Bosch A. G., Stuttgart) für Brennstoff-Einspritzleitungen. Druckmeßelement. Die kleinen Auslenkungen des durch die Plattenfeder belasteten Kolbens werden mittels der Nadel beobachtet. Eine Anschlagsschraube für die Begrenzung der Bewegungen der Plattenfeder ist vorgesehen.

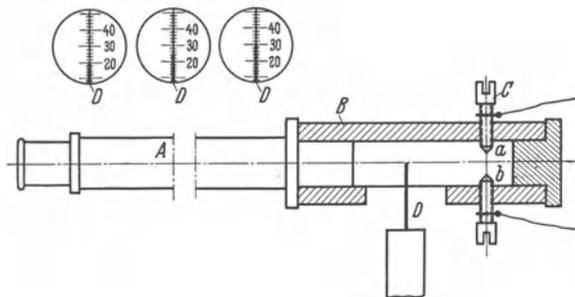


Abb. 275. Beobachtungsgerät. A Mikroskop, B Gehäuse; a-b Funkenstrecke; D Nadel, die in das Gesichtsfeld hereinragt.

bohrte Anschlagsschraube verhindert übermäßige Auslenkung und Bruch der Plattenfeder. Das Gesichtsfeld des Mikroskops wird durch einen Funken belichtet, welcher in einer Funkenstrecke der Sekundärspule eines Transformators entsteht, wenn der Primärstrom unterbrochen wird. Das Schaltbild zeigt Abb. 276. Der Primärkreis besteht aus einem 12 V-Akkumulator, einem veränderbaren Widerstand, dem Unterbrecher und einem zum letzteren parallel geschalteten Transformator. Ein auf

der Pumpenwelle sitzender Nocken betätigt den Unterbrecher und kann von Hand durch ein Schneckenradgetriebe gedreht werden. In dieser Weise kann der Zeitpunkt der Belichtung bis auf 0,1 Grad genau eingestellt und die dazugehörige Auslenkung des Druckmeßkolbens im Gesichtsfeld des Mikroskopes abgelesen werden. Es wird also der Druck bestimmt, welcher in einer vorausbestimmten Phase herrscht.

Um die Eignung der verschiedenen Ventilarten für den Zweck dieses Indizierungsverfahrens beurteilen zu können, muß man die folgenden Anforderungen im Auge halten:

a) Es ist wichtig, daß die Dauer der Verbindung ein möglichst kleiner Bruchteil des ganzen Kreisprozesses sein soll, um die Änderung des Druckes während der Zeitdauer möglichst zu vermindern.

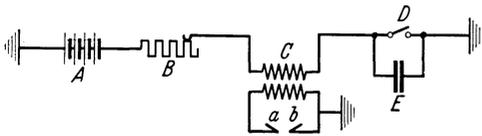


Abb. 276. Elektrische Schaltung. *A* Akkumulatorbatterie; *B* veränderlicher Widerstand; *C* Transformator; *D* Unterbrecher im Primärkreis des Transformators; *E* Kondensator für die Löschung der Funken an den Unterbrecherpunkten; *a-b* Funkenstrecke im Sekundärkreis.

b) Während der Dauer der Verbindung muß das Steuerorgan einen möglichst großen Öffnungsquerschnitt von hoher Durchflußzahl freigeben, damit der Druckausgleich zwischen den beiden Seiten schnell und vollkommen stattfindet.

c) Leckverluste müssen möglichst vollkommen verhindert werden. Leckverluste sind eine bedeutende Fehlerquelle, da die hierfür verfügbare Zeit ein Vielfaches der für die Auffüllung verfügbaren Zeit ist. Die Erfüllung dieser Forderung wird noch erschwert durch die hohen Temperaturen, welche eine Verformung der Ventilflächen verursachen können.

d) Umfang und Gewicht sollen möglichst vermindert werden und die Formgebung des Gerätes soll die Anwendung einer kurzen Verbindungsleitung erleichtern. Diese Forderung ist für Gasprobenentnahme noch wichtiger als für Druckindizierung.

Die verschiedenen Ventilarten erfüllen diese Forderungen in verschiedenem Grade.

Das Tellerventil und das Nadelventil sind am billigsten in der Herstellung und für hohe Drücke bestens geeignet. Die Öffnungsdauer ist aber lang, da die Ventilmasse zweimal beschleunigt und verlangsamt werden muß. Deshalb sind diese Ventilarten für hohe Drehzahlen nicht gut geeignet. Ferner üben diese Ventile eine bestimmte Pumpwirkung aus, d. h. sie ergeben einen Druck in der Richtung, in welcher die Durchflußzahl höher ist. Deshalb sind diese Ventile für Schwachfederdiagramme nicht zu empfehlen. Vorteilhaft ist aber, daß sie mit kleinen Abmessungen gebaut werden und mit der inneren Zylinderwand glatt abschneiden können, welcher Umstand für Gasprobenentnahmen von Vorteil ist.

Der Drehschieber ist höher in den Herstellungskosten und schwierig dicht zu halten, hohe Temperaturen können eine Verformung der Flächen verursachen. Er wirkt als eine Kreiselpumpe und ist daher für Schwachfederdiagramme nicht geeignet. Er ist aber für hohe Drehzahlen zu empfehlen, da Beschleunigungen nicht vorhanden sind.

Der hin- und hergehende Schieber (Schwingschieber) ist in seiner rohrförmigen, zylindrischen Ausführung etwas kostspielig in der Herstellung, aber eine Verformung durch Temperatureinflüsse ist nicht zu befürchten. Wenn zweckmäßige Schmierung angewendet wird, ist seine Dichtigkeit genügend für die in den normalen Verbrennungsmaschinen vorkommenden Drücke, obwohl sie unterhalb der von Teller- und Nadelventilen bleibt. Die Öffnungsdauer ist kurz, seine Durchflußzahl hoch, und er verursacht keine Pumpwirkung. Im allgemeinen ist diese Art von Steuerorgan die zweckmäßigste.

VI. Indikatoren für Sonderzwecke.

Aus einem Indikatordiagramm sind eine Anzahl Angaben ermittelbar, welche zur Beurteilung des Zustandes einer Kolbenmaschine dienen. Als solche Angaben sind zu nennen: Arbeitsleistung, mittlerer Druck, Höchstdruck (Verdichtungs- oder Explosionsdruck), Ventileröffnungs- und -schlußzeiten. Es ist aber öfters der Fall, daß nicht alle, sondern nur einige von diesen Angaben erwünscht oder notwendig sind. Für solche Zwecke sind Geräte entwickelt worden, die entweder einfacher oder billiger sind als Normalindikatoren oder die gewünschte Angabe mit größerer Bequemlichkeit angeben. In diesem Abschnitt werden derartige Sonderausführungen von Indikatoren behandelt, und zwar: *A.* Indikatoren für die Aufnahme von fortlaufenden Diagrammen, *B.* Arbeitszähler, *C.* Leistungsmesser, *D.* Mitteldruckindikatoren, *E.* Höchstdruckindikatoren, *F.* Indikatoren für Druckunterschiede, *G.* Bewegungsindikatoren. *H.* Indikatoren für Klopfuntersuchungen.

A. Indikatoren für fortlaufende Diagramme.

Einer der Anwendungszwecke der Indikatoren ist die Bestimmung der während einer Zeitdauer geleisteten Arbeit oder bei Kompressoren der gelieferten Luftmenge usw., um mit deren Hilfe den auf die Arbeitseinheit bezogenen Dampf- oder Brennstoffverbrauch, die Luftlieferung usw. kurz die Wirtschaftlichkeit der Maschine zu ermitteln. Für diesen Zweck nimmt man stichprobenartig in regelmäßigen Zeitabständen, z. B. nach je 3 min, Diagramme von der Maschine auf und berechnet die Wirtschaftlichkeit unter der Annahme, daß während dieser Zeitspanne das

dazugehörige Diagramm Gültigkeit besitzt. Diese Annahme ist aber nur bei gleichmäßiger Belastung der Maschine zulässig; bei schwankender Belastung kann sie zu falschen Folgerungen Anlaß geben. Eine stark schwankende Belastung ist aber in mehreren Betrieben unvermeidlich: z. B. in Förderanlagen, Stahlwerken, Lokomotiven u. a. m. In solchen Fällen sind Diagramme in rascher Reihenfolge oder sogar von jedem einzelnen Kreisprozeß aufzunehmen. Für diesen Zweck dienen die Indikatoren, welche jedes Diagramm fortlaufend auf einem langen Papier-

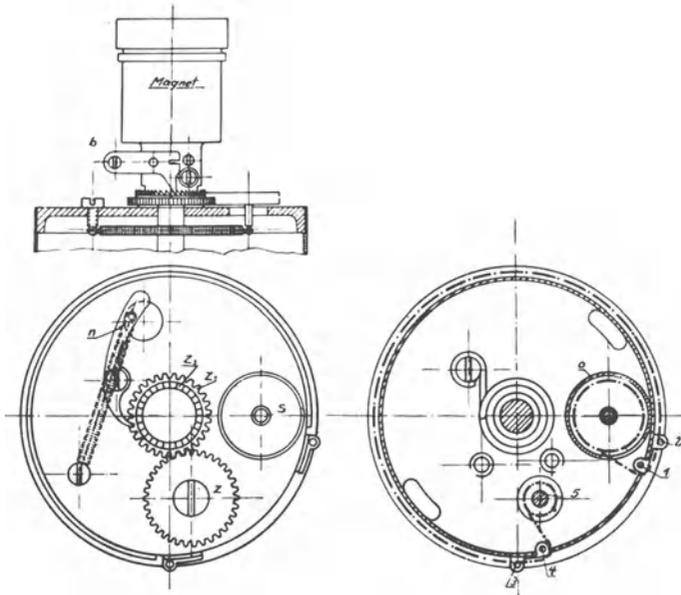


Abb. 277. Elektrischer Fernantrieb des Papiervorschubes (Maihak). Die volle Papierrolle wird auf den Stift S geschoben. Das Papierende wird zwischen den Leitwalzen 1 und 2 hindurchgeführt, über die Papiertrommel gelegt und zwischen den Walzen 3 und 4 auf Welle 5 gezogen, die das Papier in einem Schlitz festhält. Die Welle 5 trägt oben das Zahnrad Z , das mit einem auf der Achse der Papiertrommel sitzenden losen Zahnrad Z_1 im Eingriff steht. Z_1 besitzt auf seiner Stirnseite eine Sperrkrone Z_2 , in die die Sperrklinke b , die mit dem Magneten verbunden ist, federnd eingreift. Die Sperrklinke n kann mit dem Zahnrad Z_1 in Eingriff gebracht werden.

streifen aufnehmen, wobei die Trommel das Papierband bei jedem Hub um ein Geringes weiterbefördert. Dadurch wird jedes Diagramm klar sichtbar (Abb. 277). Der wichtigste Vertreter dieser Gruppe ist der Lokomotivindikator, bei dem sowohl die Papierbewegung als auch die Anpressung des Schreibstiftes mit elektromagnetischer Fernbetätigung bewirkt wird. Ein solches Gerät wird in Abb. 278—280 gezeigt.

Die Flächenbestimmung und Auswertung der so erhaltenen zahlreichen Diagramme würde aber viel zu viel Arbeit verursachen, deshalb werden solche Diagrammstreifen hauptsächlich für die Beurteilung des

Bereiches der Belastungsschwankungen und nicht für die laufende Bestimmung der geleisteten Gesamtarbeit angewendet.

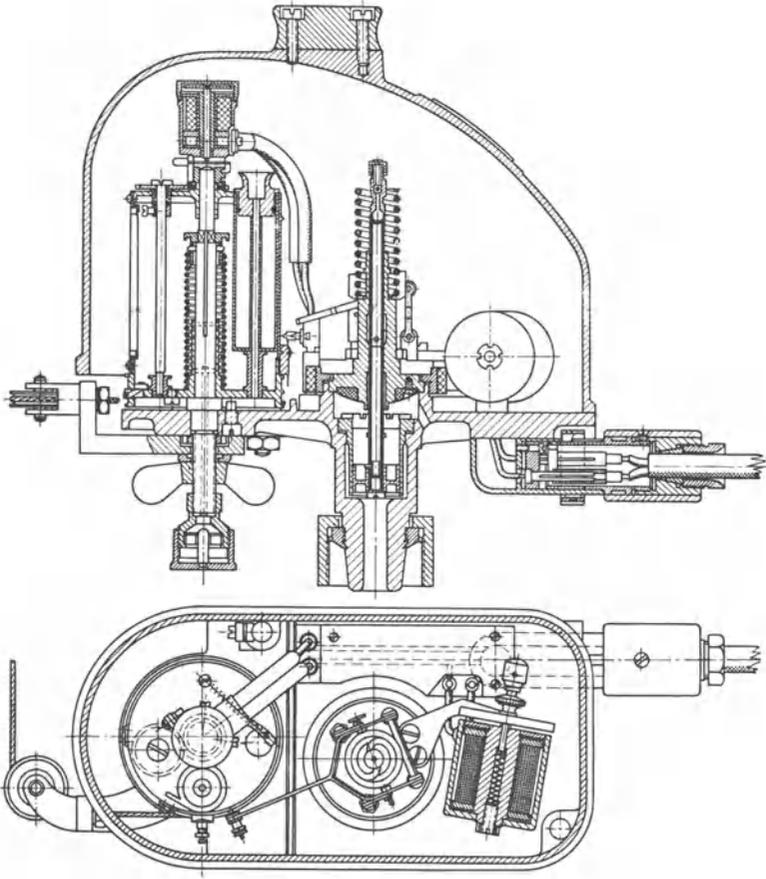


Abb. 278. Indikator mit Fernbetätigung und fortlaufendem Papierstreifen für Lokomotiven (Maihak). Der Elektromagnet drückt den Schreibhebel gegen die Trommel. Der Papierstreifenvorschub wird durch einen anderen Elektromagnet ausgelöst. Alle elektrischen Verbindungen sind in einem kräftigen Steckkontakt vereinigt. Die Schutzhaube schützt das Gerät vor Witterungseinflüssen und Beschädigungen.

B. Arbeitszähler.

Diese Geräte sind vergleichbar mit dem elektrischen Kilowattzähler, da sie die während einer Zeitdauer geleistete Gesamtarbeit einer Kolbenmaschine zahlenmäßig angeben. Diese Geräte vereinigen in sich die Wirkung eines Indikators und eines Planimeters und besitzen dazu noch eine Zählleinrichtung, welche die ermittelten Flächenwerte laufend summiert.

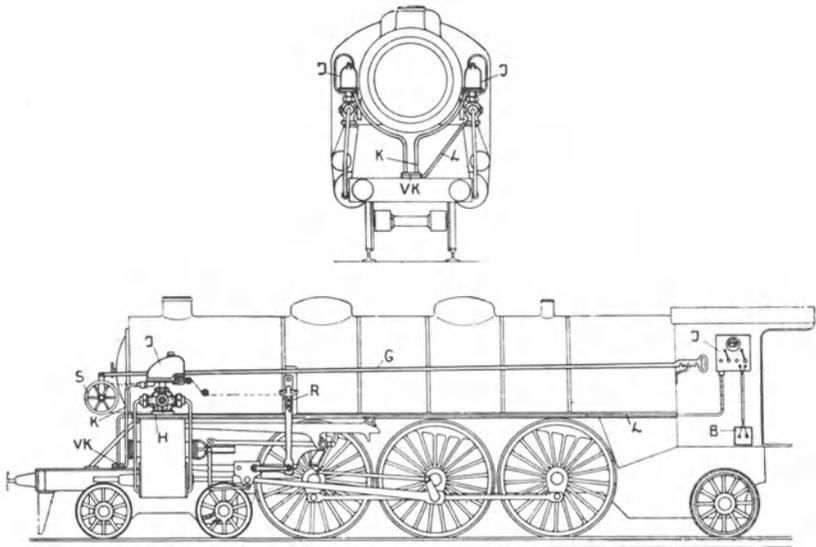
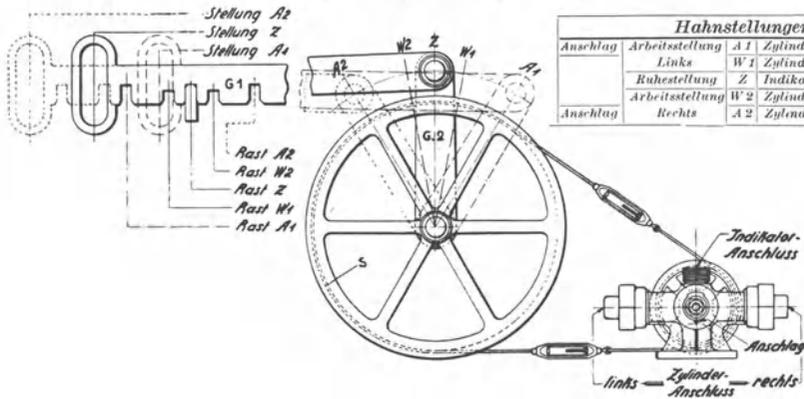
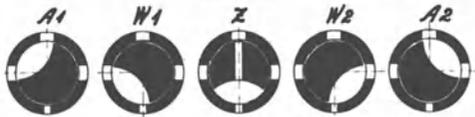


Abb. 279. Gesamtanordnung eines Lokomotivindikators mit Fernbetätigung (Maihak). *J* Indikator; *B* Akkumulatorenbatterie; *VK* Verbindungskabel; *K* Zuleitungskabel; *L* Hauptkabel; *H* Dreiwegehahn; *G* Gestänge; *S* Scheibe; *R* Hubverminderungshebel.

Hahnstellungen



Hahnstellungen			
Anschlag	Arbeitsstellung	A1	Zylinder m. Indikator
	Links	W1	Zylinder m. Atmosphäre
	Ruhestellung	Z	Indikator m. Atmosphäre
	Arbeitsstellung	W2	Zylinder m. Atmosphäre
Anschlag	Rechts	A2	Zylinder m. Indikator

Abb. 280. Antrieb des Dreiwegehahnes (Maihak).

In seiner beachtenswerten Arbeit: „Anzeige- und Zählgeräte für mechanische Arbeit“ stellt Döring die verschiedenen, für Kraft- sowie Arbeitsmaschinen in Frage kommenden Meßverfahren zusammen. Er

stellt für die selbsttätige Ermittlung von Leistung und Arbeit das folgende Schema auf (Abb. 281).

Die indizierte Arbeit einer Kolbenmaschine ist dem Produkt aus Kolbendruck und Kolbenweg verhältnisgleich. Demgemäß erhalten die Arbeitszähler die folgenden wesentlichen Elemente: Das Druckmeßelement, welches den Druckwert in einen verhältnisgleichen Wegwert umwandelt; das Wegmeßelement, das den Kolbenweg in einem verhältnisgleichen Wegwert umwandelt, und das Produktbildungselement, welches aus den Augenblickswerten des Druckes und des dazugehörigen Kolbenwegdifferentials das Produkt bildet. Die so erhaltenen Flächenwerte werden durch ein Zählwerk addiert und deren Summe auf einem Zifferblatt angezeigt.

Das Druckmeßelement ist dem Wesen nach einem federbelasteten Indikatorkolben und das Kolbenwegmeßelement einer Indikatortrommel

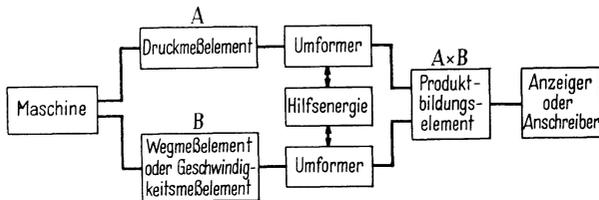


Abb. 281. Schema der selbsttätigen Arbeitszähler und Leistungszähler nach Döring.

ähnlich. Für die Produktbildung kommen verschiedene Verfahren in Frage, nämlich:

a) mechanische Verfahren, ähnlich wie bei den verschiedenen Planimetern: Hier wird also eine Fläche bestimmt.

b) Messung einer durch die zwei Faktoren beeinflussten Stoffmenge: Wägung.

c) Messung einer durch die zwei Faktoren beeinflussten Energiemenge (Licht oder Elektrizität) mittels entsprechender Meßinstrumente.

Der älteste Arbeitszähler mit mechanischer Produktbildung ist in der britischen Patentschrift von W. Ashton und J. H. Storey 1097—1869 beschrieben¹, in welchem das Produkt mittels einer „Kraftscheibe“ gebildet wird. Eine Abänderung mit Ermöglichung einer Diagrammaufnahme ist in dieser Patentschrift auch dargestellt, und auch die in der Patentschrift gezeigte Bauweise scheint für die tatsächliche Ausführung geeignet gewesen zu sein. Obwohl Versuche mit diesem Gerät in der Fachliteratur nicht veröffentlicht worden sind, kann diese Erfindung als die Urform der späteren tatsächlich ausgeführten Arbeitszähler betrachtet werden.

In der Patentschrift von W. G. Little, DRP. 87193 (1895) und USA.-Patent 546897 (1895)¹ wird ein Arbeitszähler beschrieben, in

¹ Siehe auch Rosenkranz: Der Indikator, 7. Aufl.

welchem die „Kraftscheibe“ die Mantelfläche der Indikatortrommel berührt, wobei der Indikatorkolben den Neigungswinkel der Kraftscheibenachse abhängig von dem Druck ändert. Im Indikator von Hamann¹ betätigt der Indikator gleich den Fahrstift eines Polarplanimeters, dessen Meßrolle sich an der oberen Mantelfläche der Indikatortrommel abrollt.

Im Arbeitszähler von Gumbel (DRP. 251497) (Abb. 282) wird das Produkt mit einem mechanischen Verfahren gebildet. Zwei Scheiben

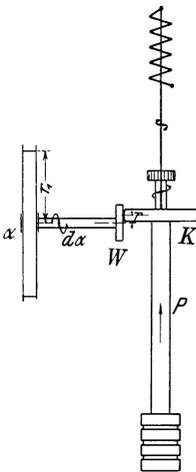


Abb. 282. Grundsatz des Arbeitszählers nach Gumbel. K Kraftscheibe; W Wegscheibe; P Druckkraft; α Drehwinkel der Wegscheibe, vom Maschinenkolben abgeleitet; r_1 Trommelhalbmesser; r Auslenkung der Kraftscheibe aus dem Mittelpunkt der Wegscheibe.

K und W arbeiten miteinander als ein Reibradgetriebe; die axialen Verschiebungen der Scheibe K — im folgenden Kraftscheibe genannt — werden durch die Bewegung eines federbelasteten Kolbens bewirkt und sind daher dem auf den Kolben wirkenden Druck verhältnismäßig; die Verdrehungen der Scheibe W , — im folgenden Wegscheibe genannt —, werden von dem Kolben oder Kreuzkopf der zu untersuchenden Maschine abgeleitet und sind dem Kolbenweg verhältnismäßig. Die Kraftscheibe wird durch Reibung von der Wegscheibe in Drehung gesetzt: ihr Drehwinkel ist sowohl vom Drehwinkel der Wegscheibe (Kolbenweg) als auch von dem Abstand des Berührungspunktes vom Mittel der Wegscheibe (Druckwert) abhängig; die sich ergebende Winkeldrehung der Kraftscheibe ist dem Produkt der beiden Werte verhältnismäßig. Wenn es sich um geschlossene Linienzüge handelt, wie es bei den Diagrammen von Kolbenmaschinen der Fall ist, pendelt die Wegscheibe während einer Umdrehung der Maschine einmal hin und her, und die Gesamtverdrehung der Kraftscheibe ergibt sich als der Unterschied zweier Winkeldrehungen. Deshalb ist es nicht notwendig, daß die Nullstellung der Kraftscheibe in die Mitte der Wegscheibe fällt; die Lage der atmosphärischen Linie ist ebenso belanglos wie bei der Bestimmung des Flächenwertes eines Indikatorgrammes.

In der tatsächlichen Ausführung des Gerätes (Abb. 283 a—c) werden zwei Wegscheiben W_1 und W_2 angewendet, die ihre Bewegung durch Kegelradantrieb von einer Welle erhalten, die mittels Schnurantrieb von der untersuchten Maschine, ähnlich wie eine Indikatortrommel angetrieben wird. Die Stirnflächen der beiden Wegscheiben werden durch Feder gegen die Kraftscheibe schwach angepreßt; die beiden Federkräfte heben sich gegenseitig auf, so daß die Kraftscheibe und

¹ Siehe auch Rosenkranz: Der Indikator, 7. Aufl.

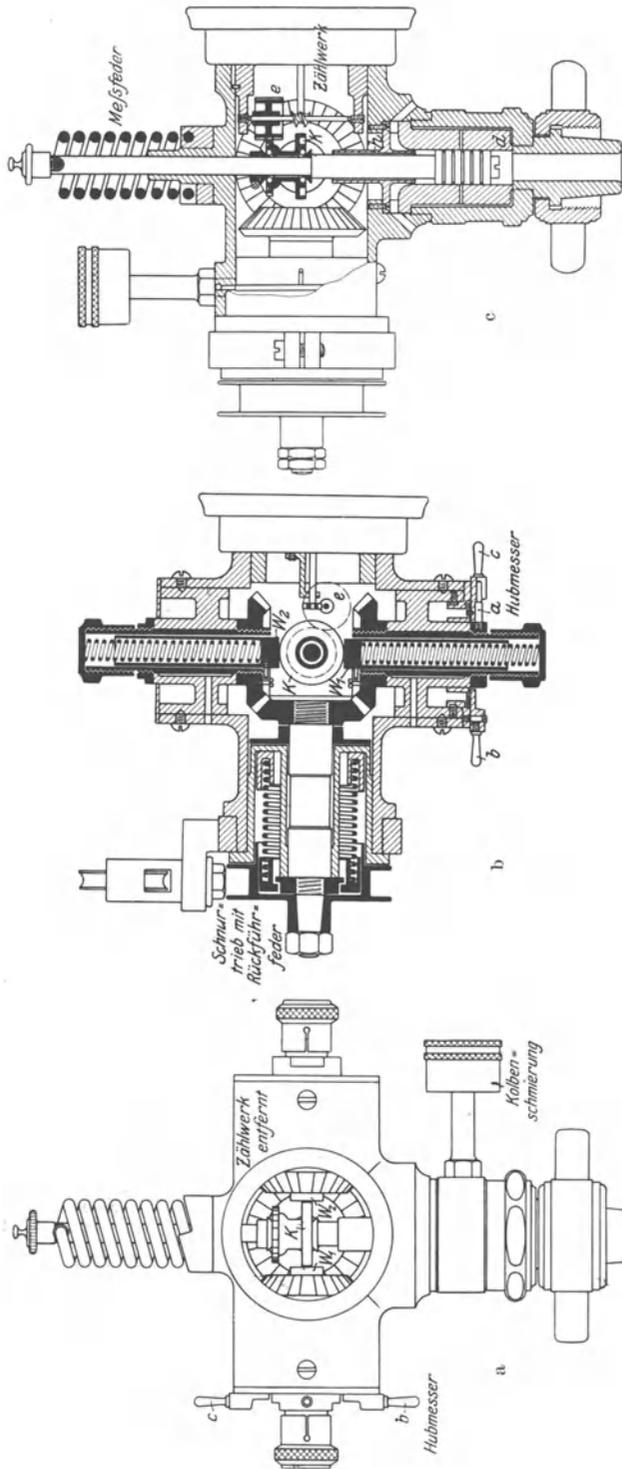


Abb. 283a—c. Arbeitszähler nach Gumbel (Lehmann und Michels). *a* Mitnehmer; *b* und *c* Schleppeizer für den Hubmesser; *W₁* und *W₂* Wegscheiben; *K* Kraftscheibe auf Kugellagern gelagert; *e* langer Zahntrieb des Zählwerkes; der Indikator Kolben liegt bei *d* dichtend an; das Zählwerk wird durch den Schutzdeckel *h* vor Beschädigung durch Leckgase geschützt.

die Kolbenstange von Seitenkräften und von dadurch entstehenden Reibungen entlastet ist.

Die Indikatorfeder ist am Ende der die Kraftscheibe tragenden Kolbenstange angebracht, sie ist austauschbar ähnlich wie in Indikatoren angeordnet.

Die Verdrehungen der Kraftscheibe werden auf ein Zählwerk übertragen. Da die Kraftscheibe in der Achsrichtung verschoben wird und das Zählwerk sich in Ruhe befindet, wird der dauernde Eingriff durch Anwendung eines langen Zahntriebes e gesichert.

Der auf dem Zifferblatt des Zählwerkes ablesbare Zahlenunterschied zwischen Anfang und Ende eines Maschinenversuches multipliziert mit einer Apparatkonstanten ergibt die in dieser Zeitspanne geleistete indizierte Arbeit, bezogen auf einen Maschinenkolbendurchmesser von 1 cm, auf einen Maschinenkolbenhub von 1 m, einen Trommelhub von 100 mm und eine Indikatorfederkonstante von $1 \text{ mm} = 1 \text{ kg/cm}^2$. Um den tatsächlichen Trommelhub bestimmen zu können, ist auf dem Gerät ein Hubmesser angebracht, bestehend aus zwei Schleppzeigern b und c , welche durch einen Mitnehmer beim Hin- und Hergehen der Trommel auseinandergedrückt werden. Die Arbeit ergibt sich aus der Formel:

$$\text{Arbeit} = A \frac{D^2 S}{m s} n ;$$

in derselben bedeutet A Apparatkonstante, D Maschinenkolbendurchmesser in cm, S Maschinenkolbenhub in m, m Federmaßstab, $\text{mm/kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ s Angabe am Hubmesser, mm , n Zifferblatablesung.

Die so ermittelte Arbeit, dividiert durch 75, mal Versuchsdauer in Sekunden ergibt die mittlere Leistung in PS.

Der Güm belseche Arbeitszähler wurde für Dauerbetrieb, insbesondere für Dampf- und Verbrennungsmotoren bestimmt, die nicht für elektrische Stromerzeugung benutzt werden und bei denen die Möglichkeit der Messung der elektrischen Leistung nicht besteht. Infolge der kräftigen Ausführung der Teile, Anwendung von Kugellagern an der Kraftscheibe und Schmierung des Kolbens ist das Gerät ziemlich ausgedehntem Dauerbetrieb gewachsen. Da das Druckmeßelement (Kolben, Stange, Kraftscheibe) leicht und von allen anderen Zusatzmassen unbelastet ist, ist das Gerät auch für ziemlich hohe Drehzahlen oder besser gesagt ziemlich rasche Druckänderungen anwendbar.

Der Arbeitszähler von Böttcher und Lehmann (DRP. 212628 [1908] und USA.-Patent 1039250 [1912]) vereinigt in sich auch einen Normalindikator und ist auch für die Aufnahme von Diagrammen geeignet. In der ursprünglichen Form wurde als „Wegscheibe“ die Stirnfläche der Indikatortrommel angewendet. Da diese Bauweise das Auflegen und Abnehmen des Diagrammblattes erschwerte, wurde eine Form mit einer besonderen Wegscheibe entwickelt, wie in Abb. 284 (Prinzip-skizze) und Abb. 285 (tatsächliche Ausführung) gezeigt. Der Vorteil der

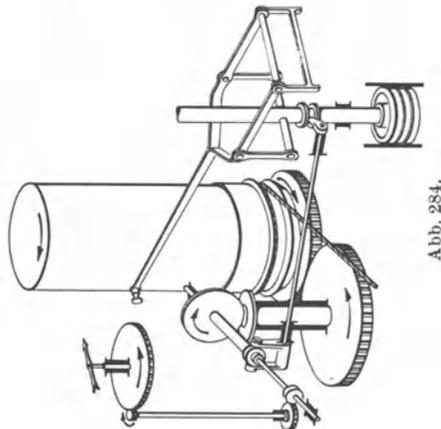
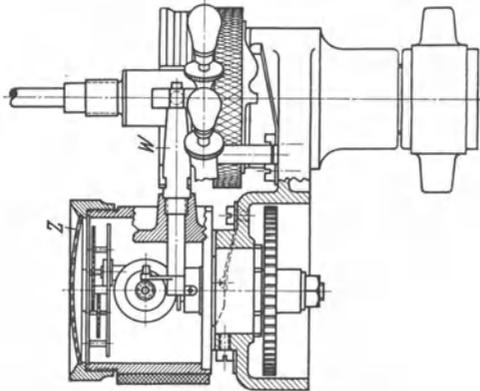
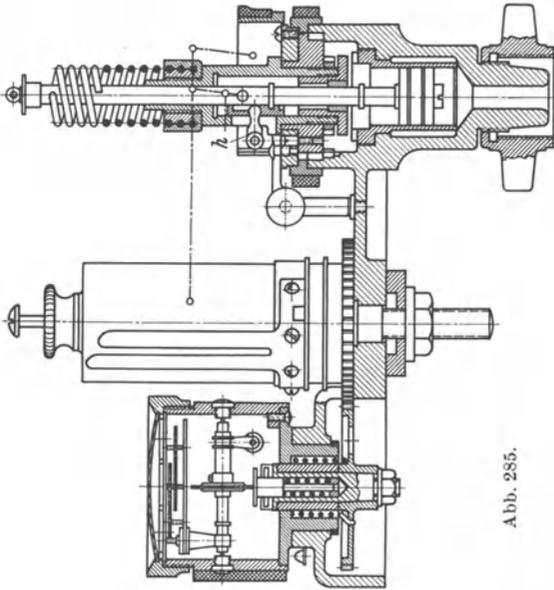


Abb. 284 und 285. Grundsatz und Ausführungsform des Arbeitszählers von Böttcher und Lehmann, mit Normalindikator vereinigt (Maßstab). Eine besondere Wegscheibe wird von der Indikatortrommel mittels Zahnradantrieb angetrieben, wodurch die Handhabung des Diagrammblattes ermöglicht wird. Die Kraftscheibe wird von der Kolbenstange mittels Hülse und Klauenhebel betätigt.

Ermöglichung der Diagrammaufnahme ist aber mit dem Nachteil der vergrößerten bewegten Masse und daher mit vergrößerten Massenfehlern erkaufte, so daß derartige Geräte sich nur für niedrige Drehzahlen eignen.

Eine Abänderung dieser Ausführungsformen ist in der Patentschrift von Eike DRP. 341366 (1916) beschrieben, in welcher die Kraftscheibe statt an der Stirnfläche einer Wegscheibe an der Mantelfläche eines Wegkegels sich abrollt.

Eine Produktbildung durch Beeinflussung und Wägung einer Stoffmenge ist in der Weise denkbar, daß die zwei Seitenlängen einer rechteckigen Durchflußöffnung verhältnismäßig den beiden Veränderlichen verändert werden, wobei die von einem Behälter unter gleichmäßigen

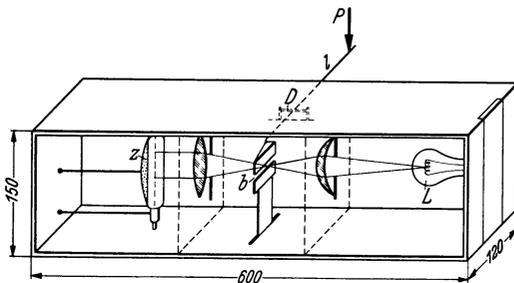


Abb. 286. Schematische Darstellung der Kraftmessung mittels lichtelektrischem Verfahren (Döring). *L* Lichtquelle; *b* Meßspalt; *Z* lichtelektrische Zelle; *P* zu messende Kraft; *l* Hebel; *D* Achse.

Druck durch die Durchflußöffnung strömende Meßflüssigkeit gesammelt und gemessen wird. Entsprechend den positiven und negativen Arbeitsbeträgen, die in einem Kreisprozeß auftreten, sollte im allgemeinen die Sammlung in zwei Gefäßen vorgenommen werden, wobei die geleistete Arbeit dem Unterschied der beiden Flüssigkeitsmengen entsprechen würde. Ein auf dieser Grundlage beruhender Arbeitszähler ist nicht bekanntgeworden, aber der Gedankengang eines Indikators nach den Patentschriften von Max Arndt (DRP. 147713 [1902], 202596 [1905], 219020 [1908], 251046 [1911]) kommt dieser Lösung ziemlich nahe. Für Kraftvorgänge, welche mit gleichmäßiger Geschwindigkeit ablaufen, wäre dieses Meßverfahren leichter anwendbar. Die Umständlichkeit der Handhabung und die Notwendigkeit einer Hilfsflüssigkeit sind aber ausschlaggebende Nachteile; tatsächlich ausgeführte Apparate sind daher in der Fachliteratur nicht bekanntgeworden.

Als ein Beispiel der Produktbildung mittels einer durch die beiden Faktoren beeinflussten Energiemenge ist das von W. Döring vorgeschlagene lichtelektrische Meßverfahren zu nennen. Dabei wird das Licht aus einer stetigen Lichtquelle durch eine Blende gesteuert, die aus zwei aufeinander senkrechten Lichtspalten gebildet wird. Die beiden Spaltweiten werden verhältnismäßig den beiden veränderlichen Faktoren eingestellt. Der durch die Blende gesteuerte Lichtstrom wird einer Photozelle zugeführt, die die Lichtschwankungen in elektrische Stromschwankungen umwandelt. Der so erhaltene Meßstrom wird nach entsprechender Verstärkung auf bekannte Weise angezeigt oder auf-

gezeichnet. In der schematischen Darstellung (Abb. 286) wird nur eine einzige Spaltblende gezeigt, und auch in seiner Versuchsausführung für Kraftmessungen an Werkzeugmaschinen (Drehbank, Flächenschleifmaschine und Hobelmaschine) hat Döring nur einen Spalt angewendet. Dieses Meßverfahren besitzt einige wichtige Vorteile: 1. kleine bewegte Massen, 2. die Möglichkeit der Aufstellung des Zählgerätes entfernt von der untersuchten Maschine, wodurch störende Erschütterungen des Gerätes vermieden werden und 3. die leichte Veränderung des Meßbereiches wegen Anpassung an den untersuchten Vorgang. Obwohl dieses Meßverfahren nur im Versuchsstadium ist, scheint dessen Weiterentwicklung für praktische Zwecke in Anbetracht der raschen Fortschritte auf dem Gebiete der Elektronenröhren durchaus möglich.

C. Leistungsmesser.

Der Arbeitszähler gibt den Gesamtwert der während einer Zeitdauer geleisteten Arbeit an, gibt aber über deren Verlauf keine Aufklärung. Der Leistungsmesser gibt demgegenüber, ähnlich wie ein Wattmeter, den augenblicklichen Wert der Leistung an. In einem Leistungsmesser wird also das Produkt der Kolbenkraft und der Kolbengeschwindigkeit gebildet. Diesbezügliche Patente sind: J. Picht, DRP. 181678 (1905); E. Roucka, DRP. 353172 (1918); Krupp A.-G., engl. Patent 146325 (1920) und franz. Patent 518766 (1920); A. Frisch, DRP. 368252 (1919), USA.-Patent 1588544 (1926) und brit. Patent 200089. Alle diese Geräte lösen die Aufgabe mittels elektrischer Einrichtungen. Im folgenden wird nur der Leistungszähler von Frisch beschrieben, welcher tatsächlich gebaut und erprobt wurde.

Die schematische Anordnung zeigt Abb. 287. Sowohl die Kolbenkraft als auch die Kolbengeschwindigkeit werden in verhältnismäßige Stromwerte i_p und i_r umgewandelt und beide Stromwerte zu einem Wattmeter geführt, in welchem das Produkt gebildet wird. Die Genauigkeit dieses Meßverfahrens hängt von der Genauigkeit ab, mit welcher die Verhältnismäßigkeit der Umwandlung verwirklicht wird. Für dieses Problem hat Frisch sinnreiche Lösungen gefunden.

Der Druckumformer (Abb. 288a) ist ein federbelasteter Indikatorkolben, welcher statt einem Schreibwerk einen veränderbaren elektrischen Widerstand betätigt. Die Widerstandsplatten stehen still und haben die Form eines konkaven Zylinderausschnittes, worauf ein von der Kolbenstange betätigtes als konvexer Zylinderausschnitt geformtes Kontaktstück abrollt. Durch diese Anordnung wird der Abrollweg der Zylinderausschnitte ein Vielfaches des Indikatorkolbenhubes gemäß der Formel:

$$r = R - R/m \text{ und } m = S/s.$$

Hierbei ist R Halbmesser des konkaven Ausschnittes, r Halbmesser des konvexen Ausschnittes, S Verschiebung des Kontaktpunktes, s Indikatorkolbenhub, m Übersetzungsverhältnis.

angetrieben, einen Strom erzeugen, dessen Wert in jedem Augenblick verhältnisgleich der Kolbengeschwindigkeit wäre. In wirklichen Maschinen mit einem endlichen Pleuelstangenverhältnis r/l ist aber die

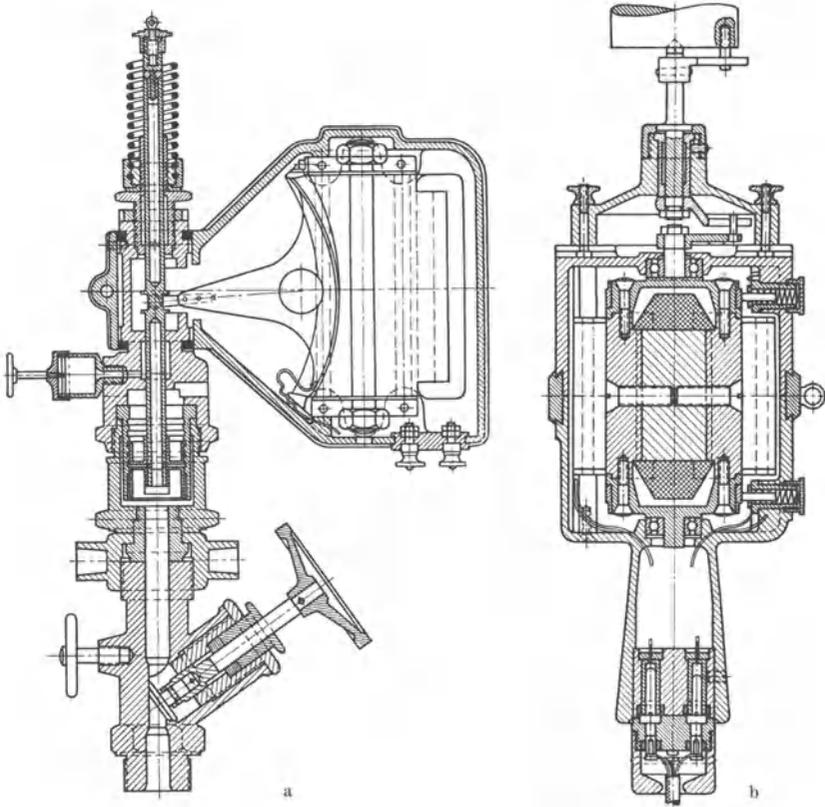


Abb. 288a u. b. Ausführung des Druckumformers und des Geschwindigkeitsumformers des Leistungsmessers nach Frisch.

Kolbengeschwindigkeit keine einfache harmonische Funktion des Kurbelwinkels.

Um in diesem Falle eine verhältnisgleiche Stromstärke zu erreichen, ist es notwendig, der Leiterschleife eine entsprechende, ungleichmäßige Winkelgeschwindigkeit zu erteilen. Das kann dadurch erreicht werden, daß der Anker nicht unmittelbar von der Maschinenwelle angetrieben wird, sondern unter Zwischenschaltung eines exzentrischen Schleifkurbeltriebes, welcher von der Maschinenwelle angetrieben wird. Die erwünschte ungleichmäßige Drehung wird erreicht, wenn die Ankermitte um den Betrag $r^2/2l$ gegenüber dem Drehpunkt des Schleifkurbeltriebes versetzt wird. Dann wird die projizierte Länge der angetriebenen Kurbel (und auch die durch die Leiterschleife geschnittene Kraftlinienzahl) verhältnisgleich

dem augenblicklichen Kolbenhub, wodurch die obengenannte Forderung erfüllt wird. Für den Beweis der Richtigkeit dieses Verfahrens vom versetzten Drehpunkt, welches von Brix herrührt und für die zeichnerische Bestimmung der zu gegebenen Kurbelstellungen gehörigen Kolbenstellungen Anwendung findet, wird auf die Handbücher über Kinematik hingewiesen¹.

Eine Schwierigkeit dieses Umformungsverfahrens liegt in der Erzeugung eines gleichmäßigen magnetischen Feldes. Diese Aufgabe wurde dadurch gelöst, daß der Anker stillstehend und der Elektromagnet als Rotor ausgeführt wurde. Der Elektromagnet wird aus einer Akkumulatorbatterie gespeist. Eine andere Schwierigkeit liegt in der Erreichung einer wahren Verhältnisgleichheit zwischen Drehzahl und elektromotorischer Kraft. Deshalb wurde der Stromerzeuger so groß gebaut, daß er auch unter der höchsten Belastung durch das Meßgerät nur bis etwa 90 % seiner Höchstleistung belastet wird. Dadurch wird der Spannungsabfall im Anker vernachlässigbar gering. Eine weitere Fehlerquelle entsteht durch die Drehung des magnetischen Kraftfeldes durch die Ankerrückwirkung; sie kann bei Zunahme der Geschwindigkeit durch eine geringe Rückstellung des Ankers ausgeglichen werden.

Als der eigentliche Leistungsanzeiger dient ein Wattmeter, in welches die zwei Ströme eingeführt werden. Dasselbe ist eine Sonderkonstruktion, um große Zeigerablenkung und geringe Wattverluste zu erreichen.

D. Mitteldruckindikatoren.

Aus den schwankenden Druckwerten einer Kolbenmaschine kann man einen Mittelwert nach verschiedenen Grundsätzen bestimmen. Man unterscheidet a) den mittleren auf den Hub bezogenen Druck, b) den mittleren Tangentialdruck und c) den zeitlichen Mittelwert des Druckes.

a) Der mittlere indizierte Druck ergibt sich aus dem üblichen auf den Kolbenhub bezogenen Indikatordiagramm gemäß der Gleichung:

$$p_i = \frac{\int_0^s p \, ds}{s}.$$

b) Der mittlere Tangentialdruck ist der auf den Kurbelkreisumfang bezogene Mittelwert der schwankenden Tangentialdruckwerte:

$$\tau_m = \frac{\int_0^{2\pi} \tau r \, d\alpha}{2 r \pi} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \tau \, d\alpha.$$

Eine gleichmäßige Winkelgeschwindigkeit der Kurbelwelle vorausgesetzt, ergibt sich:

¹ Siehe auch Hütte, 26. Aufl., Bd. II, S. 87 und Brix: Das bizenrische polare Exzenterschieberdiagramm. Z. d. V. d. I. 1897, S. 431.

$$\frac{d\alpha}{dt} = \omega \quad \text{und} \quad \frac{2\pi}{\omega} = T = \text{Zeit einer Umdrehung,}$$

Damit kann der mittlere Tangentialdruck auch in folgender Weise ausgedrückt werden:

$$\tau_m = \frac{1}{T} \int_0^T \tau dt,$$

d. h. als der zeitliche Mittelwert der schwankenden auf die Kolbenflächeneinheit bezogenen Tangentialkräfte.

Die während einer Umdrehung der Kurbelwelle geleistete und auf die Kolbenflächeneinheit bezogene Arbeit A/F kann entweder durch den mittleren indizierten Druck p_i oder den mittleren Tangentialdruck τ_m ausgedrückt werden:

$$A/F = p_i s = 2r\pi\tau_m; \quad s = 2r;$$

hieraus ergibt sich der einfache Zusammenhang:

$$p_i = \pi\tau_m$$

zwischen den beiden Mittelwerten.

c) Der zeitliche Mittelwert des Druckes wird durch die folgende Formel ausgedrückt:

$$p_t = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p dt}{t_2 - t_1}.$$

Die Bedeutung dieser oben definierten mittleren Drücke für die Untersuchung und Beurteilung der Kolbenmaschinen besteht darin, daß sie Momentanwerte darstellen, welche den jeweiligen Zustand der Maschine und etwaige Änderungen sofort widerspiegeln. Drosselt man z. B. die Ansaugluft eines Fahrzeugmotors oder ändert man die eingespritzte Brennstoffmenge in einer Dieselmachine, so tritt eine entsprechende Änderung in dem angezeigten mittleren Druck ein, welcher Umstand die Einregulierung von Maschinen sehr erleichtert. Mit dem Normalindikator wäre diese Bestimmung mit großer Mühe und bei schnellaufenden Maschinen und kleinen Diagrammabmessungen außerdem auch mit Fehlerquellen behaftet. Aus diesem wichtigen Bedürfnis für Hilfsmittel für schnelle Einregulierung und schnelle Kontrolle der Kolbenmaschinen sind die verschiedenen Mitteldruckindikatoren entstanden.

a) Mitteldruckindikatoren für den indizierten und tangentialen mittleren Druck.

Da diese beiden mittleren Drücke sich nur durch einen konstanten Faktor unterscheiden, so kann für deren Bestimmung dasselbe Gerät dienen. Für ihre Ermittlung ist die Messung des Kolbendruckes allein nicht genügend, sondern es muß der Kolbenweg oder der Kurbelwinkel, bei welchem die Drücke auftreten, auch zur Wirkung kommen.

Der Mitteldruckindikator nach Wim per is (Abb. 289 und 290) mißt den zeitlichen Mittelwert der Tangentialdrücke, mittels eines Kraftmeßgerätes von niedriger Eigenschwingungszahl. Der Gasdruck wirkt auf einen

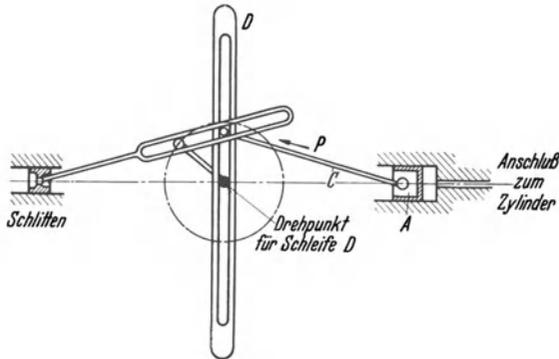


Abb. 289. Grundsatz des Mitteldruckindikators nach Wim per is

Kolben *A*, der über eine Treibstange *C* auf eine Führung *D* einwirkt. Der Angriffspunkt der Treibstangenkraft *P* wird durch eine von der Kurbelwelle der Kraftmaschine angetriebene Kurbel, welche in einer geschlitzten

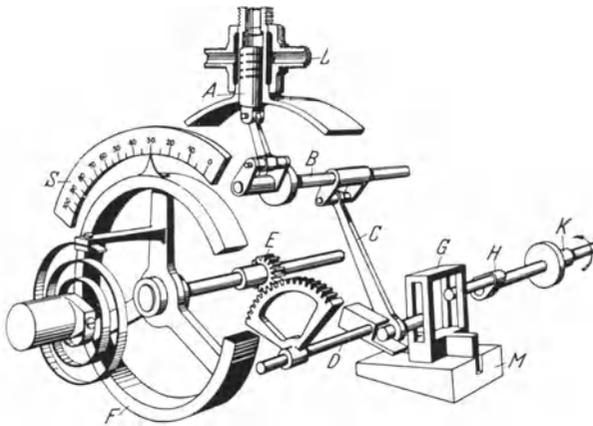


Abb. 290. Ausführungsform des Mitteldruckindikators nach Wim per is. *A* Indikator Kolben; *B* Schwingwelle; *C* Treibstange; *D* Kreuzschlitz (teilweise gebrochen, um den Zapfen zu zeigen); *E* Übersetzungsgetriebe ins Rasche; *F* Trägheitsgrad; *G* Schlitzblock; *M* Führung; *H* Schlitzkurbel; *K* Antrieb von der Maschinenwelle; *L* Kühlwassereinlaß; *S* Zifferblatt.

Stange gleitet, senkrecht zur Richtung der Kolbenkraft so hin- und herbewegt, daß die Treibstangenkraft *P* der wirklichen in der Maschine auftretenden Treibstangenkraft in jedem Augenblick, d. h. in jeder Kurbelstellung verhältnismäßig ist. Die Treibstangenkraft *P* wirkt dann unter Zwischenschaltung einer Übersetzung *E* ins Rasche auf ein mit einer Drehfeder verbundenes Schwungrad *F* ein, das die Drehschwankungen nicht mehr mitmacht, sondern den mittleren Druck auf einem

Zifferblatt S anzeigt. Das Zifferblatt kann entweder in indizierten oder in tangentialen Druckeinheiten beziffert werden.

Der Mitteldruckindikator von E. Schimanek, Technische Hochschule, Budapest, (DRP. 300978 [1917]) beruht auf dem folgenden Gedankengang (Abb. 291 A—C). Eine kleine Maschine wird angewendet, im folgenden der „Indikatormotor“ genannt, die keine Steuerung besitzt, aber sonst in ihren Abmessungen (Kolbenhub, Kolbendurchmesser, Pleuelstangenverhältnis L/r) ein im bekannten Maßstab verkleinertes

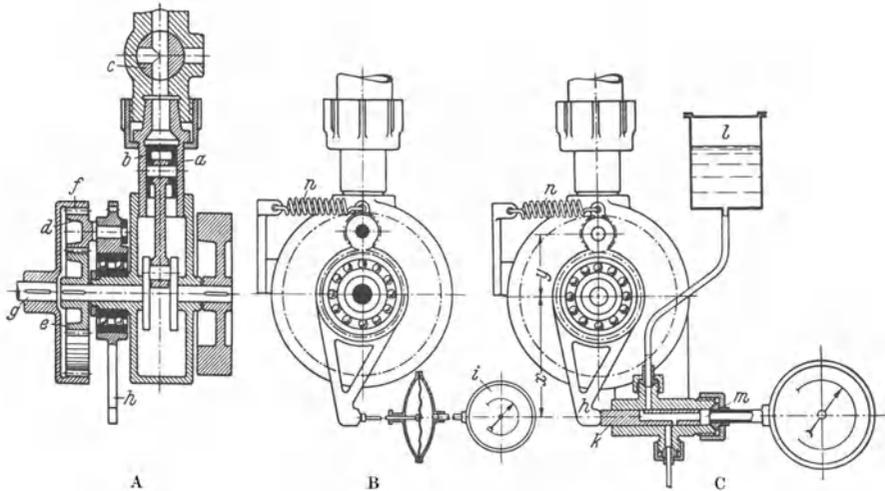


Abb. 291 A—C. Mitteldruckindikator nach Schimanek. a Meßzylinder; b Kolben des Meßzylinders; c Hahn zur Verbindung mit der Außenluft; d, e, f Umlaufgetriebe; g mit der Kraftmaschine verbundene Welle; h Hebel zur Übertragung der Kraft auf das Manometer; i Manometer; k Steuerkolben der Meßdose; l Druckbehälter; m Ölraum der Meßdose; n Feder für Mittelstellung von h .

Modell der untersuchten Maschine darstellt. Der Zylinderraum des Indikatormotors wird durch eine möglichst weite und kurze, daher reibungsfreie Rohrleitung mit dem Zylinderraum der zu untersuchenden Maschine verbunden, so daß auf den Kolben des Indikatormotors in jedem Augenblick derselbe Druck einwirkt, der im Zylinder der untersuchten Maschine herrscht. Die Kurbelwelle des Indikatormotors wird synchron und in Phasengleichheit mit der Kurbelwelle der zu untersuchenden Maschine angetrieben. Der Indikatormotor wird dann seiner Kurbelwelle eine Leistung, eine Arbeit und ein Drehmoment abgeben, welche zu der indizierten Leistung, Arbeit und Drehmoment der untersuchten Maschine in demselben Verhältnis wie die betreffenden Hubräume stehen. Dieses Verhältnis ist aus den Abmessungen der Maschinen bekannt. — Voraussetzung ist, daß in dem Indikatormotor keine Reibungsverluste vorhanden sind. Würde man nun das Drehmoment der Indikatormotorwelle messen, so wäre daraus der indizierte Druck des Indikatormotors ermittelbar, wenn man den Betrag des durch die

Reibung aufgezehrten „Reibungsdruckes“ abzieht. Dieser Reibungsdruck ist aber durch eine zweite Drehmomentenmessung bestimmbar, wobei die Verbindung zwischen den beiden Zylinderräumen durch einen Hahn c gesperrt ist und daher durch die Welle eine Leistung zum Indikator-motor zugeführt wird. Die Summe der beiden so ermittelten Druckwerte ergibt den indizierten mittleren Druck des Indikatormotors, und den ihm gleichen der zu untersuchenden Maschine. Die Indikator-kurbel-welle muß nun von der Kurbelwelle der zu untersuchenden Maschine derart angetrieben werden, daß das dabei übertragene Drehmoment gemessen werden kann und die Phasengleichheit zwischen den beiden Wellen aufrechterhalten bleibt. Diese Aufgabe wurde durch ein Planeten-getriebe d, e, f, g, h gelöst, welches zwischen die eigentliche Indikator-kurbelwelle und die Kurbelwelle der untersuchten Maschine geschaltet wird und in ihrer Wirkung ein Zahnrad-dynamometer darstellt. Am Hebel h , in welchem das Planetenrad d gelagert ist, entsteht ein Dreh-moment, welches durch ein Manometer i gemessen werden kann. Da diese Art der Drehmomentmessung eine bestimmte, obwohl geringe Phasenverschiebung verursacht, wurde die Schieberanordnung k, m nach Abb. 291 C entwickelt, welche zum Manometer Druckflüssigkeit von einem Behälter l zuführt oder in die Atmosphäre ableitet und so einem Servo-motor ähnlich den Hebel h in seine Nullstellung zurückführt und dadurch die Phasenverschiebung ausgleicht.

Während der Dreivegehahn c des Indikatormotors die Verbindung mit dem untersuchten Zylinderraum herstellt, gibt die Kurbelwelle des Indikatormotors an der Antriebswelle g eine Leistung ab und das Manometer zeigt den Druck p_1 an; während der Dreivegehahn die Verbindung mit dem untersuchten Zylinderraum absperrt, wird die Kurbel-welle des Indikatormotors von der Antriebswelle g eine Leistung auf-nehmen und das Manometer zeigt den Druck p_2 an. Die während der beiden Versuche auf den Hebel h wirkenden Kräfte sind also ein-ander entgegengesetzt gerichtet. Um in beiden Versuchen einen positiven Druck im Manometer sicherzustellen, wird die Feder n vorgesehen, die den Hebel h ständig gegen das Manometer andrückt.

Der indizierte mittlere Druck ergibt sich aus der folgenden Formel:

$$p_i = C (p_1 - p_2),$$

wobei

$$C = \frac{x}{y} \left(\frac{d_i}{d_k} \right)^2 \frac{D \pi}{s}.$$

In dieser Formel bedeutet x/y das in Abb. 291 C gezeigte Hebelver-hältnis; d_i , d_k und D sind der Reihe nach die Durchmesser des Modell-maschinenkolbens, des Kolbenschiebers k und des Teilkreises des Sonnen-rades e , und s ist der Hub der Modellmaschine.

Abb. 292 und 293 zeigt ein Gerät für die gleichzeitige Indizierung einer Vierzylindermaschine, in welchem also vier Modellkolben mittels der

Nockenhebel b_1 und b_2 auf eine einzige Kurbel einwirken. In dieser Bauform wird die Wirkung des Hebels h (in Abb. 291 A) durch die Rollen h erfüllt, welche in den schraubenförmigen Schlitten des Schwungrades f sich bewegen. Die dadurch verursachte, auf das Rad g ausgeübte Axialkraft betätigt den Kolbenschieber k in der oben beschriebenen Weise. Der Antrieb von der zu untersuchenden Maschine wird auf den Indikatormotor durch Zahnrad i übertragen, welches mit einem breiten Zahnrad in Eingriff steht, das eine Verschiebung des Schwungrades g in der Achsenrichtung gestattet.

Die Patentschriften DRP. 305477 (1918) und 305746 (1918) von E. Schimanek beschreiben eine Abänderung des Mitteldruckindikators, in welchem für den phasengleichen Antrieb des Indikatormotors ein Wechselstromgenerator und Synchronmotor angewendet werden.

Der Drehmomentmesser von K. Kutzbach (Techn. Hochsch. Dresden, DRP. 410266

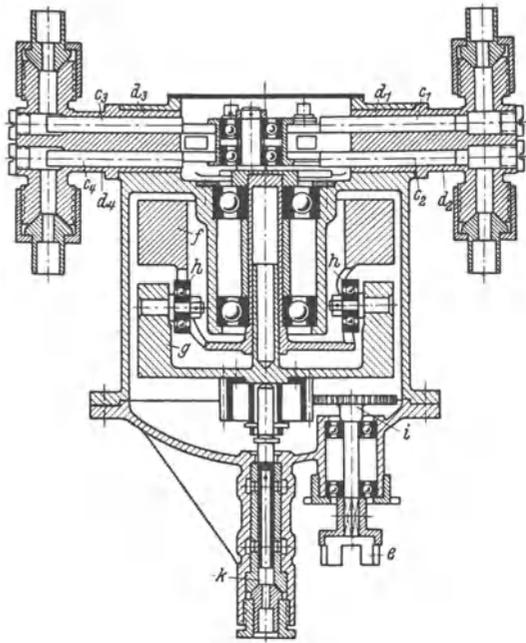


Abb. 292.

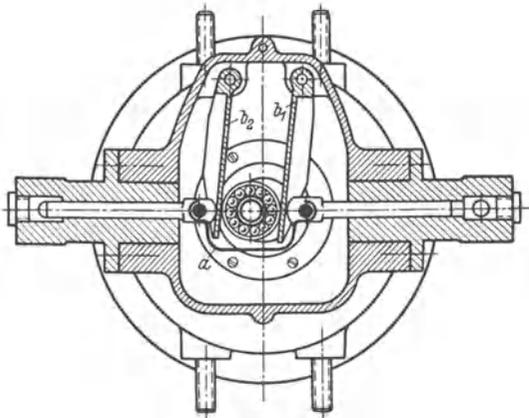


Abb. 293.

Abb. 292 und 293. Mitteldruckindikator nach Schimanek für die gleichzeitige Messung von vier Zylindern; die Meßkolben c_1 , c_2 , c_3 und c_4 bewegen sich in den vier Zylindern d_1 , d_2 , d_3 und d_4 , welche mit je einem Maschinenzylinderraum in Verbindung stehen. Durch den Antrieb e und i von der Maschinenwelle wird das Schwungrad f mittels der im Rad g gelagerten Rollen h und der im Schwungrad angeordneten schraubenförmigen Schlitten angetrieben. Durch die Längsverschiebung des Rades g wird der Kolbenschieber verschoben, wodurch der Druck im Raum k eingestellt wird. Die Kolben werden mit den zwei Schwingarmen b_1 und b_2 mittels einer hufeisenförmigen Feder a in Berührung gehalten.

[1923]) kann als ein Gerät für die Bestimmung des indizierten mittleren Druckes oder des mittleren Drehdruckes aufgefaßt werden. Wie die Patentzeichnung Abb. 294 zeigt, wird das Drehmoment durch den Indikatorkolben 7 und einen pendelnden Plankegel 1 gemessen. Letzterer ist im Zapfen 3 drehbar gelagert, welcher an einer mit der Kurbelwelle der zu untersuchenden Maschine synchron und phasengleich umlaufenden Welle 2 angeordnet ist und mit derselben umläuft. Das Kraftaufnahmeelement ist die Feder 9. Der auf den Indikatorkolben 7 wirkende Druck ruft in der Feder 9 eine mit der jeweiligen Tangentialkraft verhältnismäßige Spannung hervor, deren schwankende Werte an der Trommel 10 durch den Schreibstift 11 aufgezeichnet werden. Man

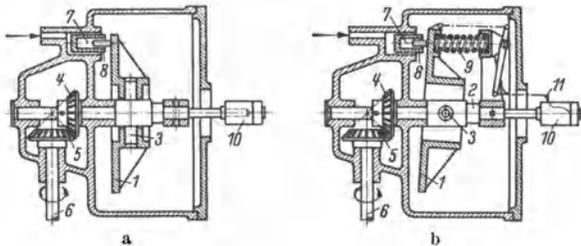


Abb. 294 a und b. Drehmomentmesser von Kutzbach. 1 pendelnder Plankegel; 2 Welle, von der untersuchten Maschine angetrieben; 3 Zapfen; durch Kegelräder 4 und 5; 7 Indikatorkolben; 8 Rolle; 9 Meßfeder; 10 Schreibtrommel; 11 Schreibstift.

kann am Umfang des Plankegels beliebig viele Indikatorkolben anordnen, je nach der Zahl der zu indizierenden Zylinder. Dabei muß dafür gesorgt werden, daß die Totpunktlagen der verschiedenen Maschinenkurbeln mit der Totpunktlage des Pendels für jeden einzelnen Indikatorkolben zusammenfallen. Es wird dann an der Schreibtrommel die resultierende Umfangskraft (Drehkraft, Tangentialkraft) aufgezeichnet. Grundsätzlich eignet sich diese Anordnung für die Aufzeichnung des schwankenden Augenblickswertes der Tangentialkraft, jedoch würde dieser Wert durch die Massenwirkungen des Gerätes verzerrt. Deshalb schlägt Kutzbach eine Vergrößerung der Massen und die Einführung einer Dämpfung vor, um das mittlere Drehmoment möglichst schwankungsfrei zu erhalten. Die Patentschrift enthält auch Lösungen für die Berücksichtigung des endlichen Pleuelstangenverhältnisses r/l .

Eine sinnreiche Verfeinerung dieses Erfindungsgedankens ist in der Patentschrift DRP. 420044 (1924) von Kutzbach enthalten, nach welcher sowohl der Augenblickswert als auch der Mittelwert angezeigt werden. Eine dritte Lösung auf elektrischem Wege wird in der Patentschrift DRP. 465651 (1924) von Kutzbach beschrieben.

Der Tangentialdruckmesser von D. Fischmann beruht auf einem ähnlichen Grundgedanken wie die oben beschriebenen Geräte. Einzelheiten sind aus der Patentschrift DRP. 312833 (1917), 396964 (1920), 402452 (1921) und 405884 (1922) zu entnehmen.

b) Mitteldruckindikator für den zeitlichen Mittelwert des Druckes.

Der Mitteldruckindikator oder Pimeter von Geiger (DRP. 416623 [1923] und 540803 [1929]) zeigt den zeitlichen Mittelwert des Druckes an. Er benötigt nur eine Rohrverbindung mit dem zu untersuchenden Zylinderraum, aber keinen Antrieb von der Maschinenwelle¹.

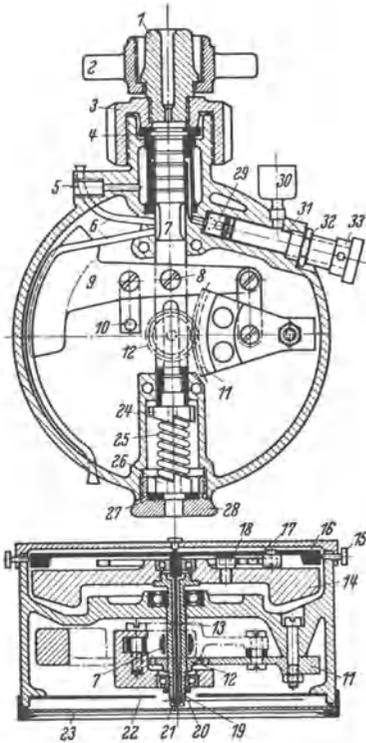


Abb. 295.

Abb. 295. Mitteldruckindikator (Pi-meter) von Geiger (Lehmann und Michels). 1 Indikatoranschluß; 2 Befestigungsmutter; 3 Überwurfmutter; 4 Zylinderbüchse; 5 Kühlwasseranschluß; 6 Schmutzölabflußröhrchen; 7 Kolben mit Kolbenstange; 8 Kolbenstangenzapfen; 9 Übertragungshebel; 10 Lenker mit festem Drehpunkt; 11 Zahnsegment; 12 Zahnrad; 13 Schwungradachse; 14 Hauptschwungrad; 15 Feststellschraube für Transport; 16 Zusatzschwungrad; 17 Feder zum Zusatzschwungrad; 18 Befestigung der Feder 17; 19 Achse des Zusatzschwungrades; 20 Zeiger; 22 Skala; 23 Glasplatte; 24 Federfuß; 25 Indikatorfeder; 26 Federkopf; 27 Unterlagscheibe zum Justieren; 28 Befestigungsmutter; 29–33 Druckölpumpe, von Hand betätigt, mit Schmierölgefäß 30.

Abb. 296. Hubdruckdiagramm einer Auspuffdampfmaschine.

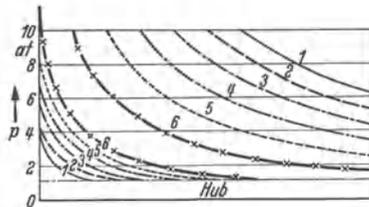


Abb. 296.

Im Gegensatz zu den vorgenannten Instrumenten, bei welchen stets ein mit gleicher Drehzahl und gleicher Winkelstellung wie die Kurbelwelle rotierender Meßkurbeltrieb notwendig ist und wobei das Meßverfahren auf die Messung der mittleren auf den Kurbelzapfen ausgeübten Drehkraft abzielt, steht der Mitteldruckindikator oder das Pimeter nach Geiger¹, Abb. 295.

Demselben liegt die Erkenntnis zugrunde, daß bei allen Kraftmaschinen zwischen dem mittleren auf den Kolbenhub und dem mittleren auf die Zeit bezogenen Druck eine verhältnismäßig einfache Beziehung

¹ Geiger: Mitteldruckindikator. Z. VDI Bd. 70 (1926) S. 509—512. Das Meßgerät wird von Lehmann & Michels in Altona gebaut.

besteht. Diese Beziehung ist zwar für verschiedene Kraftmaschinen bzw. Arbeitsverfahren verschieden, läßt sich jedoch für jeden beliebigen Fall leicht aufstellen, wenn man von der Anlage Indikatordiagramme bei möglichst verschiedenen Belastungen, beginnend von der reinen Kom-

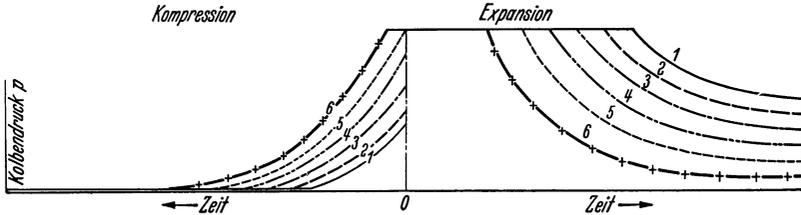


Abb. 297. Druckzeitdiagramm für die Hubdruckdiagramme von Abb. 296.

pression ohne Zündungen oder ohne Dampfeinlaß besitzt. Abb. 296 zeigt solche auf den Hub bezogene Diagramme einer Auspuffdampfmaschine, Abb. 297 die zugehörigen durch Umzeichnen entstandenen Druckzeitdiagramme und Abb. 298 die daraus durch Planimetrieren der jeweiligen

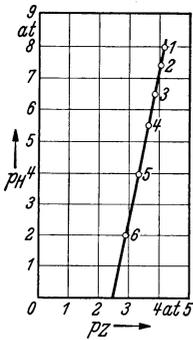


Abb. 298. Beziehung zwischen dem mittleren, auf den Hub bezogenen Druck p_H und dem mittleren auf die Zeit bezogenen Druck p_Z für eine Auspuffdampfmaschine.

Diagrammflächen und Division derselben durch den Kolbenhub bzw. das π -fache desselben sich ergebende Beziehung zwischen dem mittleren auf den Hub bezogenen Druck p_H und dem mittleren Zeitdruck p_Z .

Abb. 299 zeigt die Beziehung für eine Großgasmaschine, die Abb. 300—302 für einen Kompressor bzw. einen Viertakt Dieselmotor ohne bzw. mit Druckluft einspritzung.

Zwecks Aufstellung und Verwendung dieser Beziehung ist es notwendig, daß immer nur eine Größe, z. B. die Füllung oder der Gegendruck oder die Menge des eingespritzten Brennstoffes geändert wird. Werden mehrere Größen gleichzeitig geändert, so ergeben sich statt einer Kurve Kurvenbündel. Während des Betriebes kommen solche Änderungen, wenn wir von den Änderungen des Luftdruckes bei Fahrzeugmotoren, die in stark verschiedenen Höhen arbeiten, absehen, kaum vor; wohl aber sind sie möglich, wenn man den gleichen Indikator, z. B. an Viertakt Dieselmotoren mit verschiedenem Kompressionsverhältnis verwendet, da, wie Abb. 302 zeigt, die Kompression auf die Lage der p_H - p_Z -Kurve von nicht unwesentlichem Einfluß ist.

Es könnte befürchtet werden, daß Unterschiede in der Verbrennung auf die Beziehung ebenfalls von wesentlichem Einfluß sind. Glücklicherweise ist dies aber nicht der Fall, wie dahingehende Untersuchungen an Dieselmotoren mit Luftspritzung bei starken Vor-

zündern, ausgesprochenen Nachbrennern und normaler Verbrennung dargetan haben.

Den mittleren auf die Zeit bezogenen Druck kann man auf folgende einfache Weise ermitteln: Baut man einen Indikator so, daß seine Eigenfrequenz genügend tief unter der niedrigsten Wechselzahl der vorkommenden Druckschwankungen liegt, so spricht er auf diese nicht mehr an: Der Indikator Kolben stellt sich von selbst auf eine dem jeweiligen mittleren Zeitdruck entsprechende Lage ein.

Hierbei wirkt gemäß Abb. 295 der verlängerte und durch eine normale Indikatorfeder 25 im Gleichgewicht gehaltene Kolben 7 über Zapfen 8,

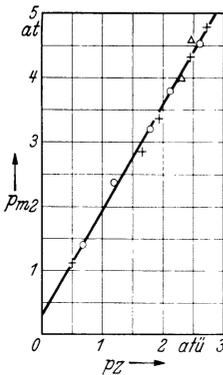


Abb. 299. Diagramm wie Abb. 298 für eine Großgasmaschine.

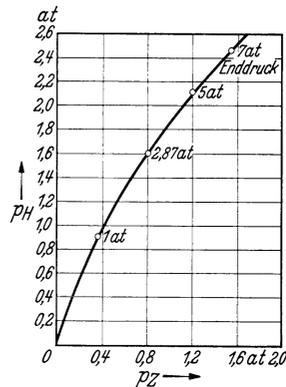


Abb. 300. Diagramm wie Abb. 298 für einen Kompressor.

Hebel 9, ein Zahnradvorgelege 11 und 12 mit starker Vergrößerung der Bewegung auf ein Schwungrad 14 ein, das wieder unter Zwischenschaltung einer Feder 17 mit einem weiteren Schwungrad 16 verbunden ist, auf dessen verlängerter Achse der Zeiger 20 sitzt. Die Schwungräder sind im Verein mit den Federn 17 und 25 so bemessen, daß sie auch bei ganz niedrigen Drehzahlen eine ruhige, schwankungsfreie Einstellung des Zeigers ergeben. Eine Wasserkühlung 5 und eine Ölpumpe 29—33 sind vorgesehen, um das Pimeter auch längere Zeit an der Maschine belassen und es als Dauerinstrument benützen zu können. Für kurzes Ablesen genügt dagegen gute Schmierung des Kolbens. Nach Öffnen des Indikatorhahnes vergehen im allgemeinen 5—10 s, bis sich der Zeiger in seine Gleichgewichtslage eingestellt hat.

Infolge seines Grundsatzes und des Fehlens jeglicher schnell hin- und herbewegter Teile eignet sich das Pimeter ohne weiteres für die höchsten Drehzahlen: für hohe Drehzahlen genügt sogar ein Schwungrad im Meßgerät. Da die Skala mit einem sehr großen Maßstab ausgeführt ist, kann man auch sehr geringe Druckunterschiede leicht mit hinreichender Genauigkeit ablesen.

Bei dauernder Verwendung an Maschinen gleicher Art und Einstellung kann die Skala so ausgeführt werden, daß man unmittelbar den auf den Hub bezogenen Druck ablesen kann. Im andern Falle ist eine Zeitdruckskala vorzuziehen, worauf man dann mit Hilfe der für jeden einzelnen Fall zuvor ermittelten Abhängigkeit des Hubdruckes p_H vom Zeitdruck p_Z den Hubdruck leicht ermitteln kann. Durch Auswechseln der normalen Indikatorfeder kann das Pimeter für beliebige Drücke bzw. Maschinen verwendet werden.

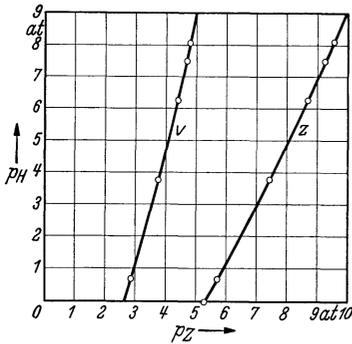


Abb. 301. Diagramm wie Abb. 298 für einen Viertakt- (*V*) bzw. einen Zweitaktmotor (*Z*) mit direkter luftloser Einspritzung des Brennstoffes.

Hauptsächlich wird es benützt, um bei Mehrzylindermotoren rasch sämtliche Zylinder auf gleichen mittleren Druck einstellen bzw. nachprüfen zu können, wobei man das Pimeter der Reihe nach an

sämtliche Zylinder anschraubt und abliest. Infolge seiner Einfachheit bürgert sich der Mitteldruckindikator bei Anlagen mit vielen Zylindern immer mehr ein¹. Zur Beurteilung der Belastung ist er weit zuverlässiger als die oft benützten Auspuffthermometer.

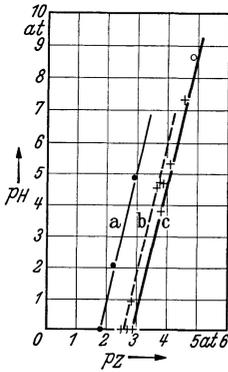


Abb. 302. Diagramm wie Abb. 298 für einen Viertaktmotor mit Drucklufteinblasung und verschieden hoher Kompression: $a = 24$; $b = 33$; $c = 37$ atü.

Die Patentschrift von J. C. Groff (USA.-Patent 1922659 [1934]) beschreibt eine Vorrichtung für die Beurteilung des Maschinenzustandes mittels eines Manometers, der mit dem zu untersuchenden Maschinenzylinder durch eine Seitenbohrung und ein Rückschlagventil verbunden ist. Die Seitenbohrung in der Zylinderwand ist in einer solchen Lage, daß der Arbeitskolben die Öffnung nur kurz vor der Öffnungsphase des Auslaßventils freigibt. Auf diese Weise zeigt das Manometer denjenigen Druck an, welcher am Ende des Ausdehnungshubes, d. h. gerade vor der Öffnung des Auslaßventils im Zylinder herrscht. Nach den Ausführungen des Erfinders besteht eine Abhängigkeit zwischen diesem Ausdehnungsenddruck und dem indizierten mittleren Druck,

welche für jede Maschine durch Indizieren ein für allemal ermittelt werden kann, so, daß das erwähnte Manometer unmittelbar in Einheiten des indizierten mittleren Druckes beziffert werden kann. Anordnungen für die Untersuchung von Mehrzylindermaschinen durch dieses Manometer sind in der Patentschrift beschrieben.

¹ Ein Gerät, mit dem unmittelbar der mittlere auf den Hub bezogene Druck abgelesen werden kann, ist im Versuchstand.

E. Höchstdruckindikatoren.

Die Kenntnis des Höchstdruckes gibt schon allein eine wertvolle Aufklärung über den Zustand einer Kolbenmaschine, insbesondere über die mechanische Beanspruchung ihrer Maschinenteile und bei Mehrzylindermaschinen über die Gleichheit der Belastung der einzelnen Zylinder. Wenn man in Verbrennungskraftmaschinen außer dem Höchstdruck auch noch den Verdichtungsdruck bestimmt, so lassen sich damit weitere wichtige Schlüsse ziehen. Aus diesem Grunde sind eine Anzahl Höchstdruckindikatoren entwickelt worden, welche den Höchstdruck einfacher und schneller angeben, als er aus einem vollständigen Indikatordiagramm ermittelbar wäre.

Der Höchstdruck in einer Kolbenmaschine kann mit einem Normalindikator auch bei hohen Drehzahlen bestimmt werden, bei welchen die Trägheit des angewendeten Gerätes die Aufnahme von vollständigen Diagrammen verbietet. Das Verfahren zeigt Abb. 303. Ein gegabelter Keil wird unter den Kopf der Indikator-Kolbenstange und den Indikatorzylinderkopf geschoben und dadurch die Indikatorfeder so weit angespannt, bis die durch die wechselnden Drücke verursachte Bewegung des Indikator Kolbens aufhört. Die Höhenlage des Schreibstiftes wird dann im Maßstabe der angewendeten Feder den Höchstdruck anzeigen.

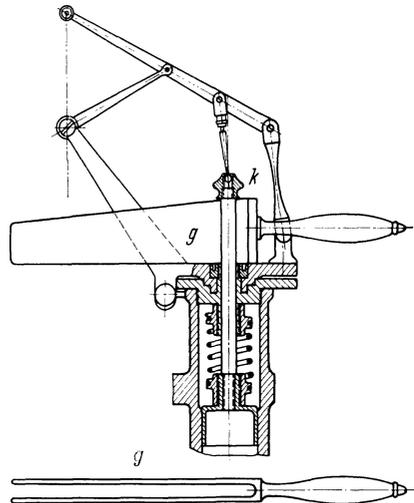


Abb. 303. Anwendung eines Keiles für die Bestimmung des Höchstdruckes mittels einem Normalindikator. *g* gegabelter Keil; *k* Kolbenstangenkopf.

Auf derselben Grundlage beruht der Höchstdruckmesser von J. Okill (British Pat. 12158 [1907] und USA.-Pat. 1467558 [1923]), welcher aber als ein eigens für diesen Zweck gebautes, handliches Gerät ausgebildet ist (Abb. 304). Es besteht aus einem federbelasteten Kolben, welcher dem Zylinderdruck ausgesetzt ist, und einem Zeiger, welcher anzeigt, ob der Kolben sich bewegt oder nicht. Die Meßfeder kann mit einer Kordelschraube zusammengedrückt und dadurch die Federspannung solange erhöht werden, bis die Kolbenbewegung aufhört. Die Federspannung und der dazugehörige Druck werden an der Mikrometerteilung des äußeren Federgehäuses abgelesen. In der gezeigten neueren Ausführung des Gerätes wird ein Zählwerk statt der Mikrometerteilung angewendet, wodurch die Ablesung erleichtert wird. Eine weitere Verfeinerung und

eine Erhöhung der Empfindlichkeit dieses Gerätes wird dadurch erreicht, daß statt dem Zeiger eine Signallampe angewendet wird, welche durch einen Kontaktgeber zwischen Kolben und Gehäuse betätigt wird (Abb. 305).

Der Höchstdruckmesser von R. B. Watson (USA.-Patent 1950532 [1934]) beruht auf demselben Grundgedanken, mit der Verfeinerung, daß

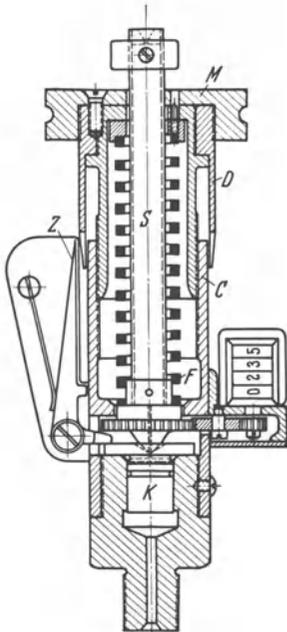


Abb. 304. Höchstdruckmesser von Okill (Hersteller G. Taylor, Ltd. Bolton, England). *K* Kolben; *F* Meßfeder; *S* hohle Kolbenstange und Schmierölleitung; *D* Hülse, mit Teilung versehen; *M* Kordelgriff; *Z* Zeiger.

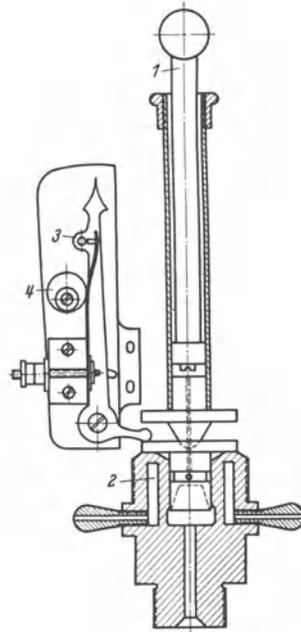


Abb. 305. Okill-Höchstdruckmesser mit elektrischem Signalanzeiger. *1* Schmierölstempel; *2* Wasserkühlmantel; *3* elektrischer Kontaktgeber; *4* ausmittige Scheibe für die Regelung des Kontaktabstandes.

der die Kolbenbewegung anzeigende Kontaktgeber durch einen Vergrößerungshebel betätigt wird, um die Empfindlichkeit zu erhöhen.

Der Höchstdruckmesser von Robert Bosch A.-G. wurde für die hohen Drücke entwickelt (bis zu 1000 kg/cm^2), welche in der Brennstoffleitung einer Dieselmachine auftreten (Abb. 306). Das Gerät beruht auf demselben Grundsatz wie die oben beschriebenen Geräte, aber es wird statt eines Kolbens ein Nadelventil angewendet, welches in sich die Wirkung eines Ventils und eines Kolbens vereinigt. Das Gerät wird in die Brennstoffleitung eingeschaltet und die geeichte Meßfeder 2 soweit mittels der Mutter 3 zusammengedrückt, bis das federbelastete Nadelventil 1 gerade aufhört Flüssigkeit durch die Düsenöffnung ins Freie entweichen zu lassen. Der dann in der Brennstoffleitung herrschende

Höchstdruck kann an der geeichten Mikrometerteilung der Mutter abgelesen werden. Bei solchen Nadelventilen ist der Öffnungsdruck höher als der Schlußdruck, d. h. es ist ein höherer Druck nötig, um das Ventil zu öffnen, als es geöffnet zu erhalten; dadurch entsteht eine Fehlerquelle oder vielmehr eine Unsicherheit in der Druckangabe, jedoch ist das für den Zweck des Gerätes belanglos. Das Gerät hat sich für die Einstellung auf gleichen Einspritzdruck in Mehrzylindermaschinen, für die Beurteilung des Widerstandes der Brennstoffleitung und auch als Sicherheitsventil für die Brennstoffleitung in Versuchsmotoren sehr brauchbar und nützlich erwiesen.

Der Höchstdruckmesser von P. Langer, W. Thomé und Marquardt (Technische Hochschule Aachen) wurde für Untersuchungen an Fahrzeugdieselmotoren entwickelt (Abb. 307). Das Gerät zeigt das Erreichen oder Überschreiten eines bestimmten, einstellbaren Druckes an.

Der Hebel *a* wird durch den Elektromagneten *b* gegen den Kontakt *c* gezogen. Sobald der Druck auf den Kolben *d* der Anziehung des Elektromagneten *b* das Gleichgewicht hält, verschwindet der Kontaktdruck bei *c*, und der Stromkreis wird auf dieser Stelle unterbrochen. Die Stromunterbrechung wird über ein hochempfindliches Relais auf einen Schreibmagneten übertragen, der die Stromunterbrechung durch Ausschlagen aufschreibt. Die Anziehungskraft des Elektromagneten *b*, der in einem besonderen Stromkreis liegt, kann man mit dem Vorschaltwiderstand *f* regeln; die Drücke, die den Anzeigen des Strommessers *e* entsprechen, bestimmt man durch Eichung. Wie aus dem Schreibstreifen in Abb. 308 ersichtlich ist, sind drei Schreibstellen vorgesehen, und zwar verzeichnet Schreibstelle 1 die Stromunterbrechungen bei *c*, Schreibstelle 2 die einzelnen Motorumdrehungen und Schreibstelle 3 die Aufzeichnungen

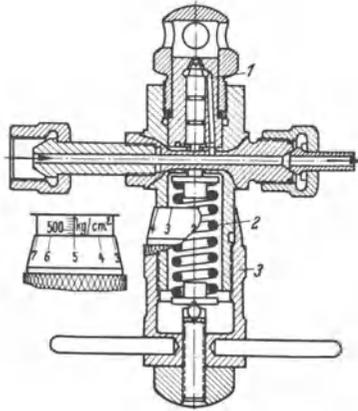


Abb. 306. Höchstdruckindikator für Brennstoffleitungen der Robert Bosch A.-G. 1 Düse; 2 Meßfeder; 3 Federspannmutter mit Mikrometerteilung.

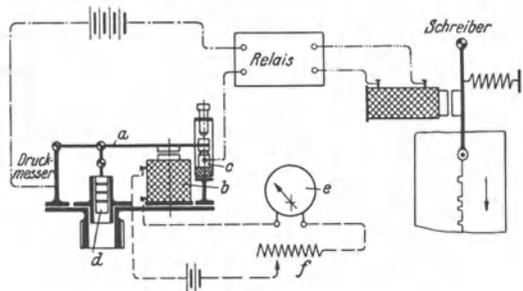


Abb. 307. Höchstdruckmesser von Langer, Thomé und Marquardt, T. H. Aachen. *a* Hebel; *b* Elektromagnet; *c* Kontaktgeber; *d* Meßkolben; *e* Stromzeiger; *f* regelbarer Widerstand.

einer Halbsekundenkontaktuhr. In diesem Falle wurde die Kraft des Elektromagneten *b* solange erhöht, bis die Schreibstelle *l* nur mehr vereinzelte Ausschläge anzeigte. Am Strommesser wurde dann der Druck von 30 at abgelesen, welcher nur bei einzelnen Zündungen erreicht und überschritten wurde.



Abb. 308. Ausschnitt aus einem Schreibstreifen des Höchstdruckmessers.

Ein weiterer Höchstdruckmesser wurde W. Lehmann patentiert (DRP. 435447 [1924]), der auch auf dem Grundsatz der Anspannung einer geeichten Feder beruht (Abb. 309). Der Druck wird mittels eines Zeigers an einem geeichten Zifferblatt abgelesen. Der Kolben und die damit zusammen bewegten Teile sind kurz und leicht ausgeführt, um das Gerät auch für hohe Drehzahlen anwendbar zu machen.

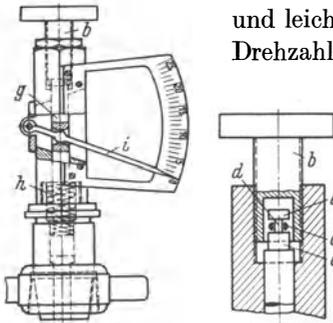


Abb. 309.

Höchstdruckmesser von W. Lehmann.
h Meßfeder; *b* Federspannschraube;
i Zeiger; *d, e* Hals und Kopf an der
 Kolbenstange; *c* mit der Schraube *b*
 verbundener Mitnehmer, welchen die
 Kolbenstange *g* bewegt, aber ihr einen
 Spielraum erlaubt.

In diese Gruppe gehört die Vorrichtung von P. Bothur und W. Beil (DRP. 374801 [1921]) für das Prüfen der gleichmäßigen Arbeitsleistung der Zylinder einer Mehrzylinder-Verbrennungsmaschine, wobei der Indikatorkolben mit einer bis zum Verdichtungsdruck vorgespannten Feder belastet wird. Die Auslenkungen, welche der Kolben oberhalb seiner Anfangslage ausführt, werden durch ein Zählwerk summiert. Die Summe ist an einem Zifferblatt ablesbar und dient als ein Maß der Heftigkeit und der Regelmäßigkeit der während der Versuchsdauer stattgefundenen Verbrennungen.

In schnellaufenden Maschinen, insbesondere wenn Klopfen auftritt, geht den Höchstdrücken ein sehr rascher Druckanstieg voran und ihre Dauer ist äußerst kurz.

Für derartige Untersuchungen müssen die sich bewegenden Teile des Höchstdruckmessers so leicht wie möglich gestaltet werden. Diese Forderung lag dem sog. „Acrometer“ (griechisch, etwa Spitzenmesser) von Mazellier und Carpentier zugrunde, in welchen ein äußerst leichtes, kleines Plattenventil aus Platin, das als Rückschlagventil dient, zwischen dem zu untersuchenden Maschinenzylinder und

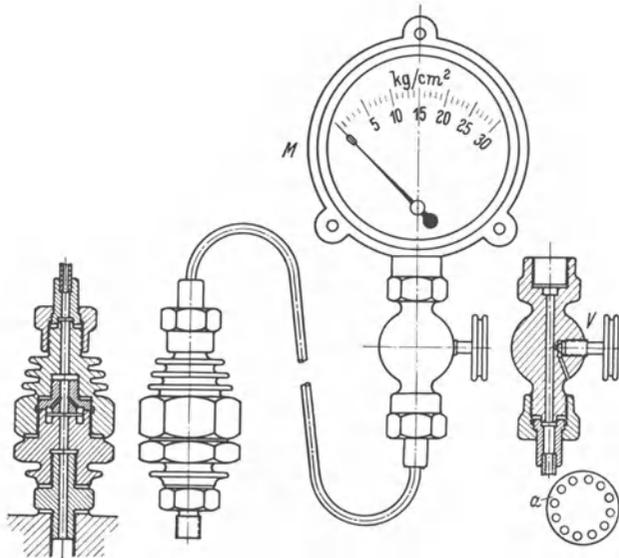


Abb. 310. Das „Acrometer“ von Mazellier und Carpentier. Das leichte Blattventil *a* erlaubt die Überströmung der Verbrennungsgase vom Zylinderraum zum Druckmesser *M*. Dieser letztere kann entleert werden mittels des Abbläventils *V*, bevor eine neue Ablesung gemacht wird.

einem genauen Manometer geschaltet wird (Abb. 310). Die Verbrennungsgase werden oberhalb des Ventils im Manometerraum gesammelt, bis in diesem Raum der Höchstdruck des Kreisprozesses erreicht wird. Die Patentschrift von A. Mazellier, DRP. 187521 (1905) beschreibt eine Anordnung, wobei auch noch ein von der Maschinenwelle gesteuertes Ventil zwischen dem Zylinderraum und dem Rückschlagventil eingeschaltet ist, um das Gerät für das Anzeigen der Höchstdrücke in einer vorausgewählten Phase geeignet zu machen. Die Anwendung eines Rückschlagventils ist mit der Fehlerquelle behaftet, daß die beiden Flächen, auf welche der Druck von der Maschine Seite und von der Manometerseite her einwirkt, infolge der Sitzfläche ungleich sind.

Um diese Fehlerquelle zu vermeiden, wird in dem Höchstdruckmesser von K. Lorenz (DRP. 419389 [1926]) mit dem Rückschlagventil ein Kolbenschieber vereinigt, welcher letzterer eine wesentlich größere Druckfläche besitzt als das Ventil (Abb. 311). Die Steuerkanten des Kolbenschiebers werden so gelegt, daß sie den

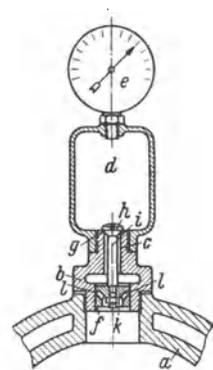


Abb. 311. Höchstdruckmesser nach K. Lorenz. *a* Maschinenzylinder; *b*, *c* Ventilgehäuse; *d* Sammelraum; *e* Druckmesser; *f* Kolbenlauf; *k* Kolbenschieber mit den Kanälen *l*; *g* Ventilsitz; *h* Ventil; *i* Ventilstange.

Weg zum Rückschlagventil erst freigeben, wenn dieses so weit gelüftet ist, daß es nur einen vernachlässigbaren Drosselwiderstand bietet.

Sowohl die Druckvergleichsmembran vom amerikanischen Normenbureau als auch das Druckvergleichsventil des Farnborough-Indikators

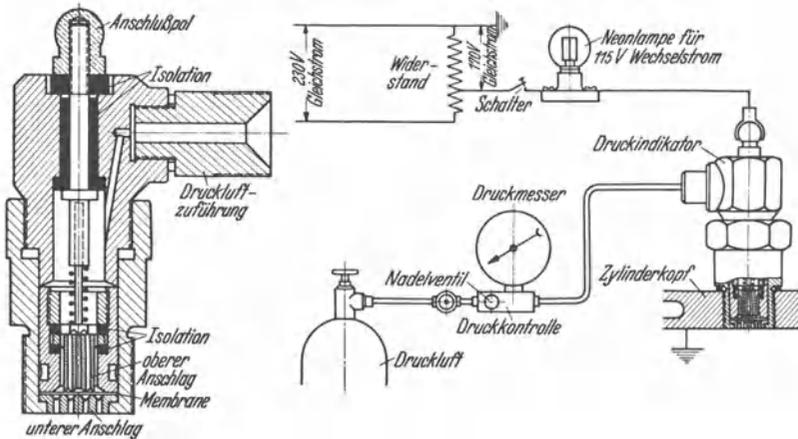


Abb. 312.

Abb. 313.

Abb. 312 und 313. Höchstdruckmesser mit Druckvergleichsmembran der amerikanischen N.A.C.A. Ventilelement und allgemeine Anordnung.

können für die Bestimmung von Höchstdrücken verwendet werden. Mit diesen beiden Geräten wird ein Hilfsvorrat von Druckluft oder Druckgas

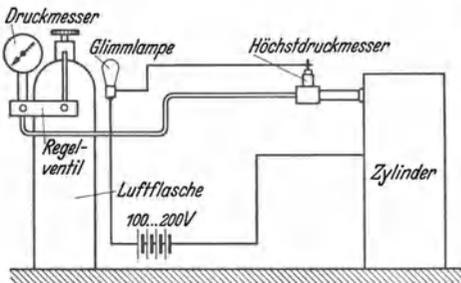


Abb. 314.

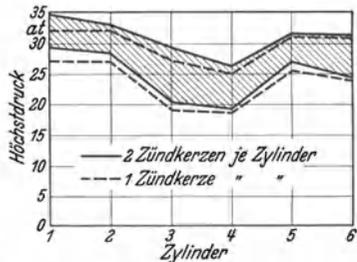


Abb. 315.

Abb. 314 und 315. Höchstdruckmesser der DVL. (E. Urbach). Allgemeine Anordnung und Versuchsergebnisse an einem Sechszylindermotor.

angewendet; sie stehen also im Gegensatz zu den oben beschriebenen Rückschlagventilen, die die für die Betätigung des Druckmessers notwendigen Druckgase unmittelbar dem untersuchten Zylinder entnehmen. Da bei der Messung von Höchstdrücken die Kenntnis der dazugehörigen Phase nicht erforderlich ist, fällt der Phasensucher weg und das Gerät gestaltet sich sehr einfach. Nur ein Anzeigorgan,

Telefon oder Neonlampe, ist notwendig, um anzugeben, ob ein elektrischer Kontakt zustande kommt oder nicht, d. h. ob der Höchstdruck erreicht wurde.

Der Höchstdruckmesser der National Advisory Committee for Aeronautics (Nationales Beratungskomitee für Luftfahrt, Washington) besteht aus dem Druckelement, dem Druckgasvorrat mit Regelventil und Manometer und dem elektrischen Kreis mit der Neonlampe (Abb. 312 und 313). Das Druckelement wird in eine metrische Zündkerzenbohrung eingesetzt; deshalb wird der Membrandurchmesser auf etwa 13 mm und der freie Durchmesser auf etwa 9,5 mm beschränkt. Als Material wird schwedischer Federstahl angewendet, so dünn, wie es die zu messenden Drücke erlauben, 0,1 mm für Drücke bis etwa 50 at (Verpuffungsmotore) und 0,2 mm bis etwa 100 at (Dieselmaschinen). Die durchlöcherten Stützwände erlauben eine Mittendurchbiegung von etwa 0,12 mm, so daß die Streckgrenze nicht überschritten wird. Es wurde berechnet, daß etwa 0,3 at Überdruck zur Kontaktgebung genügt.

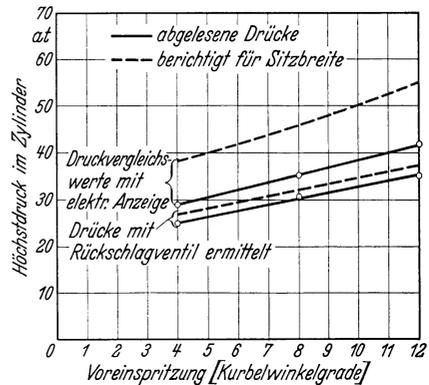


Abb. 316. Vergleich der Verbrennungsdruckwerte, gewonnen mit einem Farnborough-Indikatorventil, und zwar 1. mit Druckluftvorrat und elektrischer Anzeige, und 2. ohne Druckluftvorrat, mit unmittelbarer Druckmesserablesung.

Der von der DVL (Deutsche Versuchsanstalt für Luftfahrt) entwickelte Höchstdruckmesser (Abb. 314 und 315 bezw. 249) beruht auf ähnlicher Grundlage. Eine Glimmlampe von 115 V und 2 bis 3 W wird angewendet. Es wurde gefunden, daß der Verdichtungsdruck einer Verbrennungskraftmaschine mit einer einzigen Messung feststellbar ist, da nur vernachlässigbare Abweichungen zwischen den einander folgenden Kreisprozessen bestehen. Demgegenüber zeigen die Verbrennungsdrücke eine beträchtliche Streuung voneinander, so daß man von einem Bereich des Verbrennungsdruckes sprechen kann und dessen niedrigster und höchster Wert bestimmt werden muß (Abb. 315).

Der Höchstdruck kann durch ein Vergleichsventil, wie es im Farnborough-Indikator angewendet wird, in zweierlei Weise bestimmt werden: entweder mit einem Druckgasvorrat, wobei die Druckgleichheit durch einen elektrischen Anzeiger angegeben wird oder ohne Druckgasvorrat, wobei das Ventil als Rückschlagventil wirkt und der Druck der gesammelten Gase unmittelbar mit einem Druckmesser gemessen wird. Die Untersuchungen der N.A.C.A. haben ergeben, daß die beiden Messungen voneinander abweichende Ergebnisse geben, und zwar liefert

das zweite Verfahren einen niedrigeren Druckwert infolge des durch das Ventil verursachten Druckverlustes, wie es zeichnerisch in Abb. 316 gezeigt wird.

F. Indikatoren für Druckunterschiede.

Genau genommen gibt irgendein Indikator nicht den Absolutwert des Druckes an (d. h. den Druck gegenüber Vakuum), sondern den Unterschied zwischen dem Zylinderdruck der Maschine, welcher auf die eine Seite des Indikator Kolbens, und dem atmosphärischen Druck, welcher auf die andere Seite des Indikator Kolbens einwirkt, an. Man kann aber

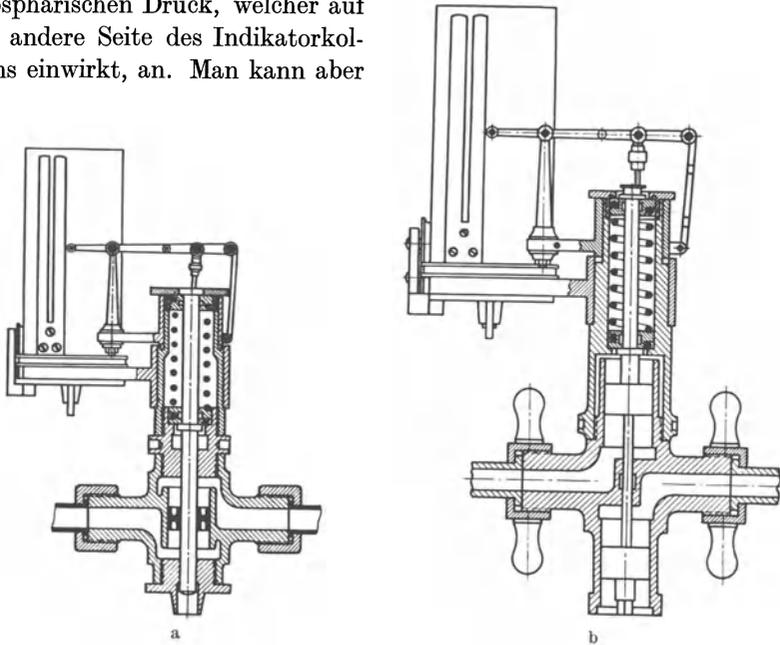


Abb. 317 a u. b. Differenzindikatoren (Schaeffer und Budenberg). a mit einem Kolben; b mit zwei Kolben.

auf die beiden Seiten des Indikator Kolbens je einen wechselnden Druck einwirken lassen, und dadurch den Unterschied der beiden Drücke aufzeichnen lassen. Die eigens dafür gebauten Indikatoren sind die Differenzdruckindikatoren. Verbindet man z. B. die zwei Kolbenseiten einer Dampfmaschine mit beiden Seiten des Indikator Kolbens, so würde der Indikator unmittelbar die Kolbenstangenkraft der Maschine aufzeichnen. Mit einem einfachwirkenden Normalindikator könnte die Kolbenstangenkraft als der Unterschied der von den beiden Kolbenseiten der Maschine aufgenommenen Diagrammwerte ermittelt werden, also mit mehr Mühe und mit geringerer Genauigkeit, da sowohl Reibungsfehler

und andere Indikatorfehler als auch Beobachtungsfehler in der Unterschiedsbildung das Endergebnis beeinflussen.

Derartige Indikatoren zeigen die Abb. 317 a, b und 318, wobei

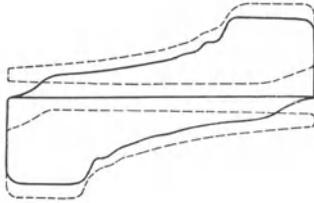


Abb. 318 zeigt ein Differenzdiagramm, überlagert von zwei von den beiden Zylinderseiten aufgenommenen Einzeldiagrammen.

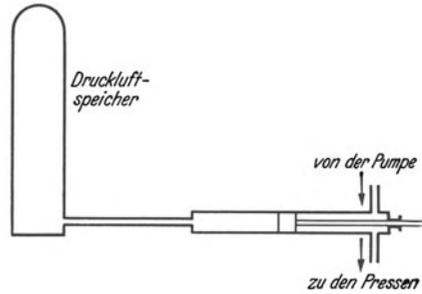


Abb. 319. Anordnung des Druckluftspeichers für hydraulische Arbeitsmaschinen.

die beiden Indikatorräume voneinander und von der Außenluft dichtend abgeschlossen werden müssen. Die Verbindung mit den beiden Zylinderenden der Maschine macht eine lange Verbindungsleitung notwendig,

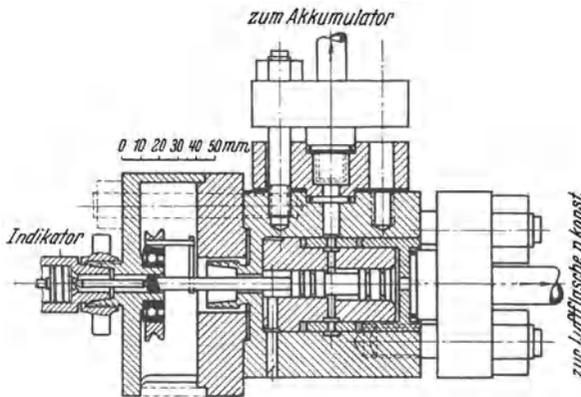


Abb. 320. Differenzindikator von R. Sackheim für hohe Drücke. Auf die große Stirnfläche des Differenzkolbens wirkt ein gleichbleibender Druck einer Luftflasche; auf dessen kleine Ringfläche wirkt der wechselnde Speicherdruck. Der Unterschied der beiden Kräfte wird auf die Kolbenstange des Indikators übertragen. (Der Indikator Kolben ist an beiden Seiten der Außenluft ausgesetzt, daher wirkt er lediglich als Geradeführung für die Indikator-Kolbenstange.) Die Übertragung der Kraft des Differentialkolbens auf den Indikator Kolben mittels einer an beiden Enden zugespitzten Nadel ist bemerkenswert. Die in Kugeln gelagerte Schmurrolle dient für die Drehung des Differenzkolbens, die Kugellagerung zur Ausschaltung der Reibung in der Achsenrichtung.

welche Drosselungs- und Trägheitsfehler verursacht. Weiterhin fehlen von dem erhaltenen Diagramm die charakteristischen Linien, so daß es sich für die Beurteilung der Steuerung und der Phasen des Arbeitsprozesses nicht eignet. Wegen dieser Mängel werden solche Differenzindikatoren an Kolbenkraftmaschinen kaum mehr angewendet.

Der Grundsatz findet aber Anwendung für Druckvorgänge, in welchen die verhältnismäßig geringen Schwankungen um einen hohen mittleren Druck von Interesse sind. Das ist der Fall in hydraulischen Speichern, welche für die Betätigung von Pressen, Scheren, Nietmaschinen und ähnlichen Arbeitsmaschinen dienen. Eine derartige Anordnung zeigt Abb. 319. Der Druck der im Speicher enthaltenen Luft ändert sich um ein

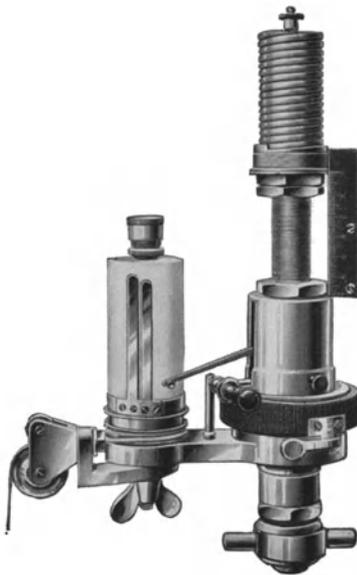


Abb. 321. Indikator für Druckunterschiede mittels vorgespannter Feder (Lehmann und Michels).

Geringes, wenn der hydraulische Kolben sich infolge Zunahme oder Abnahme von Druckflüssigkeit derselben bewegt. Für die Aufzeichnung dieser geringen Druckänderungen hat R. Sackheim einen Normalindikator in Verbindung mit einem Zusatzgerät verwendet, welches aus Abb. 320 ersichtlich ist. Der wesentliche Bestandteil dieses Gerätes ist der Differentialkolben, auf dessen Ringfläche die Speicherdrücke wirken, während seine Stirnfläche ein gleichbleibender Druck einer Druckluftflasche beeinflusst. Der Unterschied dieser beiden Drücke wird vom Indikator in großem Federmaßstab aufgezeichnet. Die Reibung in der Achsenrichtung wird durch Drehung des Kolbens ausgeschaltet. Es wird angegeben, daß mittels dieses Gerätes eine Schwankung um etwa 0,1 at bei einem mittleren Druck von 500 at noch klar aufgezeichnet werden kann.

Ein den Bedürfnissen von Pressen, Nieten und anderen Arbeitsmaschinen angepaßter Differenzindikator wird im Patent von A. Bahnmayer, DRP. 368 121 (1921) ausführlich beschrieben.

In dem Differenzindikator von Lehmann und Michels (Abb. 321) wird die Meßfeder einem vorbestimmten Bezugsdruck entsprechend vorgespannt, wobei der Indikatorkolben entweder in seine untere oder in seine obere Grenzlage gebracht wird. Dementsprechend wird dann der Indikator nur den Über- oder den Unterdruck gegenüber diesem Bezugsdruck aufzeichnen. Dieses Verfahren kann als die Weiterentwicklung der Aufnahme von Schwachfederdiagramme angesehen werden, in welchen auch der obere Teil des Diagrammes infolge der mechanischen Begrenzung der Kolbenbewegung unterdrückt wird.

G. Indikatoren für Bewegungen.

Wie in den übrigen Abschnitten schon erwähnt wurde, eignet sich der Indikator auch für die Aufzeichnung einer Bewegung als die Funktion

einer anderen Bewegung. Hierbei können die Bewegungen entweder in wahrer Größe oder verkleinert oder vergrößert aufgezeichnet werden. In diesem Abschnitt sollen einige eigens für diesen Zweck dienende Indikatoren beschrieben werden.

Abb. 322 zeigt einen Indikator der H. Maihak A.-G. für Ventilerhebungsdiagramme, wobei die Ventilerhebung ohne Vergrößerung aufgezeichnet wird. Die Kolbenstange wird mit einer schwachen langen Feder belastet, um ein sattes Anliegen am Ventil zu sichern.

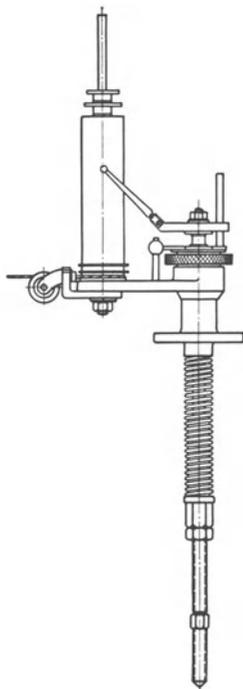


Abb. 322. Indikator für Ventilerhebungen (H. Maihak).

Abb. 323 zeigt einen Indikator nach R. T. Stewart für die Aufzeichnung der Unrundheit von Röhren. Das Rohr wird auf zwei Rollen *R* gelegt und daran langsam gedreht. Zwei Tastpunkte *N* und *M* berühren

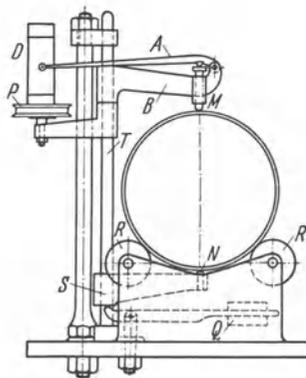


Abb. 323. Indikator für die Messung der Unrundheit von Röhren (R. T. Stewart).

dabei zwei auf einem Durchmesser einander gegenüberliegende Punkte. Der untere Tastpunkt *N* bildet einen Teil des Balkens *S*, der am Stab *T* festgemacht ist und mit demselben zusammen auf und ab sich bewegen kann. Die satte Berührung des Tastpunktes *N* mit der Rohroberfläche wird durch Gewicht *Q* gesichert. Am Stab *T* wird auch der Indikator befestigt, der den anderen Tastpunkt *M* trägt. Die Bewegung der beiden Tastpunkte wird durch den Hebel *A* im Verhältnis 10:1 vergrößert auf der Trommel *D* aufgezeichnet, welche zweckmäßig verhältnismäßig mit der Rohrdrehung gedreht wird.

Der sog. Meßroller (Robert Blohm, Hamburg) dient für die Aufzeichnung der Unrundheit oder der Abnutzung der Zylinderbüchse, insbesondere von großen Dieselmotoren (Abb. 324). Ein Normalindikator wird auf einem Rahmen befestigt, welcher mit zwei Schlitten

und einer Rolle an der inneren Lauffläche des zu untersuchenden Zylinders anliegt und durch einen Stiel im Zylinderinnern auf und ab bewegt werden kann. Zwischen den

beiden Schlitten ist ein Meßkontaktpunkt angeordnet, welcher an der Oberfläche federnd anliegt; dessen Bewegungen werden auf die Kolbenstange des Indikators und daher auf das Schreibgestänge übertragen und auf der Indikatortrommel vergrößert aufgezeichnet. Die Drehung der oben genannten Rolle wird durch entsprechende Zahnräder und Schnurantrieb auf die Indikatortrommel übertragen. Dadurch erhält man das Diagramm der Abweichung einer Zylindermantellinie von der Geraden als Funktion des Hubes. Zwei solche Diagramme, eines in der Ebene der Maschinenwelle, das andere quer zu derselben, geben eine eindeutige Aufklärung über den Zustand der Zylinderlauffläche. Durch periodische Diagrammaufnahme kann die Abnutzung

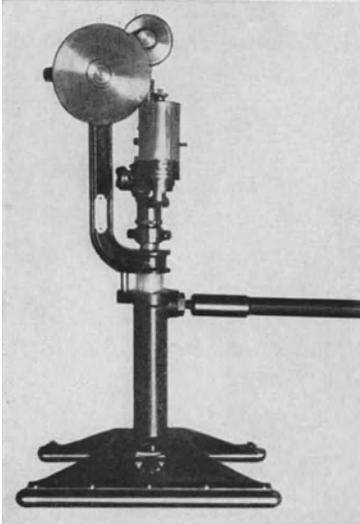


Abb. 324. Meßroller für die Untersuchung des Zylinderinneren (Laufbüchsen) großer Dieselmotoren (Robert Blohm, Hamburg).

der Lauffläche überwacht werden. Dieses Gerät hat sich für die periodische Überwachung der Lauffläche, für die Ermittlung der Abnutzung

bei Verwendung von verschiedenen Brennstoffen und Schmierölen usw. gut bewährt. Auf ähnlicher Grundlage beruht das in Abb. 325 gezeigte Gerät für die Untersuchung von Kolbenstangen auf Abnutzung und Biegung.

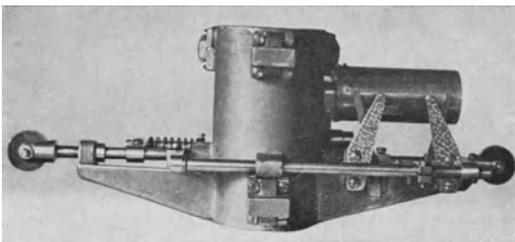


Abb. 325. Meßroller für die Untersuchung von Kolbenstangen von großen Dieselmotoren (Robert Blohm, Hamburg).

H. Indikatoren für Klopfuntersuchungen.

Unter gewissen Bedingungen tritt in Verbrennungsmotoren statt einer allmählichen Verbrennung eine heftige Verbrennung mit hoher Geschwindigkeit auf, die als Detonation oder Klopfen bezeichnet wird. Die dabei auftretenden Druck- und Temperatursteigerungen führen unter Umständen zu einer gefährlichen Beanspruchung der Triebwerksteile und Ventile. Die Verbrennungsgeschwindigkeit in einer Vergasermaschine

wurde von K. Schnauffer¹ zu etwa 20 bis 25 m/s bei gewöhnlicher Verbrennung und etwa 250 bis 300 m/s beim Klopfen festgestellt¹. Für das Auftreten des Klopfens sind hauptsächlich der Verdichtungsgrad der Maschine und die Eigenschaften des Brennstoffes maßgebend.

In einer Vergasermaschine ist die ganze Brennstoffmenge im Zylinder vorhanden; in einer Dieselmachine wird die Brennstoffmenge allmählich am Ende der Verdichtung eingeführt. Dementsprechend benehmen sich beide Gasmaschinentypen in bezug auf ihre Klopf Eigenschaften entgegengesetzt.

In Vergasermaschinen begünstigt eine Erhöhung des Verdichtungsgrades das Klopfen. Je höher die Verdichtung, um so höher die Temperatur des im Zylinder vorhandenen brennbaren Gemisches, wodurch eine gleichzeitige Selbstzündung der noch unverbrannten Gemischmenge entsteht. Schnelle Verbrennungsgeschwindigkeit des Brennstoffes begünstigt das Klopfen.

In Dieselmachines dagegen wird das Klopfen begünstigt durch einen niedrigen Verdichtungsgrad. Je höher die Verdichtung, um so höher ist die Temperatur der Verbrennungsluft im Zylinder und um so kürzer der Zeitverzug zwischen Einführung und Verbrennung der eingespritzten Brennstoffteilchen, um so gleichmäßiger ist also die Verbrennung. Schnelle Verbrennungsgeschwindigkeit, d. h. geringer Zündverzug des Brennstoffes wirken beim Dieselmotor klopfhindernd.

Hinsichtlich der Klopfneigung von Maschinen und Brennstoffen sei auf das diesbezügliche Schrifttum hingewiesen. An dieser Stelle sollen nur die für solche Untersuchungen dienenden Geräte besprochen werden.

Wohl das älteste Klopfmeßgerät ist der Sprungstabindikator (bouncing-pin indicator) von T. Midgley, der dieses Gerät bei seinem Suchen nach Klopfgegenmitteln benutzt hat und hierbei zur Entdeckung der Wirksamkeit von Tetra-äthylblei gelangte (Abb. 326). Das Gerät besteht aus einer Membran aus Legierstahl (etwa 0,4 mm dick, 14 mm \varnothing), die durch die Zylinderdrücke in Schwingungen gesetzt wird. Auf dieser liegt der Sprungstab an, der etwa 5,5 mm \varnothing und 17,5 mm Länge hat. Unmittelbar über dem Stab ist ein elektrischer Kontaktgeber angeordnet,

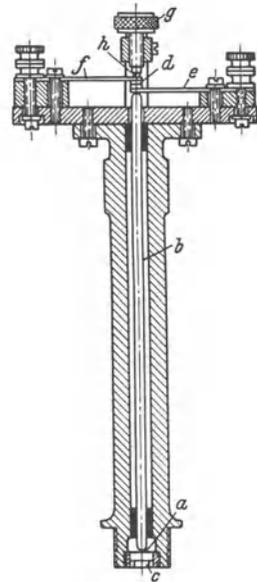


Abb. 326. Sprungstabindikator nach T. Midgley für Klopfuntersuchungen. *a* Membran; *b* Sprungstab mit isolierendem Bakelite-Teil am oberen Ende; *c* Haltermutter für die Membran *a*; *d* Kontaktpunkte; *e* und *f* untere und obere Kontaktfeder; *g* obere Feststellschraube mit kleinem federbelastetem Kolben *h*.

¹ Schnauffer, K.: Z. VDI Bd. 75 (1931) S. 1126.

der aus zwei Blattfedern mit Kontaktpunkten besteht, deren Abstand von etwa 0,075 bis 0,15 mm regelbar ist. Wenn die Druckänderungsgeschwindigkeit im Zylinder einen gewissen Betrag überschreitet, wird der Stab in die Höhe geschleudert und dadurch der Kontakt geschlossen. Je heftiger das Klopfen, um so mehr und länger werden die Kontaktpunkte zusammengedrückt und desto größer wird die hindurchgehende Strommenge. Die Strommenge ist daher ein Maß der Klopfstärke und wird entweder mit einer Knallgaszelle durch die sich ansammelnde Knallgasmenge oder mit einer Heizwendel und einem die Temperatur dieser Wendel messenden Thermolement ermittelt.

Dieses Gerät gestattet nur einen qualitativen Vergleich, auch sind dessen Angaben nicht in bestimmten physikalischen Maßeinheiten ausdrückbar. Die Angabe hängt stark von der Einstellung des Gerätes, von dem freien Membrandurchmesser, von der Elastizität der Kontaktblätter und vom Abstand der Kontaktpunkte voneinander usw. ab. Es ist auch schwer, mehrere Geräte gleich einzuregulieren, d. h. so, daß sie unter denselben Maschinenzuständen dasselbe Ergebnis liefern. Trotz dieser Mängel hat das Gerät bei Untersuchungen von Klopfmitteln und beim Vergleich verschiedener Brennstoffe untereinander in bezug auf ihre Klopf Eigenschaften wertvolle Dienste geleistet. In neuerer Zeit sind aber Bestrebungen im Gange, für Klopfuntersuchungen Apparate und Verfahren zu entwickeln, die eine Eichung in physikalischen Einheiten zulassen und deren Angaben wiederholbar sind. (Siehe Abschnitt Zündverzugindikator nach Hetzel.)

VII. Prüfung und Eichung des Indikators.

Ein Diagramm, welches den Arbeitsprozeß einer Kolbenmaschine getreu wiedergeben soll, kann nur mit einem Indikator erhalten werden, welcher an sich genau ist und in einem tadellosen Zustand erhalten wird. Ein unrichtiges Diagramm kann zu irrigen Schlüssen Anlaß geben. Man muß im Auge behalten, daß ein Indikator im Betriebe hohen Beanspruchungen und auch zufälligen Beschädigungen ausgesetzt ist; deshalb ist es notwendig, seinen Zustand von Zeit zu Zeit zu prüfen und ihn auf Richtigkeit eichen. Die grundsätzlichen Fehlerquellen wie dynamische Einflüsse, Reibung am Kolben und Schreibgerät, Abweichung von Parallelismus zwischen Trommelachse und Kolbenachse und Fehler im Trommelantrieb sind in den früheren Abschnitten bzw. in den Abschnitten VIII und IX behandelt. Den Gegenstand dieses Abschnittes bilden die Verfahren und Apparate für die Bestimmung des tatsächlichen Federmaßstabes.

Das Vergrößerungsverhältnis des Schreibgerätes kann einfach dadurch bestimmt werden, daß der Kolben um einen bekannten Abstand

verschoben und die dadurch verursachte Bewegung der Schreibspitze gemessen wird. Ein dazu dienendes Mikrometergerät zeigt Abb. 327.

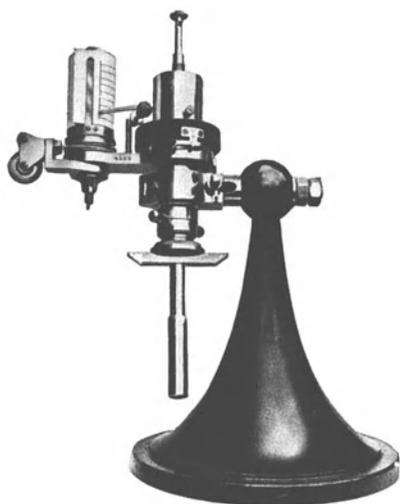


Abb. 327. Einrichtung zur Prüfung der Proportionalität zwischen Kolben und Schreibstiftweg (Lehmann und Michels).

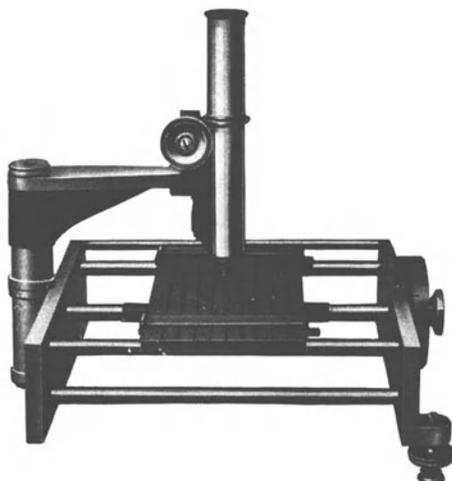


Abb. 328. Meßtisch für Eichdiagramme nach Dr.-Ing. A. Stauß (Lehmann & Michels).

Das so erhaltene Eichdiagramm kann entweder mit einem genauen Maßstab (gläserne, durchsichtige Genauigkeitsmaßstäbe werden für diesen Zweck hergestellt) oder mit einem Meßmikroskop (Abb. 328 u. 329) ausgemessen werden.

Der Federmaßstab, welcher am Federfuß angegeben wird, gilt nur annähernd; er ändert sich geringfügig bei Änderungen in den elastischen Eigenschaften des Federmaterials durch die wiederholten Beanspruchungen,

durch in langen Zeiträumen eintretende Änderungen der Kristallstruktur usw. Die Federeichung kann entweder durch Druck oder durch Gewicht vorgenommen werden.

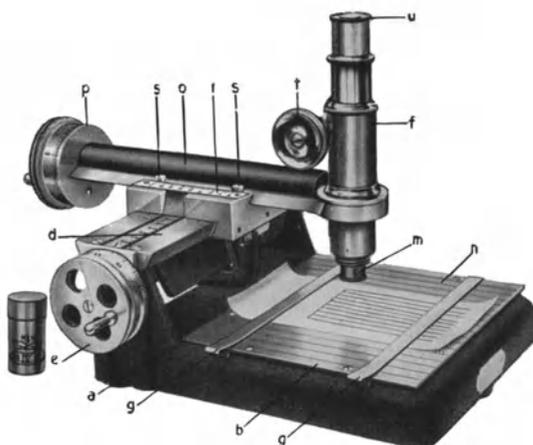


Abb. 329. Meßmikroskop für Diagramme jeder Art mit Bewegung in zwei Koordinaten (H. Maihak, A.-G.).

Bei der Druckeichung wird der Indikatorkolben mit verschiedenen Flüssigkeits- oder Gasdrücken belastet, welche gleichzeitig mit einem genauen Manometer (Feder, Flüssigkeits- oder Kolbenmanometer) gemessen werden. Über die genaue Druckmessung gibt es ein ausgedehntes Fachschrifttum, worauf im Literaturverzeichnis hingewiesen wird. Hier seien nur solche Apparate besprochen, die für die laufende Eichung von Indikatoren benutzt werden.

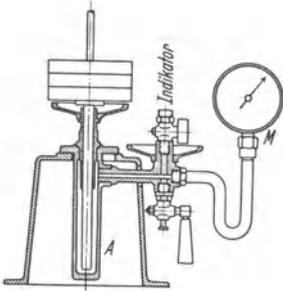


Abb. 330. Kolbenmanometer (Dreyer, Rosenkranz und Droop). *M* Manometer.

Das Kontrollmanometer ist ein besonders sorgfältig hergestelltes Federmanometer mit Bourdon-Röhre, das seinerseits mit einer Quecksilbersäule verglichen wird. Der Druck muß dabei durch eine besondere Flüssigkeitspumpe erzeugt werden.

Flüssigkeitsmanometer für niedrige Drücke bestehen aus einem geneigten, mit Wasser, Alkohol oder Quecksilber gefüllten Rohr. Durch Einstellung der Neigung kann der Ablesemaßstab geändert werden. Für

hohe Drücke dienen lange (bis 25 m und mehr), senkrechte, mit Quecksilber gefüllte Röhren, in welchen das Niveau mit Spiegel abgelesen wird. Um Aufstellung und Ablesung zu erleichtern, werden diese auch aus mehreren kurzen Röhren hergestellt, in welchen zwei Flüssigkeiten, d. h.

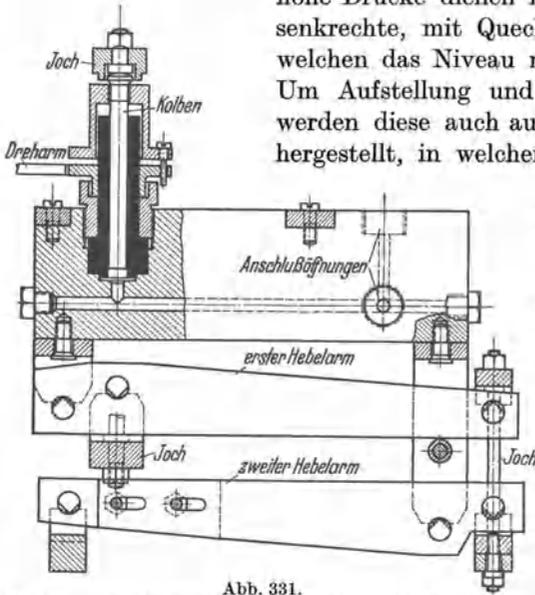


Abb. 331. Kolbenmanometer nach de Juhasz, mit Hebelübersetzung und Waageanzeige. (The Pennsylvania State College.)

Quecksilber (von hohem spezifischem Gewicht) und Wasser (von niedrigem spezifischem Gewicht) angewendet werden. Bei dieser Anordnung müssen allerdings eine Anzahl von Oberflächen abgelesen werden, wodurch eine Ablesefehlerquelle eintritt. Auch muß beim Meßwert noch die Temperatur der Meßflüssigkeiten berücksichtigt werden. Wegen dieser umständlichen Handhabung werden solche

Flüssigkeitsmanometer nicht direkt für die Eichung von Indikatoren benutzt, sondern nur für die Prüfung von Eichinstrumenten.

In dem in Abb. 330 gezeigten Kolbenmanometer wird der Öldruck durch einen in einen Zylinder genau eingeschliffenen Kolben erzeugt, der

durch Gewichte belastet wird. Das Gewicht dividiert durch die Kolbenfläche ergibt unmittelbar den Druck. Die Reibung in der Achsenrichtung wird durch Drehung des Kolbens ausgeschaltet. Unter der Gewichtsbelastung sinkt der Kolben; deshalb ist eine Nachfüllung des Öles durch eine Kolbenpresse notwendig. Dieses für die Genauigkeitsansprüche der Indikatoreichung völlig ausreichende Manometer wird häufig angewendet. Das Auflegen und Abheben der Gewichte ist aber unbequem.

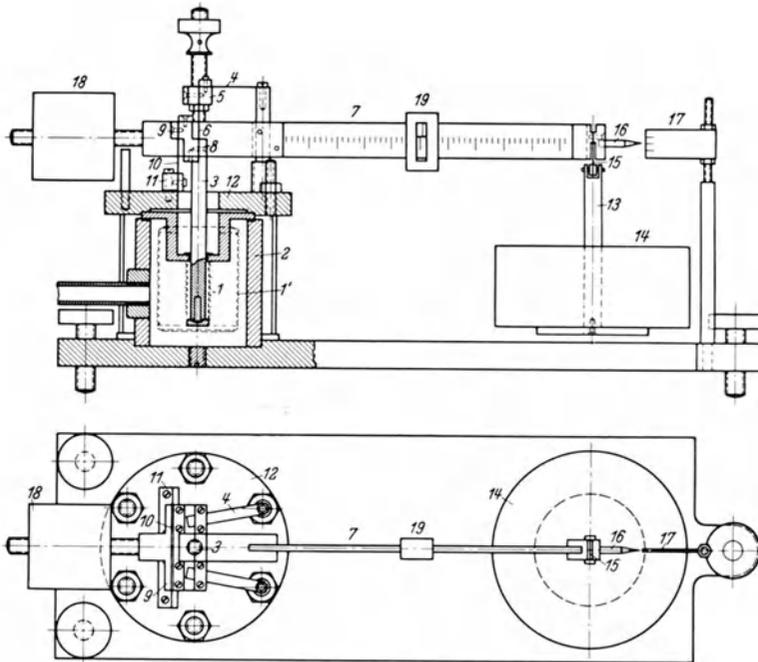


Abb. 332. Metallballmanometer nach R. J. S. Pigott (Gulf Research and Development Corporation, Pittsburgh). 1 Balg von kleinem Durchmesser (für hohe Drücke); 1' Balg von großem Durchmesser (für niedrige Drücke); 2 Gehäuse; 3 Balgstange; 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11 Gelenkanordnung mit dünnem Stahlband; 7 Waagenhebelarm; 12 Deckelplatte; 13 Pfannenstiel; 14 Meßgewicht; 15 Stahlbandaufhängung; 16 Zeiger; 17 Einspielmarke; 18 Gegengewicht; 19 Laufgewicht. Entweder wird Balg 1 oder Balg 1' angewendet.

Im Eichgerät von De Juhasz (Pennsylvania State College), Abb. 331, wird dieser Übelstand durch Anwendung einer Hebelübersetzung und einer Pendelwaage vermieden. Der Öldruck ergibt sich durch die Kolbenoberfläche, durch das Hebelverhältnis und durch die Gewichtsanzeige der Waage; das Zifferblatt der Waage gibt unmittelbar die Druckeinheiten an. Der Zylinder wird in einem Stahlkörper eingesetzt, in welchem eine Anzahl miteinander durch entsprechende Bohrungen verbundene Anschlußöffnungen vorgesehen sind. Eine der Anschlußöffnungen ist mit einer handbetätigten Ölpressen verbunden, während die andere zu den zu eichenden Geräten, Indikatoren oder Manometern, führt.

Die nach oben gerichtete Kolbenkraft wird durch ein Joch auf einen Hebel übertragen, der diese im Verhältnis der Hebelarme verkleinert auf einen zweiten Hebel überträgt; die so verminderte Kraft wird durch die Pendelwaage gemessen. Die Länge eines Hebelarmes kann zwecks genauer Einstellung des Hebelverhältnisses geändert werden. Das Gewicht des Kolbens, Joches und Hebels wird durch Hilfshebel und Gewicht ausgeglichen.

Weitere Kolbenmanometer mit Hebelübersetzung für hohe Drücke sind im Schrifttumsverzeichnis angegeben.

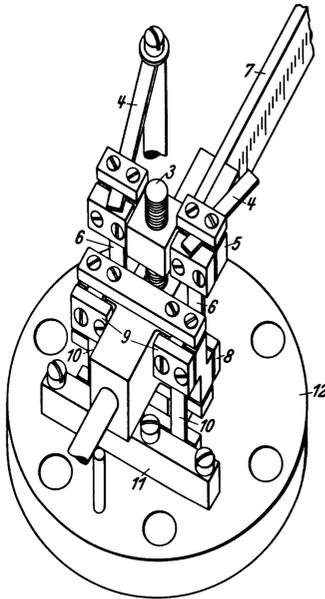


Abb. 333. Aufhängung der Balgstange und des Waagenhebelarmes an Stahlbandgelenken.

Nachteilig ist bei den Kolbenmanometern das Lecken des Öles und die Notwendigkeit der Drehung des Kolbens. Diese Nachteile vermeidet unter gleichzeitiger Erhöhung der Empfindlichkeit das Eichmanometer von R. J. S. Pigott (Gulf Research Laboratory, Pittsburgh), in welchem statt eines Kolbens ein Metallbalg und statt Schneiden Stahlbandgelenke angewendet werden (Abb. 332 bis 334). Der Metallbalg wird aus einem Stück nahtlos hergestellt und wurde in den letzten Jahren durch Verbesserungen in Baustoff und Herstellungsverfahren zu einem zuverlässigen Maschinenelement ausgebildet, welches zahlreiche Anwendung in der Technik gefunden hat. Wenn ein Metallbalg auf Druck beansprucht wird, muß der Druck auf die Außenseite des Balges wirken; ein Innendruck beansprucht den Balg auf Ausknicken, was zu vermeiden ist. Die wirksame Querschnittsfläche des Balges kann aus den Abmessungen nicht genau genug ermittelt werden, sondern muß durch Eichung

festgestellt werden. Es wurde aber gefunden, daß diese wirksame Querschnittsfläche vom Druck unabhängig ist, vorausgesetzt, daß die Längsmessung unveränderlich erhalten wird. Für dieses Eichmanometer wurden verschiedene Baustoffe, wie Neusilber, Phosphorbronze, verschiedene Kupfer-Nickellegierungen, durch Wärmebehandlung veredeltes Chrom-Nickel-Molybdän usw. versucht. Endlich wurde Berylliumkupfer als das am besten geeignete Material gefunden. Für hohe Drücke werden naturgemäß Bälge von kleinem Durchmesser, für niedrige Drücke solche von großem Durchmesser angewendet.

Das als Gelenk angewendete dünne Stahlband kann praktisch als reibungslos betrachtet werden und ermöglicht eine gedrängte Bauweise und ein großes Hebelverhältnis.

Die Einzelheiten des Entwurfs sind aus den Abbildungen ersichtlich. Abb. 332 zeigt die normale Ausführung mit einem einzigen Balg, bei welcher die Hauptbelastung durch aufgelegte Gewichtstücke 14, und die

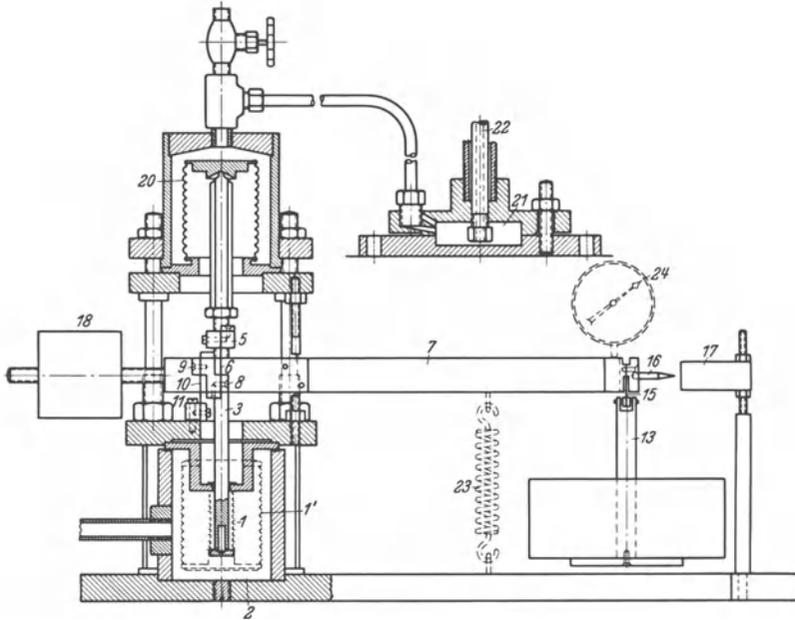


Abb. 334. Abänderung des Pigottschen Balgmanometers mit einem Hilfsbalg für Feineinstellung. Ziffernbezeichnungen wie oben. 20 Hilfsbalg; 21 Flüssigkeitsbehälter; 22 Flüssigkeitssäule; 23 Hilfsfeder; 24 Meßuhr. Entweder 21 und 22, oder 23 und 24 werden angewendet.

Feineinstellung durch das Laufgewicht 19 vorgenommen wird. Abb. 333 zeigt die Anordnung der Stahlbandgelenke. In der Anordnung nach Abb. 334 wird die Feineinstellung durch das Laufgewicht erübrigt durch Anwendung eines zweiten Balges von großem Durchmesser, welcher unmittelbar auf eine Flüssigkeitssäule 21, 22 einwirkt. Die Nulllage des Hebelarmes kann mittels einer Meßuhr 24 abgelesen werden. Die Genauigkeit des Gerätes wurde zu 0,01 bis 0,02% des Höchstbetrages ermittelt.

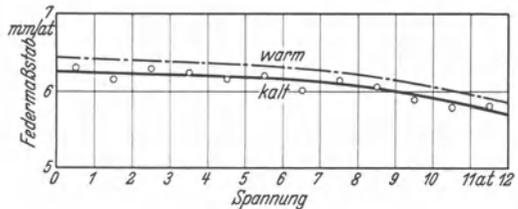


Abb. 335. Einfluß der Federtemperatur auf den Federmaßstab.

Es ist vorteilhaft, den Indikator in betriebswarmem Zustande zu eichen, da sowohl der Federmaßstab als auch die Kolbenfläche von der Temperatur abhängig sind. Abb. 335 zeigt die Änderung des Federmaßstabes von der Temperatur. Der Flächenzuwachs des Kolbens kann zu etwa 0,2% für je 100° C angenommen werden. In manchen Indikator-

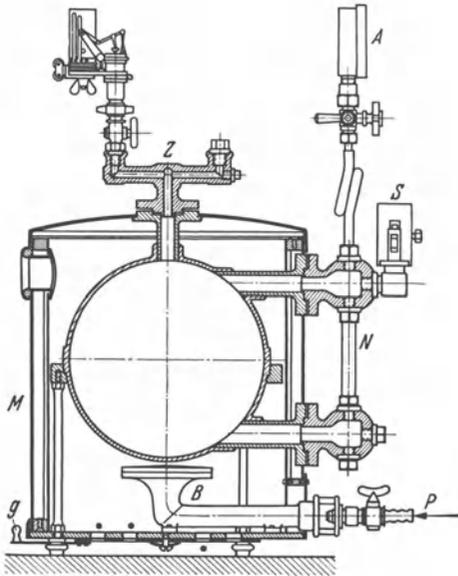


Abb. 336.

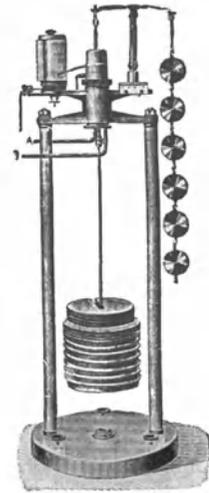


Abb. 337.

Abb. 336. Kessel für die Eichung von Indikatoren im betriebswarmen Zustande. Der kupferne Kugelkessel hat 300 mm \varnothing ; *B* Gasbrenner; *M* Isoliermantel; *g* Hebel zur Luftzugregelung; *Z* Anschlußkopf; *N* Wasserstandshahnkopf; *S* Sicherheitsventil; *A* Kontrollmanometer.

Abb. 337. Federprüfvorrichtung mit Heizung. (Lehmann und Michels.)

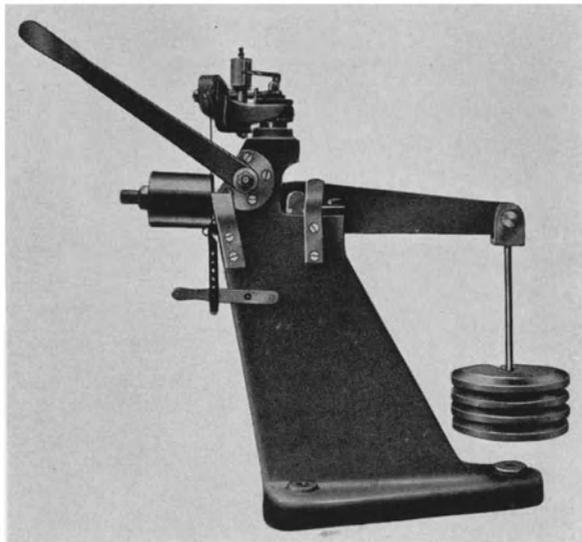


Abb. 338. Prüfeinrichtung, insbesondere für Stabfederindikatoren (H. Ma i h a k A.-G.). Mit Gestell, Indikatorkopf, Stabfederindikator, Waagebalken, Gegengewicht für das Ausgleichen des Gewichtes des Waagebalkens und des Gestänge, Meßgewichten, Anschlußstutzen, Hebel für die Feststellung des Waagebalkens bei jedem Lastwechsel, Hebel für die Drehung der Trommel, zwecks Aufzeichnung der Eichlinien. Übersetzung 1 : 10.

eichgeräten ist dementsprechend Aufwärmung durch Dampf vorgesehen (Abb. 336). Seit Einführung der Kaltfederinstrumente ist aber die Berücksichtigung der Erwärmung überflüssig.

Bequemer als die Druckeichung ist die Gewichtseichung, bei welchem Verfahren die Indikatorfeder durch die Kolbenstange mittels aufgehängter Gewichte belastet wird (Abb. 337). Das Gewicht dividiert durch die mit hoher Genauigkeit meßbare Kolbenfläche ergibt den Druck. Gegen dieses Verfahren wird angewendet, daß ein Fehler in der Bestimmung der wahren Kolbenfläche eine Fehlerquelle bedeutet, und auch, daß die wirksame Fläche, welche zwischen Kolbenfläche und Zylinderquerschnittsfläche liegt, nicht mit Sicherheit bestimmt werden kann. Wegen der hohen Genauigkeit, mit welchen Kolben und Zylinder hergestellt werden und der Kleinheit des zwischen ihnen liegenden Spieles sind diese Einwendungen belanglos. Auch in derartigen Geräten kann eine Vorrichtung für die Erwärmung des Indikators eingebaut werden (Abb. 336), ist aber in den meisten Fällen unnötig.

Um die Handhabung von schweren Gewichten zu vermeiden, wurden auch für dieses Verfahren Hebelwaagen entwickelt (Abb. 338), welche betreffend Bequemlichkeit des Gebrauches die Geräte mit unmittelbarer Gewichtsbelastung übertreffen. Die Genauigkeit ist vielleicht etwas niedriger, aber für den Zweck der Indikatoreichung noch immer voll ausreichend.

VIII. Fehlerhafte Diagramme.

Hier werden nur solche Einflüsse besprochen, die in Fehlern des Indikators oder in fehlerhafter Anwendung desselben einschließlich Fehlern beim Indiziergestänge bzw. beim Indizierkanal ihre Ursache haben.

Eine ziemlich häufig vorkommende Fehlerquelle ist die große Länge, zu enger Querschnitt oder ungünstige Anordnung des Indizierkanals. Bei rasch laufenden Maschinen, insbesondere solchen mit rascher Druckänderung wie Verpuffungs- und Dieselmotoren, spielt dieser Einfluß eine wesentlich größere Rolle als bei Langsamläufern. Bei ersteren sollte man ferner Richtungsänderungen des Indizierkanals in Form von scharfen Ecken möglichst vermeiden. Also möglichst kurze gerade und genügend weite annähernd vom Brennherd radial weggehende Leitung!

Beim Indiziergestänge kommt es nicht selten vor, daß dasselbe den Kolbenweg nicht gleichmäßig verkleinert, sondern infolge Anwendung von Lenkern und Verbindungsstangen z. B. in der Nähe des oberen Totpunktes mehr als beim unteren Totpunkt. Solche Fehler sind am besten durch Änderung der Konstruktion zu beseitigen; eine Korrektur im Diagramm ist gewöhnlich recht umständlich. Häufig stellt man beim

Indizieren von Maschinen, die bereits seit langer Zeit in Betrieb sind, fest, daß das Gestänge Spiel hat, die Zapfen abgenützt und die Lager ausgeschlagen sind. Bei solchen Maschinen also zuerst das Gestänge auf Spiel prüfen und unter Umständen die Lager neu ausbüchsen! Wesentlich seltener kommt Spiel im Gestänge des Indikatorschreibzeuges vor.

Beim Schnurantrieb der Trommeln können Fehler durch Längung der Schnur, durch Klettern der Schnur in den Leitrollen und durch Massenwirkungen von sog. Schnurspannern vorkommen. Diese Fehler sind zum Teil daran zu erkennen, daß die sog. atmosphärische Linie bei rasch laufender Maschine länger — oder auch kürzer — ist, als wenn

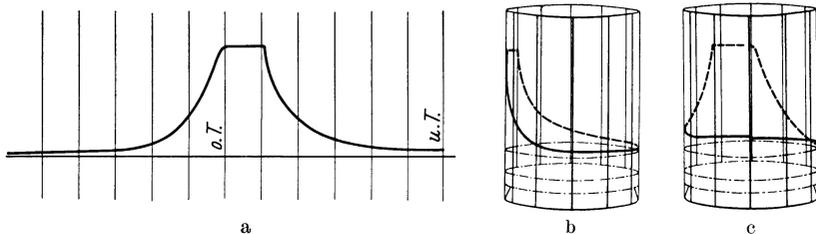


Abb. 339a—c. a Kurbelweg-Druckdiagramm einer (idealisierten) Dieselmachine; b dasselbe auf einer durchsichtigen Zylinderfläche abgebildet zeigt das Kolbenweg-Druckdiagramm, wenn es senkrecht zum die zwei Totpunkte verbindenden Durchmesser betrachtet wird; c ein „versetztes“ Diagramm erscheint, wenn die Schaurichtung nicht senkrecht zum die zwei Totpunkte verbindenden Durchmesser gerichtet wird.

man diese nun ganz langsam laufen läßt oder sie durchschaltet. Man prüfe daher die atmosphärische Linie daraufhin. Der Schnurzug selbst soll nicht unnötig durch Leitrollen gekrümmt und durch dazwischen angebrachte Holzstücke beschwert werden. Bei hoher Drehzahl Stahldraht oder Stahlband anwenden!

Einfluß der unrichtigen Einstellung des Trommelantriebes.

Wenn die Kurbel des Trommelantriebes etwas gegen die zugehörige Kröpfung der Kurbelwelle versetzt ist, so entsteht eine Fehlerquelle, welche bei der Bestimmung des mittleren indizierten Druckes einen Fehler von mehreren Hundertsteln des wahren Wertes verursachen kann. Es wird manchmal die Frage gestellt: Wieviel Hundertteile Fehler wird durch einen Fehler von einem Grad in der Phaseinstellung der beiden Kurbeln begangen? Diese Frage kann aber nicht mit allgemeiner Gültigkeit beantwortet werden, sondern hängt von den Verhältnissen des Einzelfalles ab, wie die folgende Überlegung zeigt.

Abb. 339a stellt das Druck-Kurbelwegdiagramm einer Kolbenmaschine (z. B. eines Dieselmotors) dar. Wird ein solches Diagramm auf ein Zelluloidblatt gezeichnet und daraus ein Zylinder geformt, dann wird

dem Beschauer, der diesen Zylinder senkrecht zur Zylinderachse betrachtet, ein Diagramm erscheinen. Ist die Schaurichtung senkrecht zum Durchmesser, welcher die beiden Totpunktordinaten verbindet, so erscheint das Druck-Volumendiagramm in richtiger Einstellung. Ist die Schaurichtung parallel zum Durchmesser, welcher die beiden Totpunktordinaten verbindet, so ist das erscheinende Diagramm um 90 Grad versetzt. (Der Einfluß der endlichen Schubstangenlänge wird in diesem Beispiel, welches nur den Grundsatz klarlegen soll, nicht berücksichtigt.)

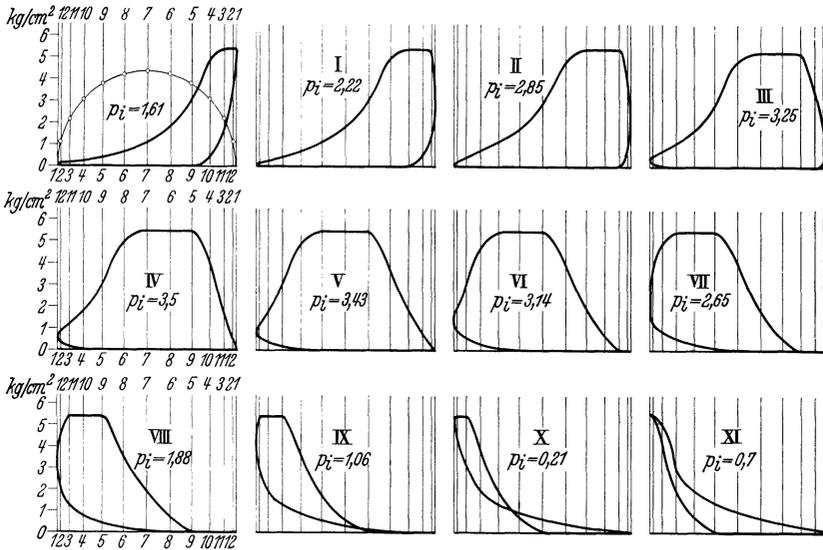


Abb. 340. Wirkung der Phasenverstellung des Trommelantriebes. Die sich ergebenden Diagramme für je eine Versetzung von 15° werden gezeigt und die so erhaltenen „scheinbaren“ indizierten mittleren Drücke bei den Diagrammen angegeben.

Zwischen diesen beiden Werten gehört zu jedem Grad Phasenverstellung ein anderes Diagramm, wie es Abb. 339 b und c und Abb. 340 zeigen.

Bestimmt man nun aus jedem Diagramm den „scheinbaren“ mittleren Druck und zeichnet diese Drücke als Ordinaten über dem Winkelwert der Phasenverstellung auf, so erhält man eine Sinuslinie nach Abb. 341. Von dieser Linie wird nur eine einzige Ordinate, welche zur Null-Grad-Phasenverstellung (d. h. zur richtigen Phaseinstellung) gehört, den richtigen indizierten mittleren Druck darstellen. Falls diese Ordinate in die Nähe des Maximalwertes der Sinuslinie fällt, ist der Fehler gering, welcher durch einen Grad Phasenverstellung verursacht wird. Das ist der Fall bei „dicken“ Diagrammen, wie bei Pumpen und Dampfmaschinen mit hohem Füllungsgrad, bei welchen das Verhältnis des indizierten mittleren Druckes zum Höchstdruck nicht viel niedriger als 1,0 ist. Liegt aber die richtige Ordinate in der Nähe des Nullwertes der Sinuslinie, dann ist der Fehler groß, welcher durch eine Phasenverstellung von

einem Winkelgrad verursacht wird. Das ist der Fall bei „dünnen“ Diagrammen, in welchen das Verhältnis des indizierten mittleren Druckes zum Höchstdruck ein kleiner Teil von 1,0 ist wie in Kraftmaschinen mit innerer Verbrennung, insbesondere in Dieselmotoren bei geringer Belastung. Aus dieser Überlegung erhellt, daß in diesen Fällen besondere

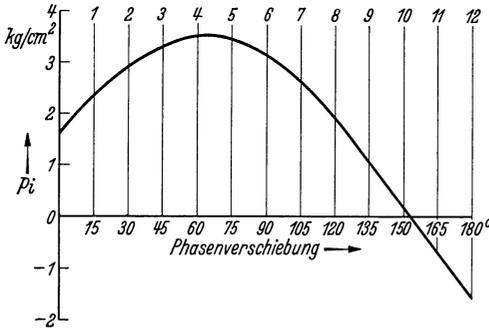


Abb. 341. Die aus den scheinbaren indizierten mittleren Drücken gebildete Kennlinie als Funktion der Phasenverstellung.

Sorgfalt angebracht ist, um die richtige Phaseinstellung bei der Aufnahme des Diagrammes zu erreichen.

In mathematischer Formulierung kann der richtige indizierte mittlere Druck durch

$$p_i = a \sin \alpha$$

ausgedrückt werden, in welcher Formel a den Höchstwert der Sinuslinie und α den Winkelwert der richtigen Ordinate derjenigen Phase darstellt, in welcher die Sinuslinie die

Abszissenlinie schneidet. Der durch eine Phasenverstellung $d\alpha$ entstehende Fehler ist

$$d p_i = a \cos \alpha d \alpha$$

sein Wert, im Verhältnis zum richtigen Wert p_i ausgedrückt, ergibt sich aus

$$\frac{d p_i}{p_i} = \frac{a \cos \alpha}{a \sin \alpha} d \alpha = \operatorname{ctg} \alpha d \alpha .$$

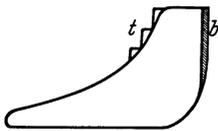


Abb. 342. Diagramm mit scharfen, geradlinigen Begrenzungen.

Aus dieser Formel ist also ersichtlich, daß der Fehler Null ist, falls $\alpha = 90$ Grad ist, d. h. wenn die richtige Ordinate von p_i mit dem Höchstpunkt der Sinuslinie übereinstimmt; der Fehler kann unendlich groß sein, wenn die richtige Ordinate von p_i mit dem Nullwert der Sinuslinie übereinstimmt.

Scharfe geradlinige Begrenzungen etwa nach Stelle b in Abb. 342 sind auf Anstoßen der Indikatortrommel oder des Kolbens zurückzuführen. Im ersteren Fall verkürze man die Schnur oder setze eine kleinere Hubrolle ein, im letzteren ist eine stärkere Feder zu verwenden.

Treppenförmige Linien, etwa nach Stelle t in Abb. 342, entstehen durch Schmutz, der am Kolben oder der Zylinderbüchse hängt. Der Indikator soll daher nach Abnahme weniger Diagramme wieder gereinigt und geschmiert werden.

Eine besonders wichtige Fehlerquelle besteht in Schwingungserscheinungen, sei es des Indikatorkolbens oder der Trommel.

Sie brauchen keineswegs immer so stark zu sein, daß sie auf den ersten Blick als Schwingungen auffallen; sie können ohne offenkundiges Pendeln eine falsche Wiedergabe des Höchstdruckes herbeiführen. Aus diesem Grunde sollte man stets sich über die Eigenfrequenzen des Indikators vergewissern und in solchen Fällen, wo dieselben nicht bekannt oder nicht ermittelbar sind, möglichst mit zwei verschiedenen Federn die Diagramme abnehmen. Stimmen hierbei die Diagramme, insbesondere deren Höchstdrücke, unter Berücksichtigung der verschiedenen Federkennlinien nicht zusammen, so ist dies ein sicheres Zeichen, daß dynamische Einflüsse bereits eine Rolle spielen.

Hierüber ist im Abschnitt „Dynamik des Indikators“ noch ausführlich die Rede.

Welchen Einfluß Massenwirkungen der Indikatortrommel auch bei Verwendung von Stahlband und ganz kurzer Bandlänge bei

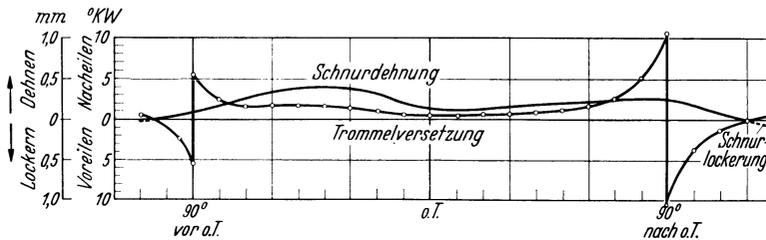


Abb. 343. Einfluß der Massenwirkung der Trommel auf die Schmurdehnung.

sehr hohen Drehzahlen haben können, geht aus Abb. 343, welche dem Aufsatz Neumann: „Genaueres Arbeiten mit dem Stabfederindikator bei hohen Drehzahlen“ entnommen ist, hervor. Danach findet sich bei dem untersuchten Indikator in O. T. ein Fehler von $\sim 1/2$ Grad K-Winkel, der aber bei 90 Grad Trommelversetzung bis zu 10 Grad K-Winkel anwächst. Eine genaue Untersuchung, aus welchen Einzelfehlern sich dieser Fehler zusammensetzt, ist allerdings in dem Aufsatz nicht enthalten.

In manchen Fällen weicht das Verhalten der Indikatorfeder vom Geradliniengesetz ab, dieser Fehler ist durch statische Eichung des Indikators, wobei der Kolben durch Gewichte belastet wird, leicht nachzuprüfen. Es kann ferner bei den Innenfederindikatoren die Elastizität der Feder durch die vom heißen Arbeitsmedium übergehende Wärme sich ändern. In solchen Fällen, wo man den Indikator längere Zeit an der Maschine lassen will, sind daher Außenfederindikatoren nicht zu umgehen und auch bei diesen macht sich die Erwärmung allmählich geltend. Bei Verbrennungskraftmaschinen sind hierbei gekühlte Indikatorhähne oder Indikatorventile angebracht. Am besten ist es auf alle Fälle, den Indikator nur so lange an der Maschine und insbesondere das Indikatorventil nur so lange geöffnet zu lassen, als zur Abnahme von ein paar Diagrammen rasch hintereinander unbedingt

notwendig ist und hernach den Indikator abzunehmen und kühl zu lagern.

Fehler durch Ungenauigkeiten im Vergrößerungsgestänge für den Schreibstift sind bei guten Indikatoreausführungen kaum vorhanden. Sie lassen sich übrigens sowohl auf zeichnerischem Wege als auch meßtechnisch leicht nachprüfen. Häufiger kommt es dagegen vor, daß ein zu langer Schreibstift angewendet wird, welcher durch die an einem langen Hebelarm angreifende Stiftreibung auf dem Papier eine Verdrehung des meist mit ziemlich schmalem Rechtecksquerschnitt ausgeführten und daher gegen Verdrehung wenig steifen Schreibhebels ergibt. Unter Umständen kann noch einseitige Massenwirkung der Schreibstiftschraube hinzutreten.

IX. Dynamik des Indikators.

A. Allgemeine Dynamik.

Beim Indikator unterscheidet man zwei elastische rasch hin und her bewegte Systeme.

1. Den Kolben samt Vergrößerungsgestänge und
2. die Indikatortrommel.

Wir beschäftigen uns zunächst nur mit ersterem: Auf den Kolben wirkt ein rasch sich ändernder Gasdruck, der die Feder durchbiegt und Schwingungen des Kolbens verursacht, wenn die Frequenz der Gasdruckschwankungen über eine gewisse Größe hinausgeht. Bezüglich der ausführlichen mathematischen Behandlung dieses Problems sei auf das Schrifttum, insbesondere aber auf die Mitteilungen aus den Forschungsanstalten des G-H-H-Konzerns 1931, Heft 7, verwiesen.

Im Fall des Beharrungszustandes ist auch unter Berücksichtigung der Dämpfungen das Problem ziemlich einfach:

Allgemein läßt sich hierbei die Aufgabe zurückführen auf den Fall eines mit Masse belegten Punktes, der durch eine masselos gedachte Feder in einer Gleichgewichtslage gehalten wird und auf den eine harmonisch, d. h. sinusförmig wechselnde Kraft einwirkt.

Wir denken uns nämlich den wirklichen Kraftverlauf abhängig von der Zeit harmonisch analysiert¹, d. h. abgesehen von der Linie

¹ Dem Leser, der sich mit der harmonischen Analyse noch nicht befaßt hat, diene folgendes zur Kenntnis:

Jeder beliebige periodische Kurvenzug läßt sich in eine Reihe von Sinusschwingungen zerlegen, deren Größe, Frequenz und Phase sich nach der Art des Kurvenzuges richten. Dadurch wird es möglich, auch verwickelte Schwingungsprobleme, sofern die Erregung nur von periodischem Verlauf ist, auf einfache, verhältnismäßig leicht zu handhabende Sinusschwingungen zurückzuführen. Für jede einzelne Sinusschwingung lassen sich die auftretenden Erscheinungen

gleichbleibenden mittleren Druckes in seine einzelnen Sinusschwingungen zerlegt.

Dieselben haben verschiedene Größe (Amplitude) und verschiedene Frequenz. Die Frequenz der langsamsten Schwingung, d. h. der Grundschwingung, entspricht der Drehzahl bzw. bei Viertaktmotoren, bei denen sich nur alle zwei Umdrehungen das Kräftespiel wiederholt, der halben Drehzahl, die Frequenzen der Oberschwingungen sind immer ganzzahlige Vielfache jener der Grundschwingung, also das 2-, 3-, 4fache usw. Diese letztere Zahl bezeichnet man als Ordnungszahl. Es wechselt also die Harmonische 8. Ordnung 8mal so rasch wie die Grundschwingung. Die Größe der harmonisch wechselnden Kräfte nimmt mit zunehmender Frequenz sehr rasch ab und nähert sich asymptotisch dem Wert Null. Im allgemeinen läßt sich sagen, daß nur die Harmonischen bis zur 8. Ordnung, bei Viertakt höchstens bis zur 12. Ordnung von Bedeutung sind. Bei den hohen Harmonischen sind die Kräfte meistens so gering, daß sie gegenüber den sonstigen Einflüssen wie Reibung am Kolben und Schreibstift vernachlässigt werden können. Allerdings gilt dies nicht mehr bei brisant einsetzenden Zündungen. Tabelle Seite 263 Spalten S, C und p zeigt die harmonische Analyse des in Abb. 344 dargestellten Kolbendruckzeitdiagrammes eines Viertakt Dieselmotors. Für die Durchführung der harmonischen Analyse gibt es eine Reihe von rechnerischen und mechanischen Verfahren. Von ersteren sind die bekanntesten von W. Lohmann¹ bzw. von Zipperer², unter den mechanischen ist am gebräuchlichsten der Analysator von Mader, gebaut von Gebr. Stürzl in München, der sich durch einfache Handhabung und niedrigen Preis auszeichnet.

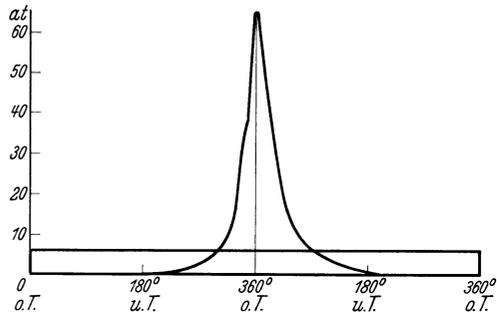


Abb. 344. Zeitdruckdiagramm einer Vorkammer-Viertakt-Dieselmachine mit $n=1500/\text{min}$. Geschwindigkeit der Druckzunahme $25\,600\text{ kg/cm}^2$.

Wir ermitteln jetzt für eine gegebene harmonische und am Kolben angreifende Kraft P die Verhältnisse für verschiedene Frequenzen.

angeben, für die Ermittlung der bei der zusammengesetzten Kurve auftretenden Ausschläge usw. könnte es scheinen, als ob die Einzelausschläge nach Größe, Phase und Frequenz richtig zusammensetzen wären. Das ist jedoch meistens gar nicht notwendig; es genügt gewöhnlich zu wissen, ob die Frequenz der einzelnen harmonischen Erregungen über oder unter der Eigenfrequenz des zu untersuchenden Systems und in welchem Abstand sie vor ihr liegt.

¹ Harmonische Analyse zum Selbstunterricht. Berlin W: Fischer med. Buchhandel, H. Hornfeld. — ² Tafeln zur harmonischen Analyse periodischer Kurven. Berlin: Julius Springer 1922.

Ist m die gesamte Masse des Kolbens und der mit ihm zwangsläufig, wenn auch gelenkig verbundenen Teile, f die minutliche Frequenz, $\omega = f \cdot \pi/30$ die sog. Kreisfrequenz und a der sinusförmige Ausschlag, den der Kolben ausführt, so wird, ähnlich wie die Fliehkraft einer im Kreis bewegten Masse, die zugehörige Massenträgheitskraft

$$T = m \cdot \omega^2 \cdot a.$$

Die Summe aus Massenkraft und angreifender Kraft P muß in jedem Augenblick der Federkraft $F = c \cdot a$ gleich sein. Hierbei ist c die sog. Federkonstante, d. h. die zu der Auslenkung von 1 cm gehörende Kraft in Kilogramm. Es ergibt sich also

$$m \cdot \omega^2 \cdot a \cdot \sin \alpha + P \cdot \sin \alpha = c \cdot a \cdot \sin \alpha$$

oder
$$a = \frac{P}{c - m \cdot \omega^2} = \frac{P}{c \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_e^2}\right)} = \frac{a_{\text{stat}}}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_e^2}}.$$

Hierbei ist $\omega_e = \sqrt{\frac{c}{m}}$ die Kreisfrequenz der

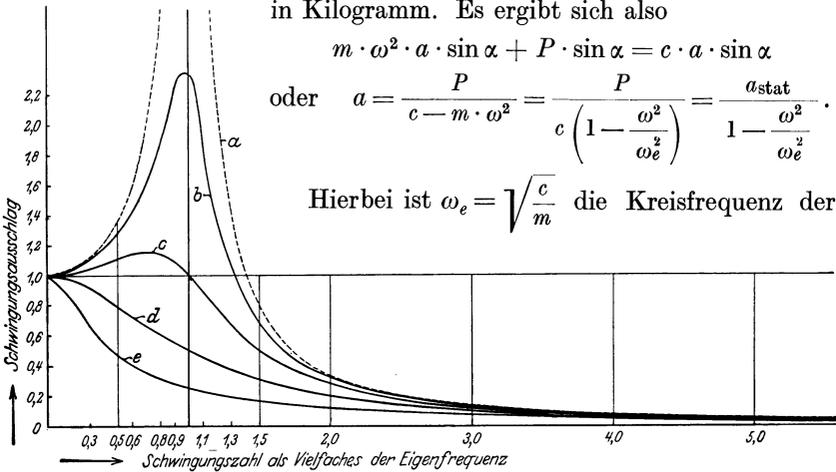


Abb. 345. Abhängigkeit des Kolbenausschlages von dem Verhältnis Erregungsfrequenz zu Eigenfrequenz für verschieden große Dämpfungen: a Ohne Dämpfung; b $1/4$ der aperiodischen Dämpfung; c $1/2$ der aperiodischen Dämpfung; d bei der aperiodischen Dämpfung; e 2mal der aperiodischen Dämpfung.

Eigenschwingung des Indikatorkolbens, a_{stat} der bei statischer Einwirkung der Kraft P sich ergebende Ausschlag des Kolbens.

Falls $c/m = \omega^2$ wird, haben wir den Fall der Eigenschwingung, in welchem sich das System zu unendlich großen Ausschlägen hochschaukeln würde, wenn keine Dämpfung vorhanden wäre. Die Abhängigkeit des Kolbenausschlages von dem Verhältnis $\frac{\omega}{\omega_e} = \frac{f}{f_e}$ der Schwingungszahl der Erregung zu der der Eigenschwingung ist in Abb. 345 dargestellt. Diese Abbildung ist für das Verständnis des dynamischen Verhaltens des Indikators von größter Wichtigkeit.

Für den Fall, daß an der Masse m noch eine der Schwingungsgeschwindigkeit $\omega \cdot a$ und damit dem Ausschlag a proportionale Dämpfung $D = k \cdot \omega \cdot a$ angreift — wobei k in kgs/cm der Dämpfungsfaktor ist —, kommt zu der einen vorhin genannten Schwingung noch eine ihr in der Phase um 90 Grad nacheilende Schwingung hinzu; für letztere besteht einfach die Beziehung, daß in jedem Moment die Dämpfungskraft gleich dem Teil der erregenden Kraft P sein muß, der

mit ihr in gleicher Phase ist. Bezeichnen wir denjenigen Teil von P , der mit der Massen- und Federkraft in gleicher Phase ist, mit P_v , den mit der Dämpfung in Phase befindlichen mit P_h , so ergibt sich:

1. $P = \sqrt{P_v^2 + P_h^2}$
2. $m \cdot \omega^2 \cdot a \cdot \sin \alpha + P_v \cdot \sin \alpha = c \cdot a \cdot \sin \alpha$
3. $P_h = k \cdot \omega \cdot a$.

Man rechnet jetzt zweckmäßig unter der Annahme $P_v = P$ den Wert a und daraus P_h aus, bestimmt dann $P_{res} = \sqrt{P^2 + P_h^2}$ und verkleinert jetzt, um den richtigen Wert a zu finden, das vorläufige a im Verhältnis $\frac{P}{P_{res}}$.

In der Schwingungslehre ist viel von aperiodischer Dämpfung die Rede. Man versteht darunter im Grenzfall eine so starke Dämpfung, daß ein aus seiner Gleichgewichtslage ausgelenkter Massenpunkt, der federnd in derselben gehalten wurde, in dieselbe zurückkehrt, ohne über sie hinauszuschwingen. Siehe Kurve d der Abb. 345.

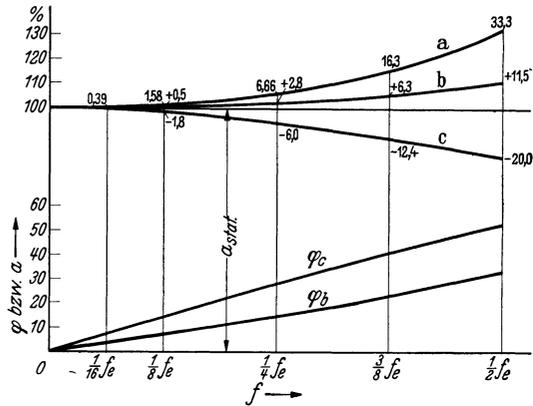


Abb. 346. Kolbenausschlag a , Diagrammfehler in v. H. und Phasenverschiebung φ in Grad abhängig von dem Verhältnis Erregungsfrequenz f zu Eigenfrequenz f_e . a Ohne Dämpfung, b bei halbperiodischer Dämpfung, c bei aperiodischer Dämpfung.

Bei gut geschmierten und gereinigten Indikatoren ist die Dämpfung viel geringer (höchstens halb so stark), so daß hierfür die Kurven c bzw. b besser gelten. Im Falle c , d. h. für halbperiodische Dämpfung ergibt sich $k = \sqrt{m \cdot c}$, so daß man leicht den Ausschlag berechnen kann. In Abb. 345 sind die Verzerrungen außerdem noch für mehrere andere Dämpfungen wiedergegeben, und zwar auch für weit über der Eigenschwingungszahl liegende Frequenzen. Für den praktischen Gebrauch des Indikators kommt aber nur das Gebiet unter $\frac{f}{f_e} = 1$ in Frage. Man sieht, daß bei etwa halbperiodischer Dämpfung die Verzerrung am geringsten ist.

Die Größe der Dämpfung läßt sich experimentell ziemlich leicht feststellen, wenn man den Kolben mit konstantem Gasdruck belastet, den Schreibhebel hierbei auslenkt und plötzlich unter gleichmäßigem Fortziehen des Papiers losläßt. Allgemein sind mit Dämpfung die Fehler kleiner als ohne Dämpfung. Abb. 346 stellt oben den für Indikatoren wichtigsten Teil der Abb. 345 stark vergrößert dar und gibt unten gleichzeitig auch die Phasenverschiebung an. Aus dieser Abbildung läßt sich sofort die Verzerrung in % ablesen. Aus ihr geht hervor, daß für $f = 1/8 f_e$

der Fehler auch bei hohen Ansprüchen an Genauigkeit verschwindend klein ist.

Man sieht sowohl aus Abb. 345 als auch aus Abb. 346, daß die höchste Frequenzzahl der wichtigeren harmonischen Gasdruckkräfte höchstens ein Viertel der Eigenfrequenz des Indikatorkolbens betragen darf, daß dies aber andererseits auch ausreicht, um genügend einwandfreie Diagramme zu erzielen und daß es vollständig überflüssig ist, auf den hundertsten Teil oder noch weiter herunter zu gehen. Im letzteren Fall wird nur der Bau des Indikators unnötig erschwert und verteuert.

Beträgt nun z. B. die vierte Harmonische 12% des gesamten Höchstdruckes, die dritte 20% und die zweite 30% desselben und sind die Frequenzen $\frac{4}{8}$, $\frac{3}{8}$ und $\frac{2}{8}$ der Eigenfrequenz, so findet sich bei halbaperiodischer Dämpfung an Hand von Abb. 346 unter der Voraussetzung, daß im Moment

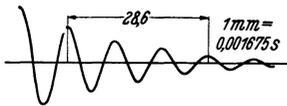


Abb. 347.
Ausschwingdiagramm mit reiner
Geschwindigkeitsdämpfung.

des Höchstdruckes alle 3 harmonischen Kräfte gerade ihren Höchstwert erreichen, also in der Phase nicht gegeneinander verschoben sind, der Gesamtfehler in Prozenten des Höchstdruckes zu $0,3 \cdot 2,8 + 0,2 \cdot 6,3 + 0,12 \cdot 11,5 = 3,48\%$.

Durch das gleichzeitige Mitwirken der harmonischen Kräfte von höherer als der 4. Ordnung wird der Fehler noch etwas größer. Die Zahlen beziehen sich auf einen praktischen Fall einer Brennkraftmaschine.

Man sieht daraus, daß die Forderung, die Eigenfrequenz soll mindestens 8mal so hoch wie die Drehzahl der zu untersuchenden Maschine sein, keineswegs besonders weit geht. Allgemein sollte man sich unbedingt vor dem Indizieren über die bei der verwendeten Feder sich ergebende Eigenfrequenz orientieren, um so Fehler und falsche Schlüsse auf Grund des Diagrammes zu vermeiden. Die Indikatoren bauenden Firmen geben zweckmäßig die Eigenfrequenzen gleich bei Lieferung mit an.

Findet man im Diagramm Schwingungen, so ist es dann leicht festzustellen, ob sie mit der Eigenfrequenz des Indikators erfolgen, in welchem Falle sie gewöhnlich sehr stark verzerrt sind. Aber auch wenn die Frequenzen langsamer erfolgen, kann man mit Hilfe der Beziehung

$$\frac{a_{\text{stat}}}{1 - \left(\frac{f}{f_e}\right)^2}$$

rasch die zugehörige Verzerrung ermitteln, und wenn man durch einen Ausschwingversuch nach Abb. 347 die Größe der Dämpfung festgestellt hat, bereitet es keine größere Schwierigkeit, die Verzerrung auch unter Berücksichtigung der Dämpfung zu bestimmen.

Abb. 347 ist ein Ausschwingdiagramm mit reiner von der Schwingungsgeschwindigkeit abhängiger Dämpfung. Abb. 348 ist ein solches, bei welchem daneben noch von der Schwingungsgeschwindigkeit unabhängige

mechanische Reibung vorkommt und bei welchem daher nach dem Ausklingen ein kleiner Restausschlag $R_1 = R_2$ bestehen bleibt.

Für die nach Möglichkeit anzustrebende reine Geschwindigkeitsdämpfung ergibt sich nach der Schwingungstheorie das Verhältnis zweier aufeinander folgender Ausschläge a_n und a_{n+1} zu

$$\frac{a_n}{a_{n+1}} = e^{\frac{k}{2m} \frac{t_e}{2}}.$$

Hierbei ist k der Dämpfungsfaktor, m die schwingende Masse und t_e die aus dem Diagramm bestimmbare Eigenschwingungsdauer. Durch Logarithmieren erhält man das sog. logarithmische Dekrement

$$\ln a_n - \ln a_{n+1} = k \cdot \frac{t_e}{4m},$$

woraus man den Dämpfungsfaktor k bestimmt.

Ermittlung der Eigenschwingungsdauer aus Diagramm Abb. 347: Die Strecke für 3 Schwingungen entspricht 28,6 mm, also ist die Dauer einer Eigenschwingung $\frac{28,6}{3} \cdot 0,001675 = 0,01596$ s.

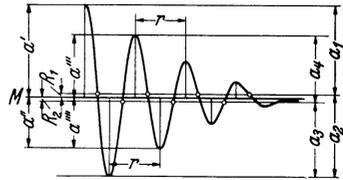


Abb. 348. Ausschwingdiagramm mit Geschwindigkeitsdämpfung und mechanischer Reibung.

Besonders sei hierbei auf die Schwingungen bei Schwachfederdiagrammen aufmerksam gemacht, da hier die Gefahr der Verzerrung infolge der niedrigen Eigenfrequenz des Indikators viel mehr gegeben ist als bei Starkfederdiagrammen.

Soweit es sich um Hubdruckdiagramme handelt und die Schwingungen hauptsächlich am Hubende erfolgen, muß man zur Feststellung der Frequenz das Hubdruckdiagramm in ein Zeitdruckdiagramm umzeichnen bzw. wenigstens die Entfernung der aufeinander folgenden Schwingungsmaxima in Kurbelwinkelgraden festlegen, um zu erkennen, wie viel rascher die Frequenz der Schwingungen wechselt als die Umdrehzahl.

Neben dem besonders wichtigen Fall der periodischen Schwankung des Gasdruckes wollen wir noch die folgenden Fälle 1—4 erörtern. Dieselben beziehen sich sämtlich auf den Fall, daß der Gasdruck von einer Zeit t an plötzlich nach irgendeinem Gesetz zunehme. Für den Leser, der sich nicht gerne mit höherer Mathematik abgibt, sei aber vorausgeschickt, daß das Ergebnis in den wesentlichen Punkten dasselbe ist wie bei dem bei Brennkraftmaschinen fast ausschließlich vorkommenden zuvor behandelten einfachen Fall der periodischen Gasdruckschwankung und daß beim Indizieren von Motoren auch bei sehr plötzlichem Druckanstieg fast immer von periodischer Gasdruckschwankung gesprochen werden kann.

1. Der Gasdruck nimmt von einem gewissen Zeitpunkt an linear mit der Zeit zu. In diesem Falle lautet die Differentialgleichung der Bewegung der Indikatorkolbenmasse m

$$m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + c x = F \cdot p' \cdot t.$$

Hierbei ist c (kg/cm) die Federungszahl der Indikatorfeder, F die Kolbenfläche des Indikators (cm²), p' (Dimension kg/cm² · s) die Zunahme des Druckes in der Zeiteinheit. Die vollständige Lösung lautet:

$$\begin{aligned} x &= F/c \cdot p' \cdot t - A \cdot \sin \omega t \\ \text{also } x' &= F/c \cdot p' - A \cdot \omega \cdot \cos \omega t \\ x'' &= + A \cdot \omega^2 \cdot \sin \omega t. \end{aligned}$$

Setzt man den Wert von x'' in die Differentialgleichung ein, so findet sich

$$m \cdot A \cdot \omega^2 \cdot \sin \omega t + F \cdot p' \cdot t - A \cdot c \cdot \sin \omega t = F \cdot p' \cdot t.$$

Hiemit wird

$$\omega = \omega_e = \sqrt{\frac{c}{m}}.$$

Das ist die Kreiseigenfrequenz von m .

Die Größe von A ergibt sich aus den Anfangsbedingungen. Für den Sonderfall, daß die Masse m am Beginn der Zeit t in Ruhe war, ergibt sich

$$x' = 0 = F/c \cdot p' - A \cdot \omega$$

also

$$A = \frac{F \cdot p'}{c \cdot \omega_e}.$$

Man findet so für die Kolbenbewegung:

$$x \cdot \frac{c}{F} = p' t - \frac{p'}{\omega_e} \cdot \sin \omega_e t.$$

Über die die wirkliche Druckzunahme verzeichnende Bewegung des Kolbens lagert sich also noch eine Sinusschwingung mit dem Größt-ausschlag $\frac{p'}{\omega_e}$. Zuerst eilt der Kolben der wirklichen Druckzunahme nach, nachher schnellert er über dieselbe hinaus (Abb. 349).

Zuerst ein ungünstiges Beispiel a): Die Eigenfrequenz eines Indikators sei 4000/min, also $\omega_e = 418$. Nimmt der Gasdruck, der zuerst Null war, in $\frac{1}{400}$ s um 10 at zu, so wird $p' = 4000$

$$\begin{aligned} p' \cdot t &= 10 \\ \frac{p'}{\omega_e} &= 9,56. \end{aligned}$$

Nach $\frac{1}{4} \cdot \frac{60}{4000}$ s, d. h. $\sin \omega_e t = \sim 1$ ist also der verzeichnete Druck erst 5,44 kg/cm², während der wirkliche Gasdruck bereits 15 at beträgt.

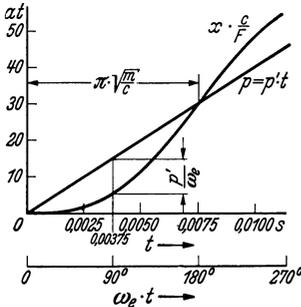


Abb. 349. Wirkliche Kolbenbewegung bei geradliniger Zunahme der Kraft.

Nach $\frac{3}{2} \cdot \frac{\pi}{418}$ s entsprechend $\omega_e t = \sim 270$ Grad ist der verzeichnete Druck $\sim 54,56$ at, der wirkliche 45 at.

Beispiel b): Der Wichtigkeit dieser Frage wegen behandeln wir noch einen weiteren Fall, wie er praktisch sehr häufig vorkommt: Abb. 350 ist das mit einem Piezoquarzindikator mit Oszillograph aufgenommene Zeitdruckdiagramm eines Vorkammerdieselmotors mit $n = 600$ min. Wir nehmen an, daß der Piezoindikator die wahren Druckwerte angibt. Im Punkt A — Druck 36 kg/cm^2 — setzt die Zündung ein. Wir ermitteln die Fehlanzeige für Punkt B — Druck $36 + 17 \text{ kg/cm}^2$ — wenn wir einen Indikator mit mechanischer Registrierung verwenden, dessen Eigenfrequenz $8000/\text{min}$ ist. Aus dem Piezoquarzdiagramm findet man, daß der Druckanstieg sowohl vor Punkt A als auch vor B genügend genau als geradlinig angesehen werden kann, und zwar findet sich vor A ein Druckanstieg $p'_1 = \frac{at}{53}$ $1970 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{s}$, zwischen A und B ein solcher von $4650 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{s}$.

Nach der Gleichung für die Geschwindigkeit x' findet sich so

$$A = \frac{F}{c} \left(\frac{p'}{\omega_e} - \frac{p'_1}{\omega_e} \right)$$

und damit die Gleichung

$$\frac{x \cdot c}{F} = p' t - \left(\frac{p'}{\omega_e} - \frac{p'_1}{\omega_e} \right) \cdot \sin \omega_e t.$$

Es sei $F = 1 \text{ cm}^2$ und $c = 50/0,5 = 100 \text{ kg/cm}$, was bei 7facher Vergrößerung eine Diagrammhöhe von $\sim 39 \text{ mm}$ ergibt.

Für Punkt B findet sich die Zeit t , die von A bis B vergeht, aus dem Piezoquarzdiagramm zu $0,00365 \text{ s}$.

Damit wird $\omega_e t = 3,05$ und in Winkelgraden

$$\frac{3,05}{2\pi} \cdot 360^\circ = 174,80^\circ.$$

$$\sin \omega_e t = + 0,09.$$

Der in Punkt B verzeichnete Druck wird also um

$$\frac{x \cdot c}{F} = 17 - 3,20 \cdot 0,09 = 16,712 \text{ kg/cm}^2$$

höher, also $52,712$ beim mechanischen Indikator gegenüber 53 kg/cm^2 beim Piezoquarzindikator. Hier ist also der Fehler vernachlässigbar klein.

Man wird vielleicht einwenden, daß dies davon herrührt, daß in Punkt B zufällig der Winkel nahe bei 180 Grad sei; aber auch wenn wir einen zwischen A und B gelegenen Punkt C so auswählen, daß hierfür der Sinus gerade 1 wird, so ist hier der wirkliche Druck gleich $36 + \sim 17/2$

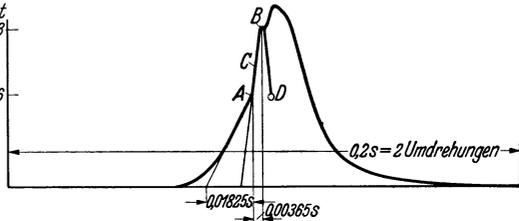


Abb. 350. Kolbendruckzeitdiagramm eines Vorkammer-Viertakt Dieselmotors, aufgenommen bei $n = 600/\text{min}$ mit Piezoquarzindikator und Schleifenoszillograph.

= 44,5 kg/cm und der verzeichnete Druck mit $44,5 + 3,20$ kg/cm² um nicht mehr als 7% zu hoch. Wenn man also das mit dem mechanisch arbeitenden Indikator erhaltene Diagramm entsprechend korrigiert, so bekommt man daher auch bei diesem nicht periodischen Vorgang auf alle Fälle ein Diagramm, dessen Fehler vernachlässigbar klein sind. Dabei spielt es keine wesentliche Rolle, wenn der Druckverlauf zwischen *A* und *B* in Wirklichkeit von einer geraden Linie etwas abweichen sollte. Hierüber wird bei Fall 3 noch die Rede sein. Die Ursachen, warum im zuerst genannten Fall der Fehler sehr groß und im zweiten Falle nur unbedeutend war, sind:

a) Doppelt so hohe Eigenfrequenz des Indikators.

b) Der Druckanstieg setzt nicht ein, wenn die Kolbengeschwindigkeit Null ist, sondern erst, nachdem der Kolben durch die vorausgegangene Verdichtung eine beachtliche Geschwindigkeit erlangt hatte.

c) Der Hundertsatz des Fehlers wird nicht auf die Drucksteigerung, sondern auf den Gesamtdruck bezogen.

Als 2. Fall nehmen wir an, daß der **Gasdruck quadratisch mit der Zeit zunehme**. Hierbei ergibt sich für denselben der Ausdruck $p = F \cdot k \cdot t^2$, und die Differentialgleichung nimmt folgende Form an:

$$m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} + c x = F \cdot k \cdot t^2$$

Die vollständige Lösung der Gleichung lautet

$$\begin{aligned} x &= A \cdot \sin \omega t + B \cdot \cos \omega t + C + D t + E t^2 \\ x' &= A \cdot \omega \cdot \cos \omega t - B \cdot \omega \cdot \sin \omega t + D + 2 E t \\ x'' &= -A \cdot \omega^2 \cdot \sin \omega t - B \cdot \omega^2 \cdot \cos \omega t + 2 E. \end{aligned}$$

Die Festwerte *C* bis *E* können durch Einsetzen in die Differentialgleichung bestimmt werden. Hierbei wird

$$\begin{aligned} \omega_e &= \sqrt{\frac{c}{m}}, \\ C &= -\frac{2 F \cdot k}{c \cdot \omega_e^2}, \\ D &= 0 \\ E &= \frac{F \cdot k}{c}. \end{aligned}$$

So entsteht:

$$x = A \cdot \sin \omega_e t + B \cdot \cos \omega_e t - \frac{2 F \cdot k}{c \cdot \omega_e^2} + \frac{F \cdot k}{c} \cdot t^2.$$

Die Festwerte *A* und *B* ergeben sich wieder aus den Anfangsbedingungen. War der Kolben an Beginn der Zeit *t* in Ruhe, so wird $x = 0$ und $x' = 0$, d. h.

$$A = 0 \quad \text{und} \quad B = 2 \cdot \frac{F \cdot k}{c \cdot \omega_e^2}.$$

Damit findet sich

$$x = 2 \cdot \frac{F \cdot k}{c \cdot \omega_e^2} (\cos \omega_e t - 1) + \frac{F \cdot k}{c} \cdot t^2$$

oder der verzeichnete Gasdruck p_z wird

$$p_z = \frac{x \cdot c}{F} = \frac{2 \cdot k}{\omega_e^2} (\cos \omega_e t - 1) + k t^2 = p - 2 \cdot \frac{k}{\omega_e^2} (1 - \cos \omega_e t).$$

Hierbei ist p der wirkliche Gasdruck. Über den wirklichen Gasdruck lagert sich also ein falscher, der mit der Eigenfrequenz des Indikatorkolbens wechselt und dessen Größtausschlag gleich $\frac{2 \cdot k}{\omega_e^2}$ ist.

Beispiel a) Abb. 350. Ist die Eigenfrequenz wieder 4000/min und nimmt der Gasdruck von 0 bis 40 at in $\frac{1}{100}$ s quadratisch zu, so wird

$$k = 40 \cdot 10^4 \left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}^2} \right)$$

und

$$\frac{2 \cdot k}{\omega_e^2} = 4,56 \left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right).$$

Nach $\frac{1}{266}$ s d. h. einer Viertelschwingung ist der Gasdruck auf 5,62 at gestiegen; es werden aber nur 1,06 at, also viel zu wenig angezeigt. Bemerkenswert ist, daß hier der Fehler stets negativ ist; die verzeichnete Kurve geht nie über die wirkliche hinaus (Abb. 351).

Beispiel b) Nach diesem ungünstigen Fall wollen wir einen zweiten praktisch besonders wichtigen Fall behandeln: Wir fragen uns, wie groß

der voraussichtliche Fehler sein wird, mit welchem die Verdichtungsline des bei Fall 1 Beispiel b genannten Viertakt Dieselmotors wiedergegeben wird. Die Verdichtung erfolgt bekanntlich nach einer Polytrope, wobei aber der Exponent derselben während der Verdichtung wechselt:

Für das zugehörige Zeitdruckdiagramm ist es in Annäherung zulässig zu sagen, der Druck nimmt proportional dem Quadrat derselben zu, und zwar in unserem Falle in einer halben Umdrehung, gleich $\frac{1}{20}$ s, von 0 auf 36 kg/cm^2 . Damit wird

$$k = \frac{p}{t^2} = 14\,400 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{s}^2,$$

$$\frac{2k}{\omega_e^2} = 0,1648 \text{ kg/cm}^2.$$

Für $\omega_e \cdot t = 418/20 = 20,9$, d. h. in Winkelgraden

$$= 360^\circ + 120^\circ$$

wird $\cos 120^\circ = -0,5$,

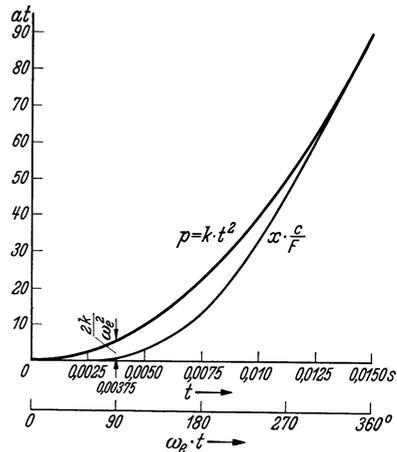


Abb. 351. Wirkliche Kolbenbewegung bei quadratischer Abhängigkeit des Gasdruckes p von der Zeit.

also wird bei Hubende der verzeichnete Druck

$$p_z = 36 - 0,1648 \cdot 1,5$$

= 35,753 kg/cm² oder um 0,8% zu wenig. Der Fehler ist also hier nur unbedeutend, trotzdem die Eigenfrequenz mit 4000/min nicht besonders hoch ist.

3. Der Gasdruck beginne mit Null und nehme in Form einer harmonischen Sinusschwingung $p = p_0 \cdot \sin \omega t$ zu, wobei vorher das System in Ruhe war.

Die Differentialgleichung der Kolbenbewegung lautet hier ohne Berücksichtigung von Dämpfungen:

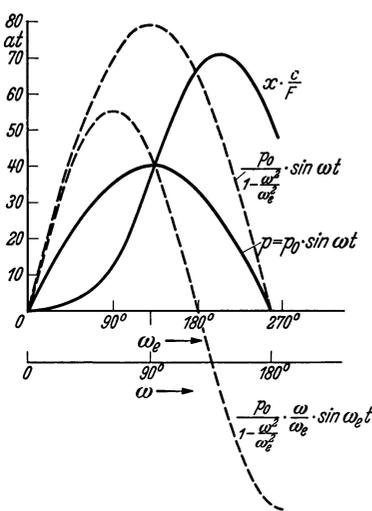


Abb. 352. Wirkliche Kolbenbewegung bei sinusförmiger Abhängigkeit des Gasdruckes p von der Zeit.

$$m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} + c x = F \cdot p_0 \cdot \sin \omega t.$$

Die Lösung dieser Differentialgleichung ist:

$$x = \frac{F \cdot p_0}{m (\omega_e^2 - \omega^2)} \left(\sin \omega t - \frac{\omega}{\omega_e} \cdot \sin \omega_e t \right).$$

Hierbei ist $\omega_e = \sqrt{\frac{c}{m}}$ wieder die Kreisfrequenz des Indikatorkolbens. Siehe Abb. 352.

Die Bewegung des Kolbens setzt sich also aus zwei Sinusschwingungen zusammen; einer, welche mit der Frequenz $f = \omega \cdot 30/\pi$ der erregenden Ursache wechselt, und einer, welche mit der Eigenfrequenz $f_e = \omega_e \cdot 30/\pi$ des Indikators sich periodisch wiederholt.

Für den verzeichneten Druck läßt sich schreiben

$$\frac{x \cdot c}{F} = \frac{p_0}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_e^2}} \left(\sin \omega t - \frac{\omega}{\omega_e} \cdot \sin \omega_e t \right).$$

Die Gleichung ist nicht anwendbar für $\omega = \omega_e$, wohl aber ganz in der Nähe hiervon.

Beispiel a). Ist z. B. $\omega = 0,7 \omega_e$ und $\omega t = 126^\circ$, so wird $\omega_e t = 180^\circ$, also $\sin \omega_e t = 0$, also

$$\frac{x \cdot c}{F} = \frac{p_0}{0,51} \cdot 0,80902 = 1,586 \cdot p_0.$$

Es wird also in diesem Moment um 58,5% zu viel angezeigt. Ist andererseits bei $\omega = 0,7 \cdot \omega_e$ der Phasenwinkel erst $\omega t = 63^\circ$, so wird $\sin \omega_e t = 1$,

$$\frac{x \cdot c}{F} = \frac{p_0}{0,51} \cdot (0,891 - 0,7) = 0,375 \cdot p_0.$$

d. h. es wird um über 60% zu wenig angezeigt.

Man sieht also hier, daß bei Erregungsfrequenzen, die noch ziemlich beträchtlich unter der Eigenfrequenz des Indikators sind, die Fehler bereits unzulässig groß werden können. Wir müssen aber auch hier wieder darauf hinweisen, daß der Fehler viel geringer wird, wenn am Beginn der Betrachtung der Indikatorkolben bereits eine gewisse Geschwindigkeit, z. B. durch die vorausgegangene Verdichtung erreicht hat.

Beispiel b). Zu diesem Zweck wählen wir nämlich das bei Fall I, Abb. 350 bereits angeführte Beispiel b eines Vorkammer-Viertakt-Dieselmotors, wobei die dort geradlinig angenommene Drucksteigerung von 36 auf 53 kg/cm² jetzt in Form einer Viertel-Sinusschwingung erfolgen soll, welche von 0 in Punkt *A* bis 90 Grad in Punkt *B* ansteigt.

Am Anfang der Zeit *t* ist hier der Kolben nicht in Ruhe, sondern hat die Geschwindigkeit $x' = p' \cdot F/c$, wobei

$$p' = 1970 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$$

ist. Die allgemeine Lösung der Differentialgleichung lautet hier

$$x = A \cdot \sin \omega_1 t + B \cdot \cos \omega_1 t + C \sin \omega t.$$

In unserem Falle nehmen wir den Punkt *A* als Koordinatenanfangspunkt an, womit x für $t = 0$ zu Null und damit auch $B = 0$ wird und finden durch Differenzieren der Lösungsgleichung:

$$A = \left(p' - \frac{\omega \cdot p_0}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_e^2}} \right) \cdot \frac{F}{c \cdot \omega_e}.$$

Damit lautet die Lösung der Differentialgleichung

$$x \cdot \frac{c}{F} = \frac{1}{\omega_e} \left(p' - \frac{\omega \cdot p_0}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_e^2}} \right) \cdot \sin \omega_e t + \frac{p_0}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_e^2}} \cdot \sin \omega t.$$

In unserem Zahlenbeispiel ist

$$p_0 = p_B - p_A = 17 \text{ kg/cm}^2.$$

Da nach Voraussetzung die Zeit von *A* bis *B* gleich einer Viertelschwingung sein soll, so wird ihre Frequenz bei 600 U/min $\frac{60}{0,00365 \cdot 4} 4100/\text{min}$, d. h. $\omega = 429,5$, ferner ist $\omega_e = 836$ wie im Fall I, Beispiel b, S. 241.

$$1 - \frac{\omega^2}{\omega_e^2} = 0,736; \quad \frac{p_0}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_e^2}} = 23,08$$

$$A = (1970 - 9900) \cdot \frac{F}{c \cdot 836} = -9,48 \cdot \frac{F}{c}.$$

Hiermit lautet die Gleichung der Kolbenbewegung

$$x = -9,48 \cdot \frac{F}{c} \cdot \sin \omega_e t + \frac{F}{c} \cdot 23,08 \cdot \sin \omega t.$$

Für Punkt *B*, Abb. 350, wird nach Voraussetzung $\omega t = 90$, also

$$\omega_e t = 90^\circ \cdot \frac{\omega_e}{\omega} = 175,1^\circ; \quad \sin \omega_e t = 0,085408$$

$$x \cdot \frac{c}{F} = -0,81 + 23,8 = 22,271.$$

Der Druck ist also nach einer Viertelschwingung der Erregung scheinbar auf $36 + 22,271 = 58,271 \text{ kg/cm}^2$ gestiegen, während er in Wirklichkeit nur auf 53 stieg. Es wird also um 10% zu viel angezeigt. Der Fehler ist also nicht mehr zulässig. Gleichzeitig sieht man aber, daß es bezüglich der Größe des Fehlers nicht allzu schlimm ist, wenn man sich über den wirklichen Verlauf des Druckanstieges von *A* bis *B* in Abb. 350 — ob gerade Linie oder eine andere Kurve — im unklaren sein sollte; denn die Abweichung einer Viertelschwingung der Sinuslinie von einer Geraden ist bereits sehr stark.

Beispiel c). Wir behandeln jetzt noch denselben Fall wie in Beispiel b, aber mit dem Unterschied, daß die Eigenfrequenz nur 4000/min beträgt.

Hierfür wird $1 - \frac{\omega^2}{\omega_e^2} = -0,05$. Nach einer Viertelschwingung der Erregung wird $\omega t = 90^\circ$, $\omega_e t = 87^\circ 36$, also

$$x \cdot \frac{c}{F} = 354 \cdot 0,99912 - 340 \cdot 1 = 14 \text{ kg/cm}^2.$$

Der Druck ist also von 36 kg/cm^2 (statt auf 53) scheinbar nur auf 50 kg/cm^2 gestiegen. Anzeige also um 5,6% zu niedrig.

Beispiel d). Zum Unterschied von Beispiel b sei hier die Eigenfrequenz $f_e = 32000/\text{min}$. Dafür findet sich

$$1 - \frac{\omega^2}{\omega_e^2} = 0,9835, \quad \omega_e t = -18^\circ; \quad \sin \omega_e t = 0,3090$$

$$x \cdot c/F = +1,63 \cdot 0,3090 + 17,3 \cdot 1,0 = 17,80,$$

so daß in Punkt *B* ein Gesamtdruck von $53,8 \text{ kg/cm}^2$ oder um 1,7% zu viel angezeigt wird. Hier, d. h. bei im Vergleich zur Erregungsfrequenz 8fach höherer Eigenfrequenz, ist also der Fehler vernachlässigbar. Das Ergebnis ist dasselbe wie bei periodisch wechselnder Gasdruckschwankung.

Beispiel e). Hier gehen wir wieder von dem bereits genannten Vorkammerdieselmotor aus, nehmen aber an, daß das Indikatordiagramm vom Punkt *A* ab über *B* bis *D* den Verlauf einer halben Sinuslinie hat (Abb. 350) und untersuchen, welcher Druck am Ende derselben in Punkt *D* angezeigt wird. Der wirkliche Druck ist hier 36 kg/cm^2 . Für $f_e = 4000/\text{min}$ findet sich

$$p = 36 + 29,6, \text{ also zu viel,}$$

für $f_e = 8000$

$$p = 36 + 1,62, \text{ also nur um 4,4\% zu viel,}$$

für $f_e = 32000$ entsteht

$$p = 36 + 0,714 \text{ oder nur um 1,9\% zu viel.}$$

Man findet also auch in diesem ungünstigen Fall, daß es genügt, wenn die Eigenfrequenz das achtfache der Frequenz des Zünddruckes beträgt.

Hätte man den Einfluß der Dämpfung noch berücksichtigt, so wäre in diesen Fällen der Fehler noch geringer geworden.

4. Es sei jetzt noch der ungünstigste Fall behandelt, daß der Gasdruck nicht periodisch wechselt, sondern plötzlich in seiner vollen Größe einsetzt. Dies kommt nur als theoretischer Grenzfall vor. Am nächsten kommt ihm das Abfeuern eines Geschützes und allenfalls ein Dieselmotor mit direkter Einspritzung und brisant sich vollziehender Zündung.

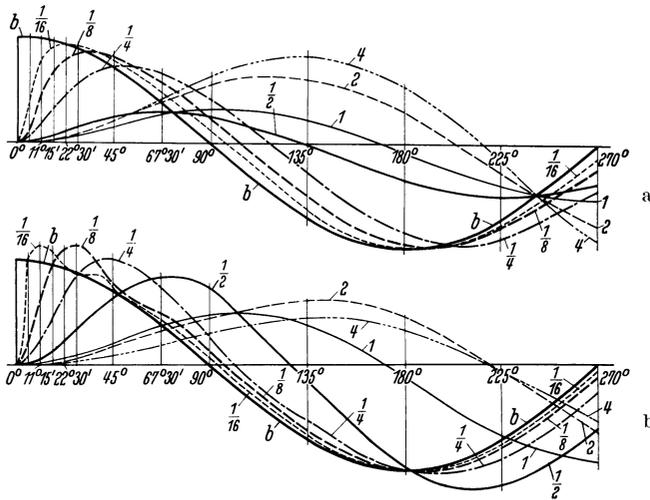


Abb. 353a und b. Wirkliche Kolbenbewegung bei plötzlichem Einsetzen des Gasdruckes b , cosinusförmigem Verlauf und halbperiodischer Dämpfung (b) bzw. aperiodischer Dämpfung (a).

Für die ausführliche Erörterung dieses Problems wird auf den Aufsatz: J. Geiger in den Mitteilungen des G.-H.-H.-Konzerns Band 1 (1931) Seite 162f. verwiesen, und zwar ist sie dort gleich unter Berücksichtigung der Dämpfung erfolgt, so daß der Leser sich auch über diesen wichtigen Einfluß ein Bild machen kann.

Wir geben aus dem diesbezüglichen Aufsatz „Über Beschleunigungsmessungen“ von J. Geiger das auf die sog. halbperiodische Dämpfung (Dämpfung halb so stark wie der Grenzwert der aperiodischen) sich beziehende Schaubild in Abb. 353 b wieder. Hierbei stellt die stark ausgezogene mit b (Beschleunigung) bezeichnete Cosinuslinie den Verlauf der Kraft dar; die verschiedenen mit 4 bis $\frac{1}{16}$ bezeichneten Kurven geben den zugehörigen Verlauf der Bewegung der Masse (Kolben) wieder, wenn die Frequenz der plötzlich in voller Größe einsetzenden Cosinusschwingung, d. h. der Kraft 4mal bis zu $\frac{1}{16}$ mal so rasch als die Eigenfrequenz der Masse wechselt. Für uns sind hier nur die Fälle mit $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{8}$ und $\frac{1}{16}$ von Interesse. Man sieht, daß der plötzliche Einsatz der

Kraft auch nicht einmal bei 16fach höherer Frequenz richtig wiedergegeben wird. Kümmert man sich nur um den Höchstdruck, so ergibt sich, abgesehen von einer beachtlichen zeitlichen Verspätung, daß derselbe ähnlich wie zuvor bei den Schwingungen im Beharrungszustand verzerrt wird. Die Verzerrung ist aber jetzt nicht unerheblich größer, sie beträgt bei dem Verhältnis $\frac{f}{f_e} = 1/8$ jetzt $\sim 13,5\%$ gegenüber nur $1,5\%$ bei der ungedämpften Dauerschwingung. An Hand des Diagramms läßt sich für jedes beliebige Verhältnis $\frac{f}{f_e}$ bequem die Phasenverschiebung und Ausschlagverzerrung ablesen. In bezug auf die Ausschlagverzerrung werden die Verhältnisse günstiger, wenn man eine etwas stärkere Dämpfung einstellt. Beim Grenzwert der aperiodischen Dämpfung entsteht z. B. das Schaubild Abb. 353 a. Trotzdem ist aber beim Indikator eine solche Dämpfung nicht zu empfehlen, da 1. bei noch stärkerer Dämpfung bereits eine starke Verkleinerung eintritt und da 2. bereits beim Grenzwert der aperiodischen Dämpfung die Phasenverschiebung viel zu groß ist. Man wolle sich immer vorstellen, daß die Linie *b* den wirklichen Druckverlauf darstellt. Wird an Stelle dessen einer etwa nach der Kurve $1/8$ verzeichnet, so macht man sich eine vollkommen unrichtige Vorstellung über den Druckverlauf z. B. über die Schnelligkeit der Verbrennung.

Kennt man die Eigenfrequenz und Dämpfung des Indikators — welche Größen sich leicht ermitteln lassen —, so läßt sich aber auch in dem ungünstigsten Fall des plötzlichen Einsetzens des Gasdruckes ein Diagramm an Hand der vorstehenden Ausführungen umzeichnen, so daß man dadurch vor zu großen Fehlschlüssen auch bei weniger geeignetem Indikator bewahrt wird. Falls man wenigstens annähernd über das Gesetz, mit dem die Druckzunahme erfolgt, Bescheid weiß, kann man die Korrektur mit noch größerer Zuverlässigkeit durchführen. Das ist deshalb von Bedeutung, da wenigstens vorerst elektrische Indikatoren wohl nur für den Laboratoriumsgebrauch in Frage kommen. Man sollte aber wegen der Umständlichkeit in der Handhabung derselben außerhalb des Laboratoriums das Indizieren nicht einfach unterlassen, sondern hierfür möglichst gute mechanische oder auch optische Indikatoren anwenden und die hierbei entstehenden Fehler, wie gezeigt, rechnerisch weitgehend vermindern.

Allgemein läßt sich sagen, daß auch dann, wenn kein Beharrungszustand herrscht; es genügt, wenn die Eigenfrequenz mindestens das Vier-, besser das Achtfache der Frequenzzahl der raschesten vorkommenden Druckänderung beträgt.

Bei den bisher besprochenen Dämpfungen war immer vorausgesetzt, daß dieselben proportional der Schwingungsgeschwindigkeit seien. Mechanische Reibung ist von letzterer annähernd unabhängig. Es

könnte erscheinen, als ob die Verhältnisse hierfür wesentlich anders wären. Zunächst läßt sich zeigen, daß die mechanische Schreibstiftreibung auf sich fortbewegendem Papier recht gut durch eine von der Schwingungsgeschwindigkeit abhängige Dämpfung ersetzt werden kann; insbesondere aber sollte man bei einem Indikator die mechanische Reibung stets durch sorgfältiges Reinigen von Kolben und Büchse sowie durch gute Schmierung auf ein unschädliches Mindestmaß verringern, da größere mechanische Reibung sich nicht nur auf die Schwingungen, sondern auch auf den mittleren Druck auswirkt und den Indikator unbrauchbar macht. Der Einfluß auf die Diagrammform ist rechnerisch insofern schwer zu erfassen, weil der Kolben unter Umständen in irgendeiner Stellung plötzlich hängen bleibt und bei einem andern Druck wieder sich bewegt. Es kann dann die bereits erwähnte Treppenform entstehen; es kann aber auch, wenn ein Mittelding zwischen mechanischer Coulombscher Reibung und Flüssigkeitsreibung vorhanden ist, vorkommen, daß z. B. während der ganzen Verdichtung der Kolben zurückbleibt, also zu geringe Drücke anzeigt, während er bei der Ausdehnung infolge des gleichen Umstandes zu hohe Drücke verzeichnet. Das Diagramm wird also zu voll, ein Umstand, der dem Lieferer einer Maschine manchmal nicht unwillkommen sein kann, den Abnehmer aber über die wirklichen Verhältnisse täuscht.

Ob erhebliche mechanische Reibung vorhanden ist, läßt sich durch einen einfachen Versuch klären. Man gebe auf den Kolben einen gleichbleibenden Gasdruck (nicht Flüssigkeitsdruck, da bei demselben die Flüssigkeitsmasse mitzubersichtigen wäre), lenke den Kolben durch Ziehen an der Kolbenstange oder dem anschließenden Lenker aus der Gleichgewichtslage aus und lasse ihn unter gleichmäßigem Fortziehen des Papiers plötzlich los. Die Auslenkung soll mehrmals, und zwar abwechselnd nach beiden Seiten erfolgen. Kehrt der Schreibstift dann wieder genügend genau in seine Gleichgewichtslage zurück, so ist keine störende mechanische Reibung vorhanden.

Der Leser, der sich nicht gerne mit mathematischen Entwicklungen aus der Schwingungstheorie befaßt, sei noch auf ein von Borth angewendetes Verfahren zur Ermittlung des wahren Druckverlaufs aus einer verzeichneten Diagrammform hingewiesen.

Für den Indikatorkolben samt den mit ihm zwangsläufig — wenn auch gelenkig — verbundenen Massen besteht folgende Gleichgewichtsbedingung:

$$F \cdot p = c x + R + k \cdot \frac{dx}{dt} + m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2}.$$

Hierbei ist F (cm²) die Indikatorkolbenfläche, p (kg/cm²) der gesuchte Gasdruck, c die Federkonstante in kg/cm, x (cm) die Auslenkung des Kolbens, R (kg) die mechanische (Coulombsche) Reibung, $k \cdot \frac{dx}{dt}$ (kg)

die der Bewegungsgeschwindigkeit proportionale Dämpfung, $k \left(\frac{\text{kg s}}{\text{cm}} \right)$ der Dämpfungsfaktor, $m \left(\frac{\text{kg s}^2}{\text{cm}} \right)$ die Masse des Indikatorkolbens samt Zubehör, $\frac{d^2 x}{dt^2}$ die Beschleunigung von m .

F , c und m lassen sich durch Rechnung bzw. Abwiegung bestimmen, R und k durch einen Ausschwingversuch ermitteln. Den Differentialquotient $\frac{dx}{dt}$ ermittelt man durch Anlegen der Tangenten an die verzeichnete Wegkurve, wodurch man ein Geschwindigkeitsdiagramm erhält, $\frac{d^2 x}{dt^2}$

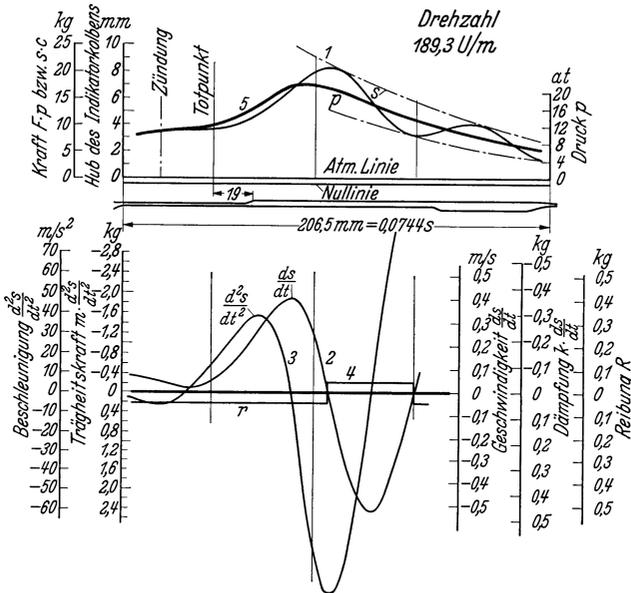


Abb. 354. Ermittlung der wahren Diagrammform aus der verzerrten nach Borth.

endlich wiederum durch Anlegen der Tangenten an die eben genannte Geschwindigkeitskurve.

Auf diese Weise werden alle Glieder auf der rechten Seite der Gleichung und damit auch der gesuchte Druck p bestimmt. Das Verfahren ist in Abb. 354 dargestellt.

Das Verfahren krankt leider an folgenden Punkten:

Die Bestimmung des mittleren indizierten Druckes p_{im} setzt eine auf 1—2% genaue Ermittlung der Diagrammfläche voraus, das zweimalige Umzeichnen nach dem Tangentenverfahren, dem noch ein Umzeichnen des Hubdruckdiagramms in ein Zeitdruckdiagramm voranzugehen hat, ist leider zu unsicher, als daß dadurch bei kleinen Diagrammen die gewünschte Genauigkeit erreicht würde.

Bei der Bestimmung des Höchstdruckes, d. h. der nächstwichtigsten Größe im Diagramm ist aber zu beachten, daß bei allen Verpuffungsmaschinen und auch bei Dieselmotoren mit direkter bzw. Vorkammerinspritzung gewöhnliche Hubdruckdiagramme im Moment des Höchstdruckes eine fast scharfe Ecke aufweisen, so daß an dieser Stelle das Tangentenverfahren nicht zu gebrauchen ist. Übrigens kommt man zur Bestimmung des Höchstdruckes mit den zuvor geschilderten schwingungstheoretischen Verfahren außerdem rascher zum Ziele.

Bei der Theorie des Indikators sind noch einige Ausführungen über Höchstdruckindikatoren am Platze.

Wir sprechen zunächst von jener Gruppe von Höchstdruckindikatoren, bei welchen der Kolben unter Federdruck an einem Anschlag anliegt, so daß erst dann eine Kolbenbewegung stattfindet, wenn der Gasdruck größer als der Auflagedruck wird. Man ist geneigt anzunehmen, daß bei solchen Indikatoren Massenwirkungen keine Rolle spielen, da sehr kleine Kolbenbewegungen bereits genügen. Das trifft aber nicht zu, wie sich zeigen läßt:

Wir müssen uns zunächst entscheiden, welches Gesetz wir für den Gasdruckverlauf annehmen wollen von dem Moment an, wo der Gasdruck den Auflagedruck zu überschreiten beginnt. Wir wählen den einfachsten Fall einer von 0 Grad an beginnenden Sinuslinie. Für diesen Fall hatten wir bekanntlich nach Seite 244 die Beziehung gefunden:

$$\frac{x \cdot c}{F} = \frac{p_0}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_e^2}} \left(\sin \omega t - \frac{\omega}{\omega_e} \cdot \sin \omega_e t \right).$$

Für den Fall Abb. 350 würde sich ergeben: Angenommen der Indikator ist so eingestellt, daß sich der Kolben erst nach Überschreiten eines Druckes von 60 atü von seinem Sitz abzuheben beginnt, so entspricht bei Annahme eines sinusförmigen Druckverlaufs die Strecke vom Abheben bis zum Wiederaufsetzen $1/30$ einer Umdrehung, d. h. die Frequenzzahl dieser halben Sinusschwingung ist das 15fache der Drehzahl von $n = 1500$. Ist jetzt die Indikatoreigenfrequenz 4500/min, wie sie bei mechanischen Indikatoren häufig vorkommt, so wird das Kreisfrequenzverhältnis $\frac{\omega}{\omega_e} = 5$.

Für den Scheitelwert der Sinusschwingung wird $\sin \omega t = 1$ und damit

$$\frac{\omega}{\omega_e} \cdot \sin \omega_e t = 1,54$$

$$\frac{x \cdot c}{F} = p_0 \cdot 0,0225.$$

War der Federmaßstab zuvor z. B. $1 \text{ mm} = 2 \text{ kg/cm}^2$ also $c/F = 20$, so ergäbe sich damit für den Scheitelpunkt mit $65 = 60 + p_0$ atü nur eine Zeigerbewegung von

$$5/2 \cdot 0,0225 = 0,0562 \text{ mm,}$$

d. h. so wenig, daß sie kaum mehr mit voller Sicherheit festgestellt werden kann. Man wird also nicht noch näher an den Höchstdruck von 65 atü herangehen können.

Man wird vielleicht einwenden, daß in dem Moment, wo der Gasdruck seinen Höchstwert erreicht hat, der Kolben eine gewisse lebendige Energie erlangt hat und vermöge dieser über den Scheitelpunkt noch etwas hinausschnellt. Zu diesem Zwecke ermitteln wir die Geschwindigkeit x' des Kolbens durch Differenzieren der vorgenannten Gleichung nach t und erhalten

$$x' \cdot \frac{c}{F} = \frac{p_0}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_e^2}} (\omega \cdot \cos \omega t - \omega \cdot \cos \omega_e t).$$

Für den Scheitelwert der Sinusschwingung ergibt sich bei $\frac{\omega}{\omega_e} = 5$ $x' \cdot c/F = -p_0 \cdot \omega \cdot 0,0394$.

Die lebendige Geschwindigkeitsenergie $v^2 \cdot m/2$ des Kolbens wird dann

$$\left(p_0 \cdot \frac{F}{c} \cdot \omega \cdot 0,0394 \right)^2 \cdot \frac{m}{F \cdot 2}.$$

Sie ist gleich der Federdurchbiegungsarbeit. Da die Feder bereits eine starke 60 atü entsprechende Vorspannung besitzt und sich nur ganz wenig durchbiegt, machen wir keinen Fehler, wenn wir die Federkraft von 60 kg auf den Durchbiegungsweg als gleichbleibend annehmen.

Damit ergibt sich ein zusätzlicher Weg von 0,0004 mm.

Man kann also diesen Einfluß der lebendigen Kraft ruhig vernachlässigen.

Hätte man den Anschlag des Kolbens nicht auf 60, sondern auf 64 atü eingestellt, so hätte sich nur rund $\frac{1}{100}$ mm, also für eine sichere Feststellung entschieden zu wenig ergeben. Man sieht daraus, daß es auch bei federbelasteten Höchstdruckindikatoren auf die Eigenfrequenz des Indikators ankommt und daß auch hier dieselbe nicht zu tief liegen darf. Freilich sind die Anforderungen an die Höhe der Eigenfrequenz erheblich geringer als bei Normalindikatoren.

B. Bestimmung der dynamisch gleichwertigen Masse.

Bei unseren vorhergehenden Ausführungen sind wir davon ausgegangen, daß man sich die ganze mit dem Kolben bewegte Masse in demselben vereinigt denken kann. Diese Masse setzt sich aus 4 Teilen zusammen:

1. der Masse des Kolbens samt Kolbenstange, den an beiden Enden sitzenden Befestigungsschrauben und dem Federkopf;
2. der Masse der Übertragungsteile, welche je nach ihrem Abstand von ihrem Drehpunkt die Bewegung des Kolbens vergrößert oder verkleinert wiedergeben;
3. der Masse der Feder;

4. der Masse des an der Kolbenbewegung teilnehmenden Mediums. Die gleichwertige auf die Bewegung des Kolbens bezogene Masse der Übertragungsteile ermittelt man allgemein dadurch, daß man für jedes Massenteilchen m den Weg s ermittelt, der zu dem bei normalen Diagrammen vorkommenden Kolbenweg s_k gehört. Die auf den Kolben bezogene Masse m_{red} ergibt sich dann zu

$$m \cdot \left(\frac{s}{s_k} \right)^2.$$

Die quadratische Reduktion erklärt sich wie folgt:

Zu jeder Bewegung s_k des Kolbens gehört je nach dem Vergrößerungsverhältnis eine n -fach größere Bewegung s eines Gestängeteils von der Masse m . Es ist also die Beschleunigung b des letzteren ebenfalls $\frac{s}{s_k}$ fach größer als die Beschleunigung b_k des Kolbens. Da aber die dadurch hervorgerufene Massenkraft $m \cdot b = m \cdot b_k \cdot \frac{s}{s_k}$ auch am $\frac{s}{s_k}$ fach größeren Hebelarm angreift, ist sie bezogen auf den Kolben nochmals mit $\frac{s}{s_k}$ zu multiplizieren, so daß sich ergibt

$$m \cdot \left(\frac{s}{s_k} \right)^2 \cdot b_k.$$

Für eine angenäherte Berechnung, für die wir den normalen Crosby-Indikator (Abb. 355) wählen, genügen folgende Angaben:

Das Kuppelgelenkstück macht annähernd die gleiche Bewegung wie der Kolben, seine Masse kann daher zur Kolbenmasse unmittelbar hinzugerechnet werden.

Beim Gegenlenker ist der eine Zapfen in Ruhe, während der andere praktisch die gleiche Bewegung wie der Kolben ausführt. Bei symmetrischer Ausführung kommt daher die Masse des Gegenlenkers zur Hälfte in Frage.

Man macht keinen großen Fehler, wenn man die Masse des Schwinghebels vernachlässigt. Bei der Masse des Schreibhebels, der einen stetig sich ändernden Querschnitt und eine verwickelte, gegabelte Form hat, bleibt nichts anderes übrig, als denselben in 5 oder mehr Teile einzuteilen und für jeden die reduzierte Masse zu bestimmen.

Ja nicht außer acht gelassen werden darf die Masse des Schreibstiftes und des zu seiner Befestigung notwendigen Schraubchens sowie des zugehörigen Auges am Schreibhebel. Bei langem Stift kann dieselbe

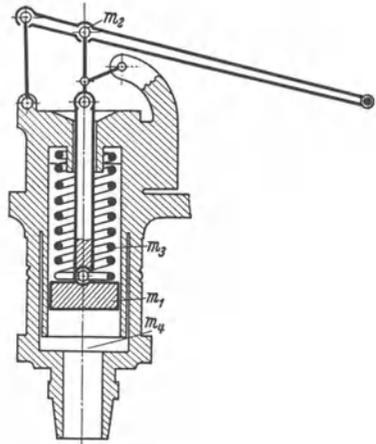


Abb. 355.
Schema des Crosby-Indikators.

infolge der Vergrößerung der Kolbenbewegung einen recht erheblichen Anteil an der gesamten auf den Kolben bezogenen Masse ausmachen.

Unter Federmasse verstehen wir nur jenen Teil der Feder, der sich elastisch deformiert; der Federfuß bewegt sich nicht und kommt daher nicht in Betracht, die Federkopfmasse wurde bereits in voller Größe beim Kolben berücksichtigt. Falls die Durchbiegung im Verhältnis zur Baulänge der Feder ziemlich klein ist, kann man, wie folgt, vorgehen.

Wir denken uns die Baulänge l gleichmäßig mit soviel Masse belegt, als der Masse m des elastisch deformierbaren Teiles entspricht. Ein Massenteilchen von der Länge dx und dem Abstand x von dem mit dem Kolben fest verbundenen Federkopf hat dann eine auf den Kolben reduzierte Masse von

$$k \cdot dx \left(\frac{l-x}{l} \right)^2,$$

wobei k ein Beiwert ist, der aus Windungszahl, Drahtstärke, Windungsdurchmesser und spezifischem Gewicht sich ergibt und das Gewicht je Längeneinheit darstellt. Integriert auf die ganze Baulänge findet sich

$$\int_0^l k \cdot dx \cdot \left(\frac{l-x}{l} \right)^2 = \frac{k \cdot l}{3} = \frac{m}{3}.$$

Die Feder ist also zu $\frac{1}{3}$ ihrer Masse zu berücksichtigen. Für solche Fälle, wo die Feder ausknicken kann oder wo sie Sonderschwingungen ausführt (sog. Flattern), ist diese einfache Berechnung nicht mehr anwendbar. Solche Fälle scheiden jedoch bei Indikatoren aus. Das gleiche gilt für solche Fälle, in welchen die reduzierte Masse des federnden Teiles verhältnismäßig groß im Vergleich zu der Summe der anderen auf den Kolben bezogenen Teile ist¹.

C. Wiedergabe der Maschinenkolbenbewegung.

Wie bereits früher angedeutet, können auch hier durch dynamische Einflüsse Fehler entstehen, nämlich zunächst dann, wenn infolge zu großer Trommelmasse oder zu hoher Drehzahl die Massenträgheitskraft der Trommel größer als die Kraft der Trommelfeder wird.

Am besten erkennt man dies aus folgendem Bild (Abb. 356), das für ein Treibstangenverhältnis $\lambda = 1 : 4$ der Maschine für 3 verschiedene Drehzahlen gezeichnet wurde, unter der Voraussetzung, daß der Angriffspunkt der Schnur eine dem Maschinenkolben genau entsprechende verkleinerte Bewegung ausführt.

Die Federkraft nimmt linear von einem Anfangswert aus zu. Ist m die auf den gleichen Abstand von der Trommelachse dynamisch, d. h. im quadratischen Verhältnis bezogene Masse der Trommel und r ihr

¹ Eine genaue Studie hierüber ist: O. Holm: Der Einfluß der Federmassen auf die dynamischen Eigenschaften von Indikatoren. Z. Instrumentenkde 1928 S. 14—26.

halber Hub, so ergibt sich für das normale zentrische Kurbelgetriebe die zugehörige Massenkraft zu

$$T = m \cdot \left(\frac{n \cdot \pi}{30} \right)^2 \cdot r \cdot \left(\cos \alpha \pm \lambda \cdot \cos 2\alpha - \frac{1}{2} \lambda^3 \cdot \sin 2\alpha (2 \cos^2 \alpha + \cos 2\alpha) \right).$$

Hierbei ist n die minutliche Maschinendrehzahl, α der Kurbelwinkel gegenüber der Stellung im oberen Totpunkt.

Für letztere ergibt sich

$$T = m \cdot \left(\frac{n \cdot \pi}{30} \right)^2 \cdot r (1 + \lambda).$$

Die Drehzahl darf nicht so hoch werden, daß die Trägheitskraft der Trommel im O.T. an die Federkraft heranreicht; letztere muß vielmehr, um ein Schlappwerden der Schnur zu verhindern, auch im O.T. wesentlich über der größten Massenkraft liegen. Günstig ist es, wenn die Neigung der Federkraftlinie annähernd der durchschnittlichen Neigung der Massenkraftlinie entspricht, da dann die elastischen Deformationen des Schnurantriebs möglichst klein gehalten werden. Selbstverständlich gelingt dies nur für eine Drehzahl, daher soll die Federkenlinie so gehalten werden, daß sie bei der Drehzahl am günstigsten liegt, für die der Indikator meistens verwendet wird. Es wäre erwünscht, wenn die Indikatorfirmen diese Drehzahl für die zugehörige Feder gleich mit angeben würden. Mit Rücksicht darauf, daß die Massenkraftkurve infolge des Einflusses der endlichen Länge der Treibstange parabolisch verläuft, während die Federkraftkurve linear anwächst, ist es auch bei günstiger Drehzahl unmöglich, daß die Differenz von Feder- und Massenkraft, d. h. die Schnurkraft bei allen Trommelstellungen gleich bleibt. In Abb. 356 beträgt bei der günstigsten Drehzahl n_{opt} die maximale Schnurkraft bereits das 1,54fache der geringsten Schnurkraft, bei einer nur um 18,30% höheren Drehzahl beträgt sie sogar das 2,33fache.

Um die Dehnungen der Schnur möglichst klein zu halten, ist daher die Schnur kurz zu wählen bzw. ist, falls ein langer Antrieb sich nicht vermeiden läßt, eine Schnur mit Drahteinlage oder ein Stahlband zu wählen.

Was die Reibung anbelangt, so kommt bei der Trommelbewegung im wesentlichen nur mechanische Reibung in Frage, der gegenüber der Einfluß der von der Schwingungsgeschwindigkeit abhängigen Reibung wie der Luftreibung ganz zurücktritt.

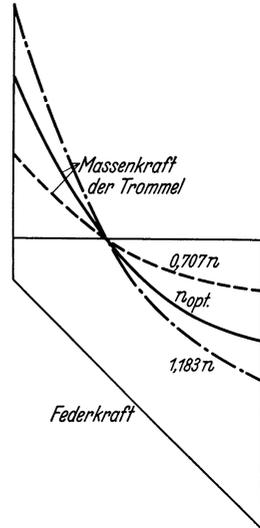


Abb. 356. Abhängigkeit der Massenkraft der Indikatortrommel von der Drehzahl und vom Hub für ein Treibstangenverhältnis 1:4 und 3 verschiedene Drehzahlen.

Bei guter Schnurführung und Trommellagerung sollte die mechanische Reibung vernachlässigt werden können. Besonderes Augenmerk muß aber hier noch der Möglichkeit gewidmet werden, daß die gewöhnlich angewendete vielfach gewundene Drehfeder ausknicken kann und dann bei zu engem Spiel gegenüber der Trommelachse an dieser reibt. Wenn schon einmal Reibung an der Trommel auftritt, so kann sie in 3facher Hinsicht sich schädlich äußern:

1. Die Diagrammlänge kann verkürzt werden, dadurch daß die Reibung dem Schnurzug bzw. der Federkraft entgegenwirkt. Nur bei ganz ungewöhnlich großer Reibung kommt dadurch eine störende Verengerung der Diagrammlänge zustande.

2. Im Zusammenhang hiermit kann der Schreibstift in den beiden Endlagen eine vertikale Linie verzeichnen, davon herrührend, daß der in Wirklichkeit mit dem Hub allmählich ansteigende oder fallende Druck

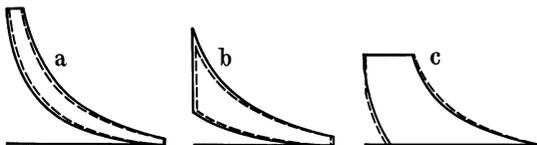


Abb. 357a—c. a Dieselmotor mit Drucklufteinblasung; b Ottomotor; c Luftverdichter. Einfluß der Trommelreibung auf das Indikatordiagramm.

infolge des augenblicklichen Stillstandes der Trommel in einen scheinbar plötzlich ansteigenden umgewandelt wird.

3. Infolge Nachhinkens der Trommelbe-

wegung gegenüber der wirklichen Kolbenbewegung, verursacht durch den Einfluß der Reibung, liegt die Verdichtungslinie über der wirklichen, während die Expansionslinie unter der wirklichen liegt. Abb. 357a zeigt dies für einen Gleichdruck-Dieselmotor, Abb. 357b für einen Verpuffungsmotor und 357c einen Kompressor. Bei den ersteren beiden wird die Diagrammfläche und damit der mittlere Druck gegenüber dem wirklichen zu klein angezeigt, beim Kompressor dagegen zu groß.

Das System Trommel samt Feder besitzt eine sog. Schleuderdrehzahl, oberhalb der das Antriebsband bei der Rückwärtsbewegung schlaff wird. Nach Wilke beträgt dieselbe je Minute

$$n_{Sch} = 13,50 \cdot \sqrt{\frac{(1-b) \left(K_0 + \frac{s}{2} k \right) - a}{m \cdot s}} \cdot \sqrt{\frac{1}{1-\lambda}},$$

hierbei sind $a = 0,038$ und $b = 0,004$ die von Wilke für einen Maihak-Indikator, Größe II, gefundenen Reibkennziffern (der Wert a stammt von dem für die ganze Hubbewegung gleichbleibenden Reibungsanteil, der Wert b ergibt multipliziert mit $K_0 + s/2 \cdot k$ den von der Federspannung herrührenden Betrag).

K_0 ist die Federspannung in Mittellage, s der Trommelhub, m die auf ihren Halbmesser bezogene Masse der Trommel, λ das Verhältnis des Kurbelradius r zur Pleuellänge l , $K_0 + s/2 \cdot k$ die Federkraft am Hubende. Bezüglich der Ableitung sei auf die Quelle verwiesen.

Bei der vorstehenden Untersuchung ist vorausgesetzt, daß die Antriebssehnur selbst unelastisch ist, so daß nur mit einem Lockern derselben zu rechnen ist. Eine Berücksichtigung der Elastizität des Antriebsbandes ist nach den Methoden der Schwingungslehre grundsätzlich möglich. Hierbei ermittelt man ähnlich wie beim Indikatorgestänge die auf den Durchmesser der Schnurrolle, d. h. mit anderen Worten die auf das Antriebsband dynamisch also im Quadrat des Radius des betreffenden Massenteilchens zum Schnurrollenradius bezogene Masse m der gesamten Indikatortrommel samt Zubehör und die Federkonstante c des Antriebsbandes. Bei letzterer ist nur die Schwierigkeit vorhanden, daß sich dessen elastische Länge während des Hubes durch Aufwickeln auf die Trommel ändert. Am sichersten geht man, wenn man für die Berechnung die größte Länge, d. h. also jene in möglichst weit abgewickeltem Zustand verwendet.

Ist F der Querschnitt des Bandes in cm^2 , l seine elastische Länge in cm (also ohne das um die Trommel gewickelte Stück) und E in kg/cm^2 der Elastizitätsmodul, so wird die Federkennzahl

$$c = \frac{F \cdot E}{l}.$$

Die Eigenfrequenz des Trommelantriebes wird dann

$$n_e = \frac{30}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{c}{m}}.$$

Bei vorstehenden Ausführungen ist vorausgesetzt, daß das Indikatorantriebsgestänge unelastisch ist und an den Übertragungszapfen kein Spiel vorhanden ist; die Elastizität des Gestänges läßt sich sowohl in statischer als auch dynamischer Hinsicht vollständig berücksichtigen. Sie wirkt sich in einer Erniedrigung der Eigenfrequenz des Trommelantriebes aus. Das Spiel muß selbstverständlich möglichst gering gehalten werden; desgleichen ist bei hohen Drehzahlen ein möglichst kurzes, den Trommelumfang an Länge nur wenig übertreffendes Stahlband zu wählen.

In diesem Falle ist aber bei den Drehzahlen, bei welchen bei mechanischen Indikatoren die Massenträgheit des Kolbens und des Schreibgestänges sich noch nicht störend bemerkbar machen, auch eine Störung durch Massenwirkungen der Trommel noch nicht zu befürchten, da hier die Längselastizität des kurzen Stahlbandes weitaus geringer ist als die auf den Trommelumfang umgerechnete Drehelastizität der Feder.

Fehlerhafte Trommelbewegung kann außer den im Abschnitt „Fehlerhafte Diagramme“ geäußerten Ursachen noch auf folgendes zurückgeführt werden: Die Kontrolle der Genauigkeit der Trommelbewegung findet gewöhnlich am Schwungrad statt, während andererseits die Trommelbewegung selbst oft vom entgegengesetzten Kurbelwellenende oder von der Steuerwelle abgeleitet wird. Zwischen dem Schwungrad und dem freien Wellenende entstehen unter dem Einfluß der wechselnden Drehkräfte und natürlich erst recht in der Nähe von kritischen Torsions-

drehzahlen der Wellenleitung Relativverdrehungen, die bei Mehrzylindermotoren leicht 1 Grad Kurbelwinkel und darüber betragen können. In starken Kritischen wurden bis 8 Grad Kurbelwinkel gemessen. Die Größe der Verdrehung hängt von der Zylinderzahl bzw. dem Abstand zwischen Schwungrad und Indikatorantrieb ab.

Beim Antrieb von der Steuerwelle aus gilt sinngemäß das gleiche:

Je längere elastische Wellenstücke zwischen Schwungrad und Antrieb sich befinden, um so größer wird die Verdrehung. Dieselbe ist aber kein Fehler, der dem Antrieb zur Last zu legen ist, sondern der Wahl der Antriebsstelle. Hierfür ist aber keineswegs ein in der Nähe des Schwungrades gelegener Punkt am günstigsten, am richtigsten ist es, den Indikatorantrieb von derjenigen Kurbel abzuleiten, deren Zylinder indiziert wird.

Wenn man besonders sorgfältig nach Fehlern sucht, so muß man noch an die Dehnung des Maschinengestells denken. Angenommen, die durchschnittliche Beanspruchung desselben unter dem Einfluß der Zündung sei 200 kg/cm^2 , so wird sich dasselbe auf 1 m Länge um 0,22 mm längen¹, dies gibt, bezogen auf den Trommelumfang fast 1 Grad und, bezogen auf den Indikatorhub 1,1 Grad KW. Fehler von 1 Grad können also leicht entstehen, brauchen aber ihre Ursache keineswegs im Indikator zu haben. Allerdings sind diese Fehler, soweit es sich um das übliche Indizieren handelt, nicht tragisch zu nehmen; es genügt in der Praxis, wenn man sich vergewissert, daß zwischen dem Indikatorhub bei langsamem Durchschalten der Maschine und bei voller Drehzahl kein erheblicher Unterschied vorhanden ist.

Schließlich sei im Zusammenhang mit der Trommelbewegung noch die Frage erörtert, ob es besser ist, eine kleine Schnurrolle oder eine große bei der Trommel anzuwenden. Dies gibt uns auch Gelegenheit, die Ermittlung der Masse der Trommel und der mit ihr bewegten Teile zu erörtern. Wir denken uns alle diese Massen in bezüglich ihrer Massenwirkung gleichwertige aber unmittelbar am Schnurende angreifende verwandelt. Ist r_0 der Abstand, in dem die Schnur an der Trommelachse angreift, und r der Abstand eines Massenteilchens dm der Trommel, so ist dessen auf den Schnurabstand bezogene Masse $dm \cdot \left(\frac{r}{r_0}\right)^2$. Soweit es sich um reine Drehkörper handelt, kann man an Hand der in jedem technischen Taschenbuch sich findenden Formeln über polare Trägheitsmomente rasch die bezogenen Massen ermitteln.

Wir sehen jetzt an Hand obiger Formel, daß es für die bezogene Masse von wesentlicher Bedeutung ist, an welchem Abstand r_0 die Schnur angreift. Bei kleinem Abstand werden die Masse und damit ihre Massenkraft sehr groß. Aus diesem Grund soll die Schnurbewegung nicht zu klein gewählt werden, und es werden gewöhnlich Schnurrolldurchmesser und Trommeldurchmesser annähernd gleich gemacht.

¹ Bei Ausführung in Gußeisen.

Auf einen Punkt, der in neuerer Zeit zu einer größeren Bedeutung gelangt ist, sei noch besonders hingewiesen:

Die Länge des Indizierkanals.

Wenn der Gasdruck sehr rasch sich ändert, so entstehen in der Indikatorbohrung Schwingungen ähnlich wie bei einer Feder. Die Frequenzzahl dieser Eigenschwingungen läßt sich für einen glatten Kanal leicht nach den folgenden Formeln berechnen: Die sekundliche Eigenfrequenz ist

$$n_e = \frac{a \cdot m}{2 \cdot L}.$$

Hierbei ist a die Schallgeschwindigkeit in m/s, m eine Zahl, die für die Grundschiwingung 1, für die erste Oberschiwingung 3, für die zweite 5 usw. ist, L die Länge der Bohrung in m. Die Schallgeschwindigkeit ergibt sich zu

$$a = \sqrt{\frac{p_0}{\rho_0} \cdot \kappa} = 331 \cdot \sqrt{\frac{T}{273}}.$$

hierbei ist p_0 der Druck in kg/cm², ρ_0 die spezifische Masse in kgs²/m⁴, $\kappa = 1,41$ und T die absolute Temperatur.

Für eine Gastemperatur von 500⁰ C ergibt sich bei $L=0,2$ m damit eine Eigenfrequenz der Grundschiwingung von 84000/min. Zeigen sich also im Indikatordiagramm eines Motors von $n=1400$ U/min und der genannten Bohrungslänge Schwingungen, die 60mal je Umdrehung wechseln, so stellen dieselben Eigenschwingungen der Gassäule dar.

Besonders schön erkennt man den Einfluß der Länge des Indizierkanals aus Versuchen von S. Meurer. In Abb. 358¹ zeigt die ausgezogene Linie ein mit dem piezoelektrischen Verfahren aufgenommenes Zeitdruckdiagramm eines Einspritzdieselmotors, wobei der Indikator direkt, d. h. ohne Kanal an den Verbrennungsraum angeschlossen war. Die drei gestrichelten Linien beziehen sich auf jeweils gleichzeitig am gleichen Zylinder aufgenommene Diagramme, wobei aber der Indikator über einen 90 bzw. 155 bzw. 270 mm langen Kanal angeschlossen war. Man erkennt deutlich, daß die Gasschwingungen um so langsamer erfolgen, je länger die Leitung ist, daß sie aber gleichzeitig um so stärker das Diagramm verzerren.

Namentlich aus dem untersten Diagramm ($r = 270$ mm) erkennt man, daß die Schwingungen bei fortschreitender Ausdehnung langsamer erfolgen. Das erklärt sich dadurch, daß gegen Ende der Ausdehnung die Drücke und damit die Temperaturen wesentlich niedriger sind als im Augenblick des höchsten Druckes und der intensivsten Verbrennung. Durch die niedrigere Temperatur wird aber gemäß den obigen Formeln die Schallgeschwindigkeit und damit die Eigenschwingungszahl niedriger.

Noch eine andere Erscheinung verdient unsere Aufmerksamkeit. Man würde erwarten, daß die wahre Ausdehnungslinie in der Mitte zwischen den obersten und den untersten Spitzen verläuft. In Wirklichkeit

¹ Entnommen aus VDI-Heft: Prüfen und Messen, 1937.

liegt sie aber bei sämtlichen drei Diagrammen bei fortgeschrittener Ausdehnung etwas darunter. Dies erklärt sich durch den Widerstand (Oberflächenreibung), den das Gas bei der Expansion beim schnellen Rückströmen aus der engen Indikatorbohrung erfährt.

Es sei besonders darauf hingewiesen, daß Kniestücke oder Ecken in dem Indizierkanal nach dieser Richtung noch schlimmer wirken als eine lange Leitung. Ähnliches ist der Fall, wenn man in die Indikatorbohrung eine Drossel einbaut. Durch sie werden zwar die Gasschwingungen gedämpft, gleichzeitig tritt aber ein Nachhinken im Diagramm ein, so daß die verzeichnete Kompressionslinie — im letzten Drittel — unter der wirklichen und die Expansionslinie etwas über der wirklichen liegt.

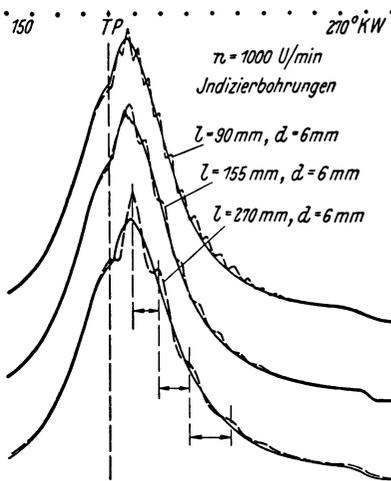


Abb. 358. Einfluß der Länge des Indizierkanals bei einem Einspritz-Viertakt Dieselmotor.

Die bezogene Masse des auf den Kolben einwirkenden Arbeitsmediums kann dann auf die Eigenfrequenz des Indikator Kolbens von Einfluß sein, wenn der Indizierkanal sehr lang und gleichzeitig schmal ist, so daß sich im Kanal Schwingungen ausbilden können.

Von solchen Fällen können wir jedoch absehen, da für genaues Indizieren sich lange Leitungen schon mit Rücksicht auf die dadurch entstehende Gassdrosselung

verbieten. Dieser Einfluß ist aber viel bedeutsamer als jener auf die reduzierte Masse des Indikators. Man kann sich dies durch eine einfache Rechnung leicht klarmachen:

Für einen gewissen viel angewendeten Indikator mit Crosby-Lenker ist die gesamte bezogene Masse aller festen Teile $1,2/10^4 \cdot \text{kg s}^2/\text{cm}$. Ist der Gaskanal volle 20 cm lang und 5 mm breit, der mittlere auf die Zeit bezogene Druck im Gaskanal $\sim 3 \text{ ata}$ bei einer Temperatur von 500°C , so ist die Gasmasse mit $5,5/10^9 \cdot \text{kg s}^2/\text{cm}$ noch nicht einmal der zwanzigtausendste Teil der Indikatormasse. Von ihr käme aber wiederum nur ein Bruchteil in Frage. Man sieht daraus, daß es zwecklos ist, in einer Theorie des Indikators auf diesen Einfluß näher einzugehen, da es zur Aufgabe einer guten Theorie gehört, das Wichtige vom Unwichtigen zu trennen.

Lediglich in Fällen, wo es sich um Indizierung sehr rasch verlaufender Flüssigkeitsdruckschwankungen handelt, kann daher infolge des großen spezifischen Gewichtes der Flüssigkeit ein Fehler entstehen. Ein solcher Fall ist die Indizierung von Brennstoffpumpen und Brennstoffleitungen

von Dieselmotoren. Hierfür müssen jedoch Sonderbauarten gewählt werden, die bereits erwähnt sind. Da bei ihnen ohnehin die zwingendste Notwendigkeit vorherrscht, den schädlichen Raum des Indikators und seinen Hub verschwindend klein zu machen und die Länge des Indikatorkanals auf Null zu reduzieren, so braucht man auch in diesem Fall den Einfluß der Flüssigkeitsmasse auf die gesamte bewegte Masse des Indikators nicht zu berücksichtigen.

X. Mechanische oder elektrische Indikatoren?

Bei diesem Vergleich soll es sich nicht um ein Urteil über dieses oder jenes Fabrikat handeln; doch dürfte eine kritische Beurteilung der Vor- und Nachteile dieser beiden Haupttypen von allgemeinem Interesse sein, da die elektrischen Indikatoren außerordentlich an Bedeutung gewonnen haben. Bis wenige Jahre vor dem Krieg war in der Praxis der mechanisch arbeitende Indikator fast allein gebräuchlich. Damals fragte man noch nicht viel nach Eigenfrequenz und Dämpfung, also nach den dynamischen Eigenschaften des Indikators, dagegen legte man besonders hohen Wert auf eine möglichst vollkommene Proportionalität zwischen Kolben- und Schreibstiftbewegung. Man vertraute im übrigen auf tadelloses Arbeiten des Indikators so sehr, daß allgemein mit ihm die indizierte Leistung unserer Kolbenkraftmaschinen bestimmt und laufend überwacht wurde und daß er als ein geradezu unentbehrliches Hilfsmittel zur Einstellung der Steuerung, zur Kontrolle der Zündung und Verbrennung angesehen wurde, daß jeder verkauften Maschine ein Indikator mitgegeben wurde und nicht nur Ingenieure, sondern auch völlig auf sich allein angewiesene, keinerlei dynamische Kenntnisse besitzende Monteure laufend indizierten.

Die Entwicklung drängte zu rascher Steigerung der Drehzahlen, womit man mit wichtigen harmonischen Anteilen des Gasdruckverlaufes in das Gebiet der Eigenschwingungszahl des Indikators kam und Diagramme erhielt, die auch dem Laien auf den ersten Blick ihre Unrichtigkeit in starken Schwingungen namentlich bei der Expansion erkennen ließen. Verschärft wurde diese Lage beim Dieselmotor durch den Übergang von der Einblasung des Brennstoffes durch Druckluft zu der direkten luftlosen Einspritzung und in deren Gefolge durch den Übergang von der Gleichdruckverbrennung zu einer Verbrennung mit starker und schnell sich vollziehender Drucksteigerung. Schwingungstechnisch gesprochen kamen dadurch in das Diagramm, in dem zuvor langsam wechselnde harmonische Gasdrücke vorherrschten, beachtlich rascher wechselnde herein, die, wenn man richtig indizieren wollte, hätten berücksichtigt werden müssen.

Die offenkundige Unrichtigkeit der verzeichneten Diagramme offenbarte sich hier außer in unmöglich starken Schwankungen während der

Verbrennung und Expansion auch in unrichtiger Anzeige des Höchstdruckes. Dazu kam noch besonders erschwerend, daß seitens der Indikatoren bauenden Firmen so kleine Modelle für hohe Drehzahlen geliefert wurden, daß bei den damit erhaltenen kleinen Diagrammen von nur $\sim 1 \text{ cm}^2$ Inhalt ein zuverlässiges Ausplanimetrieren und Bestimmen der indizierten Leistung kaum mehr möglich war.

In Erkenntnis dieser Mängel schüttete man leider vielfach das Kind mit dem Bade aus, verzichtete auf die Abnahme von Indikatordigrammen und das Bestimmen der indizierten Leistung und begnügte sich mit der Ermittlung des Höchstdruckes mit Hilfe von gewöhnlichen Indikatoren, der aber, wie wir bei der Dynamik des Indikators gezeigt haben, infolge zu niedriger Eigenfrequenz des Indikators bei schroffen Drucksteigerungen auch nicht befriedigend richtig verzeichnet wurde. Andererseits entstanden in Erkenntnis dieser Mängel die verschiedensten Vorschläge und fast jede elektrophysikalische Erscheinung wurde, wie dies aus dem Abschnitt „elektrische Indikatoren“ hervorgeht, auf ihre Eignung hin untersucht. Wenn dabei diese Indiziereinrichtungen gewöhnlich als „masselos“ im Gegensatz zu den trägheitsbehafteten mechanischen Indikatoren bezeichnet wurden, so kann dies nur relativ verstanden werden; denn jeder elektrische Indikator besitzt eine federnde Membran, einen elastischen Quarzkristall, einen Spiegel und ähnliche Teile, die keineswegs masselos sind¹. Als masselos kann nur die Übertragung und Aufzeichnung angesehen werden, und auch diese nur beim Kathodenstrahlzillograph. Selbstverständlich sind aber die Massen sehr viel geringer als bei den üblichen mechanischen Indikatoren. Es entsteht hier die Frage, ob eine so weit getriebene Verringerung der Massen tatsächlich erforderlich ist. Bei der Theorie des Indikators ergab sich, daß nicht die Masse, sondern die Eigenfrequenz oder genauer gesagt, das Verhältnis der höchsten Frequenz der wichtigeren Gasdruckschwankungen zur Eigenfrequenz das Kriterium für einwandfreies dynamisches Arbeiten des Indikators ist und daß es genügt, wenn die Eigenfrequenz wenigstens 4mal so hoch als die vorkommende höchste beachtenswerte Frequenz ist.

Der Bedeutung dieser Frage wegen seien die Verhältnisse an einem praktischen Beispiel ausführlich geschildert. Dasselbe dient gleichzeitig als Rechenmuster für andere Fälle. Abb. 344 stellt das mit einem Piezoquarzindikator mit Schleifenzillograph aufgenommene Zeitdruckdiagramm eines Vorkammer-Viertaktdieselmotors mit der sehr hohen Drehzahl $n = 1500/\text{min}$ dar. Der Fall ist also sowohl wegen der hohen Drehzahl als auch wegen der außerordentlich raschen Drucksteigerung beim

¹ Besonders deutlich geht dies hervor aus der Beschreibung des Sunbury-Kathodenstrahlindikators, Engineering 1935 S. 296. Der Verfasser bemerkt dort, daß die Membran eine Durchbiegung von 1,27 mm ergebe und also ihre Trägheitswirkung vernachlässigbar sei. Die Wege der Kolben mancher mechanischer Indikatoren sind aber nicht sehr viel größer.

Einsetzen der Zündung ein ausgesucht ungünstiger. Die hierbei durch die Verbrennung hervorgerufene Drucksteigerungsgeschwindigkeit ist mit $25\,600 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{s}$ recht schroff. Zum Vergleich sei bemerkt, daß bei einem BMW-Flugmotor nach Schnauffer, DVL-Jahrbuch 1930, sich nur eine Drucksteigerungsgeschwindigkeit von $5540 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{s}$ findet. Um ein Urteil über die bei einer gegebenen Indikatoreigenfrequenz erhaltenen Fehler zu gewinnen, ist das Diagramm harmonisch zu analysieren. Näheres hierüber findet sich im Abschnitt: Dynamik des Indikators. Das Ergebnis ist niedergelegt in folgender Tabelle. Hierbei bedeuten die arabischen Zahlen der ersten Reihe die Ordnungszahlen der harmonischen Komponenten, bezogen auf die Drehzahl. Für die Grundschwingung ergibt sich also wegen des Viertakts die Ordnungszahl $1/2$. S stellt die Sinus- und C die Cosinuskomponente, p die resultierende Erregende in kg/cm^2 dar. Für die Kurbelstellung 6° nach $O.T.$ finden sich damit die Kräfte p_6 , welche zusammen, wenn die Analyse genügend weit fortgesetzt ist, den aus dem Diagramm ablesbaren resultierenden Wert von $65,5 \text{ kg/cm}^2$ abzüglich dem mittleren Druck ergeben müssen.

Tabelle 5.

	S	C	p	p_6	Verz	φ	p_{Verz}	$p_{\text{Verz } 3}$
$1/2$	-0,90	-11,05	11,1	11,09	1		11,09	11,04
1	+1,35	+9,10	9,2	9,20	1	$3^\circ 30'$	9,20	9,16
$1 1/2$	-1,15	-6,95	7,05	7,05	1,003	6°	7,04	7,05
2	+0,75	+5,55	5,59	5,57	1,006	$7^\circ 50'$	5,50	5,62
$2 1/2$	-0,80	-4,50	4,56	4,55	1,008	$9^\circ 30'$	4,45	4,60
3	+0,65	+3,95	4,01	3,96	1,012	$11^\circ 30'$	3,81	4,05
$3 1/2$	-0,45	+3,20	3,24	2,83	1,020	13°	2,67	3,19
4	-0,95	-2,45	2,63	2,63	1,023	$15^\circ 30'$	2,57	2,68
$4 1/2$	-0,05	+2,20	2,20	1,94	1,033	18°	1,57	2,15
5	+0,55	-3,20	3,25	2,51	1,040	20°	1,71	2,94
$5 1/2$	+0,30	+2,50	2,52	2,265	1,050	$20^\circ 40'$	1,75	2,54
6	0	-1,90	1,90	1,690	1,062	$25^\circ 50'$	0,96	1,82
$6 1/2$	+0,30	+1,75	1,772	1,55	1,077	$28^\circ 10'$	1,03	1,81
7	+0,25	-1,25	1,274	1,09	1,090	$30^\circ 10'$	1,16	1,04
$7 1/2$	+0,40	+1,20	1,265	1,13	1,115	33°	0,72	1,36
8	-0,10	-0,75	0,756	0,58	1,140	40°	0,145	0,726
				59,635			55,375	61,776

Die Summe von p_6 gibt uns an, ob die harmonische Analyse genügend weit getrieben wurde: Während im Diagramm ein Höchstdruck von $65,5 \text{ kg/cm}^2$ sich findet, erhält man hier unter Hinzuzählung des mittleren Druckes von $5,95 \text{ kg/cm}^2$ $65,58$ also um $0,08 \text{ kg/cm}^2$ zu viel. Der Unterschied ist also ganz unbedeutend. Für unsere Untersuchung ist er belanglos, da wir hier von dem Rechnungswert $59,635 \text{ kg/cm}^2$ ausgehen müssen, weil wir uns um Ordnungen, die mehr als das 16fache der Grundschwingung betragen, wegen ihrer geringen Größe nicht kümmern.

Wir denken uns jetzt einen Indikator verwendet, dessen Eigenfrequenz $22\,500/\text{min} = 375\text{ Hz}$, also das 15fache der Drehzahl betrage, wobei die Dämpfung gleich der halbperiodischen sei. Aus Abb. 346 können wir für die verschiedenen Verhältnisse der Erregungsfrequenz zur Eigenfrequenz den Verzerrungsfaktor „Verz“ und die zugehörige Phasenverschiebung φ entnehmen. Für die Kurbelstellung 6 Grad nach *O.T.* ergeben sich somit die in der Spalte p_{verz} angegebenen Werte. Man sieht, daß ihre Summe mit $55,375\text{ kg/cm}^2$ um 6,4% kleiner ist als die Summe der wahren Werte $p = 59,635$. Dies rührt von der Phasenverschiebung φ_{her} , die bei den höheren Harmonischen bereits beachtlich ist. Der Maximalwert aller Kräfte p_{verz} findet sich daher nicht bei dieser Kurbelstellung, sondern 6 Grad Kurbelwinkel, d. h. 3 Grad der Grundperiode später (Spalte $p_{\text{verz } 3}$), und zwar zu $61,776\text{ kg/cm}^2$. Man sieht, daß dieser Wert gegenüber dem wahren Wert $59,635\text{ kg/cm}^2$ nur um 1,8% zu hoch ist. Allerdings ist eine Phasenverschiebung des Höchstwertes von 6 Grad vorhanden, die aber in einem auf den Hub bezogenen Diagramm erst $2,8\%_{00}$ (bei $r/l = \infty$) ausmacht, also auch bei 100 mm Diagrammlänge mit 0,28 mm noch nicht stört.

Auf den mittleren indizierten Druck ist allerdings infolge der Phasenverschiebung der Einfluß größer; jedoch ist er nicht so groß, wie man vielleicht aus dem Abschnitt „Fehlerhafte Diagramme“ bzw. aus dem Unterabschnitt über die Phasengleichheit zwischen Arbeitskolben- und Indikatortrommelbewegung schließen könnte. Es hängt dies damit zusammen, daß auf die Wiedergabe des mittleren auf die Zeit bezogenen Druckes im Hubdruckdiagramm die Phasenverschiebung ohne Einfluß ist, ferner daß auf geradzahlige Vielfache der je Umdrehung einmal wechselnden Harmonischen ihr Einfluß ebenfalls verschwindet.

Zusammenfassend finden wir also trotz des ausgesucht ungünstigen Beispiels noch genügend brauchbare Ergebnisse. Es sei aber allerdings davor gewarnt, die Eigenfrequenz des Indikators für den vorliegenden Fall noch bedeutend niedriger zu wählen, die Fehler nehmen nämlich dann ziemlich rasch zu. Wir haben absichtlich die Eigenfrequenz gerade nur so tief gewählt, daß die Fehler eben noch nicht störend sind.

Aus vorstehender Untersuchung geht klar hervor, daß die Eigenfrequenz zwar wesentlich höher liegen muß als bei den früher üblichen mechanischen Indikatoren mit nur 4—6000/min, daß sie aber andererseits für den Normalgebrauch keineswegs wie z. B. bei dem genannten Sunbury-Indikator auf 40000 Hz zu rücken ist, sondern daß trotz der hohen Drehzahl $n = 1500$ bereits 375 Hz, d. h. der 107. Teil genügen. Nur wenn man Sonderaufgaben vor sich hat, z. B. Klopferscheinungen bei Motoren untersuchen will, sind höhere Indikatoreigenfrequenzen nötig.

Das bedeutet aber, daß eine Verbesserung der mechanischen Indikatoren keineswegs aussichtslos ist und daß man von optischen

Indikatoren meistens eine genügend genaue Aufzeichnung erwarten kann, da es bei ihnen noch wesentlich leichter möglich ist die Eigenfrequenz auf den genannten Wert und bedeutend darüber zu rücken. Optische oder mechanische Indikatoren sind aber billiger, und die letzteren sind wesentlich einfacher in der Handhabung als elektrische.

Wir müssen uns hier an den Hauptzweck des Indizierens erinnern: Bestimmung der indizierten Leistung, daneben des Höchstdruckes und der Diagrammform. Auch wenn man noch so sehr die Entwicklung der elektrischen Indikatoren begrüßt, so muß man sich doch darüber klar sein, daß es sich hier um Laboratoriumsmeßgeräte handelt, zu denen ein damit aufs beste vertrauter elektrotechnisch gründlich durchgebildeter Spezialingenieur gehört. Niemand würde es wagen, mit einem solchen Meßgerät auf einer weit vom Stammwerk entfernten Anlage einen Montageingenieur oder einen Maschinisten hantieren zu lassen. So wertvoll elektrische Indikatoren für rein wissenschaftliche Untersuchungen sind, so muß doch betont werden, daß die Motorenbenutzer zur Überwachung ihrer Maschinen Meßgeräte benötigen, die von jedem tüchtigen Motoreningenieur oder Maschinenmeister nach kurzer Anlernung bedient werden können und mit denen sich in erster Linie die indizierte Leistung bestimmen läßt. Wenn aber die Erbauer und Abnehmer von Motoren nicht mehr indizieren, so begeben sie sich dadurch eines für die Untersuchung und fortlaufende Überwachung der Maschinen sehr wichtigen Hilfsmittels. Es genügt nicht, wenn nur in einigen Forschungslaboratorien gründlich indiziert wird.

Damit sollen die wichtigen Vorzüge der elektrischen Indizierverfahren nicht in den Schatten gestellt werden. Neben der bereits erwähnten vielfach höheren Eigenfrequenz sei nochmals auf die räumliche Trennung von Geber und Anzeigergerät hingewiesen, die gestattet, die Messungen in einem ruhigen, erschütterungsfreien Raum aufzunehmen, ferner ist es ein Vorteil, daß mehrere Vorgänge z. B. das Arbeiten der Brennstoffeinspritzpumpe, das Erheben eines Nadelventils und der Druckverlauf im Zylinder auf denselben Streifen zeitlich richtig untereinander verzeichnet werden können.

XI. Das Indizieren von Kolbenmaschinen.

Wir beschränken uns in diesem Abschnitt auf das Lesen und Auswerten von Indikatordiagrammen, da die notwendigsten praktischen Gesichtspunkte, welche beim Indizieren zu beachten sind, bereits bei der Beschreibung der einzelnen Indikatorsysteme bzw. in dem Abschnitt „Fehlerhafte Diagramme“ erläutert wurden. Wir gehen also davon aus, daß die aufgenommenen Diagramme als genügend einwandfrei angesehen werden können und besprechen lediglich deren Deutung.

A. Diagramme an Dampfmaschinen.

Mit Rücksicht darauf, daß Kolbendampfmaschinen gegenüber Kraftmaschinen mit innerer Verbrennung an Bedeutung zurückgetreten sind, genügen einige Hinweise:

Zu früher Voraustritt ergibt Diagramme nach Abb. 359, zu später Voraustritt dagegen Diagramme von der Form der Abb. 360. Die

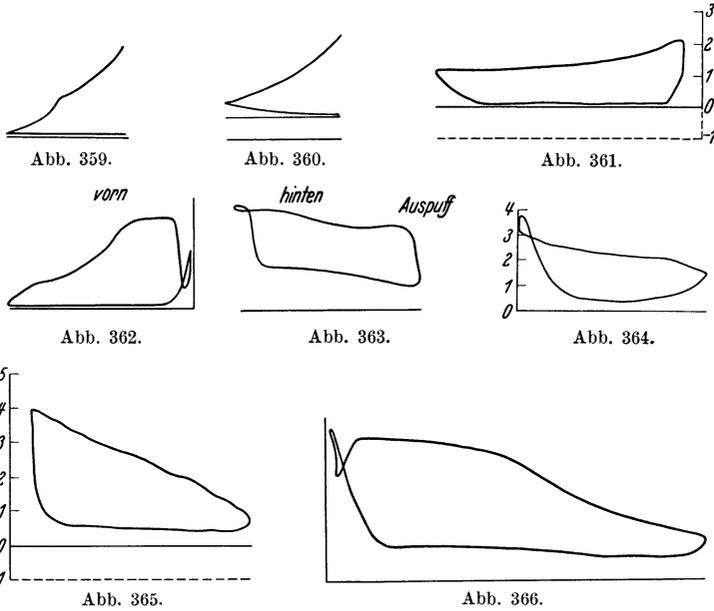


Abb. 359–366. Fehlerhafte Dampfmaschinendiagramme.

Abb. 361 und 362 einer Auspuffdampfmaschine weisen auf nicht richtig eingestellte Steuerung hin.

Bei Abb. 363 tritt der Dampf während des ganzen Hubes ein. Ursache: Fehler in der Steuerung.

Abb. 364 ergibt als Störung zu hohen Kompressionsdruck und ziemliche Drosselung des Eintrittsdampfes.

Abb. 365 zeigt ein Diagramm mit starker Drosselung des Eintrittsdampfes.

Bei Abb. 366 ist die Verdichtung zu hoch; außerdem tritt aber auch der Dampf offenkundig zu spät ein¹.

B. Diagramme an Verdichtern.

Diagramm Abb. 367 ist an einem langsam laufenden Kompressor mit selbsttätigen Saug- und Druckventilen aufgenommen, der in einer Stufe

¹ Die Diagramme Abb. 362–366 sind entnommen aus Haeder: Der Indikator und die Kraftanlage.

auf 4,7 atü verdichtete. Die Ansauglinie ist ziemlich stark unter der atmosphärischen Linie und deutet auf großen Widerstand (große Luftgeschwindigkeit) in den Saugventilen. Gleichzeitig fällt auf, daß sie auch am Ende des Saughubes nur wenig ansteigt, so daß auch der Liefergrad des Kompressors ein ziemlich schlechter ist. Ferner ist der Widerstand in den Druckventilen bzw. die Geschwindigkeit dortselbst sehr groß, was daran zu erkennen ist,

daß die höchste Spitze der Ausschublinie weit über den Gegendruck von 4,7 atü hinausragt und der Druck während des ganzen Ausschubens darüber liegt. Daß dies nicht eine reine Indikatorschwingung ist, erkennt man hauptsächlich daran, daß die Eigenfrequenz des Indikators viel höher war als die beim Ausschieben ersichtliche Druckschwankung; ferner müßte in diesem Falle die Ausschub-

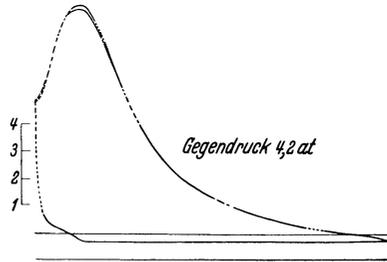


Abb. 367. Verdichterdiagramm mit ziemlich großen Widerständen in den Saug- und Druckventilen.

linie auch unter den Gegendruck sinken, nachdem sie zuvor darüber hinausgegangen ist und endlich müßte man bei der Expansion eine kräftige Indikatorschwingung beobachten; die im Diagramm an dieser Stelle sich findende ist aber nur schwach und deutet auf eine wesentlich höhere Eigenfrequenz, als man auf Grund der Ausschublinie erwarten würde. Die Expansionslinie ist natürlich unrichtig verzeichnet, was auf die sehr rasch erfolgende Druckentspannung zurückzuführen ist; man kann aus ihr infolgedessen nicht den Exponenten der Polytrope bei der Expansion ermitteln; für die Ermittlung des mittleren Druckes und der Verdichtungsarbeit ist dagegen das Diagramm gut zu gebrauchen, da hierbei die schwache Schwingung in der Expansionslinie nicht stört.

Diagramm Abb. 368 ist bei Verdichtung auf 6,9 atü bei $n=354$ /min ebenfalls bei selbsttätigen Saug- und Druckventilen aufgenommen.

Die nur sehr wenig unter der atmosphärischen Linie liegende Saugkurve deutet auf sehr geringe Widerstände bzw. Saugventilgeschwindigkeiten hin.

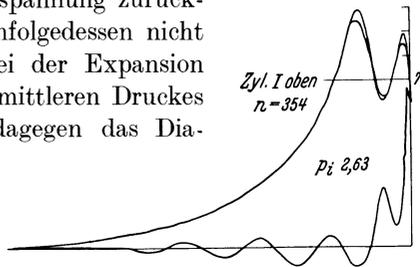


Abb. 368. Verdichterdiagramm eines rasch laufenden Kompressors mit kleinen Ventilwiderständen.

Am Beginn der Kompression ist hier der Unterdruck unmerklich klein geworden, so daß also hier der Liefergrad trotz der hohen Drehzahl recht hoch ist. Die Ausschublinie geht zwar über den Gegendruck deutlich hinaus, jedoch bedeutend weniger als bei dem zuvor gezeigten Diagramm: ihr Verlauf ist weniger durch den Widerstand in den Druck-

ventilen als durch die Indikatorschwingungen bedingt, von denen man bis O.T. $1\frac{1}{2}$ Perioden sieht. Insbesondere werden aber durch diese Indikatorschwingungen die Expansions- und der größere Teil der Sauglinie verzerrt.

C. Diagramme an Kraftmaschinen mit innerer Verbrennung, insbesondere Gasmaschinen und Dieselmotoren.

Wir besprechen zunächst solche Fälle, welche von falschem Einstellen oder fehlerhaftem Arbeiten der Einlaß- oder Auslaßorgane herrühren.

Öffnet das Auslaßventil zu spät, so erscheinen Diagramme nach Art von Abb. 369. Zu spätes Schließen des Einlaßorganes bedingt zu späten

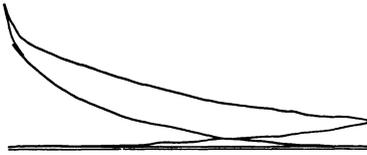


Abb. 369.

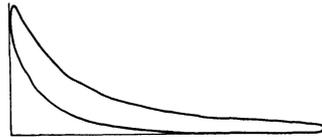


Abb. 370.

Abb. 369 und 370. Fehlerhafte Gasmaschinendiagramme.

Beginn der Kompression nach Abb. 370. Beide Erscheinungen können ihre Ursache in falscher Einstellung eines Antriebszahnrades für die Steuerwelle oder in falschem Aufkeilen der Steuernocken haben, bei Gasmaschinen kann ein Unterdruck am Beginn der Kompression von falscher Einstellung der Gasregulierklappe herrühren. Zu geringe Leistung kann von undicht gewordenen, zu stark abgenützten oder zerbrochenen Kolbenringen oder von mangelhaftem Schließen des Auspuffventiles — viel seltener des Einlaßventiles — herrühren. Hat man Indikator-diagramme von der neuen Maschine oder nach einer Überholung, bei der die genannten Teile in Ordnung befunden oder gebracht worden waren, und verläuft jetzt die Kompression viel langsamer, kommt man insbesondere nicht mehr auf gleichen Kompressionsenddruck, so deutet dies mit großer Wahrscheinlichkeit auf eine der genannten Ursachen. Voraussetzung ist aber, daß nicht in der Zwischenzeit der schädliche Raum des Motors geändert wurde, z. B. durch Einbau eines neuen Kolbens oder eines neuen Ventils, einer neuen Dichtung zwischen Zylinderdeckel und Büchse oder Entfernung einer Beilage an der Treibstange.

Für den Fall, daß Diagramme vom früheren einwandfreien Zustand nicht vorliegen, kann man bei Kenntnis des schädlichen Raumes die Verdichtung rechnerisch ermitteln und sie mit der aus dem Diagramm festgestellten vergleichen.

Naheliegender ist die Frage, wie groß der Unterdruck beim Ansaugen bzw. der Überdruck beim Ausschieben der Auspuffgase sein darf. Für

langsam laufende Maschinen wird man als normal etwa je 0,05 at ansehen, bei rasch laufenden Maschinen wird man etwa doppelt so hohe Werte und darüber zulassen.

Wichtig ist hierbei insbesondere, daß am Ende des Einsaugens kein allzugroßer Unterdruck mehr vorhanden ist, da durch den Unterdruck nicht nur negative Arbeit zu leisten ist, sondern auch weniger Luft in den Zylinder gelangt, so daß auch dadurch die Nutzleistung heruntergeht. Aus dem gleichen Grund soll auch die Ausschublinie am Ende des Auspuffs mit der atmosphärischen Linie möglichst zusammenfallen, da sonst übermäßig viel Abgasreste im Zylinder verbleiben. Manchmal kommt es vor, daß die Ausschublinie in diesem Augenblick unter die atmosphärische Linie sinkt: es ist dies eine Folge von Gasschwingungen in der Auspuffleitung und ein durchaus vorteilhafter Zustand, da dadurch mehr Frischluft in den Zylinder gelangt. Bei Maschinen mit einem großen Drehbereich ist aber zu prüfen, ob dies bei den Vollastdrehzahlen der Fall ist; die Gasschwingungen hängen nämlich stark von der Drehzahl ab. Ebenfalls eine nützliche aber viel seltenere Folge von Gasschwingungen — dieses Mal aber in der Saugleitung — ist es, wenn am Ende des Einsaugens Überdruck entsteht. Im allgemeinen ist mit solchen Schwingungen nur bei hohen Drehzahlen bzw. bei längeren Leitungen zu rechnen.

Die Kompressionslinie ergibt infolge der Wärmeaufnahme von den Wandungen her im ersten Drittel des Hubes eine über der Adiabate liegende Linie, während sie — wenigstens bei Dieselmotoren mit ihrer hohen Verdichtung — im letzten Drittel des Hubes unter die Adiabate sinkt und sich stark der Isotherme nähert. Dies hat nichts mit undichten Kolbenringen zu tun, sondern rührt daher, daß gegen Hubende die verdichtete Luft bereits heißer als die Wandungen geworden ist und nun ihrerseits Wärme an letztere abgibt.

Bezüglich der Zündung und Verbrennung ist zu unterscheiden zwischen 1. Gasmaschinen und Benzinmotoren, 2. Dieselmotoren mit Druckluft-einspritzung und 3. solchen mit direkter Einspritzung. Gemeinsam gilt für alle drei, daß bei keiner Belastungsart die an die Zündung sich anschließende Drucksteigerung erst folgen darf, wenn die Kompression bereits wieder in die Expansion übergegangen ist. Bei heißer Maschine bzw. voller Last kommt dies nicht leicht vor, viel eher aber bei kalter Maschine bzw. bei geringer Belastung, in welchem Falle infolge der kalten Wandungen die Temperatur am Ende der Verdichtung niedriger ist und infolgedessen der eingespritzte Brennstoff länger zum Entzünden und Verbrennen braucht.

Die Drucksteigerungsgeschwindigkeit während der Verbrennung ist eine wichtige Größe. Sie darf nicht zu hoch sein, weil sonst Klopferscheinungen auftreten, die sich dem Ohr durch rauhen Gang äußern

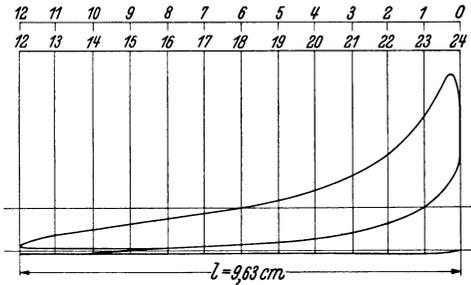


Abb. 371.

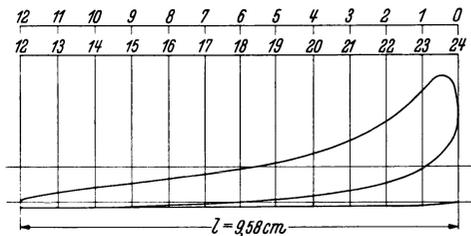


Abb. 372.

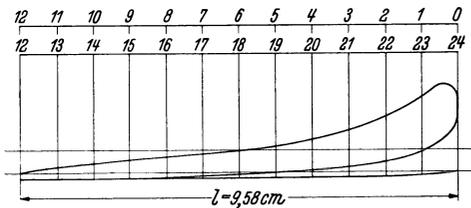


Abb. 373.

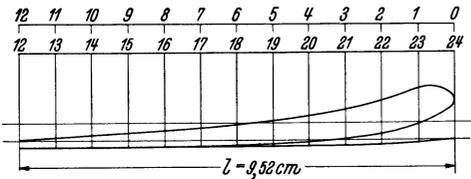


Abb. 374.

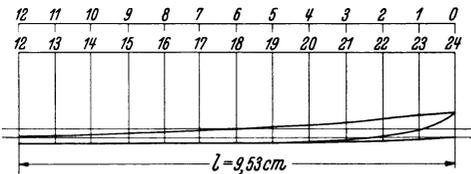


Abb. 375.

Abb. 371–375. Gute Großgasmaschinenindigramme bei verschiedenen Belastungen von Vollast bis Leerlauf und Drosselregulierung.

und übermäßige Beanspruchung der Triebwerksteile im Gefolge haben¹. Über etwa 12000 at/s Drucksteigerungsgeschwindigkeit sollte man nicht gehen, weil sonst das Klopfen beginnt, das bei einem doppelt so hohen Wert bereits stark ist. Diese Größe läßt sich natürlich nicht aus Hubdruckdiagrammen ermitteln; man braucht hierzu Zeitdiagramme von elektrischen oder optischen Indikatoren. Bei Benzinmotoren wird das Klopfen bekanntlich durch chemische die Zündwilligkeit verzögernde Zusätze zum Brennstoff bekämpft, bei Dieselmotoren ist es zwar ebenfalls in wesentlichem Maße von der Art des Brennstoffes, insbesondere seiner Zündwilligkeit, abhängig; daneben spielen aber auch andere Umstände wie Temperatur der verdichteten Luft, Art der Förderung der Brennstoffpumpe, Güte der Zerstäubung usw. eine wesentliche Rolle. Hierauf einzugehen würde zu weit führen. Die Hauptsache ist, daß der verwendete Brennstoff keinen zu großen „Zündverzug“ aufweist, d. h. daß der eingespritzte Brennstoff möglichst rasch entflammt, so daß nicht in der Zwischenzeit zu viel Brennstoff nachkommen und nunmehr eine plötzliche unregelmäßige Verbrennung geben kann. Die

¹ Siehe Geiger: Über Triebwerks- und Lagerbeanspruchungen rasch laufender Motoren. Werft-Reederei-Hafen 1937 S. 163–167.

Verbrennung soll in einem Zuge erfolgen, der Brennstoff soll zu diesem Zweck gleichmäßig und nicht absatzweise oder mit Nachtropfen in den Zylinder gelangen.

Freilich darf man nicht damit rechnen, daß die Verbrennung schon im ersten Drittel des Expansionshubes beendet ist, weil immer eine gewisse Zeit vergeht, bis jedes Brennstofftröpfchen genügenden Sauerstoff zur Verbrennung gefunden hat. Infolgedessen verbrennen auch noch während der ganzen Expansion beträchtliche Spuren von Brennstoff und es liegt trotz der nicht vernachlässigbaren Abkühlung durch die Wandungen die Expansionslinie über der Adiabaten, im letzten Drittel des Hubes naturgemäß weniger als im vorhergehenden. Druckschwankungen in der Expansionslinie sind nicht immer leicht zu deuten.

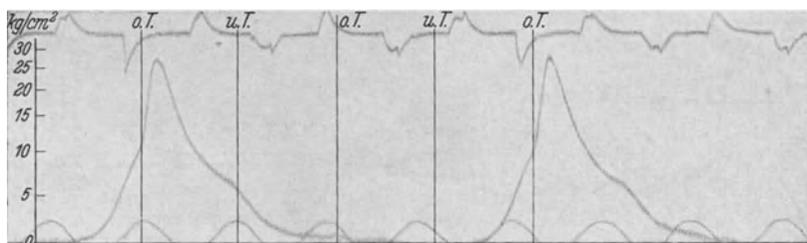


Abb. 376. Flugmotorenzeitdruckdiagramm mit Totpunkt- und Zeitmarken.

Soweit sie, wie es meistens der Fall ist, im Indikator ihre Ursache haben, sind sie im Abschnitt „Theorie des Indikators“ behandelt. Sie können aber auch gelegentlich auf tatsächlich vorhandene Gasdruckschwankungen oder auf unregelmäßige Verbrennung zurückzuführen sein.

Die Abb. 371 — 375 zeigen typische Diagramme einer langsam laufenden im Viertakt arbeitenden Großgasmaschine bei verschiedenen Belastungen von Vollast bis Leerlauf. Die Linie des mittleren Druckes ist in allen 5 Fällen gleich eingezeichnet. Infolge der angewendeten Drosselregulierung wird mit Verringerung der Last der Unterdruck beim Ansaugen immer größer und der Verdichtungsenddruck immer niedriger. Dadurch, daß das Gasgemisch immer ärmer wird, wird auch die Verbrennung immer langsamer, schleichender, so daß bei Leerlauf die Verbrennungsspitze vollständig verschwunden ist.

Demgegenüber stellt Abb. 376 ein Flugmotorenzeitdruckdiagramm dar. Auf die am linken Rand ersichtliche ungleichmäßige Einteilung der Druckskala sei besonders hingewiesen, desgleichen auf die Totpunktmarken. Die raschen Schwingungen im Diagramm sind Indikatorschwingungen, wobei allerdings noch nicht damit gesagt ist, ob es sich hierbei mehr um Schwingungen der Oszillographenschleife oder um Schwingungen des Gebers, der ja bei jedem elektrischen Indikator mit mechanischen Mitteln gebaut werden muß, handelt. Die Zündung

setzt hier unter Berücksichtigung der Verzögerung kurz vor O.T. ein, die Steilheit des Druckanstieges ist für einen Flugmotor als normal zu bezeichnen. Besonders sei noch auf den hohen Druck beim Öffnen des Auspuffventils hingewiesen, der mit ~ 7 atü sehr viel höher ist als

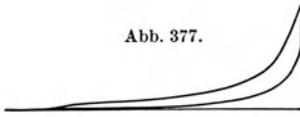


Abb. 377.

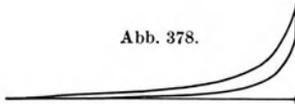


Abb. 378.

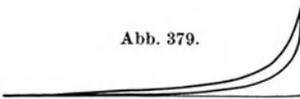


Abb. 379.

Abb. 377—379. Typische Diagramme eines kompressorlosen Zweitakt Dieselmotors mit Strahleinspritzung bei Vollast, Dreiviertellast und halber Last.

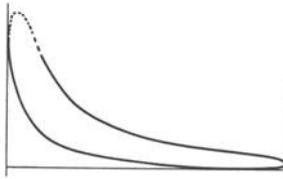


Abb. 380. Normaldiagramm eines Dieselveiertaktmotors mit Druckluft-Einspritzung des Brennstoffes.

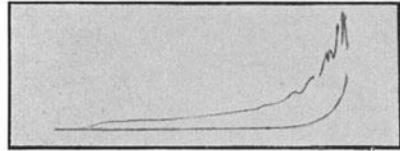


Abb. 381. Normales Hubdruckdiagramm eines rasch laufenden Zweitakt Dieselmotors.

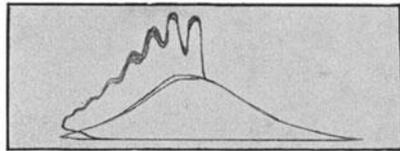


Abb. 382. Versetztes Hubdruckdiagramm des gleichen Motors.

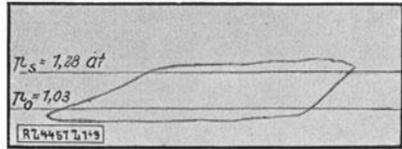


Abb. 383. Spülpumpendiagramm zum gleichen Motor.

derjenige des zuvor erwähnten Großgasmaschinendiagrammes mit $\sim 1,3$ atü bei normaler Belastung.

Die Abb. 377—379¹ stellen dagegen typische Diagramme eines kompressorlosen Zweitakt Dieselmotors mit Strahleinspritzung dar. Im Vergleich zu der früher bei Dieselmotoren mit Druckluft-Einspritzung angestrebten Gleichdruckverbrennung nach Abb. 380, die jetzt nur mehr selten angewendet wird, zeigen diese Diagramme eine Verbrennung bei konstantem Volumen, die allerdings nicht unwesentlich höhere Drücke mit sich bringt. Für die Spülung steht hier genügend Zeit zur Verfügung, was der verhältnismäßig frühzeitige Druckabfall in der Auspufflinie deutlich erkennen läßt.

Die Abb. 381—383¹ zeigen in natürlicher Größe ein normales, ein versetztes und ein Spülpumpendiagramm eines rasch laufenden Dieselveiertaktmotors mit luftloser Einspritzung. Im versetzten Diagramm

¹ Entnommen aus VDI-Heft Dieselmotoren V.

ist außerdem noch ein reines Verdichtungsdiagramm enthalten. Die in den Diagrammen sich findenden Schwingungen sind wieder Indikator-eigenschwingungen, die hier die Verbrennungs- und Expansionslinie so stark stören, daß sich zuverlässige Schlüsse insbesondere hinsichtlich der Steilheit des Druckanstieges nicht mehr ziehen lassen.

Demgegenüber zeigt Abb. 384 versetzte Diagramme eines Viertakt-dieselmotors, die besonders deutlich das Einsetzen der Zündung und auch die hier geringe Steilheit des Druckanstieges bei der Zündung erkennen lassen. Man erkennt weiter den Einfluß verschiedener Drehzahlen. Bei der höchsten Drehzahl ist der Druckanstieg am wenigsten steil,

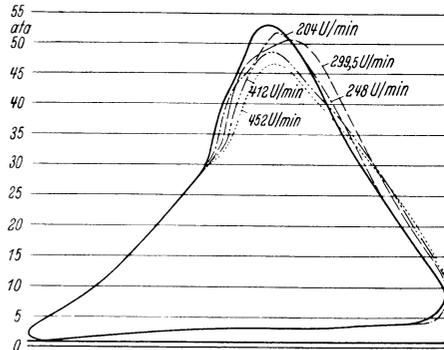


Abb. 384. Versetzte Diagramme eines Viertakt-dieselmotors mit offener Düse bei verschiedenen Drehzahlen.

Rechnet man die maßgebende Größe, nämlich die Zeit um, so kann man nicht mehr von einem bei höherer

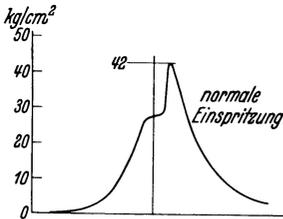


Abb. 385.

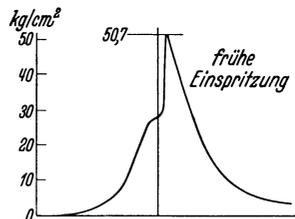


Abb. 386.

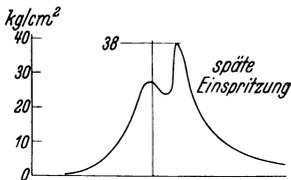


Abb. 387.

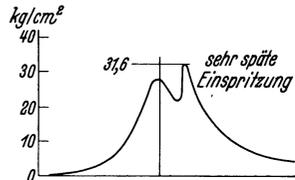


Abb. 388.

Abb. 385—388. Zeitdruckdiagramme eines kompressorlosen Dieselmotors mit Wirbelkammer, den Einfluß des Einspritzbeginns darstellend.

Drehzahl weniger steilem Druckanstieg sprechen. Dagegen wird mit zunehmender Drehzahl der Höchstdruck immer niedriger und die Expansionslinie höher, d. h. die Verbrennung setzt sich mehr in die Ausdehnungslinie fort, weil sie wie jede chemische Reaktion bei sonst gleichbleibenden Verhältnissen eine gewisse gleichbleibende Zeit benötigt.

Die Abb. 385—388 stellen Zeitdruckdiagramme — erhalten an einer kompressorlosen Viertakt-dieselmachine mit Wirbelkammer — dar und

lassen den Einfluß einer Veränderung des Einspritzbeginns bei sonst gleichen Verhältnissen (gleiche Drehzahl 1400/min und gleiches p_{im} von 5,95 kg/cm²) recht gut erkennen. Zu frühe Einspritzung gibt zu große

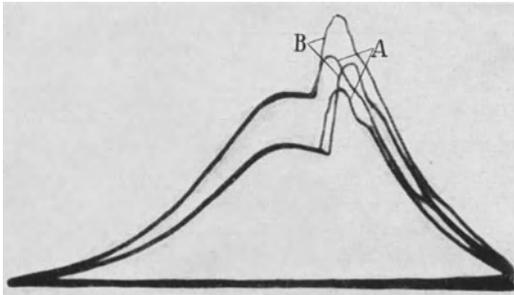


Abb. 389. Versetztes Hubdruckdiagramm eines Vorkammerdieselmotors, den Einfluß der Kühlwassertemperatur zeigend.

Drucksteigerung, zu späte zu großen Verlust an Diagrammfläche und damit an Wirkungsgrad.

Abb. 389 stellt ein versetztes Hubdruckdiagramm eines compressorlosen Vorkammer-Dieselmotors dar und läßt den Einfluß stark verschiedener Kühlwassertemperaturen auf die Diagrammform deutlich erkennen. Bei A war die Kühlwassertemperatur 95° C, bei B dagegen nur 18°. Infolgedessen ist bei A die Verdichtungs-

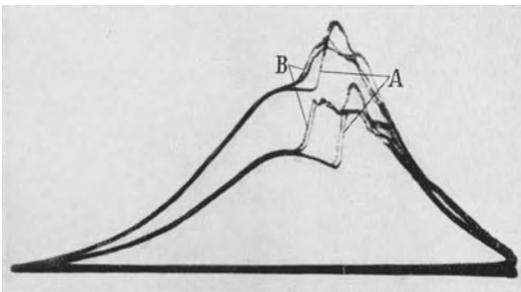


Abb. 390. Versetztes Hubdruckdiagramm eines Vorkammerdieselmotors, den Einfluß eines Zündbeschleunigers zeigend.

temperatur höher und damit der Zündverzug kleiner; außerdem ist aber der Verbrennungshöchstdruck niedriger und ebenso die Drucksteigerungsgeschwindigkeit. Bei B tritt infolgedessen Klopfen ein. Wie man sieht, ist das Ergebnis für zwei verschiedene Verdichtungen dasselbe. Es sei noch besonders darauf verwiesen, daß die Unterschiede in der

Neigung der Zünddrucklinie nicht sofort auffallen; so wie man aber die Neigung durch Anlegen von Tangenten graphisch ermittelt, findet man deutliche Unterschiede.

Abb. 390 läßt für den gleichen Motor wie Abb. 389 den Einfluß eines Zündbeschleunigers gut erkennen. Die Diagramme A sind ohne und die Diagramme B mit Beschleuniger als versetzte Hubdruckdiagramme aufgenommen.

Die Zündung setzt im Falle B wesentlich früher als im Falle A ein; der Zünddruck steigt bei B namentlich beim Diagramm mit höherer Verdichtung weniger steil an als bei A; außerdem ist der Höchstdruck niedriger.

In Abb. 390 sind 3 Zeitdruckdiagramme, aufgenommen an einem rasch laufenden Vorkammerdieselmotor, wiedergegeben.

Anmerkung: Die Abb. 385—390 sind entnommen aus Engineering 1934.

Zunächst verdient ein Vergleich der mit Kohledruckindikator und mit Piezoquarzindikator aufgenommenen Diagramme unsere Aufmerksamkeit. Obwohl es sich in beiden Fällen um elektrische Meßverfahren

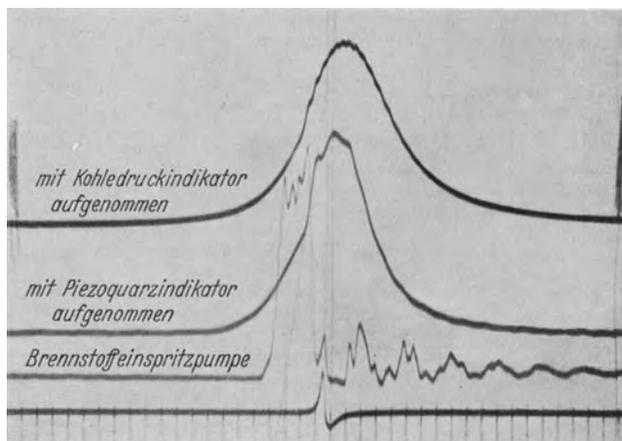


Abb. 391. Zeitdruckdiagramme, aufgenommen an einem rasch laufenden Viertakt-Vorkammerdieselmotor mit verschiedenen elektrischen Indikatoren.

handelt, sind doch die beiden gleichzeitig am gleichen Zylinder aufgenommenen Diagramme recht merklich voneinander verschieden. Im vorliegenden Falle ist das Piezoquarzdiagramm das genauere. Wir erwähnen aber den Unterschied hauptsächlich deshalb, um gerade bei elektrischen Indikatoren auf die unbedingte Notwendigkeit sorgfältiger Eichung vor und nach jeder Messung besonders hinzuweisen, wobei nicht nur die statischen Größen, sondern auch die dynamischen Verhältnisse zu prüfen sind.

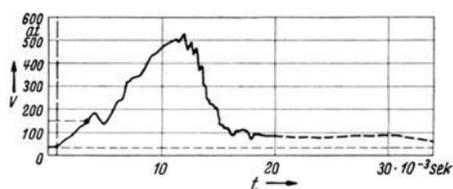


Abb. 392. Druckverlauf vor dem Einspritzventil einer kompressorlosen Dieselmachine bei Anwendung eines Nadelventils mit entlasteter Druckleitung.

Die Kurve für den Brennstoffeinspritzdruck zeigt anschließend an den eigentlichen Pumpvorgang ein ziemlich langes störendes Nachschwingen der Brennstoffsäule.

Zum Schlusse noch ein gutes Diagramm (Abb. 392) des Druckverlaufs in der Brennstoffleitung eines kompressorlosen Dieselmotors entnommen unmittelbar vor dem als Nadelventil ausgebildeten Einspritzorgan. Der Druck steigt genügend gleichmäßig an und fällt dann rasch aber stetig und ohne Nachschwingen ab.

Mit diesen Beispielen wollen wir diesen an sich zwar wichtigen, aber bereits mehr zum Motorenbau gehörenden Abschnitt beschließen.

Schrifttumsverzeichnis.

Allgemeine Literatur.

- Brand, I.: Technische Untersuchungsmethoden. Berlin: Julius Springer 1907.
- Brasch, H. D.: Mechanische Indikatoren. Arch. techn. Mess. J. 137-1 und J. 137-2.
- Buchetti: Nouveau Guide pour l'Essai des Machines a Vapeur. Paris 1888.
- De Juhasz, K. J.: The Engine Indicator, Its Design, Theory and Special Applications. (Der Indikator, sein Entwurf, Theorie und Sonderanwendungen.) Instruments Publishing Co. Pittsburgh, V.St.A. 1934. 243 S., etwa 250 Abb.
- Dickinson, H. W. and R. Jenkins: James Watt and the Steam Engine. Oxford: Clarendon Press 1927.
Ein Abschnitt, S. 228, behandelt die Entstehung des Watt-Southern Indikators; andere diesbezügliche Angaben sind in dem übrigen Text zerstreut.
- Gramberg, A.: Technische Messungen, 6. Aufl. Berlin: Julius Springer 1936. Der Abschnitt X, S. 380—410, behandelt die Theorie, Fehler und Ausführungsformen des Indikators.
- Haeder, H.: Der Indikator und die Kraftanlage, 5. Aufl. Berlin: Richard Carl Schmidt 1928.
Behandelt die verschiedenen, in der Praxis gebräuchlichen Indikatoren und deren praktische Anwendung. Die Untersuchung und Auswertung der Diagramme von Dampf- und Verbrennungskraftmaschinen sowie von Pumpen und Verdichtern wird ausführlich beschrieben. Auch andere bei der Untersuchung von Kraftanlagen gebräuchliche Meßgeräte werden behandelt.
- Labarthe, A.: Nouvelles Méthodes de Mesures Mécaniques. Ed. Blondel La Rougery. Paris 1936. 267 S. mit 283 Abb.
Beschreibt und abbildet eine große Anzahl Indikatoren für schnellaufende Maschinen; insbesondere wird der vom Verfasser herrührende lichtelektrische Indikator eingehend beschrieben.
- Meurer, S.: Indikatoren für schnellaufende Verbrennungsmotoren. Z. VDI Bd. 80 (1936) S. 1447—1454.
Eine kritische Darstellung der verschiedenen Typen von Indikatoren insbesondere derjenigen mit punktweiser Aufzeichnung und elektrischen Druckaufnahme.
- Rigg, A.: Practical Treatise on the Steam Engine, 1878 E. u. F. N. Spon Verlag.
Einige frühere Ausführungsformen des Indikators werden beschrieben.
- Rosenkranz, P. H.; Der Indikator und seine Anwendung. Weidemannsche Buchhandlung, 7. Aufl. Berlin 1914.
- Staus, A.: Der Indikator und seine Hilfseinrichtungen. Berlin: Verlag Julius Springer 1911.
- Steuding, H.: Messung mechanischer Schwingungen. Berlin: VDI-Verlag 1928.
Mit vorzüglichem Schrifttumnachweis. Der Abschnitt Indikatoren S. 357—399, mit 46 Bildern behandelt die Theorie und beschreibt eine große Anzahl Indikatoren.
- Wilke, W.: Der Indikator und das Indikatordiagramm. Leipzig: Otto Spamer 1916.
- Der Katalog des Science Museum, London über die dortige maschinentechnische Sammlung.
Enthält die Beschreibung von früheren Indikatorotypen. Mehrere von diesen wurden von H. W. Dickinson untersucht, deren Abmessungen, Federmaßstäbe, bewegliche Massen wurde von L. Pendred: The Problems of the Engine Indicator (Engng. 26. Jan. 1923 S. 119—121) einem kritischen Vergleich unterzogen.
- Abridgments of Specifications des Britischen Patentamtes, Class 106 (Registering, Measuring and Calculating).
Ist ein nützliches Nachschlagewerk sowohl für die älteren Indikatorotypen als auch für die heutigen Vorschläge.
- Die Patentschriften des Deutschen Reichspatentamtes, Klasse 42k, enthalten die über Indikatoren erteilten Patente.
- Ferner sei auf die Kataloge der folgenden Indikatorfirmen verwiesen:
Crosby Steam Gage and Valve Company, Boston, Mass. USA.
Trill Indicator Company, Corry, Pennsylvania, USA.

- K. J. De Juhasz, State College, Pennsylvania, USA.
 Dreyer, Rosenkranz und Droop, Hannover.
 Lehmann und Michels, Altona/Elbe.
 H. Maihak, A.-G., Hamburg.
 Dobbie McInnes and Clyde, Glasgow, Großbritannien.
 Budenberg Gage Company, Manchester, Großbritannien.

Federn.

- Für eine eingehendere Behandlung der Federfrage sei auf folgende Aufsätze hingewiesen:
- Die Berechnung zylindrischer Schraubenfedern. *Automob.-techn. Z.* 25. Dez. 1934 Heft 24. S. 624.
- Edgerton, C. T.: Fatigue Tests on Helical Springs. (Ermüdungsversuche an Schraubenfedern.) *Progr. Rep.* 1930 Nr. 1. *Amer. Soc. Mech. Eng. Com. Mech.* Sept.
- Göhner, O.: *Z. VDI* 1932 S. 269. Die Berechnung zylindrischer Schraubenfedern. *Z. VDI* Bd. 76 (1932) S. 269—272 mit 2 Abb.
- Pfeiffer, Karl: New Developments in Valve Springs for Gas Engines. (Neuere Fortschritte in Ventildedern für Gasmotoren.) Unveröffentlichter Vortrag vor der *Soc. Aut. Engineers. USA.*
- Sayre, M. F.: Elastic and Inelastic Behaviour in Spring Materials. (Elastisches und unelastisches Verhalten von Federstoffen.) *Rep. Spec. Ges. Comm. mech. Springs ASME* Rep. Nr. 7.
- Stresses and Deflections in Helical and Spiral Torsional Springs as Effected by Curvature. (Beanspruchung und Durchbiegung von auf Drehung beanspruchten Schrauben- und Spiralfedern und die Wirkung der Krümmung.) *ASME*. 1930.
- u. A. V. De Forest: New Spring Formulas and New Materials in Precision Spring Scale Design. (Neue Formel und Materialien für den Bau von Genauigkeitsfeder für Federwaagen.) *ASME Spec. Comm. mech. Springs* 1934.
- Sayre, M. F. u. A. V. DeForest: New Spring Formulas and New Materials for Precision Spring Scales. *Trans. A.S.M.E.* Juli 1936 S. 379—388 mit 7 Abb. und Schrifttumsnachweis.
- Thiersch, F.: Spannungsmessungen an Schraubenfedern. *Forschg. Bd. 5* (März-April 1934) S. 54—59 mit 21 Abb. und Schrifttumsnachweis.
- Spannungsmessungen an Schraubenfedern. *Forschg. Bd. 5* (März-April 1934) Nr. 2 S. 53—57.
 Diese Untersuchungen bestätigen die Richtigkeit der Theorie und Formeln von Göhner. Enthält mehrere Quellenangaben.
- Vogt, R. F.: Number of Active Coils in Helical Springs. (Zahl der wirksamen Windungen in Schraubenfeder.) *Rep. Amer. Soc. mech. Engr. Comm. mech. Springs* 1932.
- Stress and Deflection of Helical Springs. *Trans. A.S.M.E.* Aug. 1936 S. 467 bis 475 mit 12 Abb. und Schrifttumsnachweis.
- Wahl, A. M.: Helical Compression and Tension Springs. *J. Applied Mech., Trans. A.S.M.E.* März 1935 S. A-35 bis A-37 mit 5 Abb. und Schrifttumsnachweis.

Optische Indikatoren.

- Adcock, F.: The Indicating of Petrol Engines. (Indizierung von Benzinmotoren.) *Proc. Instn. mech. Engr.*
- Balfour, C. M.: Pressure Measurement in Ballistic Research. (Druckmessung in der Ballistik-Forschung.) *Engineering* Bd. 134 (26. Aug. 1932) S. 231—232.
 Beschreibt das Federmanometer von Balfour (mit Rohrfeder für den Druck).

- Berg: Druckschreiber für schnelle Druckschwankungen. Z. VDI 1934 S. 1295 bis 1296.
Beschreibt den optischen Indikator von Berg, insbesondere für die Aufzeichnung der Druckschwankungen in der Druckkilleitung von kompressorlosen Dieselmotoren.
- Boerlage, G. D. and J. J. Broeze. The Ignition Quality of Fuels in Compression-Ignition Engines. (Die Zündigenschaften der Brennstoffe in kompressorlosen Dieselmotoren.) Engineering 13. Nov., 4. Dez. u. 18. Dez. 1931.
- Bouton, C. M., H. K. Griffin and P. L. Golden: Accuracy of Manometry of Explosions. (Genauigkeit der Druckmessung von Explosionen.) Bur. Mines Techn. Pap. 1931 Nr. 496.
- Burstall: The Burstall Optical Indicator. Engineering Bd. 115 (26. Jan. 1923).
- Collins, W. G.: Micro-Indicator for High-Speed Engines. (Mikroindikator für schnelllaufende Motoren.) Engineering Bd. 115 (26. Jan. 1923) S. 123—125.
- Coward, H. F. and M. D. Hersey: Accuracy of Manometry of Explosions: General Survey of the Problem and Comparison of Piston Type with Diaphragm Type Manometers. (Die Genauigkeit der Messung der Explosionsdrücke. Allgemeine Übersicht des Problems und ein Vergleich zwischen Manometern mit Kolben und mit Membran.) U. S. Bur. Mines techn. Pap. 1933. Unveröffentlichte Handschrift.
Kurze kritische Übersicht über Manometer von verschiedenem Entwurf, und deren Eignung für die Messung von Explosionsdrücken (Kohlenstaubexplosionen in Bergwerken). Bestimmung des bestgeeigneten Apparates.
- Geiger, Dr. J.: Messung der Luftbewegung im Zylinderinnern von Dieselmotoren. Mitt. Forsch.-Anst. Gutehoffnungshütte-Konz. Bd. 4 Heft 9 (Nov. 1936) S. 213—220 m. 19 Bildern.
Beschreibt einen optischen Indikator, welcher die auf im Zylinderinnern angeordnete Flügel wirkenden Kräfte photographisch aufzeichnet. Die Versuchsergebnisse an einer Dieselmotore mit 240 mm \varnothing und bis zu 375 U/min werden angegeben und besprochen.
- Geiger, Dr. J.: Die Ermittlung des Brennstoffstoßdruckes bei Dieselmotoren und seine Verteilung. Mitt. Forsch.-Anst. Gutehoffnungshütte-Konz. Bd. 4 Heft 10 (Dez. 1936) S. 239—246.
An einer laufenden Maschine wird der Brennstoffstoßdruck in Stickstoffatmosphäre und auch in normaler Luft mit Zündung durch kleine Stauscheiben ermittelt. Eine ähnliche optische Anordnung, wie oben angegeben, wird angewendet.
- Gliwitszky, W.: Messung des Druckverlaufes bei Aluminiumstaub-Explosionen. Z. VDI Bd. 80 (30. Mai 1936) Nr. 22 S. 687—692.
Beschreibt einen optischen Kolbenindikator. — Desgleichen eine in die Bombenwand eingelassene Druckmeßdose zum Messen des Höchstdruckes. Ein Bleiplättchen von 0,3 bis 1,0 mm Dicke stellt einen luftdichten Abschluß her und wird beim Auftreffen des Druckstoßes eingewölbt. Der der Einwölbung entsprechende Druck wird aus der Eichkurve abgelesen.
- Gramberg: Techn. Messungen, 5. Aufl. Verlag Springer, Berlin.
- Huguenard, E., A. Magnan et A. Planiol: Etudes sur les Manographes et les Indicateurs de Pression. Bull. techn. No. 46 (Febr. 1928) Service techn. ind. Aéronaut. Frankreich.
Nach einer geschichtlichen Übersicht über Indikatoren für schnelllaufende Motoren werden einige dieser Geräte theoretisch und durch Versuch untersucht und deren Fehler besprochen. Der Bourdonrohr-Spiegelindikator der Verfasser wird eingehend beschrieben, abgebildet und die damit gewonnenen Versuchsergebnisse beschrieben.
- Kirner, J.: Optischer Interferenzindikator. Forsch.-Arb. VDI 1910 Nr. 88.
- Lewis, Bernhard and Günther von Elbe: The Recording of Pressure and Time in Gas Explosions. (Die Aufzeichnung von Druck und Zeit bei Gasexplosionen.) J. Amer. chem. Soc. Bd. 55 (Febr. 1933) S. 504—507.
Beschreibt einen verbesserten Membranindikator, dessen Empfindlichkeit und Freiheit von Hysterese.
- Mader, O.: Der Mikroindikator für die Untersuchung schnelllaufender Maschinen. Dinglers polytechn. J. 1912 S. 327, 420, 433. (Auszugsweise in Steuding, Messung mechanischer Schwingungen.)
Beschreibt den Mikroindikator nach Mader.

- Naegel, A.: Zündgeschwindigkeit explosibler Gasgemische. Z. VDI Bd. 52 (1908) S. 244—253 m. 14 Abb.
Beschreibt einen optischen Indikator mit Stahlmeßmembran und Stangenübertragung auf das Spiegelsystem. Die Membran schließt die Explosionsbombe ab, so daß kein schädlicher Raum entsteht.
- Nahmer, Fritz von der: Untersuchungen über den Verbrennungsvorgang im Vorkammer-Dieselmotor. Diss. Techn. Hochsch. München 1932. 29 Seiten, 29 Abb. Handschrift.
Zu diesen Versuchen wurde ein in einen optischen Indikator umgewandelter Stabfederindikator von Maihak benutzt, bei dem am Ende der Stabfeder ein kleiner Spiegel befestigt wurde, welcher seine Winkellage bei den Ausschlägen der Feder ändert. Dieser Indikator wurde auch von Kallhardt beschrieben, der mit dem Gerät Versuche ausgeführt hat.
- Nakanishi, F.: Optical Indicator. J. Soc. mech. Engr. Japan. 1930 S. 86.
Besprochen von J. Kluge. Forschung. Febr. 1931.
- Nakanishi, F., Itó and Kitamura: A. New High Speed Indicator for Internal Combustion Engines. Ein neuer Schnellaufindikator für Verbrennungsmotoren.) Rep. Aeron. Res. Inst. Sept. 1932 Nr. 87 S. 161—177.
Beschreibt die neuere Entwicklung des Nakanishi-Indikators.
- Nakanishi, Fujio, Masaharu Itó and Kikuo Kitamura: On the Effect of Pipe Bores on the Cut-off of Fuel Spray in Injection Systems with Open Nozzles. (Wirkung der Leitungsbohrung am Abschluß der Einspritzung in Einspritzsystemen mit offener Düse.) Rep. Nr. 108. Aeron. Res. Inst. Japan, Juni 1934.
Beschreibt den optischen Indikator von Nakanishi, geeignet für hohe Drücke.
- Nusselt, W.: Der Wärmeübergang in der Gasmachine. Z. VDI Bd. 58 (1914) S. 361—367.
Beschreibt einen optischen Indikator mit gewellter Stahlmembran, die in zwei Stahlringe eingespannt und in der unteren Kugelhälfte der Explosionsbombe dicht befestigt ist.
- Pabst, W.: Aufzeichnung schneller Schwingungen nach dem Ritzverfahren. Z. VDI Bd. 73 (1929) S. 1629—1633.
- Pendred, L.: High Speed Engine Indicators. (Schnellaufindikatoren.) Engineering Bd. 115 (26. Jan. 1923) S. 119—121.
- Perry, J.: The Steam Engine and Gas and Oil Engines. London: Macmillan 1904.
Beschreibt (S. 117) den optischen Indikator von Perry mit Membran.
- Schmitz, O. H.: Über Druckmessungen an hydraulischen Geschützbremsen. Ein Beitrag zur Theorie der Indikatoren. Diss. Techn. Hochsch. Braunschweig 1910. (Auszugsweise in Steding, Messung mechanischer Schwingungen.)
Beschreibt den Stimmgabelindikator für hohe, rasch auftretende Drücke.
- Stern, W. J. and H. Moss: An Improved Model of Optical Indicator. (Ein verbesserter optischer Indikator.) Proc. Instn. mech. Engr.
- Stern, W. J. and H. Moss: Notes on Engine Indicators. (Bemerkungen über Indikatoren.) Proc. Instn. mech. Engr.
- Steding: Messung mech. Schwingungen. 1928 VDI-Verlag.
- Tozier, R. E.: The N.A.C.A. Optical Engine Indicator. (Der optische Indikator vom nationalen Beratungskomitee für Luftfahrt.) Techn. Note Nr. 634 der Nat. Adv. Comm. of Aeron. Washington, D. C. Jan. 1938. 7 S., mit 6 Abb.
Beschreibt einen optischen Membranindikator, welcher für die Untersuchung von Explosionsbomben, Versuchsklopfaschinen, und von Brennstoffpumpen angewendet wurde. Membran aus Wolframstrahl, etwa 35 mm \varnothing , 1,5 mm dick, Eigenschwingungszahl des Spiegelsystems samt Membran etwa 9000 Hz. Die Druckschwankungen werden auf einer rotierenden Filmtrommel als Zeitkurven aufgenommen. Für die Untersuchungen an Bomben wurden eine Linse und ein Spiegel aus geschmolzenem Quarz angewendet, der Spiegel wurde mit Platinüberzug versehen.
- The Midgley Indicator. Engineer 2. März 1923 S. 236.
- Katalog. P. J. Kipp und Zonen, Delft, Holland. Optischer Indikator der Proefstation „Delft“ d. Bataafsche Petroleum Maatschappij, entwickelt von Boerlage, Broeze und v. Dijk.
- Katalog der Fa. Dobbie McInnes & Clyde, Glasgow.
- Katalog der Fa. Sociéte Genevoise d'Instruments de Physique, Genf, Schweiz.

- Mitt. d. Hydraulischen Instituts der Techn. Hochschule München. Herausgegeben vom Institutsvorstand Prof. Dr.-Ing. D. Thoma. Heft 6. München: R. Oldenbourg 1933; enthält die folgenden Aufsätze:
 Volkhardt, Paul: Ein neuer Druckschreiber für Wassermessungen nach dem Gibson-Verfahren.
 Deckel, Hans: Druckschreiber und Versuche zur Bestimmung von Wassermengen nach dem Gibson-Verfahren.
 Prof. Dr.-Ing. D. Thoma: Die Auswertung der Druckdiagramme von Gibson-Wassermessungen beim Auftreten von Nachschwingungen in der Rohrleitung. Die drei obigen Abhandlungen behandeln den sehr genauen und empfindlichen optischen Indikator für Wasserdruckmessung, entworfen vom Hydraulischen Institut München.
 Wasserdruckindikator für Messung mit der Gibson-Methode, der Thoma-Volkhardt-Deckel-Indikator. (Auszug in Z. VDI 10. Febr. 1934.)
 Dr.-Ing. Hans Rumpff: Optischer Indikator für hohe Drücke. Katalog und Anweisung.

Elektrische Indikatoren.

Allgemeine Artikel über elektrische Indikatoren.

- Electric Methods of Measuring Applied to Diesel Engine Design. (Anwendung elektrischer Meßverfahren zum Entwurf von Dieselmotoren.) Sulzer Technical Review, 1937, Nr. 4. S. 7—12 mit 12 Abb.
 Beschreibt die Anwendung von Induktionspule und Quarzelement für die Messung der Durchbiegung des Zylinderkopfes, der Querbewegung des Kolbens, des Druckes hinter den Kolbenringen, der Längsbewegung der Kolbenringe und der Änderung des Spüldruckes. Ein Sechselement Siemens-Oszillograph wurde angewendet.
 Hathaway, C. M. and E. S. Lee: The Electric Gage. (Das elektrische Mikrometer.) Mechanical Engineering Bd. 59 Nr. 9 (Sept. 1937) S. 653—658 mit 13 Abb.
 Beschreibt die verschiedenen, für mikrometrische Zwecke in Betracht kommenden Möglichkeiten, wie Kapazität, Brücke, Sättigung und Wirbelstromänderungen. Obwohl hauptsächlich die für Dickenbestimmung und Dehnungsmessung in Betracht kommenden Verfahren behandelt werden, ist der Aufsatz jedoch auch für die Druckmessung von Interesse.
 Janovsky, W.: Magnetoelektrische Messung. Arch. techn. Messen. V. 132-6.
 Kaufmann, W.: Druckmessung an Hochleistungsschaltern. Arch. techn. Messen. V. 133-2.
 Keinath, G.: Elektrische Druckmessung durch Änderung der Induktivität. Arch. techn. Messen. V. 132-4.
 — Druckmessung mit der Kondensator-Meßdose. Arch. techn. Messen. V. 132-5.
 Schnauffer, Kurt: Messung oszillierender Drücke nach der Kondensatormethode. Arch. techn. Messen. V. 134-2.

Kathodenstrahl-Oszillographen.

- AEG-Elektronenstrahl Osz.J. 834-21.
 Knoll, Max: Arch. techn. Messen. J. 834-5.
 — u. W. Kleen: Arch. techn. Messen. J. 834-15, 834-16.
 Steenbeck, M.: Arch. techn. Messen. J. 834-2.

Trägheitsbehaftete Oszillographen.

- Eichler, F.: Arch. techn. Messen. J. 035-1, 035-2.
 Philipoff, W. v.: Der Piezoelektrische Oszillograph. Arch. techn. Messen. J. 035-4.
 Siemens u. Halske A.-G.: Arch. techn. Messen. J. 035-3, 035-5.
 Zölllich, H.: Spulen-Vibrationsgalvanometer. Arch. techn. Messen. J. 852-3.

Lineare Zeit-Ablenkung bei Kathodenstrahl-Oszillographen.

- Fuchs, W. u. H. Kroemer: Eine einfache Schaltung mit zwangsläufiger Kopplung von Strahlspernung und Zeitablenkung beim Kathodenstrahloszillographen. Arch. Elektrotechn. Bd. 27 (1933) Nr. 2, S. 125.
- Hudec, E.: Zeitproportionale synchron laufende Zeitablenkungen für die Braunsche Röhre. Z. Hochfrequenztechn. Bd. 34 (1929) S. 207.
- Kluge, J. u. H. E. Linckh: Druckmessung mit piezoelektrischen Kristallen. Arch. techn. Messen. V. 132-3, Sept. 1932.
- Samuel, A. L.: A method for obtaining a linear time-axis for a Cathode-Ray Oszillograph. (Ein Verfahren für lineare Zeitablenkung für Kathodenstrahl-Oszillograph.) Rev. Sci. instrum. Bd. 2 (1931) S. 532.

Mehrfach-Kathodenstrahl-Oszillographen.

- Alberti, E.: Braunsche Kathodenstrahlröhren und ihre Anwendung. Berlin: Julius Springer 1932.
- Boeckels, H. u. H. Dicks: Ein neuer Mehrfach-Kathodenstrahl-Oszillograph. Arch. Elektrotechn. Bd. 27 (1933) Nr. 2 S. 134.
- Knoll, M.: Mehrfach-Kathodenstrahl-Oszillograph. Elektrotechn. Z. Bd. 53 (1932) S. 1101.
- Ardenne, M. von: Die Kathodenstrahlröhren. Berlin: Julius Springer 1934.
- Batcher, R. R.: The Cathode-ray Oscillograph and Its Applications. (Der Kathodenstrahl-Oszillograph und seine Anwendungen.) Instruments Pittsb. Pa. Juli, Aug., Sept., Okt., Nov., Dez. 1935, Jan., Febr. 1936.
Eine ausführliche Behandlung des Kathodenstrahl-Oszillographen, seine Geschichte, Theorie, Fehler, verschiedene Ausführungsformen, Anwendungsmöglichkeiten, mit ausgedehntem Literaturverzeichnis.
- Borden, P. A. u. M. F. Béhar: Oscillography. Instruments, Pittsb. Pa. (Nov. 1936) Nr. 11 S. 313—319.
Beschreibt und bildet alle Arten und verschiedene Ausführungsformen des Oszillographen ab, unter anderen auch das Gerät mit Heizdraht und den elektrostatischen Oszillographen.
- Borries, B. v.: Der Kathodenstrahl-Oszillograph, Entwicklungsstand, Anwendung und Vergleich. VDI Bd. 80 (1936) Nr. 37, 12. Sept. 1936 S. 1135—1141 mit 18 Bildern.
Eine gründliche Darstellung der Konstruktion und Anwendungsmöglichkeiten.
- Glimmlampe als optischer Anzeiger. VDI I. Sept. 1934. S. 1042. (Bilder: Lampe und Diagramm, Bedeckung der Kathode gegen Glimmlampenstrom.)
Die Osramwerke haben eine Glimmlampe mit stabförmiger Kathode entwickelt und unter dem Namen „Indikator-Glimmlampe“ in Handel gebracht, zwecks Anzeige von Strom- und Spannungsänderungen. (Bei einer Glimmlampe bedeckt das Glimmlicht nur einen Teil der Kathode, wenn die Lampe mit geringer Stromstärke betrieben wird. Steigert man die Stromstärke, so wächst bei geeigneter Ausbildung der Elektroden die Bedeckung in gleichem Verhältnis wie die Stromstärke, bis das Glimmlicht die Kathode vollständig überzogen hat.)
- Juhasz, K. J. de: Use of Electrical Indicators in Automotive Tests. (Anwendung elektrischer Indikatoren bei Automobilmotoren.) Automot. Ind. Bd. 60 (27. April 1929) S. 662—664.
- Keinath: Elektrische Druckmessung. Arch. techn. Messen. Bd. 2 Lief. 15.
- MacGregor, Morris u. Henley: Cathode-Ray Oscillography. Instruments Publishing Co. Pittsburgh.
Viele Typen von handelsüblichen Oszillographen werden beschrieben und abgebildet. Die wichtigeren Anwendungen werden ausführlich beschrieben.
- Phippoff, W. v.: Der piezoelektrische Oszillograph. Arch. techn. Messen. J. 035-4, Dez. 1932.
Das Gerät arbeitet nach dem Grundsatz des „reziproken piezoelektrischen Effektes“, demgemäß piezoelektrische Kristalle ihre Abmessung in einem geeignet erzeugten elektrischen Felde ändern. Da die Längenänderung des Kristalles sehr gering (in der Größenordnung von 1μ) ist, muß eine 30000 bis 50000fache Vergrößerung angewendet werden. Das Gerät wird ausführlich beschrieben und abgebildet mit ausführlicher Literaturangabe.

- Kataloge der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft Berlin: Über Kathodenstrahl-Oszillographen.
- Katalog der Radio Corporation of America, Camden, N. J., V.St.A.: Über Kathodenstrahl-Oszillographen.
- Katalog der Sundt Engineering Company, 4238 Lincoln Ave. Chicago, Ill., USA. Beschreibt und bildet den „Neobeam Oszilloskop“ ab, bestehend aus einer Langelektrode-Neonlampe für die Anzeige der Ordinate und einem Drehspiegel für die Abszissenanzeige.

Widerstands-Indikatoren.

- Dodds, E. M.: Development and Application of the Cathode-Ray Engine Indicator. (Entwicklung und Anwendung des Kathodenstrahlindikators.) J. Soc. automot. Engr. Dez. 1936 S. 487—495.
Der Kohlensäureindikator des Verfassers wird beschrieben und abgebildet mit ausgedehnten Versuchsergebnissen.
- Glamann, W.: Druckmessung mit Halbleitern. Physikalische Grundlagen. Arch. techn. Messen. V 132-12. März 1936. 4 S. 7 Abb.
- Glamann, W. u. H. Triebnigg: Trägheitsloser elektrischer Indikator mit Halbleiter-Druckelement. Forschg. Bd. 4 (Mai/Juni 1933) Nr. 3 S. 137—146.
- — Indikatoren und Druckmesser nach dem Prinzip der Druckmessung mit Halbleitern. Arch. techn. Messen. J. 137-4. Juli 1936. 6 S. 24 Abb.
- Martin, E. J. and D. F. Caris: A New Electrical Engine Indicator. (Ein neuer elektrischer Indikator. J. Soc. automot. Engr. Bd. 23 (Juli 1928) S. 87—97.
- McCollum, B. and O. S. Peters: A New Electrical Telemeter. (Neuer elektrischer Fernmesser.) Bur. Stand. Techn. Pap. Nr. 247.
- Neuere Entwicklungen in der Brennstoffeinspritzung in Dieselmotoren. Sulzer Techn. Nachr. 1929 Nr. 3 S. 1—11 mit 18 Abb.
Beschreibt eine Anordnung für die oszillographische Aufzeichnung von Drücken in der Brennstoffleitung. Zwei gekreuzte Bleistiftstücke dienen als Druckmeßelement.
- The Metrovick-Dodds Indicator. Automob. Engr. Sep. 1935.
- Triebnigg, H.: Untersuchungen an Pumpen und Brennstoffventilen für Dieselmotoren. Dieselmotoren V. des VDI, S. 94—100. Berlin 1932.
Beschreibt den Indikator von Glamann mit Graphitplättchen und Membran.

Piezoelektrische Indikatoren.

- Amelkin, O. S.: Piezo-elektrischer Indikator für Verbrennungskraftmaschinen. „Diselelektroenie“ „NIDI“ Moskva. März 1936 Nr. 3 S. 7—12 mit 16 Abb.
Messung piezoelektrischer Ladungen. Verfahren mittels einer umgekehrten Triodröhre. Für die Aufladung und Entladung wichtige Einflüsse. Entwurf des Voltmeters. Entwurf von Gebern, welche im wesentlichen mit demjenigen von Kluge und Linckh übereinstimmen. Prüfung und Eichung des Gerätes.
- Blaum, E.: Vorgänge in Einspritzsystemen schnellaufender Dieselmotoren. Forschg. Bd. 7 (März/April 1936) S. 93—103 mit 15 Abb.
Für Untersuchungen an den Druckschwankungen in der Rohrleitung einer Brennstoffpumpe wird eine Quarzmeßkammer angewendet.
- Crow, A. D. and W. E. Grimshaw: On the Equation of State of Propellant Gases. (Zustandsgleichung von Sprengmittelgasen.) Philos. Trans. Roy. Soc., Lond. A Bd. 230 (1930) S. 39—73 mit 8 Abb.
Beschreibt das Federmanometer mit Rohrfeder von C. M. Balfour, den piezoelektrischen Indikator von Eden und die Prüfwaage für hohe Drücke.
- Erwin, C. T.: Piezo-electric Gage for Recording the Instantaneous Pressures in Shotguns. (Piezoelektrischer Indikator für die Aufzeichnung der Drücke in Schußwaffen.) J. Franklin Inst. Bd. 213 (Mai 1932) S. 563—514.
Beschreibt einen Quarzsäulendruckmesser aus neun Quarzscheiben und die damit gewonnenen Diagramme.

- Erwin Adam-Stoffel: Ein elektrischer Indikator für raschlaufende Fahrzeugdieselmotoren. A.T.Z. Jg. 41 Heft 8 (Apr. 25. 1938) S. 219—223; 13 Abb. Der in der Versuchsanstalt der Fa. Saurer (Arbon, Schweiz) entwickelte piezoelektrische Indikator wird beschrieben, abgebildet und mit Versuchsergebnissen erläutert. Die in der T.H. Dresden von Nägel und Meurer entwickelte Quarzelement-Anordnung (mit Hülseinkapselung der Quarzplatten) wird angewendet. Eine Membran trennt das Druckmeßelement vom Verbrennungsraum. Das Anliegen der Membrane auf dem Ende des Druckmeßelementes wird dadurch gesichert, daß das Kühlwasser unter Unterdruck gesetzt wird. Elektrometerleitung mit hoher Isolation und kleiner Kapazität. Eichgerät mit Gewichtsbelastung. Abszissen-Ablenkung mittels eines elektrischen Kipp-Schaltergerätes oder es wird nur Ordinaten-Ablenkung und eine sich drehende Filmtrommel angewendet.
- Falkenhagen, H.: Handbuch der Physik. Pyro- und Piezoelektrizität. Berlin: Julius Springer 1928.
- Gechter, O. F. and H. R. Laird: Improved Device for Recording Instantaneous Tool Pressures in Machinability Studies. (Ein verbessertes Gerät für die Aufzeichnung der Augenblickswerte der Werkzeugkräfte bei Bearbeitbarkeitsuntersuchungen.) Trans. Amer. Soc. mech. Engr. Nov. 1931. 10 S. m. 9 Bildern. Die Werkzeugkräfte werden in drei Richtungen durch je eine Quarzkammer gemessen. Zeichnungen, Photographien, Schaltbild, Eichdiagramme, Versuchsergebnisse; Grenzen der Verwendbarkeit und Fehlermöglichkeiten der Apparatur werden ausführlich beschrieben.
- Holfelder, O.: Zündung und Flammenbildung bei der Diesel-Brennstoffeinspritzung. Forschsh. 374 des VDI. Sept. 1935. 25 S., 27 Abb. Beschreibt einen Quarzdruck-Hülseindikator, der an einer Verbrennungsbombe angewandt ist. Durch eine Dehnung des Gehäuses kann keine Änderung der Vorspannung eintreten. Die elastische Hülse ändert bei Temperaturdehnungen infolge ihrer flachen Federcharakteristik die Vorspannung nur in verschwindendem Maße, zumal noch ein Werkstoffausgleich angewandt wurde. Die eigentliche Gasdichtung übernimmt eine ganz dünne, nicht mehr kräfteausübende Kupfermembran. Dieser Indikator zeigte sich auch für einen Betrieb bei hohen Temperaturen geeignet.
- Jungnickel, H.: Piezo-elektrischer Indikator für schnellaufende Verbrennungsmotoren. Z. VDI Bd. 80 (18. Jan. 1936) Nr. 3 S. 80—81 m. 4 Abb. Beschreibt den Zeiss-Ikon-Piezoindikator.
- Piezo-elektrischer Indikator für schnellaufende Verbrennungsmotoren (Zeiss-Ikon). Z. VDI Bd. 80 (1936) S. 80 m 3 Abb. Kurze Beschreibung des Quarzindikators von Zeiss-Ikon.
- Kallhardt, Dr.-Ing. Emil: Indizieren schnellaufender Verbrennungskraftmaschinen. Forschsh. 376 des VDI 1936. 12 S. m. 29 Abb. An einem und demselben Motor wurden vergleichende Indizierversuche mit drei Indikatoren, d. h. einem optischen Maihak-Stabfederindikator, einem Farnboroindikator und einem piezoelektrischen Indikator durchgeführt. Die Indikatoren und die Versuchseinrichtungen werden beschrieben. Es wurde gefunden, daß der piezoelektrische Indikator die genauesten Werte ergibt, danach der Farnboro (nur 4—5% höhere Werte). Die mit dem Maihakindikator erhaltenen Werte weichen infolge der Trägheit des Gerätes von den mit den anderen beiden Indikatoren erhaltenen Werten erheblich ab. Es wird sehr klar und ausführlich beschrieben, wie die einzelnen Geräte gehandhabt worden sind, wie die Eichung und der Versuch durchgeführt wurde.
- Karcher, J. C.: A Piezo-electric Method for the Instantaneous Measurement of High Pressures. (Ein piezoelektrisches Verfahren zur augenblicklichen Messung von hohen Drücken.) Bur. Stand. (USA.) Sci. Pap. Aug. 1922 Nr. 445.
- Karde, Dr.-Ing. Klaus: Beitrag zum Verbrennungsvorgang in der Dieselmachine. Diss. Techn. Hochsch. Hannover 1936. 19 S. m. 20 Abb. ATZ Jahrg. 39 (1936) Nr. 20. Piezoelektrischer Indikator der Fa. Radio-Loewe wurde benutzt, aber statt der ursprünglichen Membran wurde ein Kolben angewendet.
- Keys, D. A.: Piezo-electric Gage. J. Franklin Inst. Bd. 196 (1923) S. 576—591.
- Kluge, J. u. H. E. Linekh: Piezo-elektrischer Indikator für schnellaufende Verbrennungsmotoren. Z. VDI Bd. 74 (21. Juni 1930) S. 887—889.
- — Messung mechanischer Größen mit der piezoelektrischen Methode. Forsch. Bd. 2 (Mai 1931) S. 153—170.

- Kluge, J. u. H. E. Linckh: Z. Instrumentenkde Bd. 52 (1932) S. 177.
Beschreibt den elektrostatisch arbeitenden Vorverstärker, der von den piezoelektrischen Ladungen gesteuert die notwendige Steuerleistung für den Kathodenstrahl-Oszillograph liefert. Siehe auch: Druckmessung mit piezoelektrischen Kristallen. A.T.M. V 132 (Sep. 1932). Beschreibt das Röhrevoltmeter und auch die Schaltung für Kippschwingung durch Glimmlampe.
- Marti, Willy: Ventilferschwingungen. Diss. Techn. Hochsch. Zürich. Winterthur: 1935. 21 Seiten, 33 Abb.
Beschreibt schematisch einen Quarzindikator, welcher für die Messung der Druckkräfte an den beiden Enden einer Schraubenfeder angewendet wurde. Die Schraubenfeder wird durch eine Nockenwelle bestätigt.
- Meurer, S.: Beitrag zum Bau piezoelektrischer Indikatoren. Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurw. 1937. S. 249—260.
Die Eigenschaften und Fehlerquellen der vorhandenen Quarz-Indikatoren werden eingehend besprochen. Einfluß der Temperatur, Einwirkung schneller Temperaturwechsel, Nachteile der Membran als Verschlüsselement werden gründlich behandelt. Auf der Grundlage seiner Untersuchungen hat der Verfasser ein Hülsengehäuse für die Aufnahme der Quarzplatten entwickelt, welche Bauweise weniger Fehlerquellen als die Membran ausgesetzt ist und einen zuverlässigeren und gleichmäßigeren Maßstab ergibt.
- Paul, W. H. and K. R. Eldredge: The Development of a Piezo-electric Indicator for Highspeed Internal Combustion Engines. (Entwicklung eines Piezoindicators für Schnellläufermotoren.) Diss. Oregon State Agricul. College USA. 1935.
- The Zeiss-Ikonindikator. Automob. Eng. Nov. 1935.
- Watanabe, Sh.: Cathode-Ray Oszillograph and Piezo-electricity. Proc. Wld.-Engng-Congr. Tokyo Bd. 5—6 (1929) S. 141—156.
- Shumpei: A new Design of Cathode-Ray Oscillograph and Its Applications to Piezo-electric Measurements. (Ein neuer Kathodenstrahl-Oszillograph und dessen Anwendung für piezoelektrische Messungen.) Sci.Pap. Inst. physic. chem. Res., Tokyo Bd. 12 (1929) S. 82, vgl. auch Bd. 12 (1929) S. 99, Bd. 14 (1930) S. 153.
- Watson, H. G. I. and D. A. Keys: A piezo-electric method of measuring the pressure variations in internal combustion engines. (Piezoelektrische Methode für die Messung der Druckänderungen in Brennkraftmaschinen.) Canad. J. Res. Bd. 6 (März 1932) S. 322—331.
- Watzinger, A. und R. Schnell Larsen: Zwei neue Verfahren für die Diagrammaufnahme an schnelllaufenden Kolbenmaschinen. Z. VDI Bd. 81, Nr. 35. 28. Aug. 1937, S. 1011—1012 m. 4 Abb.
Im Laboratorium für Wärmekraftmaschinen der Norwegischen Tech. Hochsch. Trondheim wurden zwei Indizierverfahren entwickelt. Das eine Verfahren nützt die Kapazitätsänderungen eines Zylinderkondensators für die Kolbenwegübertragung auf den Kathodenstrahl-Oszillographen aus, während das andere die Lichtbildaufnahme von Diagrammreihen gestattet.
- Radio-Aktien-Gesellschaft D. S. Loewe, Berlin-Steglitz (Wiesenweg 10).
Katalog und Gebrauchsanweisung über Piezodruckmeßgeräte, aufgebaut auf der von J. Kluge und H. E. Linckh ausgearbeiteten Grundlage, aber den praktischen Anforderungen und Betriebsbedingungen angepaßt. Der Röhrevoltmeter wurde entweder für Schleifenoszillographen (Stromindikatoren) oder für Kathodenstrahl-Oszillographen (Spannungsindikatoren) ausgearbeitet. Die Quarzdruckkammer wird entweder in normaler Ausführung (ohne Zündkerze) oder mit eingebauter Zündkerze geliefert.

Indizierverfahren mittels der photoelektrischen Wirkung.

- Döring, Werner: Anzeige- und Zählgeräte für mechanische Arbeit und Versuche mit einem lichtelektrischen Arbeitszähler. Diss. Techn. Hochsch. Dresden 1933. VDI-Verlag, 69 Seiten, 81 Abb.
Nach einer allgemeinen Einteilung der verschiedenen Meßmöglichkeiten werden die früheren Arbeitszähler und Leistungsmesser kritisch behandelt. Ein neues auf dem lichtelektrischen Prinzip beruhendes Meßverfahren wird beschrieben. Meßergebnisse an verschiedenen Werkzeugmaschinen werden angegeben.

- Französische Patentschrift 728632, Dez. 1931. Georges Marboux: Perfectionnements apportés aux procédés et dispositifs pour la photoélasticimétrie. (Verbesserungen an Meßverfahren mittels Photoelastizität.) Beschreibt ein Meßverfahren mit einem gespannten Glasprisma und Polarisationsapparat und dessen Anwendung auf einen Druckindikator, Erdbebenmesser, Beschleunigungsmesser, Verschiebungsmesser.
- Labarthe, A. et M. Demontvignier: Opto-elektrischer Indikator. Comptes Rendus Acad. Sci. Paris Bd. 195 (1932) S. 1240—1242.
- Rose, R. A., G. C. Wilson and R. R. Benedict: Photo-Electric Combustion Analysis. (Verbrennungsuntersuchungen mittels photoelektrischem Verfahren. J. Soc. automot. Engr. Bd. 39 (Nov. 1936) Nr. 5 S. 459—468.

Indikatoren mit druckveränderlicher Kapazität.

- Ernst-Eberhard-Wilberg: Druckmessung und punktweise Indizierung mit Hilfe eines Kondensatormikrometers. Diss. Techn. Hochsch. Braunschweig 1932. Hektograph-Handschrift. 74 Seiten, 42 Abb.
Nach einer kritischen Behandlung der bisher bekannten punktweisen Indiziermethoden werden die Einzelpunktindikatoren des Verfassers, nach dem Kondensator-Mikrometerprinzip, seine ursprüngliche Form und weitere Entwicklungsformen beschrieben. Die Fehlerquellen der einzelnen Teilelemente sowie die Änderung der Quarzfrequenz, des Geberkondensators, der Temperatur, werden gründlich erörtert. Versuche und Eichergebnisse des Gerätes werden ausführlich beschrieben und abgebildet.
- Fieber, C. W.: Diss. Techn. Hochsch. Wien 1934.
— Ein neuer elektrischer Indikator für schnelllaufende Verbrennungskraftmaschinen. Automob.-techn. Z. 1934 Heft 20 S. 523—528. 7 Abb.
— Forsch. Ing.-Wes. 1934 S. 201.
— Elektrischer Indikator für schnelllaufende Verbrennungskraftmaschinen. Z. VDI Bd. 79 (9. Nov. 1935) S. 1368—69. 3 Abb. Enthält auch folgende Literaturhinweise.
- Obata, Juichi: The Ultramicrometer, a New Instrument for Measuring very Small Displacement of Motion and Its Various Applications. (Der Ultramikrometer, ein neues Gerät für Messung sehr kleiner Verschiebungen und dessen verschiedene Anwendungen.) J. opt. Soc. Amer. a. Rev. Sci. Instrum. Bd. 16 (Juni 1928) S. 419—429.
— The Ultramicrometer. Vortrag auf der Weltkraftkonferenz, Okt. 1929. 9 Seiten.
— u. Yabei Josida: An Electric Indicator for High-Speed Internal Combustion Engines. (Elektrischer Indikator für Verbrennungsmotoren.) Rep. aeron. Res. Inst., Tokyo Bd. 1, 14 (Dez. 1927) Nr. 28 S. 9.
— u. Yukio Munatomo: On the Possibility of Applying the Cathode Ray Oscillograph to the Indicator for High-Speed Engines. (Anwendung des Kathodenstrahloszillographen für die Indizierung von Schnellaufmotoren.) Rep. aeron. Res. Inst., Tokyo Bd. 5, 4 (Febr. 1930) Nr. 57 S. 93—100.
- Kiyoshi Tomizuka (Forschungsanstalt f. Luftfahrt der Tokyo Universität): Elektrischer Kapazitätsindikator mit Abschlußventil. Bericht in Automotive Industries, Sept. 18. 1937. S. 380.
- Reisch, S.: Z. Hochfrequenztechn. Bd. 38 (1931) S. 101.
Beschreibt das Spannungsteilungsverfahren von Reisch.
- Schnauffer, K.: Indizieren von schnelllaufenden Motoren. Z. VDI Bd. 74 (26. Juli 1930) S. 1066—1067.
— Aufzeichnung rasch verlaufender Druckvorgänge mittels des Verfahrens der halben Resonanzkurve. Luft.-Forsch. 1930 S. 126—136 mit 23 Abb.
— Messung oszillierender Drücke nach der Kondensatormethode. Arch. techn. Mess. Bd. 1 (Dez. 1931) S. 2.
— Untersuchung von Verbrennungsvorgängen in Zündermotoren mittels elektrischen Meßverfahrens. Z. Flugtechn. Motorluftsch. 1931 Heft 17. 4 Seiten mit 7 Abb.

Indizierverfahren mittels druckveränderlicher Induktivität.

- Beale, E. S. L. u. R. Stansfield: Standard-Sunbury Cathode Ray Oscillograph Engine Indicator. *Engineer* 13., 20., 27. Dez. 1935.
Beschreibt den zur Messung des Druckes und der Einspritz-Ventilbewegung gebauten Indikator mit druckbewegter Spule.
- Draper, C. S.: The Physical Effects of Detonation in a Closed Cylindrical Chamber. (Die physikalischen Wirkungen von Explosionen in einer geschlossenen zylindrischen Kammer.) *Techn. Rep. Nat. Advisory Comm. Aeronaut. Washington* 1934 Nr. 493.
Beschreibt den im Massachusetts Institute of Technology entwickelten und zur Messung der Druckänderungsgeschwindigkeit geeigneten Indikator.
- Ewing, E. A.: Magnetische Induktion in Eisen und verwandten Metallen. R. Oldenbourg, München 1892.
- Fiene, M. E.: Electrical Method of Obtaining Indicator Card of a Compressor. (Indizierung eines Kompressors mit einem elektrischen Indikator.) *Refrig. Engng. Bd. 15 (März 1928) S. 77—80.*
- Hetzel, T. B.: The Development of Diesel Fuel Testing. (Die Entwicklung der Meßverfahren für die Prüfung von Diesel-Brennstoffen.) *Bulletin Nr. 45. Engineering Experiment Station der The Pennsylvania State College.*
Nach einer eingehenden Erörterung der früheren Meßmethoden und Apparate wird ein vom Verfasser entwickeltes Meßverfahren und -gerät beschrieben, das zwei Lautsprecher-Geber-elemente verwendet, deren eines für die Bestimmung der Einspritzzeit dient, während das andere für die der Zündzeit bestimmt ist. Aus den beiden Angaben wird der Zündverzug bestimmt, welcher als Maßstab für die Güte des Brennstoffes dient.
- Keinath, G.: Elektrische Druckmessung durch Änderung einer Induktivität. *Arch. techn. Mess. V 132-4 Okt. 1932. 4 Seiten mit 11 Abb.*
Beschreibt eine Anzahl von Methoden: Einfach-Drossel mit Änderung des Luftspaltes, Verwendung einer Vergleichsdrossel mit konstantem Luftspalt, Doppeldrossel mit Quotientenmesser, Doppeldrossel mit Brückenschaltung, Differentialtransformator, Doppeldrossel mit bewickeltem Zwischenstück, Resonanzschaltung, Phasensprungschaltung. *Literaturverzeichnis.*
- Sawyer, H. T.: An Indicator for High Speed Engines. (Ein Indikator für schnelllaufende Motoren.) *Mech. Engng. Bd. 58 (Mai 1936) Nr. 5 S. 283—285. 5 Abb.*
Beschreibt einen Indikator mit Kolben, an dessen Stange eine Stahlmembran befestigt wird, deren Bewegung auf einen Anker übertragen wird, welcher im Luftspalt einer elektrischen Spule angeordnet ist. Dadurch wird die Induktivität der Spule geändert. Die dadurch in einem Stromkreis verursachten Änderungen werden mit dem Oszillograph aufgezeichnet.
- Taylor, C. F., C. S. Draper, E. S. Taylor u. G. L. Williams: New Instrument Devised for Study of Cylinder Performance. (Ein neues Gerät für die Untersuchung von Vorgängen in Zylindern.) *SAE J. Bd. 34 (Febr. 1934) Nr. 2 S. 59 bis 62 mit 8 Abb.*
Beschreibt das für Indizierung der Geschwindigkeit der Druckänderung gebaute und mit einer druckmessenden Membran und Induktionsspule ausgerüstete Gerät sowie die damit erzielten Versuchsergebnisse.

Magneto-elektrische Indizierverfahren.

- Reports of the Aeronautical Research Institute, Tokyo Imperial University:
- Janovsky, W.: Über die magneto-elastische Messung von Druck-, Zug- und Torsionskräften. *Z. techn. Physik Bd. 14 (1933), S. 466.*
- Tatuo Kobayashi: Nr. 109. Juli 1934. Magnetic Pressure Indicator for Internal-Combustion Engines. (Magnetischer Druckindikator für Verbrennungsmotoren.) 35 Seiten, 25 Abb.
- Tatuo Kobayashi, Hiroto Okumura and Kinmatu Simamura: Nr. 40. Sept. 1928. On the Inverse Wiedemann Effect and its Allied Phenomena. 55 S., 39 Abb.

- Tatuo Kobayashi, Kinmatu Simamura and Tatuo Koyama: Nr. 52. Nov. 1929. Application of the Inverse Wiedemann Effect to Torque Measurements and to Torque Variation Recordings. (Anwendung der umgekehrten Wiedemann-Wirkung für die Drehmomentmessung und für die Aufzeichnung von Drehmomentänderungen.) 20 Seiten, 24 Abb.
- Nr. 54. Jan. 1930. Fortsetzung von Nr. 52. 4 Seiten, 10 Abb.
- Wintergerst, S.: Die magnetoelastischen Eigenschaften von Stahl und deren Anwendung zu Spannungs- und Schwingungsmessungen. Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens 1937, S. 238—246. VDI-Verlag.
- Untersuchung der Zusammenhänge zwischen mechanischer Beanspruchung und magnetischem Verhalten von Stahl. Erläuterung und Kritik der Anwendung für Meßzwecke.

Punktweise messende Indikatoren.

- Bachle, C. F.: Combined Spark Plug and Indicator Valve developed for Use with Farnborough-Instrument. (Ein mit einer Zündkerze vereinigtcs Indikatorventil zum Farnborough-Indikator.) Automotive Industries. 1. Dez. 1934 S. 686—688.
- Bartholomew, E., H. Chalk and B. Brewster: Carburation, Manifolding and Fuel Anti-knock Value. (Vergasung, Einführungsrohr-Gestaltung und Gegenklopffwert von Brennstoffen.) Jl. Soc. Automob. Engr., Februar 1938.
- Beschreibt die Anwendung eines elektromagnetisch gesteuerten Ventiles für die Entnahme von Gasmustern aus einem Verbrennungsmotor. Das Ventil ist dem Cox-Entnahmeventil ähnlich und ist mit einer Zündkerze vereinigt.
- Brandt u. Viehmann: Der D.V.L. Glimmlampenindikator für schnellaufende Maschinen. Mitt. Nr. 322. Deutsche Versuchsanstalt für Luftfahrt. Automob. techn. Z. Bd. 36 (25. Juni 1933) S. 309—311.
- Collins, J. H.: Alterations and Tests of the "Farnborough" Engine Indicator. (Änderungen und Versuche an dem „Farnborough“-Indikator.) Nat. Adv. Comm. Aeron. Techn. Note 348 (1930) S. 14.
- Courcy, de: Indicator Diagrams. Automob. Engr. Bd. 15 (Okt. 1925) S. 334—335.
- de Juhasz, K. J.: A Novel Method for Testing Internal Combustion Engines. (Neues Verfahren zur Untersuchung Verbrennungskraftmaschinen.) Automob. Engr. Bd. 12 (Mai 1922) S. 143—144.
- Versuche an einem Automobilmotor. Forschungsheft zur Auto-Technik. Nr. 2. Berlin: Klasing & Co. 1925. 14 S., 11 Abb.
- Uj eljárás gyorsan lefolyó, periodikusan ismétlődő nyomásváltozások vizsgálátára. (Neues Verfahren für die Untersuchung von schnell wechselnden, periodisch wiederkehrenden Druckänderungen.) Doktor-Diss. T.H. Budapest 1922. 30 S.
- Gyorsjárásu explóziós motorok indikálása. (Indizieren schnellaufender Explosionsmotoren.) Magy. Mérn. Ép. Egyl. Közl. (Z. d. V. ungarischer Ing. u. Arch.) 16. Dez. 1923. S. 171—176. 18 Abb.
- The de Juhasz-Indicator. The Automob. Engr. Bd. 15 (Sept. 1925) S. 292—295.
- The de Juhasz-Indicator. The Automob. Engr. Bd. 19 (Aug. 1929) S. 303—307.
- Measuring the Scavenging Efficiency of Two-Stroke Diesel Engines. (Bestimmung des Spülwirkungsgrades einer Zweitaktmaschine.) Automotive Industries. 28. Dez. 1935 S. 858—861 mit 5 Abb.
- Eine Versuchsreihe wird beschrieben, in welcher ein De Juhasz-Phasenwählschalter für Gasentnahme benutzt wurde.
- Der D.V.L.-Mehrzylinder-Glimmlampenindikator. Luftf.-Forschg. 1936 Nr. 10 S. 357.
- Dickinson, H. C. u. F. B. Newell: A High-Speed Engine Pressure Indicator of the Balanced Pressure Type. Nat. Adv. Comm. Aeron. Techn. Rep. 1921 Nr. 107 S. 15.

- Flight Tests with R.A.E. Electrical Indicator. (Flugversuche mit dem R.A.E.-Farnborough-Indikator.) Royal Aircraft Establishment. Reports and Memoranda Juni 1923 Nr. 880.
Es werden Indizerversuche beschrieben und illustriert, welche im Fluge an einem „Napier Lion“-Motor in Febr. und März 1923 in Höhen bis 6000 m ausgeführt worden sind.
- Gale, C. H.: The Gale High Speed Indicator. Engineer. Bd. 142 (24. Sept. 1926) S. 332—333.
- Geissler, A.: Experimentelle Untersuchungen an schnellaufenden Kleinmotoren. Berlin: R. Oldenbourg 1930. 69 Seiten, 19 Abb., 8 Zahlentafeln.
Der Ausspülverlust bei Zweitakt-Gemischmaschinen wird durch ein vom Verfasser entwickeltes Drehschieberentnahmeorgan ermittelt. Eine Kupplung wird beschrieben, welche das Ein- und Auskuppeln des Steuerorganes während des Laufes der Maschine ermöglicht und dabei die genaue Phaseneinstellung bewahrt.
- Heinrich, H.: Vorgänge in der Brennstoffleitung kompressorloser Dieselmotoren. Diss. Techn. Hochsch. Stuttgart. Gekürzt auch in Dieselmotoren V. des VDI 1932, S. 143—148.
- Hemmeter, G. T.: New Recording Method for Electric Engine Indicator Gives Positive Card Directly. (Ein neues Aufzeichnungsverfahren für elektrische Indikatoren ergibt unmittelbar ein positives Diagramm.) Automot. Ind. 9. Febr. 1935 S. 177—178 mit 3 Abb.
- Jacklin, H. M.: Some Use of the High-Speed Multi-Cylinder Indicator. (Gebrauch des Mehrzylinder-Schnellläuferindikators.) Mech. Engng. Bd. 49 (Mai 1927) S. 543.
Beschreibt Versuche mit dem Phasenventilindikator von Jacklin.
- Balancing Power output in Multi-Cylinder Engines. (Ausgleich von Leistung in Mehrzylindermotoren.) J. Soc. automot. Engr. Bd. 25 (Nov. 1929) S. 525 bis 532.
- Judge, A. W.: The Dobbie-McInnes “Farnborough“-Indikator. Automob. Engr. Bd. 15 (Jan. 1925) S. 9—14.
- Klüsener, O.: Das Arbeitsverfahren raschlaufender Zweitakt-Vergasermotoren. Forsch.-Arb. VDI 1930 Nr. 334.
- Mader, O.: Weiterentwicklung der Junkers Gegenkolbenmaschine. Z. VDI Bd. 69 (31. Okt. 1925) S. 1369—1378.
- Meurer, S.: Indikatoren für schnellaufende Verbrennungsmotoren. Z. VDI Bd. 80 (28. Nov. 1936) Nr. 48 S. 1447—1454 mit 22 Abb. und Schrifttumsverzeichnis.
- Ostwald, Wa.: Mit dem de Juhasz-Indikator. Autotechn. 1923 Nr. 19 S. 27—29.
- Prescott, Ford L.: Indicators as a Means of Improving Aircraft Engine Performance. (Der Indikator als Mittel für die Verbesserung der Leistung von Flugmotoren.) J. Soc. automot. Engr. Bd. 31 (Sept. 1932) S. 361—370 mit 12 Abb.
- New Sampling Indicator. Automot. Ind. 25. März 1933 S. 171 mit 2 Abb.
- Ricardo, H. R.: Combustion in Diesel Engines. (Verbrennung in Dieselmotoren.) J. Inst. Aut. Engr. Lond. März 1930.
Auf S. 8 wird eine geänderte Ausführung des „Farnborough“-Indikators beschrieben, welche für die Untersuchung der Drücke in Brennstoffleitungen entworfen wurde.
- Schmidt, Fr.: Ein neuer Indikator für schnellaufende Motoren. Mitt. Nr. 338. Deutsche Versuchsanstalt für Luftfahrt. Z. VDI 8. Juli 1933 S. 748—749
- Schweitzer, P. H.: Oil Pressure Indicator. (Öldruckindikator.) Oil Engine Power (New York) Juli 1927 S. 475—479.
- Serruys, Max: Bestimmung der oberen Grenze der Zeitdauer des Klopfens in Verbrennungskraftmaschinen. C. R. Acad. Sci., Paris Bd. 194 (30. Mai 1932) S. 1894—1896.
- Spanogle und Buckley: The N.A.C.A. Combustion Chamber Sampling Valve. (Phasenventil des N.A.C.A. für die Untersuchung von Verbrennungskammern.) Techn. Note Nr. 454 Nat. Adv. Comm. Aeron. (Washington) 1933.

- Taylor, E. S. and C. S. Draper: Besprechung des Vortrages von F. L. Prescott. J. Soc. automot. Engr. Bd. 32 (Jan. 1933) S. 41—42.
 — — A new high-speed engine indicator. Mech. Engng. Bd. 55 (März 1933) S. 169—171.
 Völker, W.: Neuerungen an der De Juhasz-Indiziereinrichtung. Automob.-techn. Z. Bd. 34 (20. Juni 1931) S. 400—403.
 Withrow, Lovell and Boyd: Following Combustion in the Gasoline Engine by Chemical Means. (Verfolgung der Verbrennung im Benzinmotor durch chemische Verfahren.) Ind. a. Engng Chem. Bd. 222 Sept. 1930 S. 945—951.
 Wood, M.: R.A.E. Electrical Indicator. Engineering Bd. 115 (26. Jan. 1923) S. 125—126.

Indikatoren für Sonderzwecke.

- Döring, W.: Anzeige und Zählgeräte für mechanische Arbeit und Versuche mit einem lichtelektrischen Arbeitszähler. Diss. Techn. Hochsch. Dresden 1933. Steindruckausgabe des VDI-Verlag, Berlin. 70 Seiten mit 81 Abb.
 Eine ausführliche Arbeit, welche 1. die theoretische Grundlage der Kraft- bzw. Drehmomentmessung und der Weg- bzw. Geschwindigkeitmessung, behandelt; 2. eine große Anzahl der vorhandenen oder bekannten diesbezüglichen Meßinstrumente beschreibt und 3. ein vom Verfasser entwickeltes, auf lichtelektrischem Prinzip beruhendes selbsttätiges Meßverfahren eingehend untersucht. Versuchsergebnisse werden angegeben.
- Frisch, A.: Concerning a new method and apparatus for directly measuring the indicated output of reciprocating engines. (Neue Methode und Gerät für die unmittelbare Bestimmung der indizierten Leistung von Kolbenkraftmaschinen.) Zürich: Fachschriften-Verlag 1919. 22 S.
- Geiger: Mitteldruckindikator. Z. VDI Bd. 70 (1926) S. 509—512.
 Das Prinzip und der Aufbau des Mitteldruckindikators werden beschrieben.
- Mechanische Schwingungen und ihre Messung. Berlin: Julius Springer 1927. Abschnitt: Systeme mit 2 Massen, S. 190.
 Hier wird die Theorie des Mitteldruckindikators erläutert.
- Giessmann, W.: Die Klopfestigkeit der Leichtkraftstoffe. Z. VDI Bd. 30 (4. Juli 1936) Nr. 27 S. 833—839.
 Beschreibt die Methode für die Messung der sog. Oktanzahl. Beschreibt den Sprungstabindikator von Midgley (bouncing-pin indicator). Er besteht in der Hauptsache aus einer Membran, die durch die Verbrennungsdrücke des Motors in Schwingungen versetzt wird, welche mittels eines Sprungstabes auf einen elektrischen Kontakt übertragen werden.
- Hicks, C. W.: The Measurement of Maximum Pressures. (Messung von Höchst- drücken.) Techn. Rep. Nat. Adv. Comm. for Aeron. (Washington, USA.) 1928 Nr. 294.
 Beschreibt mehrere Höchstdruckindikatoren.
- Langer, P.: Fahreigenschaften von Dieselmotoren und Vergasermotoren in Nutzkraftwagen. Dieselmotoren V. des VDI 1932.
 Auf S. 85—89 wird der elektromagnetische Indikator für Maximaldrücke beschrieben.
- Spanogle, J. A. u. J. H. Collins: Jr. Maximum Pressure Indicator. (Höchst- druckindikator.) Techn. Note Nr. 359 des Nat. Adv. Comm. Aeron. (Washington, USA.) 1931. 7 S.
- Urbanach: Höchstdruckmesser für schnellaufende Verbrennungsmotoren. Jb. dtsh. Versuchsanst. Luftf. 1932 S. IV/45—IV/46.
- Wimperis, H. E.: New Means of Ascertaining Mean Pressure in a Heat Engine. (Neues Verfahren für die Bestimmung des mittleren Druckes in Wärmekraft- maschinen.) Engineer. Bd. 135 (2. März 1923) S. 238—239.
 Beschreibt den Wimperis-Mitteldruckindikator und bringt die theoretische Untersuchung des Prinzips.
- Z. VDI 2. Nov. 1935. Behandelt das „Messei“ (engl. „crusher“) einen mit einer Ausbohrung versehenen Stahlkörper, den man bei der Messung in den Ver- brennungsraum verlegt, mit kupfernem Stauchzylinder.

Prüfung und Eichung des Indikators.

- Dylley, J. R. u. W. L. Edwards: A high-pressure Gas-compression system. (Gerät für die Hochverdichtung von Gasen.) Bull. Unit. Stat. Depart. Agricult. Jan. 1929 Heft 61.
Eine Presse und ein Kolbenmanometer werden beschrieben, welche für die Erzeugung und Messung von hohen Drücken in der Ammoniakindustrie angewendet werden. Bereich bis zu 1500 at. Das Kolbenmanometer arbeitet mit Hebelübersetzung.
- Eberle: Prüfung von Indikatorfedern. Z. bayer. Revis.-Ver. August 1961.
- Ebert, H.: Handbuch der Physik, Bd. 2. Berlin: Julius Springer 1926.
Der Abschnitt 8A beschreibt die verschiedenen Verfahren zur Erzeugung und Messung von Drücken. Geschichtliche Übersicht und kritische Beschreibung mit Genauigkeitsangaben.
- Frese: Beeinflussung des Indikatorgramms durch die Art der Anbringung des Indikators. Z. VDI 1885 S. 769.
- Gramberg, A.: Technische Messungen.
Kapitel VI Messung der Spannung und Kapitel X Der Indikator, enthalten eine klare Übersicht und ein ausgedehntes Schrifttumsverzeichnis über Verfahren zur Bestimmung der Spannung und für die Prüfung von Indikatorfedern.
- Holborn, L.: Handbuch der Experimental-Physik, I. Meßmethoden. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft 1926.
Ein Abschnitt beschreibt einige der in der Physikalisch-technischen Reichsanstalt benutzten Genauigkeitsmanometer.
- Klein, George: Der Genauigkeitsgrad von Hochdruckmessern. VDI Bd. 54 (1910) S. 791.
Ein Vergleich zwischen einigen Kolbenmanometern von Stückrath, Martens, Schaeffer und Budenberg. Fehlerquellen und Empfindlichkeit werden gründlich besprochen. Ein Versuchszyylinder wurde parallel zur Achse mit kleinen Bohrungen versehen und der Druck gemessen.
- Meyers, C. H. u. R. S. Jessup: A multiple manometer and piston gages for precision measurements. (Ein Mehrfachmanometer und ein Kolbenmanometer für Genauigkeitsmessungen.) USA. Bur. Stand. Res. Pap. 1931 Nr. 324. Bur. Stand. J. Res. Bd. 6 (Juni 1931).
Zwei Genauigkeitsmanometer, welche im amerikanischen Eichamt entwickelt worden sind, werden beschrieben. Eines ist ein 15 Atm. Quecksilber-Differentialdruckmesser, bestehend aus fünf U-Röhren in Reihenschaltung. Die Genauigkeit ist 0,1‰. Die Kolbenmanometer bestehen aus einem Tauchkolben aus gehärtetem Stahl; der Kolben kann gedreht werden.
- Wiebe: Temperaturkoeffizient bei Indikatorfedern. Forsch.-Arb. Ing.-Wes. H. 33.
- Wiebe, H. F.: Zur Kompr. flüss. Gase. Preßluft-Ind. Bd. 13 (1910) S. 83.
Geschichtlicher Überblick. Das von Stückrath für die Phys.-Techn. Reichsanstalt gebaute Kolbenmanometer wird beschrieben. In der früheren Ausführung wurde dem Kolben eine oszillierende, in der neueren Ausführung eine drehende Bewegung erteilt. Kolben und Zylinder bestehen aus 25% Nickelstahl, die Lederpackung aus Goldschlägerhaut. Genauigkeit etwa 1:1000.

Fehlerhafte Diagramme und Dynamik des Indikators.

- Ausführlich sind mechanische Schwingungen in den folgenden Werken behandelt:
- Geiger, J.: Mechanische Schwingungen und ihre Messung. Berlin: Julius Springer 1927.
- Über Beschleunigungsmessungen: Mitt. Forsch.-Anst. Gutehoffnungshütte 1931 Heft 7.
- Neue Betrachtungen über Beschleunigungsmessungen und ähnliche Vorgänge. Mitt. Forsch.-Anst. Gutehoffnungshütte 1932 Heft 3.
- Hort, W.: Technische Schwingungslehre. Berlin: Julius Springer 1922.
In mehreren Abschnitten werden die Schwingungen in Indikatoren, von Flüssigkeitssäulen u. s. f., behandelt.
- Steding, H.: Messung mechanischer Schwingungen. Berlin: VDI Verlag 1928.
Der Abschnitt über Indikatoren, S. 357–399, mit 45 Abb., behandelt die Theorie und Fehler der verschiedenen Typen.

- Amtliche Bestimmungen für die Eichung von Indikatoren sind veröffentlicht in Z. VDI 1906 S. 709—711.
- Almen, J. O. u. A. Laszlo: The Uniform Section Disc. Spring. (Scheibenfeder mit gleichmäßigem Querschnitt.) ASME. Spec. Comm. mech. Springs 1935.
- Brightmore, A. W.: Experiments on the Steam Engine Indicator. (Versuche am Dampfmaschinenindikator.
Beide Aufsätze und deren Besprechung wurden veröffentlicht in Proc. Inst. Civil Engs., Lond. Bd. 83 (1886) S. 1—105.
- J. B. u. A. B. Schier: Design of Conical Spring with coils of Uniform Slope. (Entwerfen von Kegelfedern mit gleichmäßiger Steigung.) Rep. ASME. Spec. Comm. mech. Springs. Rep. 1930 Nr. 3.
- Borth: Untersuchungen über den Verbrennungsvorgang in der Gasmaschine. Z. VDI Bd. 52 (4. April 1906) S. 521—529.
- Ernst, P. W.: Die Genauigkeit der Planimetrierung von Indikatordiagrammen. Automob.-techn. Z. Bd. 34 (20. Juni 1931) S. 399—400.
- Holm, O.: Der Einfluß der Federmassen auf die dynamischen Eigenschaften von Indikatoren. Z. Instrumentenkde Bd. 48 (Jan. 1928) S. 14—26.
- Krylow, A. H.: Nekotoryja sametchanija o krescherach i indikatorach. [Bemerkungen an Indikatoren und Meßeiern (engl. crushers).] Izv. Imperat. Akad. Nauk. 6, III. s., 623, 1909 S. 623—654.
Besprochen auch in Steudings Werk: Messung mechanischer Schwingungen.
- Meurer, S.: Zur Messung schnell veränderlicher Drücke und Temperaturen. VDI-Heft Prüfen und Messen 1937, S. 40—42.
- Neumann, H. H.: Genaues Arbeiten mit dem Stabfederindikator bei hohen Drehzahlen. Automob.-techn. Z. Bd. 36 (10. Sept. 1933) S. 423—425.
- Reynolds, Osborne: On the Theory of the Steam Engine Indicator and the Errors in Indicator Diagrams. (Über die Theorie des Dampfmaschinenindikators und die Diagrammfehler.)
- Rothrock, A. M.: Pressure Fluctuations in a Common Rail Fuel Injection System. (Druckänderungen in Einspritzleitungen von Dieselmotoren.) Tech. Rep. Nr. 363 Nat. Adv. Comm. Aeron. 1930.
- Schweitzer, P. H.: The Tangent Method of Analysis of Indicator Diagrams of Internal Combustion Engines. (Die Tangentenmethode für die Untersuchung von Indikatordiagrammen von Brennkraftmaschinen.) Bulletin Nr. 35. of the Pennsylvania State College, Engineering Experiment Station. Sept. 1926.
- Timoshenko, S.: Schwingungsprobleme der Technik. Berlin: Julius Springer 1932.
- Wiebe, H. F. u. A. Lehmann: Untersuchungen über die Proportionalität der Schreibzeuge bei Indikatoren. Forschungsarb. VDI 1906 Nr. 34.
- Wilke, W.: Untersuchungen über die Grenzen der Verwendbarkeit des Indikators bei schnellaufenden Maschinen für elastische Medien. Ölmotor Bd. 5 (1916) Nr. 5/6.

Namenverzeichnis.

- | | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Abraham 100.
 A. E. G. 106.
 Amelkin 124.
 American Instrument Co.
 155.
 Arcus 178.
 Arndt 194.
 Ashton 189.
 Atlas Imperial Diesel En-
 gine Co. 83.</p> <p>Bachelder 9.
 Bahnmayr 218.
 Balfour 27, 67.
 Bauer 165.
 Beil, W. 212.
 Benedict 134.
 Berg 27, 60.
 Bernhard 110.
 Blaum 121, 126.
 Blohm, R. 219.
 Blondel 100.
 Boerlage 126.
 Böttcher 192.
 Bollinck 6.
 Bosch, Robert, A.G. 182,
 210.
 Bothur, P. 212.
 Boulton 1.
 Bourdon 27, 108.
 Bouton 172, 181.
 Boyd 181.
 Brandt 165.
 Braun 10, 103.
 Brightmore 6.
 Brix 197.
 Broeze 84, 123.
 Brown 4.
 Brown-Boveri A.G. 108.
 Budenberg 47, 216.
 Bureau of Standards 155.
 Burman 83.
 Burmester 6.
 Burstall 82.</p> <p>Caris 112.
 Carpentier 91, 212.
 Chatillon 28.</p> | <p>Clyde 6.
 Cody 8.
 Collins 53.
 Continental Motors Corp.
 162.
 Courcy, de 171.
 Coward 57.
 Cowper 4.
 Cox 181.
 Crosby 5, 7, 11, 12, 28,
 34, 253.
 Curie 119.</p> <p>Deckel 77.
 Delft Proefstation 84.
 Demontvignier 133.
 Deutsche Versuchsanstalt
 für Luftfahrt
 (D. V. L.) 55, 139, 166,
 215.
 Dion, de 172.
 Dobbie 6, 13, 40, 90.
 Dodds 116.
 Döring 188, 194.
 Draper 152, 164.
 Dreyer 10, 13, 20, 224.
 Driel, van 126.
 Droop 10, 224.
 Duddel 100.
 Dyk, van 84.</p> <p>Edelmann 59, 102.
 Eichelberg 110.
 Eicke 194.
 Eindhoven 102.
 Elbe, v. 27, 58.
 Eldredge 125.
 Ervin 119.</p> <p>Farey 4.
 Farnborough 158, 171, 214.
 Fieber 140.
 Field 4.
 Fiene 145.
 Fischmann 204.
 Förderreuther 77.
 Forest, de 28.
 Frisch 107, 195.</p> | <p>Gale 178.
 Garner 116.
 Gasterstaedt 157.
 Geh 165.
 Geiger 16, 34, 72, 75, 205,
 247, 270.
 Geissler 178.
 Glamann 110, 113.
 Graham 48.
 Grassmann 6.
 Gümbel 22, 27, 190.</p> <p>Haeder 266.
 Haedicke 9.
 Hallwachs 133.
 Hartmann 6, 100.
 Heimann 107.
 Heinrich 182.
 Hemmeter 161.
 Hersey 57.
 Herz 133.
 Hetzl 151.
 Holm 6, 31, 254.
 Hopkinson 90.
 Hospitalier 27, 91.
 Huguenard 83.
 Hull 120.</p> <p>Illgen 120.</p> <p>Jacklin 181.
 Jaquet 79.
 Joachim 120.
 Johnston 111.
 Joshida 138.
 Juhász, de 10, 19, 34,
 37, 39, 94, 173, 223.
 Junkers 157.</p> <p>Kallhardt 59, 120, 124, 132.
 Kalmar 113.
 Kamm, W. 121, 129.
 Karcher 120.
 Karde 120.
 Keinath 145.
 Keynion 9.
 Kinlin, v. 121, 129.
 Kirner 68.</p> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

- Kiyoshi, Tomizuka 138.
 Klüsener 180.
 Kluge 120.
 Kobayashi 152.
 Krupp A. G. 195.
 Krylow 6.
 Kutzbach 203.
- Labarthe** 133.
 Langer, P. 211.
 Langley Field, Luftfahrt,
 Versuchsanstalt 182.
 Larsen 131.
 Lehmann 6, 10, 14, 15, 23,
 34, 47, 49, 50, 192, 205,
 212, 218, 223, 228.
 Leopold 3.
 Lewis 27, 58.
 Linckh 120, 124.
 Little 189.
 Lohmann, W. 235.
 Lorenz, K. 213.
 Lowell 181.
 Lueg, W. 114.
- McCollum** 111.
 McNaught 4.
 Mader 51, 52, 235.
 Magnan 83.
 Maihak 7, 10, 17, 19, 23,
 27, 30, 34, 37, 47, 181,
 187, 219, 228.
 Main 4.
 Marboux 136.
 Marquardt 211.
 Marti 121.
 Martins 112.
 Mathot 39.
 Maudsley 4.
 Mazellier 212.
 Mehlig 180.
 Meurer 120, 123, 126, 132,
 163, 259.
 Michels 10, 14.
 Midgley 82, 221.
 Munetomo 138.
- Nägel** 109.
 Nagaoka 152.
 Nahmer, von der 59.
 Nakanishi 59.
 National Advisory Comitee
 for Aeronautics
 (N. A. C. A.) 159, 215.
 de Juhasz-Geiger, Der Indikator.
- Nernst 109.
 Newton 69.
 Nugent 41.
 Nusselt 59.
- Obata** 137.
 Okill 209.
 Opitz 109.
 Osram, W. 102.
- Pabst** 55.
 Pauer 178.
 Paul 125.
 Peletier 126.
 Pennsylvania State College
 151, 169.
 Peters 111.
 Peters Cartridge Co. 119.
 Picht 195.
 Pigott 226.
 Planiol 83.
 Popp 165.
 Prescott 179.
- Rabazzana** 113.
 Radio-Löwe 123.
 Rassweiler 154.
 Reich 141.
 Reynolds 6.
 Ricardo 162.
 Richards 4, 6, 31.
 Rickert 121, 129.
 Robertson 6, 7.
 Roos 178.
 Rose 134.
 Rosenkranz 6, 13, 20, 224.
 Roucka 195.
 Rumpf 27, 63, 93, 110, 114.
- Sackheim, R.** 217.
 Sass 42.
 Savery 1.
 Sawyer 147.
 Sayre 28.
 Schäffer 47, 48, 216.
 Scheuermeyer 165.
 Schimanek 201.
 Schmaltz 109.
 Schmidt 165.
 Schmitz 53.
 Schnauffer 139, 221, 263.
 Schnell 131.
 Schultze 93.
 Schweitzer 170.
 Schwirkus 6.
- Serruys 163.
 Siemens & Halske 100.
 Slaby 6.
 Société Générale 92.
 Southern 1, 8.
 Spohrleder 171.
 Sprake 116.
 Stärzl 51.
 Standard Sunbury 147,
 263.
 Stansfield 147.
 Stauss 6, 8, 223.
 Stewart 219.
 Storey 189.
 Strupler 6.
 Sundt Engineering Co. 103.
 Szal, Jan 178.
- Taylor** 152, 164.
 Thoma 77.
 Thomé, W. 211.
 Thompson 5.
 Thring 27, 63, 93.
 Triebnigg 110, 113.
 Trill 6, 10, 13.
- Urbach** 165.
- Vrehmann** 165.
 Volckhardt 77.
- Wallichs** 109.
 Watson, R. B. 210.
 Watt 1, 8.
 Watzinger 131.
 Wayne 10.
 Webster 6.
 Wehnelt 105.
 Wheatstone 140.
 Wiebe 6.
 Wiedemann 152.
 Wilberg 141.
 Wilkinson 1.
 Williams 152.
 Willner 6.
 Wilke 6, 256.
 Wilson 134.
 Wimperis 200.
 Withrow 154, 181.
 Wright Field 179.
- Young** 181.
- Zeiß Ikon** 130.
 Zipperer 235.