

Schaltanlagen in elektrischen Betrieben von Prof. Dr. F. Niehammer.	
I. Allgemeines. Schaltpläne. Einfache Schalttafeln. Mit 46 Figuren	Nr. 796
II. Schaltanlagen für hohe Spannungen und große Leistungen. Schaltkästen. Schutzvorrichtungen. Mit 53 Fig.	Nr. 797
Hochspannungs-Freileitungen von Dr.-Ing. Karl Draeger. Mit zahlreichen Abbildungen	Nr. 1015
Elektrische Schaltgeräte, Anlasser und Regler von Dr.-Ing. Fritz Kesselring. I. Theoretische Grundlagen zur Berechnung der Schaltergeräte. Mit 80 Figuren	Nr. 711
Einführung in die Hochspannungstechnik von Prof. Dr.-Ing. K. Fischer. 2 Bände. Mit 138 Figuren	Nr. 609, 940
Ströme und Spannungen in Starkstromnetzen von Dipl.-Elektro-Ing. Josef Herzog und Prof. Feldmann. Mit 68 Abbild.	Nr. 456
Die zweckmäßigste Betriebskraft v. Ober-Ing. Fr. Barth. I. Einleitung. Dampfkraftanlagen. Verschiedene Kraftmaschinen. Mit 19 Figuren	Nr. 224
II. Gas-, Wasser- und Wind-Kraftanlagen. Mit 24 Abb.	Nr. 225
III. Elektromotoren. Betriebskostentabellen. Graph. Darstellungen. Wahl der Betriebskraft. Mit 13 Abb.	Nr. 474
Elektromotorische Betriebe (Grundlagen für die Berechnung) von Prof. Dr.-Ing. A. Schwaiger. Mit 25 Abb.	Nr. 827
Elektrische Bahnen von Prof. Dr.-Ing. A. Schwaiger. Mit 45 Abbild.	Nr. 958
Straßenbahnen von Dipl.-Ing. A. Boshart. Mit 72 Abb.	Nr. 559
Elektrokarren, Automobile, Personen- und Lastautomobile sowie Elektrokarren. Von Ing. R. Thebis. Mit 77 Abb.	Nr. 948
Die Elektrizität im Dienste der Kraftfahrzeuge von Geh. Reg.-Rat Dr.-Ing. Rich. Albrecht. Mit 46 Figuren.	Nr. 815
Die Elektromotoren, ihre Arbeitsweise u. Verwendungsmöglichkeit von Prof. Dr. F. Niehammer.	
I. Gleichstrommotoren, Mehrphas. Synchron- u. Asynchronmotoren. Mit 56 Figuren	Nr. 798
II. Kommutatormotoren. Mech. Aufbau. Wirtschaftlichkeit u. a. Mit 62 Figuren	Nr. 799
Transformatoren von Prof. Dipl.-Ing. Fr. Sallinger. Mit 66 Abbild. u. 12 Tafeln	Nr. 952
Gleichrichter von Dipl.-Ing. Josef Just. Mit 90 Abb.	Nr. 945
Die Gleichstrommaschine von Prof. Dipl.-Ing. Fr. Sallinger. 2 Bände. Mit 129 Figuren u. 6 Tafeln	Nr. 257, 881
Aufgabensammlung über die Gleichstrommaschine mit Lösungen von Prof. Dipl.-Ing. Fr. Sallinger. Mit 38 Fig.	Nr. 912
Wechselstromerzeuger von Prof. Dipl.-Ing. Fr. Sallinger. Mit 77 Figuren	Nr. 547
Wechselstrom-Kommutatormaschinen von Ing. Karl Baudisch. Mit 62 Fig. im Text und 20 Abb. auf 12 Tafeln	Nr. 992
Blitzschutz der Gebäude von Baurat H. Klaiber. Mit 39 Abbild.	Nr. 982
Elektrische Förderanlagen von Prof. Dr.-Ing. A. Schwaiger. Mit 50 Abb.	Nr. 678
Elektrische Öfen v. Prof. Dr. Osw. Meyer. Mit 83 Abb.	Nr. 704

Elektrizität im Hause von Prof. Dr. F. Niehammer. Mit 104 Figuren	Nr. 1006
Röntgenstrahlen (Physik, Technik u. Anwendungen) v. Dr. phil. nat. Rich. Herz. Mit 48 Textfig. u. 36 Abb. auf 16 Taf.	Nr. 950
Elektrizitätswirtschaft von Dr.-Ing. R. Fischer. Mit 54 Textfiguren und 8 Tafeln	Nr. 995
Die elektrische Telegraphie mit Drahtleitung von Prof. I. Herrmann.	
I. Die Telegraphie mit Morsezeichen. Mit 124 Figuren . .	Nr. 172
II. Die Typendrucktelegraphen. Mit 76 Textfig. u. 18 Abb. auf 16 Tafeln	Nr. 975
Das Fernsprechwesen von Dipl.-Ing. W. Winkelmann. 2 Bände. Mit 124 Figuren	Nr. 155, 775
Bildtelegraphie von Prof. Dr. A. Korn. Mit 41 Fig. und 8 Taf.	Nr. 873
Radlotechnik I. Allgem. Einführung von Prof. I. Herrmann. Mit 100 Figuren im Text und 18 Abbild. auf 16 Tafeln . .	Nr. 888
— II. Wellentelephonie von Dr. Werner Bloch. Mit 80 Abb.	Nr. 946
— III. Die Empfänger von Dipl.-Ing. Hermann Seacke. Mit 82 Abbild.	Nr. 951
— IV. Stromquellen für Röhrenempfangsgeräte, galvanische Elemente, Akkumulatoren und Netzanschlußgeräte von Dr.-Ing. Richard Albrecht. Mit 61 Abbild.	Nr. 966
— V. Die Elektronenröhre von Dipl.-Ing. Otto Stürner. Mit 88 Figuren und 35 Abbild. auf 16 Tafeln	Nr. 974
— VI. Die elektrischen Wellen von Prof. Dr. F. Kiebitz. Mit 28 Figuren	Nr. 1010
Die Kraftstellwerke der Eisenbahnen von Oberbauf. a. D. S. Scheibner. 2 Bände. Mit 70 Abb. u. 1 Tafel. Nr.	689, 690
Das elektrische Fernmeldewesen bei den Eisenbahnen von Geh. Baurat K. Fink. Mit 54 Abb.	Nr. 707
Die elektrischen Meßinstrumente. Die Wirkungsweise der gebräuchlichsten Meßinstrumente der Elektrotechnik von Prof. I. Herrmann. Mit 167 Figuren	Nr. 477
Die elektrische Meßtechnik I von Prof. I. Herrmann. Die elektrischen Meßmethoden im allgemeinen. Mit 85 Fig.	Nr. 885
Die elektrische Meßtechnik II von Prof. G. Brion. Die Messungen an elektrischen Maschinen, Transformatoren und Gleichrichtern. Mit 96 Abbildungen	Nr. 886
Physikalische Messungsmethoden von Professor Dr. Wilh. Bohrdt. Mit 54 Figuren	Nr. 501
Elektrizität und Magnetismus von Prof. Dr. G. Jäger. Mit 33 Figuren	Nr. 78
Elektromagnetische Lichttheorie und Elektronik von Prof. Dr. G. Jäger. Mit 17 Figuren	Nr. 374
Elektrische Schwingungen von Professor Dr. Herm. Rohmann. 2 Bände. Mit 153 Figuren	Nr. 751, 752
Die Akkumulatoren für Elektrizität v. Geh. Reg.-Rat Dr.-Ing. Rich. Albrecht. Mit 56 Figuren	Nr. 620
Tragbare Akkumulatoren von Geh. Reg.-Rat Dr.-Ing. Rich. Albrecht. Mit 61 Abb.	Nr. 919
Tarife für den Verkauf elektrischer Arbeit von Dipl.-Ing. Paul Munk. Mit 26 Abbild.	Nr. 969

Weitere Bände sind in Vorbereitung

Sammlung Göschen

Die elektrische Meßtechnik

II

Die Messungen an elektrischen Maschinen,
Transformatoren und Gleichrichtern

Von

Dr. G. Brion

Prof. der Elektrotechnik und Physik
a. d. Bergakademie Freiberg

Mit 96 Abbildungen



Berlin und Leipzig
Walter de Gruyter & Co.

vormals G. J. Göschen'sche Verlagshandlung · J. Guttentag, Verlags-
buchhandlung · Georg Reimer · Karl J. Trübner · Veit & Comp.

1929

Alle Rechte, insbesondere das Übersetzungsrecht,
von der Verlagshandlung vorbehalten.

Druck von C. G. Röder G. m. b. H., Leipzig. 871129

Inhaltsverzeichnis.

1. Kapitel.

Mechanische Hilfsmessungen.

Seite

1. Umlaufzähler	7
2. Tachometer	7
3. Beschleunigungsmessung	10
4. Messung des Trägheitsmoments	16
5. Messung von Drehmomenten	22

2. Kapitel.

Zusammenfassende Messungen an elektrischen Maschinen.

1. Spulen und Wicklungen	32
2. Magnetische Größen	38
3. Charakteristiken	42
4. Verluste in elektrischen Maschinen	44
5. Trennung der Verluste	45
6. Wirkungsgrad	48
7. Erwärmung	50
8. Störungen und Fehler an elektrischen Maschinen	51

3. Kapitel.

Messungen an Gleichstrommaschinen.

1. Widerstandsmessungen	53
2. Neutrale Zone der unbelasteten Maschine	56
3. Spannungskurve am Kollektor	57
4. Feldkurven	59
5. Bürstenübergangsspannung	61
6. Reihenschlußgenerator	62
7. Nebenschlußgenerator	63
8. Doppelschlußgenerator	65
9. Reihenschlußmotor	65
10. Nebenschlußmotor	67

4. Kapitel.

Messungen an Ein- und Mehrphasen-Synchronmaschinen.

1. Kurvenform	69
2. Symmetrie in Mehrphasensystemen	70
3. Leerlauf- und Kurzschlußversuch	71

	Seite
4. Betriebskurven	72
5. Erregerstrom	73
6. Verluste und Wirkungsgrad	75
7. Leistungslinien	75
8. V-Kurven	76

5. Kapitel.

Messungen an Transformatoren.

1. Das Übersetzungsverhältnis	77
2. Leerlauf	78
3. Kurzschluß	78
4. Spannungsänderung	81
5. Betrieb	85
6. Künstliche Belastung	85

6. Kapitel.

Messungen an Drehstrom-Induktionsmotoren.

1. Betriebskurven (Strom, Leistung, Schlüpfung, Drehmoment)	88
2. Verluste	89
3. Streuungskoeffizient (bei Motoren mit Schleifringanker)	101
4. Kreisdiagramm	102
5. Kompensierte Drehstrommotoren	103

7. Kapitel.

Messungen an Einphasen-Induktionsmotoren. 104

8. Kapitel.

Messungen an Wechselstrom-Kollektormotoren.

1. Betriebseigenschaften	107
2. Einphasen-Reihenschlußmotor	109
3. Repulsionsmotor	110
4. Deri-Motor	112
5. Dreiphasen-Reihenschlußmotor	113

9. Kapitel.

Umformung der Stromart, Gleichrichter.

1. Pulsationen	116
2. Wirkungsgrad	117
3. Übersetzungsverhältnis	119
Register	121

Literaturübersicht.

- Arnold, Die Wechselstromtechnik II. 2. Aufl. Berlin 1923.
Arnold-La Cour, Die Gleichstrommaschine I. 3. Aufl. Berlin 1923.
Baudisch, Wechselstrom-Kommutatormotoren. Sammlung Göschen, Bd. 992.
Block, Technische Meßgeräte. AWF. Berlin 1923.
Brion, Elektrotechnisches Praktikum. Leipzig 1911.
DIN-Taschenbuch 7: Elektrische Maschinen usw. Berlin 1927.
Goldschmidt, Normale Eigenschaften der Maschinen. Berlin 1909.
Gramberg, Technische Messungen. 5. Aufl. Berlin 1923.
Günther-Schulze, Gleichrichter und Ventile. München 1924.
Herrmann, Elektrische Meßtechnik I. Sammlung Göschen, Bd. 885.
— Elektrische Meßtechnik I—IV. Sammlung Göschen, Bd. 196—198, 657.
Heubach, Der Drehstrommotor. 2. Aufl. Berlin 1923.
Jolley, Alternat. Current Rectification. London 1926.
Krause-Jahn, Elektrische Maschinenmessungen. 5. Aufl. Berlin 1925.
Linker, Elektrotechnische Meßkunde. 3. Aufl. Berlin 1923.
Niethammer, Elektromotoren I. Sammlung Göschen, Bd. 798.
Niethammer, Elektromotoren II. Sammlung Göschen, Bd. 799.
REM, Regeln für die Bewertung und Prüfung elektrischer Maschinen. Herausgegeben vom VDE (Verband Deutscher Elektrotechniker). Berlin 1923.
RET, Regeln für die Bewertung und Prüfung elektrischer Transformatoren. Herausgegeben vom VDE. Berlin.
Sallinger, Die asynchronen Drehstrommaschinen. Berlin 1928.
Sallinger, Die Gleichstrommaschine II. Sammlung Göschen, Bd. 881.
Sallinger, Transformatoren. Sammlung Göschen, Bd. 952.
Sallinger, Wechselstromerzeuger. Sammlung Göschen, Bd. 547.
Schenkel, Die Kommutatormaschinen. Berlin 1924.
Skirl, Elektrische Messungen. Siemens Handbücher IV. Berlin 1928.
Vidmar, Die Transformatoren. 2. Aufl. Berlin 1925.

Zeitschriften.

- ETZ: Elektrotechnische Zeitschrift.
Archiv: Archiv für Elektrotechnik.
Helios: Fachzeitschrift für Elektrotechnik.
E. im B.: Elektrizität im Bergbau.
ZVDI: Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure.
Forschungsarbeiten des VDI.
-

Formelzeichen.

A	=	Ampere
AW	=	Amperewindungen
\mathfrak{B}	=	magnetische Induktion
C	=	elektrische Kapazität
$c_1 \dots c_n$	=	Konstanten
E, e	=	Elektromotorische Kraft EMK (Plural EMKe)
f	=	Frequenz
g	=	Erdbeschleunigung
\mathfrak{H}	=	magnetische Feldstärke
I, i	=	Stromstärke
J	=	Trägheitsmoment
M	=	Drehmoment
m	=	Masse
N	=	Leistung
p	=	Polpaarzahl
n	=	minutliche Drehzahl
n_σ	=	Schlüpf Touren
P	=	Kraft
R, r	=	elektrischer Widerstand
T	=	Schwingungsdauer (volle Schwingung)
t	=	Zeit
U	=	Spannung
W, w	=	Windungszahl
W	=	Watt
kW	=	Kilowatt
η	=	Wirkungsgrad
φ	=	Winkel der Phasenverschiebung
$\cos \varphi$	=	Leistungsfaktor
Φ	=	magnetischer Fluß
$\omega = 2 \pi n$	=	Winkelgeschwindigkeit
$2 \pi f$	=	Kreisfrequenz
v	=	Streuungskoeffizient
τ	=	Strefaktor
σ	=	prozentuale Schlüpfung
\approx	=	ungefähr gleich

1. Kapitel. Mechanische Hilfsmessungen.

§ 1. Umlaufzähler.

Umlaufzähler (Tourenzähler) bestehen in der einfachsten Form aus einer Welle mit Schnecke, Schneckenrad, Zeiger und Skala. In der Regel soll die in einem bestimmten Zeitabschnitt erfolgte Drehzahl gemessen werden; in diesem Fall gehört zum Tourenzähler eine Uhr, meist eine Stech- oder Stoppuhr. Über einen sehr genauen Sekundenmesser von Siemens, bei dem die Zahl der während des Meßvorganges verstrichenen Perioden eines Wechselstroms gemessen wird, s. ETZ 1928, S. 1651. Vielfach sind Tourenzähler und Uhr zusammen verbunden, so daß ihr Mechanismus gleichzeitig ein- und ausgerückt wird. Bei den Tourenzählern von Jaquet wird z. B. das Zählwerk nach einer Umlaufzeit von 1,5'' genau 6'' lang freigegeben; die Skala gibt die minutliche Drehzahl an unter Voraussetzung konstanter Drehgeschwindigkeit.

§ 2. Tachometer.

Die Apparate zur Messung der Drehgeschwindigkeit geben in der Regel die minutliche Drehzahl n an. Die Winkelgeschwindigkeit ω ist durch die Beziehung gegeben:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} .$$
 Als Meßprinzip benutzt man u. a. die Flieh-

kraft, Wirbelströme, die Resonanz und magnetelektrische Maschinen.

a) Fliehkrafttachometer. Bei einer Ausführungsform nach dem Prinzip des Zentrifugalreglers sind Schwungmassen über Gelenke und Hülse mit der Zählerwelle verbunden. Je größer ω , um so mehr werden sie von der Achse weggeschleudert; dieser Bewegung wirkt eine Feder entgegen, die gespannt wird und das Richtvermögen (früher Direktionskraft genannt) gibt. Die Einstellungsänderung der Schwungmassen und damit die Verschiebung der Hülse auf der Welle ist ein Maß für ω ; sie wird auf einen Zeigermechanismus übertragen. Wegen der quadratischen Beziehung zwischen Fliehkraft und ω ist die Skala am Anfang gedrängt, die Meßgenauigkeit unter ca. $\frac{1}{3}$ der Drehzahl für Vollausschlag gering. Um innerhalb eines bestimmten Meßbereiches eine große Empfindlichkeit (d. h. große Einstellungsänderung bei geringer Drehzahländerung) zu erhalten, baut man Tachometer mit abgekürzter Skala.

Handtachometer werden vielfach mit verschiedenen Meßbereichen versehen. Bei unbekannter Drehzahl stets mit der unempfindlichsten Skala beginnen! Achse des Tachometers in die Verlängerung der Maschinenwelle (nicht schief!) halten, ohne stark gegen die Welle zu drücken.

Bei den Flüssigkeitstachometern nach dem Fliehkraftprinzip wird eine Flüssigkeit von großer Dichte gegen die Außenwand geschleudert und dadurch der Spiegel einer darüber befindlichen spezifisch leichteren Flüssigkeit in einer vertikalen Röhre verschoben.

b) Wirbelstromtachometer. Ein Hufeisenstahlmagnet ist auf der Zählwelle derart befestigt, daß die magnetische und die Zählerachse zusammenfallen. Eine in der Nullstellung durch eine Feder festgehaltene metallische

Scheibe oder Glocke ist um die gleiche Achse so gelagert, daß sie bei der Drehung der Welle von den Kraftlinien des Stahlmagneten geschnitten wird. Es entstehen in ihr Wirbelströme i , die nach dem Lenzschen Gesetz die Scheibe in der Drehrichtung mitzunehmen suchen; die Feder wird gespannt, die Scheibe um den Winkel α gedreht. Für den Gleichgewichtszustand gilt:

$$C \alpha = c \mathfrak{H} i = c' \mathfrak{H}^2 \frac{\omega}{R};$$

es bedeuten C die Torsionskonstante der Feder, c und c' Konstanten, \mathfrak{H} die Feldstärke des Magneten, ω die Drehgeschwindigkeit der Welle, R der Widerstand der Wirbelströme in der Metallscheibe. Nach der Formel ist der Drehwinkel α der Drehgeschwindigkeit der Welle direkt proportional, daher die lineare Skala. Für ein einwandfreies Arbeiten ist Bedingung: Konstanz von \mathfrak{H} und Unabhängigkeit des Widerstandes R von der Temperatur. Da der Ausschlag von der Drehrichtung abhängig ist, so muß der Nullpunkt in der Mitte liegen, wenn nach beiden Drehrichtungen gemessen werden soll.

c) Resonanz. Ein Wechselstromelektromagnet wirkt auf eine Anzahl einseitig eingespannter, abgestufter Stahlfedern; je mehr die Eigenschwingungszahl einer Feder mit der Frequenz des Wechselstroms übereinstimmt, um so mehr gerät sie ins Mitschwingen. Der Wechselstromgenerator (Geber) ist eine kleine, mit der Maschinenwelle gekuppelte magnetelektrische Maschine, in deren Ankerspulen EMKe erzeugt werden, deren Frequenz nur von ihrer Drehzahl und Polpaarzahl abhängt. Die Ankerklemmen werden über eine Leitung mit dem Elektromagneten verbunden. Einfachster Fall einer Fernmessung. Leider ändern sich die elastischen Eigenschaften und damit die Eigenschwingungsdauer der Federn trotz vorheriger

künstlicher Alterung, so daß diese Frequenzmesser öfters nachgeeicht werden müssen.

Zur Erregung der einzelnen, auf einen gemeinsamen Steg kammartig montierten und abgestimmten Federn genügen nach Frahm die Erschütterungen einer Maschinengrundplatte, die bei jeder Umdrehung auftreten, da der Schwerpunkt der rotierenden Massen nie ganz genau in die geometrische Achse der Maschine fällt. Der Apparat wird auf das Maschinenfundament befestigt; diejenige Feder führt die stärksten Schwingungen aus, die auf die gleiche Schwingungszahl wie die Drehzahl der Maschine abgestimmt ist.

d) Tourendynamo. Mit der Maschinenwelle wird eine kleine magnetelektrische Gleichstrommaschine oder noch besser ein Generator mit konstant gehaltener Fremderregung verbunden. Die EMK ist der Drehzahl proportional und kann mit einem Spannungsmesser gemessen werden. Die Bürsten müssen gut aufliegen, nicht schwingen, der Kollektor soll sauber und rund sein zur Vermeidung unkontrollierbarer größerer Übergangswiderstände; die Kollektor- und Nutenteilung darf nicht grob sein, der Spannungsmesser soll möglichst hohen Eigenwiderstand besitzen (Drehspulinstrument).

e) Die Messung des Ungleichförmigkeitsgrades der Drehgeschwindigkeit — hervorgerufen durch ungleichförmigen Antrieb oder ungleichförmige Bremskraft — geschieht mittels Tachographen oder besonderer Vorrichtungen, dessen nähere Beschreibung hier zu weit führen würde (s. u. a. Helios 1928, S. 273).

§ 3. Beschleunigungsmessung.

a) Elektrische Apparate¹⁾. Einfache und zuverlässige Apparate zur Messung der Drehbeschleunigung gibt es

¹⁾ Siehe Ke in a th: Technik elektrischer Meßgeräte II, S. 322.

nicht. Nach dem Vorschlag von Lomonosoff (Abb. 1) wird ein Transformator T mit großem Luftspalt in den Ankerkreis einer Tourendynamo G mit möglichst feiner Kollektor- und Nutenteilung eingeschaltet, so daß der magnetische Fluß von T dem Ankerstrom direkt proportional ist. In einer Sekundärwicklung, die über einen empfindlichen Gleichstromspannungsmesser mV von kurzer Schwingungsdauer geschlossen ist, wird eine EMK e_2 bei jeder Änderung des Primärstromes i_1 induziert. Es ist

$$e_2 = W_2 \frac{d\Phi}{dt} = c \frac{di_1}{dt}, \text{ und}$$

da i_1 der Drehzahl proportional ist, so erhalten wir

$$e_2 = c_1 \frac{d\omega}{dt}. \text{ Auch bei An-}$$

wendung einer hohen Windungszahl W_2 ist e_2 gering und daher ein sehr empfindliches Meßgerät erforderlich; e_2 nimmt ferner einen unzulässig hohen Wert an, wenn der Gleichstromkreis versehentlich plötzlich unterbrochen wird und das Feld Φ zusammenbricht; zum mindesten wird der Spannungsmesser verbrannt.

Nach Ytterberg (Abb. 2) ist der Anker einer für möglichst hohe Spannungen gebauten Tourendynamo G über einen Kondensator C und einen Strommesser geschlossen. Jeder Drehzahländerung entspricht eine Spannungs- und Ladungsänderung und damit ein Ladestrom i am Kondensator.

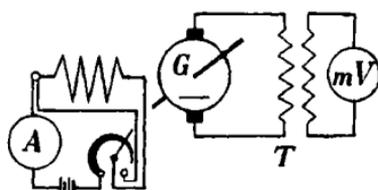


Abb. 1. Beschleunigungsmesser nach Lomonosoff.

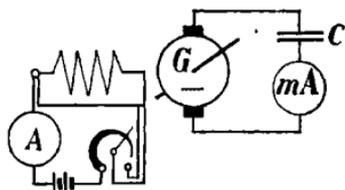


Abb. 2. Beschleunigungsmesser nach Ytterberg.

Es ist $i = \frac{dQ}{dt} = C \frac{dU}{dt} = c_1 \frac{d\omega}{dt}$, wobei Q die Ladung, C die Kapazität, U die Spannung am Kondensator und c_1 eine Konstante bedeutet. Hier stören vor allem die Gleichstrompulsationen infolge der endlichen Zahl der Kollektorlamellen und -nuten, sowie die Verluste und der endliche Widerstand im Kondensator.

Trotz der prinzipiellen Einfachheit dieser Meßmethoden haben sie sich bis jetzt wegen der besprochenen Mängel und

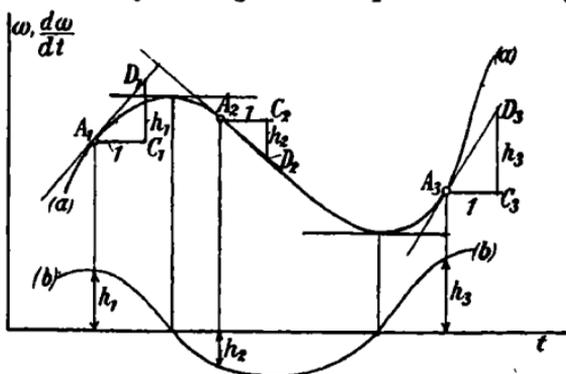


Abb. 3. Zeichnung einer Differentialkurve.

ihrer geringen Empfindlichkeit nicht durchsetzen können (s. hierüber Keinath, Elektr. Meßgeräte II, S. 322 1928).

b) Graphische Methode. Die Beschleunigungskurve kann durch eine graphische Differentiation der Geschwindigkeitskurve in Funktion der Zeit konstruiert werden. Abb. 3 zeigt (a) die Geschwindigkeits- und (b) die Beschleunigungskurve. Man legt in einem Punkt A_1 der a -Kurve eine Tangente an die Kurve, zieht durch A_1 eine Parallele zur Abszissenachse, trägt die Maßeinheit $= A_1C_1$ auf und errichtet im Endpunkt C_1 eine Senkrechte, die die Tangente in D_1 trifft. Dazu ist unter Berücksichtigung des

Maßstabes $\text{tg } C_1 A_1 D_1 = \frac{d\omega_1}{dt}$, und $C_1 D_1 = h_1$ ist die Drehzahländerung je Maßeinheit der Zeit. Die Konstruktion ist für einige Punkte A durchgeführt. An den Stellen, wo die ω -Kurve durch ein Maximum oder Minimum hindurchgeht, schneidet die b -Kurve die Abszissenachse, da für diese Punkte $\frac{d\omega}{dt} = 0$. Die Konstruktion muß sehr exakt ausgeführt werden; auch macht sich ein Fehler in der Urkurve a in erhöhtem Maße in der Differentialkurve b bemerkbar

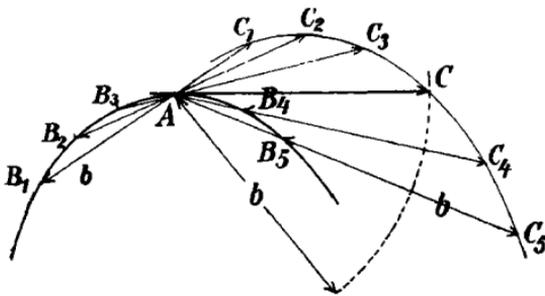


Abb. 4. Tangente an die Kurve durch A .

(s. u. a. Willers, Methoden der praktischen Analysis, S. 110ff. 1928).

Da diese Aufgabe relativ oft vorkommt, so sollen einige mathematische Hilfskonstruktionen angegeben werden. Die Tangente in einem beliebigen Punkt A kann folgendermaßen konstruiert werden (Abb. 4): Man legt durch A eine Anzahl Sekanten und trägt von ihren Schnittpunkten $B_1 \dots B_n$ mit der Kurve nach derselben Seite eine beliebige gleiche Strecke b auf. Die Endpunkte $C_1 \dots C_n$ von b verbindet man durch eine neue Kurve. Man schlägt mit b einen Kreisbogen um A , seinen Schnittpunkt C mit der neuen Kurve verbindet man mit A . Die gesuchte Tangente