

SAMMLUNG GÖSCHEN BAND 881

DIE GLEICHSTROMMASCHINE

VON

DR.-ING. KARL HUMBURG
Professor an der Technischen Hochschule Hannover

II. Band

Mit 38 Abbildungen

Zweite, durchgesehene Auflage



WALTER DE GRUYTER & CO.

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

BERLIN 1956

Alle Rechte, einschl. der Rechte der Herstellung von
Photokopien und Mikrofilmen, von der Verlagshandlung
vorbehalten



Copyright 1956 by Walter de Gruyter & Co.,
Berlin W 35, Genthiner Str. 13

Archiv-Nr. 11 08 81

Satz und Druck 1/10/14 Walter de Gruyter & Co.
5000/23/56

Printed in Germany

Inhalt des zweiten Bandes

I. Das betriebsmäßige Verhalten der Gleichstrom-Maschine	5
1. Schaltung und Kennlinien von Gleichstrom-Erzeugern	5
a) Gewöhnliche Stromerzeuger	5
b) Stromerzeuger für Sonderzwecke, insbesondere für Lichtbogenschweißung	11
c) Querfeldmaschinen	14
2. Schaltung und Kennlinien von Motoren	20
a) Schaltungen	20
b) Kennlinien	21
c) Anlauf und Drehzahlregelung	26
d) Bremsung	30
II. Verluste und Wirkungsgrad	33
1. Berechnung	33
2. Messung	43
III. Die Erwärmung	50
1. Grenzen der zulässigen Erwärmung	50
2. Messung der Erwärmung	52
3. Berechnung der Erwärmung bei Dauerbetrieb	54
4. Zeitlicher Verlauf der Erwärmung	59
IV. Die Größenbemessung	63
1. Allgemeine Grundsätze	63
2. Die Entwurfsgleichung	64
3. Die Beanspruchungen	69
4. Regeln des Ebenmaßes	72
5. Die Typenreihe	74
V. Berechnungsbeispiel	76
1. Hauptabmessungen	76
2. Der Anker	77
a) Wicklungsschema	77
b) Nutenabmessungen	79
c) Verluste und Erwärmung	81
3. Der Stromwender	84
4. Die Welle	86
5. Die Hauptpole	88
a) Polkerne und Joch	88
b) Magnetische Nachrechnung	91
c) Hauptpolwicklung	93
6. Die Wendepole	96
7. Wirkungsgrad	100
Sachregister für Band I und II	101

Inhalt des ersten Bandes

I. Der Aufbau der Gleichstrommaschine

1. Allgemeines
2. Der Ständer
3. Der Ankerkörper
4. Die Ankerwicklung
5. Der Stromwender
6. Die Bürsten und Bürstenhalter
7. Die tragenden Maschinenteile
8. Die Lüftung

II. Die Ankerwicklung

1. Begriffe und Bezeichnungen
2. Wicklungsregeln
3. Induzierte Spannungen
4. Ausgleichsverbindungen
5. Entwurf einer Gleichstromwicklung
6. Stromdichte und Strombelag

III. Der magnetische Kreis der Hauptpole

1. Die magnetischen Grundgesetze und Einheiten
2. Die Berechnung der Erregung bei Leerlauf
3. Die Berechnung der Erregung bei Belastung
4. Die Kompensationswicklung
5. Die Berechnung der Erregerwicklung

IV. Die Stromwendung

1. Die Dauer der Stromwendung
 2. Die Stromwendespannung
 3. Die Wendepole
 4. Die Stromzeitkurven und die Bürstenspannungskurven
 5. Bedingungen für gute Stromwendung
 6. Die Dämpfung
 7. Die Rückwirkung der Kurzschlußströme auf das Hauptfeld
-

I. Das betriebsmäßige Verhalten der Gleichstrommaschine

1. Schaltung und Kennlinien von Gleichstrom-Erzeugern

a) Gewöhnliche Stromerzeuger

Die gebräuchlichste Schaltung eines Gleichstrom-Erzeugers ist die mit Nebenschlußerregung (Selbsterregung) nach Bild 1b. Nur in besonderen Fällen wird Fremderregung nach Bild 1a angewendet. Noch seltener ist die Reihenschlußerregung nach Bild 1c. Häufiger wird eine Nebenschlußwicklung mit einer Reihenschlußwicklung („Verbundwicklung“) zu einer „Doppelschlußerregung“ verbunden (Bild 1d).

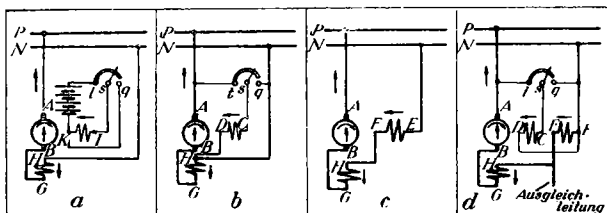


Bild 1. Schaltungen von Gleichstromerzeugern mit Wendepolen.
a Fremderregung. b Nebenschlußerregung. c Reihenschlußerregung.
d Doppelschlußerregung.

Bild 1 zeigt auch die durch VDE-Regeln festgelegte Klemmenbezeichnung: Netz $P-N$, Anker $A-B$, Nebenschlußwicklung $C-D$, Reihenschlußwicklung $E-F$, Wendepol- oder Kompensationswicklung $G-H$, fremderregte Wicklung $I-K$.

In den Kreis der Nebenschlußerregewicklung wird stets ein Regelwiderstand (Klemmen t und s in Bild 1) einge-

6 I. Das betriebsmäßige Verhalten der Gleichstrommaschine

schaltet. Die Nebenschlußwicklung soll aber nie ganz geöffnet werden, weil dabei ihre magnetische Energie einen starken Öffnungsfunken erzeugen würde. Sie wird statt dessen kurzgeschlossen über die Klemme q .

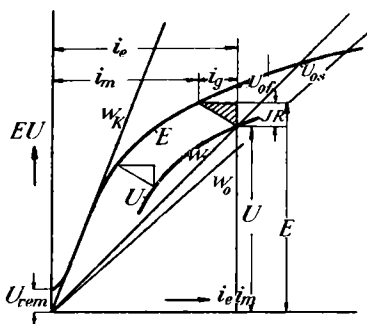


Bild 2. Erregerstrom-Kennlinien.

Das betriebsmäßige Verhalten der Maschinen wird durch Kennlinien dargestellt. Die wichtigsten Kennlinien für Stromerzeuger sind diejenigen, die die Spannung in Abhängigkeit vom Erregerstrom darstellen (Erregerstrom-Kennlinien, Bild 2) oder in Abhängigkeit vom Belastungsstrom (Laststrom-Kennlinien, Bild 3). Die Leerlaufkennlinie (Bd. I, Bild 42) ist in Bild 2 Kurve E nochmals wiedergegeben. Bei Belastung der Maschine ist zur Erregung des gleichen magnetischen Flusses ein höherer Erregerstrom notwendig. Der Unterschied soll als Gegenerrregung i_g bezeichnet werden. Auch ist bei Belastung die Klemmenspannung U kleiner als die induzierte Spannung E , und zwar um den Betrag der Ohmschen Spannung $I \cdot R$. (R = Ohmscher Widerstand des Ankers und der mit ihm in Reihe geschalteten Wicklungen einschließlich Übergangswiderstand am Stromwender). Die bei Belastung erforderliche Erregung i_e erhält man also durch Aufzeichnung des „Spannungsabfalldreiecks“ mit den Seiten i_g und $I \cdot R$ (Bild 2).

Die Gegenerrregung ist nicht einfach dem Strom proportional (s. Bd. I Seite 69). Auch die Ohmsche Spannung $I \cdot R$ ist nicht genau dem Strom proportional, weil sie auch

Das betriebsmäßige Verhalten der Maschinen wird durch Kennlinien dargestellt. Die wichtigsten Kennlinien für Stromerzeuger sind diejenigen, die die Spannung in Abhängigkeit vom Erregerstrom darstellen (Erregerstrom-Kennlinien, Bild 2) oder in Abhängigkeit vom Belastungsstrom (Last-

die Übergangsspannung an den Bürsten enthält (s. Seite 38). Für überschlägige Untersuchungen pflegt man trotzdem anzunehmen, daß das ganze in Bild 2 schraffierte Spannungsabfalldreieck dem Belastungsstrom I proportional ist.

Die Gegenerrregung ist auch nicht unabhängig von der Stärke des Hauptfeldes, also von der Erregung. Nur wenn man hiervon absieht, kann man, wie üblich, eine Erregerstromkennlinie für konstante Belastung konstruieren (Kurve U in Bild 2), indem man das Spannungsabfall-Dreieck einfach an der Leerlaufkennlinie entlang verschiebt.

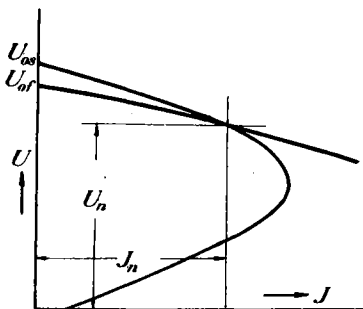


Bild 3. Laststrom-Kennlinien.

Das Spannungsabfall-Dreieck in Bild 2 sei für Nennlast gezeichnet. „Nennlast“ ist die Belastung, für die die Maschine bestimmt ist, und die auf dem Leistungsschild genannt ist: „Nennleistung“ $N_n =$ „Nennspannung“ $U_n \cdot$ „Nennstrom“ I_n .

Als „Spannungsänderung“ bezeichnet man die Spannungserhöhung bei Übergang von „Nennbetrieb“ auf Leerlauf. Sie kann aus den Kennlinien (Bild 2) gefunden werden. Die Spannungsänderung ist bei Selbsterregung (Nebenschlußerregung) wesentlich größer als bei Fremderregung. Bei Fremderregung kann die Leerlaufspannung U_0 aus der Leerlaufkennlinie für $i_e = \text{konst.}$ gefunden werden (U_{0f}). Bei Selbsterregung wird durch die Zunahme der Klemmenspannung bei Entlastung auch die Erregung vergrößert; die Klemmenspannung wird dadurch noch weiter erhöht. Als konstant zu betrachten ist hier der Widerstand im Erregerstromkreis, also der Quotient

8 I. Das betriebsmäßige Verhalten der Gleichstrommaschine

$U:i_e$. Dieser Widerstand ist in Bild 2 durch die Neigung des Strahles W dargestellt, der deshalb als „Widerstandsgerade“ bezeichnet wird. Die Leerlaufspannung bei Selbsterregung (U_{os}) ist nun durch den Schnitt der Widerstandsgeraden mit der Leerlaufkennlinie gegeben.

Wenn man die Klemmenspannung der Maschine abhängig von der Belastung (Strom I) bei unverändertem Erregerwiderstand für Fremderregung und für Selbsterregung aufträgt, so erhält man die in Bild 3 gezeichneten Kurven. Beachtenswert ist hier vor allem, daß bei Selbsterregung der Belastungsstrom gar nicht über einen bestimmten Grenzwert hinaus anwachsen kann, und daß bei Kurzschluß (Klemmenspannung $= 0$) der Strom wieder kleiner wird. Bei einer selbsterregten Maschine wird ja im Kurzschluß auch die Erregung $= 0$, der Kurzschlußstrom wird also nur noch durch die remanente Spannung (U_{rem} , Bild 2) getrieben. Bei Fremderregung dagegen ist der Kurzschlußstrom sehr groß, die Spannungsänderung dementsprechend klein.

Durch eine Verbundwicklung kann die Spannungsänderung nach Belieben vergrößert oder verkleinert werden. Eine größere Spannungsänderung ist erwünscht z. B. bei Schweißstromerzeugern oder bei Generatoren, die mit Pufferbatterien zusammenarbeiten sollen. Bei solchen Maschinen wird die Verbundwicklung so geschaltet, daß sie der Nebenschlußwicklung entgegenwirkt.

Eine kleinere Spannungsänderung wird verlangt für Maschinen, die ohne selbsttätigen Spannungsregler ein Netz mit konstanter Spannung speisen sollen. In diesem Fall muß die Verbundwicklung so geschaltet sein, daß sie die Nebenschlußwicklung unterstützt. Maschinen mit feldverstärkender Verbundwicklung arbeiten schlecht parallel. Ein gutes Parallelarbeiten wird ermöglicht durch eine Ausgleichsleitung (Bild 1d), welche die Verbundwicklungen allein miteinander parallel schaltet.

Wenn man bei einer selbsterregten Maschine den Widerstand des Erregerstromkreises verkleinert, so kann man die Leerlaufspannung erhöhen. Hier wird aber bald eine Grenze erreicht, sobald nämlich der Vorwiderstand ganz ausgeschaltet und nur noch der Widerstand der Erregerwicklung selbst im Erregerstromkreis enthalten ist (Widerstandsgerade W_0). Vergrößert man den Widerstand des Erregerstromkreises, so kann die Spannung zunächst stetig verkleinert werden. Bald aber, wenn nämlich die Widerstandsgerade die Leerlaufkennlinie berührt (Widerstandsgerade W_k), fällt die Spannung fast plötzlich bis auf einen Wert, der nicht viel größer ist als die remanente Spannung (U_{rem}). Man nennt den Widerstand des Erregerstromkreises, bei dem dieses plötzliche Absinken der Spannung beobachtet wird, den kritischen Widerstand.

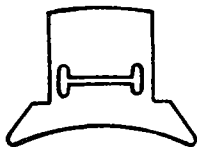


Bild 4. Isthmuspol.

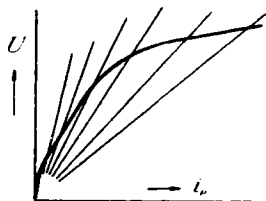


Bild 5. Leerlaufkennlinie einer Maschine mit Isthmuspol.

In manchen Fällen, z. B. bei Erregermaschinen für Drehstromgeneratoren, wird eine stetige Regelung bis zu einer sehr kleinen Spannung verlangt. Die Leerlaufkennlinie muß dann eine solche Form erhalten, daß ihr geradliniger Teil nicht mehr durch den Nullpunkt geht. Man erreicht dies, indem man parallel zu einem Luftspalt einen schmalen Eisensteg („Isthmus“) anbringt, etwa nach Bild 4, der schon bei geringer Spannung gesättigt ist. Die Leerlaufkennlinie einer solchen Maschine zeigt Bild 5. Hier hat jede der eingezeichneten

10 I. Das betriebsmäßige Verhalten der Gleichstrommaschine

Widerstandsgeraden einen wohldefinierten Schnittpunkt mit der Leerlaufkennlinie.

Die Leerlaufkennlinie E gilt für eine bestimmte Drehzahl. Bei kleinerer Drehzahl liegt sie niedriger. Ändert man mit der Drehzahl den Maßstab so, daß die Leerlaufkennlinie immer dieselbe bleibt, dann ändert sich die Neigung der Widerstandsgeraden umgekehrt proportional mit der Drehzahl. Bei einer bestimmten Drehzahl, die um so niedriger liegt, je geringer der Widerstand im Erregerstromkreis ist, kommt die Widerstandsgerade in die kritische Lage W_k . Man nennt diese Drehzahl die kritische Drehzahl. Unterhalb der kritischen Drehzahl ist die Maschine nicht imstande, sich selbst zu erregen; d. h. die Spannung steigt nicht wesentlich über die remanente Spannung.

Wenn man bei gleichbleibender Drehrichtung einer selbst-erregten Maschine die Erregerwicklung umpolt (die Klemmen C und D in Bild 1 b vertauscht), dann erregt sich die Maschine nicht. Die remanente Spannung erzeugt vielmehr dann in der Erregerwicklung einen Strom, der den remanenten magnetischen Fluß schwächt („Totschaltung“). Eine Umkehr der Spannungsrichtung (Umpolung) der selbsterregten Maschine ist also auf diese Art nicht zu erreichen. Um die Maschine umzupolen, muß man vielmehr durch einen Erregerstromstoß aus fremder Stromquelle die Richtung des remanenten Flusses ändern. Wird dann die Selbsterregung wieder eingeschaltet, dann erregt sich die Maschine von selbst trotz unveränderter Schaltung und Drehrichtung auf eine Spannung von entgegengesetzter Richtung.

Bei manchen Anwendungen (z. B. bei der Lichtbogenschweißung) kann ein unbeabsichtigtes Umpolen vorkommen, wenn z. B. nach einem Kurzschluß der Erregerstrom rascher verschwindet als der Kurzschlußstrom im Ankerstromkreis. Dieses Umpolen ist sehr unerwünscht; deshalb vermeidet man hier die reine Selbsterregung.

b) Stromerzeuger für Sonderzwecke,
insbesondere für Lichtbogenschweißung

Unter den Stromerzeugern, die für irgendwelche Sonderzwecke in außergewöhnlicher Bauart hergestellt oder in außergewöhnlicher Schaltung verwendet werden, sind die Schweißstromerzeuger die wichtigsten. Man verlangt von ihnen vor allem einen kleinen Kurzschlußstrom I_k , der den Arbeitsstrom I_a nur wenig überschreiten darf. Kurzschlüsse kommen ja beim Schweißen betriebsmäßig vor, wenn nämlich die Schweißelektrode mit dem Werkstück in Berührung gebracht wird, um den Lichtbogen entstehen zu lassen, oder wenn ein Tropfen von der Elektrode zum Werkstück übergeht. Auch muß der Arbeitsstrom und mit ihm der Kurzschlußstrom regelbar sein, weil der beim Schweißen benötigte Strom von der Stärke der zu verbindenden Werkstücke und vom Elektrodendurchmesser abhängig ist. Ferner muß der Schweißstromerzeuger eine „Zündspannung“ von etwa 70 V liefern können, obwohl die Lichtbogenspannung (Arbeitsspannung U_a) nur etwa den dritten Teil hiervon, nämlich 20–25 V beträgt.

Man erfüllt diese Forderungen am einfachsten dadurch, daß man den Schweißstromerzeuger für eine konstante Spannung U_0 von etwa 70 V auslegt, und in den Schweißstromkreis veränderliche Widerstände, je nach der gewünschten Arbeitsstromstärke, einschaltet. Bild 6 zeigt die Laststromkennlinien einer solchen Anlage. Man erhält aber dabei einen sehr schlechten Wirkungsgrad; denn von der erzeugten Spannung werden immer zwei Drittel in den Widerständen vernichtet. Deshalb wird dieses Verfahren nur bei Mehrstellen-Schweißanlagen angewendet. Hier braucht man einen Erzeuger konstanter Spannung, damit die verschiedenen Schweißstellen sich gegenseitig nicht stören.

Wenn ein Stromerzeuger nur eine Schweißstelle speisen soll, kann man ähnliche Laststromkennlinien (Bild 7) bei einer fremderregten Maschine durch eine starke Gegenverbund-

12 I. Das betriebsmäßige Verhalten der Gleichstrommaschine

wicklung erreichen. Durch einen Nebenwiderstand zur Gegenverbundwicklung, der einen kleineren oder größeren Teil des Arbeitsstromes an dieser Wicklung vorbeileitet, kann auch hier die Arbeitsstromstärke in weiten Grenzen verändert werden.

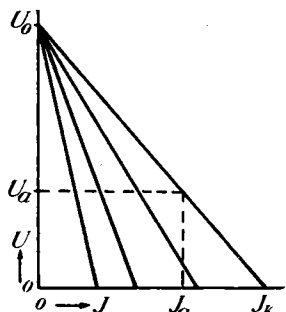


Bild 6. Laststromkennlinien einer Mehrstellenschweißanlage mit Regelwiderstand.

Noch ein wenig günstigere Laststromkennlinien gibt die Maschine für konstanten Strom nach Krämer, deren Verhalten an Hand der Erregerstromkennlinien (Bild 8) erklärt werden soll. Diese Maschine trägt neben einer fremderregten Wicklung und einer Gegenverbundwicklung noch eine selbsterregte (Nebenschluß-)Wicklung, deren Widerstand ungefähr der kritische (s. S. 9) ist. In einem weiten Spannungsbereich

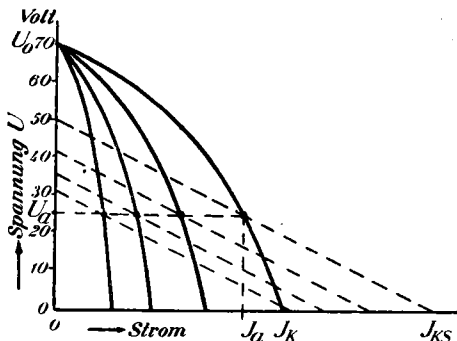


Bild 7. Laststromkennlinien einer Gegenverbundmaschine.
— Standkennlinien — Stoßkennlinien.

liefert deshalb die selbsterregte Wicklung allein gerade die zur Felderregung notwendigen Amperewindungen ($AW_s =$