

# Zur Regulierung von Drehstrommotoren

Autor(en): **Behn-Eschenburg, Hs.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **27/28 (1896)**

Heft 12

PDF erstellt am: **20.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-82331>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

INHALT: Zur Regulierung von Drehstrommotoren. — Romantische Skulpturen im Münster zu Basel. — Konkurrenzen: Primarschulhaus in Luzern. Kurhaus in Westerland a. Sylt. — Preisausschreiben: Verbesserungen an Elektrizitätszählern für den häuslichen Bedarf. — Miscellanea: Städtische Gerüstkontrollen in Zürich. Der Einsturz des Neubaus der Beckmannschen Baumwollspinnerei in Bocholt i. W. Lieferung der Tur-

bine für die elektrische Kraft- und Lichtzentrale der Société Lyonnaise des Forces Motrices du Rhône. Eine Gedenkfeier für Jakob Steiner und Ludwig Schläfli. Durchschlag des Horgener Tunnels der Linie Thalweil-Zug. Ein nachahmenswertes Vorgehen. Jura-Simplon-Bahn. — Korrespondenz. — Vereinsnachrichten: Zürcher Ing.- und Arch.-Verein. G. e. P.: Generalversammlung. XVII. Adressverzeichnis. Stellenvermittlung.

### Zur Regulierung von Drehstrommotoren.

Von Dr. Hs. Behn-Eschenburg.

Es ist bekannt, dass die Regulierung der Anzugskraft, der Anlaufstromstärke und der Geschwindigkeit von Drehstrommotoren durch Einschalten von regulierbaren induktionsfreien Widerständen in die Stromkreise des induzierten Systems oder des Ankers bei konstanter Klemmenspannung des primären feldbildenden Stromes gleich wirksam, gleich bequem und einfach, aber auch mit den gleichen Mängeln behaftet ist wie die Regulierung von Gleichstrommotoren, deren Feld durch einen Nebenschluss konstant erregt ist und deren Bürstenspannung durch Regulierwiderstände im Hauptstromkreis reguliert wird. Eine solche Regulierung von Drehstrommotoren ist wohl zuerst von Dolivo-Dobrowolsky angewandt und in einigen Ländern zum Patent angemeldet worden (Ende 1890). In Heft 1 der E. T. Z. 1896 habe ich für die Theorie dieser Regulierung einige Formeln abgeleitet (in denen ein paar augenfällige Fehler stehen geblieben sind). Im folgenden möchte ich den Vorgang und die Berechnung dieser Methode in praktischer Form darstellen.

Allgemein besteht zwischen der Geschwindigkeit des Motors, dem Widerstand der Ankerstromkreise und dem Drehmoment oder Belastungsmoment oder der Zugkraft des Motors die einfache Beziehung, dass das Drehmoment in Kilogrammetern nahezu gleich ist (genau ist es um 3% kleiner) der im Ankerwiderstand in Wärme umgesetzten elektrischen Energie in Watt, geteilt durch die Differenz der synchronen und der wirklichen Tourenzahl in der Minute. Daraus folgt, dass der Nutzeffekt des Motors allgemein kleiner ist als das Verhältnis der beiden Tourenzahlen.

Beim Anlaufen ist die wirkliche Tourenzahl null, bei normalem Betrieb soll die wirkliche Tourenzahl höchstens um 5% kleiner sein als die synchrone, bei Leerlauf soll die wirkliche Geschwindigkeit praktisch gleich sein der synchronen.

Es sollen folgende Zeichen gebraucht werden:

- $E_1, E_2$  Klemmenspannungen eines primären, bezüglich eines sekundären Stromes,
- $E_o$  sekundäre Klemmenspannung bei ruhendem Motor und offenen Ankerstromkreisen,
- $J_1, J_2$  Stromstärken eines primären, bezüglich eines sekundären Stromes,
- $J_o$  primäre Stromstärke bei Leerlauf oder offenem Anker,
- $J_a$  primäre Stromstärke beim Anlauf mit kurz geschlossenem Anker,
- $J_b$  sekundäre Stromstärke beim Anlauf in kurz geschlossenem Anker,
- $T_o$  synchrone Tourenzahl, Tourenzahl des Leerlaufs,
- $T$  wirkliche Tourenzahl bei irgend einer Belastung,
- $D$  Drehmoment des Motors in Kilogrammetern (Zugkraft mal Hebelarm),
- $A$  Arbeitsleistung des Motors in Watt (inklusive mechanische und magnetische Reibungsarbeit),
- $s$  Schlüpfung des Motors,
- $N_1, N_2$  Zahl der primären, bezüglich sekundären Ströme verschiedener Phase (in der Regel  $N_1 = N_2 = 3$ ),
- $W_1, W_2$  Windungszahlen einer Phasenabteilung,
- $r_1, r_2$  ohmscher Widerstand einer Phasenabteilung,
- $R$  zugeschalteter Regulierwiderstand im Stromkreis einer sekundären Phase.

Wir führen folgende Abkürzungen ein:

$$m = \frac{w_1^2}{w_2^2} \cdot \frac{N_1}{N_2} \quad (\text{in der Regel } m = \frac{w_1^2}{w_2^2})$$

$$s l_2 = \frac{s E_1}{m \cdot J_a} \text{ scheinbarer induktiver Widerstand einer Ankerphase.}$$

Bekannt sind allgemein folgende Beziehungen:

$$A = D \cdot T \cdot 1,03 \dots \dots \dots (1)$$

$$S = \frac{T_o - T}{T_o} \dots \dots \dots (2)$$

$$\frac{J_o}{J_a} = 1 - \frac{E_o^2 \cdot W_1^2}{E_1^2 \cdot W_2^2} = \sigma, \dots \dots \dots (3)$$

wobei  $\sigma$  ein Mass für die magnetische Streuung im Motor ist.

An Stelle der Gleichheit in (3) tritt thatsächlich eine Grenzbeziehung

$$\frac{J_o}{J_a} = \sigma_{min}, 1 - \frac{E_o^2 \cdot w_1^2}{E_1^2 \cdot w_2^2} = \sigma_{max}$$

und es kann  $\sigma_{max}$  ungefähr dreimal grösser werden als  $\sigma_{min}$ .

Bei einem Betrieb des Motors mit normalen Stromstärken tritt ein Wert von  $\sigma$  in die Formeln, der ungefähr in der Mitte liegt. Da nun im folgenden in allen Formeln  $\sigma$  ausgedrückt ist durch den Quotienten  $\frac{J_o}{J_a}$ , so würde einerseits ein zu kleiner Wert von  $\sigma$  eingeführt sein, wenn für  $J_o$  und  $J_a$  die wirklich beobachteten Stromstärken des Leerlaufs und Anlaufs gesetzt werden und andererseits ein zu grosser Wert von  $\sigma$ , wenn für  $\frac{J_o}{J_a}$  die zweite Beziehung von Formel (3) gebraucht wird.

Wir nehmen an, dass diesem Umstand im folgenden bei jeder Anwendung der Formeln Rechnung getragen worden ist.

Die maximale Arbeitsleistung des Motors bei kurzgeschlossenem Ankersystem ist:

$$A_{max} = \frac{N_1}{2} E_1 J_a (1 - \sigma) \left( 1 - \frac{(r_1 + m r_2) J_a}{E_1} \right) \dots (4)$$

bei einer Tourenzahl:

$$T_m = T_o \left( 1 - \frac{m r_2 J_a}{E_1} - \frac{r_1 \cdot r_2 \cdot m J_a^2}{E_1^2} \right)$$

und der primären Stromstärke:

$$J_m = \frac{J_a}{\sqrt{2}}$$

Hierbei übt der Motor das maximale Drehmoment aus:

$$D_m = \frac{N_1 E_1 J_a}{2,06 \cdot T_o} \left( 1 - \frac{r_1 \cdot J_a}{E_1} \right) (1 - \sigma) \dots (5)$$

Allgemein für irgend eine Geschwindigkeit, irgend eine Belastung und irgend einen Ankerwiderstand erhält man:

$$J_1^2 = \frac{1,03 \cdot D (T_o - T)}{N_1 \cdot m (1 - \sigma) (r_2 + R)} \left( 1 + \left[ \frac{m (r_2 + R) J_o}{s E_1} \right]^2 \right) \dots (6)$$

$$J_2^2 = \frac{1,03 \cdot D (T_o - T)}{N_2 (r_2 + R)} = \frac{E_o^2 \cdot s^2}{\left( r_2 + R + s \cdot \frac{r_1}{m} \right)^2 \left[ 1 + \frac{l_2^2 s^2}{\left( r_2 + R + s \frac{r_1}{m} \right)^2} \right]} \dots (7)$$

$$s = \frac{N_1 \cdot J_a^2 (1 - \sigma) m (r_2 + R)}{2,06 \cdot D \cdot T_o} \left( 1 \pm \sqrt{1 - \frac{D^2}{D_{max}^2}} \right) \dots (8)$$

Das Anzugsmoment des Motors bei kurzgeschlossenem Anker ist:

$$D_a = \frac{N_1 \cdot J_a^2 (1 - \sigma) m \cdot r_2}{1,03 \cdot T_o} \dots \dots \dots (9)$$

Hierbei ist zu beachten, dass die Anzugskraft des Motors in verschiedenen Stellungen verschieden ausfallen kann, so lange der Ankerwiderstand klein ist gegenüber dem durch die Streuung bedingten induktiven Widerstand  $l_2$ , was für kurz geschlossene Anker allgemein gültig ist. Das Feld ist infolge der Nuten- oder Locheinschnitte im Eisen nicht für jede Gegenüberstellung der Anker- und Feldlöcher homogen. Es ist dann ein Mittelwert von  $D_a$  einzuführen.

Durch Aufnahme des Wertes von  $D_a$  vereinfacht sich die Formel (8) erheblich. Es wird:

$$s = \frac{D_a}{2D} \left( 1 \pm \sqrt{1 - \frac{D^2}{D_m^2}} \right) \frac{(r_2 + R)}{r_2} = \frac{T_o - T}{T_o} \dots (10)$$

Daraus folgt, so lange das *Belastungsmoment* des Motors konstant gehalten wird:

$$\frac{T_0 - T}{r_2 + R} = \text{konstant} \dots (11)$$

$J_2 = \text{konstant}$  und  $J_1 = \text{konstant}$ .

Die *Tourenzahle* ändert sich proportional dem *Ankerwiderstand*, dabei bleiben für alle Geschwindigkeiten die *Stromstärken* konstant.

Ob also der Motor im Ruhezustand oder bei normaler Geschwindigkeit ein gegebenes Drehmoment ausübe, die *Stromstärken* in Feld und Anker sind die gleichen; und Motoren, welche die volle Belastung mit geringerer als der normalen *Stromstärke* anziehen sollen, leiden am Beobachtungspersonal.

Die Formeln (13) geben zunächst Aufschluss über eine sehr einfache *Nutzeffektbestimmung* des Motors ohne *Bremung*. Der Motor wird im Ruhezustand festgehalten und wie bei einem Transformator wird für einen bestimmten sekundären *Belastungswiderstand*  $R$  die primäre und sekundäre elektrische Energie gemessen.

Die sekundäre Energie ist dabei:

$$W_2 = N_2 \cdot J_2 \cdot E_2 = N_2 \cdot J_2^2 R$$

und der *Nutzeffekt* des Motors für irgend eine Leistung  $A = W_2$

$$\eta = \frac{W_2}{N_1 \cdot E_1 \cdot J_1 \cdot \cos \varphi_1} = \frac{A}{N_1 E_1 J_1 \cos \varphi_1} \dots (12)$$

Beim stillstehenden Motor sind allerdings die mechanischen *Reibungsverluste* null, dagegen sind die *hysteretischen Verluste* im Anker im umgekehrten Verhältnis der *Schlüpfung* grösser als beim laufenden Motor, so dass sich in der Regel gute *Nutzeffektergebnisse* ergeben werden. Der *sekundäre Spannungsabfall* des Motortransformators ergibt sich aus:

$$E_2 = \frac{E_0}{\sqrt{\left[1 + \frac{(r_2 + \frac{r_1}{m})^2}{R}\right] + \frac{l_2^2}{R^2}}} \dots (13)$$

ganz analog dem *Spannungsabfall* eines Transformators.

Der für eine gegebene *Anzugskraft* erforderliche *Regulierwiderstand*  $R$  ist leicht aus der Formel zu berechnen.

$$R + r_2 = \frac{N_2 E_2^2}{1,03 \cdot D \cdot T_0} \dots (14)$$

woraus sich die *Näherungsformel* ergibt:

$$R + r_2 = \frac{0,8 \cdot N_1 \cdot E_1^2}{m \cdot T_0 \cdot D}$$

Das *maximale Anzugsmoment* tritt ein für:

$$R + r_2 = l_2 = \frac{E_1}{m \cdot J_a}$$

Es wird das *maximale Anzugsmoment* gleich dem *maximalen Belastungsmoment*, vergl. (5), nämlich:

$$D_m = \frac{3}{2} \frac{E_1 \cdot J_a}{1,03 \cdot T_0} \left(1 - \frac{r_1 \cdot J_a}{E_1}\right)$$

und hierbei die *Stromstärke*  $J_m = \frac{J_a}{\sqrt{2}}$ , wie auch unmittelbar aus (11) einleuchtet.

Für irgend eine gegebene *Geschwindigkeit* bei gegebenem *Belastungsmoment* ist der erforderliche Wert des *Regulierwiderstandes*  $R$  aus dem für das gleiche *Anzugsmoment* berechneten Wert von  $R$  zu erhalten durch *Division* durch den Betrag der *Schlüpfung*  $S$ .

Eine leichte Diskussion der Formel (10) für die *Schlüpfung*  $s$  zeigt, dass für jedes zulässige *Belastungsmoment* ein *labiler* und ein *stabiler Bewegungszustand* des Motors möglich ist.

Für den *labilen Zustand* gilt das obere Zeichen vor der Wurzel, es ist angenähert:

$$s = \frac{(r_2 + R) D_a}{r_2 D}$$

für den *stabilen Zustand* kann mit grosser Annäherung, so lange  $D < 0,8 \cdot D_{max}$ , gesetzt werden:

$$s = \frac{r_2 + R}{r_2} \cdot \frac{D_a \cdot D}{4 D_{max}^2} \dots (15)$$

woraus unmittelbar folgt:

$$\frac{T_0 - T_1}{T_0 - T_2} = \frac{D_1 (r_2 + R_1)}{D_2 (r_2 + R_2)}$$

Die *Differenz* der *synchronen* und *wirklichen Tourenzahl* des Motors wächst in gleichem Mass mit einer *Vergrößerung* des *Belastungsmomentes* und einer *Vergrößerung* des *Ankerwiderstandes*.

Der Quotient  $\frac{D}{D_{max}}$  erhält für praktischen Betrieb eine einfache Deutung. Bei normaler Belastung und kurzgeschlossenem Anker soll die *Schlüpfung* sehr klein sein, also  $T$  nahezu  $T_0$  sein. Es kann dann für normale Belastung das Verhältnis  $\frac{D}{D_m}$  nahezu gleich gesetzt werden dem Verhältnis der normalen Leistung des Motors zu der maximalen und drückt daher die *Ueberlastungsfähigkeit* des Motors aus. Die normale Leistung soll im Bereich des maximalen *Nutzeffektes* liegen, für den *maximalen Nutzeffekt* wurde an oben citierter Stelle die *Arbeitsleistung* berechnet:

$$A_n = N_1 \cdot E_1 \cdot J_0 (1 - \sigma) \sqrt{\frac{A_0}{N_1 \cdot J_0^2 r_1}} \dots (16)$$

$A_0$  stellt die *Leerlaufarbeit* des Motors für *Ueberwindung* der *Reibung* und *Hysterisis* dar.

$N_1 \cdot J_0^2 r_1$ , die im Kupfer der primären Wicklung beim *Leerlauf* umgesetzte Energie, das Verhältnis beider drücken wir aus durch den *Koeffizienten*  $c$  und erhalten so für den *Ueberlastungsquotienten*:

$$\frac{A_n}{A_{max}} = 2 \sigma \sqrt{c} = \frac{2 J_0}{J_a} \sqrt{c} \dots (17)$$

### Romanische Skulpturen im Münster zu Basel.

In dem vom Basler Münsterbauverein herausgegebenen, kürzlich erschienenen Prachtwerke über die Baugeschichte des Basler Münsters hat Herr Dr. Karl Stehlin ein besonderes Kapitel der Veröffentlichung gewidmet, die Architekt Christoph Rigggenbach in den fünfziger Jahren beabsichtigte, die aber leider durch seinen am 12. Juni 1863 erfolgten Tod nicht zum Abschluss gelangte. Bekanntlich hat Arch. Rigggenbach gemeinsam mit Bauinspektor Amadeus Merian die Restauration des Münsters in den fünfziger Jahren durchgeführt, die sich vornehmlich auf das Innere des Bauwerkes beschränkte und er hat bei dieser Gelegenheit eine grosse Zahl von Aufnahmen gemacht, die er seinem Werke beizugeben beabsichtigte. Nach seinem Tode fand sich von dem Text, der die bildlichen Darstellungen begleiten sollte, nichts vor, als das Konzept einer Einleitung und einige Andeutungen über die Anordnung des Inhaltes, dagegen waren zahlreiche Lithographien und Stöcke von Holzschnitten vorhanden, welche seine Hinterbliebenen dem Münsterbauverein schenkungsweise vermachten. Derselbe hat sodann die betreffenden Darstellungen in 18 Tafeln dem Werke beigelegt, ebenso auch die im Auftrage der Hinterbliebenen teils von Prof. G. Lasius in Zürich persönlich, teils unter seiner Leitung ausgeführten trefflichen Stahlstiche von Aufnahmen des ganzen Bauwerkes.

Indem wir uns vorbehalten, in einer späteren Nummer unserer Zeitschrift auf das ganze Werk mit seinen Beilagen zurückzukommen, sind wir heute dank der Gefälligkeit des Herrn Reg.-Rat H. Reese in der Lage, unsern Lesern nachfolgend einige Abdrücke der bereits erwähnten Holzschnitte vorlegen zu können. Herr Dr. Karl Stehlin bemerkt hierüber, dass sowohl die Lithographien, als auch die Holzschnitte seines Wissens zum ersten Male wirklich brauchbare, den Charakter der Originale getreu wiedergebende Abbildungen darstellen, denn die älteren Zeichnungen von Büchel<sup>1)</sup> und Guise<sup>2)</sup> können auf dieses Prädikat keinen Anspruch machen und auch die später von Cahier<sup>3)</sup> veröffentlichten stehen den Rigggenbachschen bedeutend nach.

<sup>1)</sup> Originale in den «Monumenta summi templa» (Kunstsammlung des Museums zu Basel), Reproduktionen einiger Stücke bei J. Burckhardt in Ehrenbergs Zeitschrift f. d. ges. Bauwesen Band III. Zürich 1839.

<sup>2)</sup> In der anonymen Münsterbeschreibung von 1842.

<sup>3)</sup> P. Charles Cahier, nouveaux mélanges d'archéologie, d'histoire et de littérature sur le moyen âge 1873—1875.