

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 28 (1937)
Heft: 19

Artikel: Der Anlaufvorgang bei elektromotorischen Antrieben
Autor: Hopfenwieser, St.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1059868>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 03.04.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

und es erklärt sich der Ausdruck «verzerrungsfreie Leitung» durch die Unabhängigkeit der räumlichen Dämpfung von der Frequenz.

Von den vielen interessanten Problemen, die man auf Grund der abgeleiteten Formeln noch lösen könnte, sollen nur noch mit Brillouin die Koeffizienten der Reflexion der Wanderwellen an einer beliebigen Impedanz Z_0 angegeben werden. Sofern sich diese am rechten Ende der Leitung befindet,

hat man nach Fig. 1 $Z_0 = \frac{U'}{I'}$, für das linke Ende

hingegen $Z_0 = -\frac{U}{I}$. Der Reflexionskoeffizient ist

für den Strom und für Impedanz rechts, nach Gl. (11), die ja auch für die gestrichenen Grössen gilt

$$\begin{aligned} \rho_1 &= \frac{I'_2}{I'_1} = \frac{I' Z - U'}{I' Z + U'} \\ &= \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \end{aligned}$$

Bei Impedanz links hat man dasselbe ρ , denn

$$\rho_2 = \frac{I_1}{I_2} = \frac{IZ + U}{IZ - U} = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0}$$

Für die Spannungen gelten wegen Gl. (11) die negativen Werte der Koeffizienten für die Ströme.

$$\rho_3 = \frac{U_2'}{U_1'} = -\frac{I_2' Z}{+I_1' Z} = -\rho_1$$

$$\rho_4 = \frac{U_1}{U_2} = -\rho_2$$

Man überzeugt sich leicht, dass keinerlei Reflexion stattfindet, wenn Z_0 gleich dem Wellenwiderstand Z ist. Dies ist auf Grund der Definition des Wellenwiderstandes natürlich nötig.

Es ist bemerkenswert, dass man mit rein algebraischen Methoden Resultate ableiten kann, für deren Herleitung die Infinitesimalrechnung im allgemeinen als unentbehrlich gilt.

Der Anlaufvorgang bei elektromotorischen Antrieben.

Von St. Hopferwieser, Baden.

621.316.717:621.313.13

Es wird ein einfaches Hilfsmittel für die graphische Behandlung von Anlaufvorgängen angegeben. Nach einem Hinweis auf die Eigenanlaufzeiten üblicher Motoren wird untersucht, wie sich das während des Anlaufs an die angetriebene Maschine abgegebene Drehmoment zum gesamten, vom Motor entwickelten Anlaufdrehmoment verhält. Daraus wird abgeleitet, dass die Form der Drehmomentlinie eines Motors auf die beim Anlauf in den Uebertragungsteilen erzeugten Beschleunigungsdrücke nur bedingt einen Einfluss hat.

L'auteur indique un moyen simple pour l'étude graphique des phénomènes de démarrage. Après quelques considérations sur la durée de démarrage des moteurs courants, il examine le rapport du couple appliqué pendant le démarrage à la machine entraînée au couple total développé par le moteur au démarrage. Il en déduit que la forme de la caractéristique du couple d'un moteur n'a que sous certaines conditions une influence sur les pressions d'accélération exercées au démarrage dans les organes de couplage.

Eine Maschine in Betrieb setzen heisst, in der Sprache der Mechanik, sie aus dem Zustand der Ruhe in Bewegung zu überführen und auf die gewünschte Geschwindigkeit zu beschleunigen. Dieser «Anlaufvorgang» erfordert ein Drehmoment, das die gegebenen Bewegungswiderstände überwindet und mit einem verbleibenden Ueberschuss die zu bewegendenden Massen beschleunigt. Eine einfache Beziehung zwischen Beschleunigungsdrehmoment M (in mkg), dem GD^2 (in kgm^2) der zu bewegendenden Massen, bezogen auf die Enddrehzahl n (pro min) und der Anlaufzeit t (in s) auf deren Ableitung hier wohl verzichtet werden kann¹⁾, ermöglicht es, aus den gegebenen bekannten Grössen die vierte zu errechnen:

$$\text{Anlaufzeit } t = 2,67 \cdot \frac{GD^2}{M} \frac{n}{1000} \text{ in s, oder}$$

$$\text{Beschleunigungsdrehmoment } M = 2,67 \cdot \frac{GD^2}{t} \frac{n}{1000} \text{ in mkg.}$$

Führt man statt dem Drehmoment jenen Anteil P der Motorleistung ein, der für die Beschleunigung zur Verfügung steht, ausgedrückt in kW, so

lautet die für den praktischen Gebrauch etwas handlichere Beziehung, weil sich die Umrechnung auf das Drehmoment erübrigt:

$$t = 2,75 \frac{GD^2}{P} \cdot n^2 \cdot 10^{-6} \text{ in s, oder}$$

$$P = 2,75 \frac{GD^2}{t} \cdot n^2 \cdot 10^{-6} \text{ in kW.}$$

Diese für die Beschleunigung verfügbare Motorleistung P ist zu verstehen als jene Leistung, die dem Beschleunigungsmoment M , bezogen auf die Enddrehzahl n , entspricht.

Die Fluchtlinien Fig. 1 sind ein bequemes Hilfsmittel, um solche Beschleunigungsvorgänge mit praktisch ausreichender Genauigkeit zahlenmässig zu erfassen. Ihre Benützung soll an einem Beispiel erklärt werden. Ein Motor von (10 PS =) 7,35 kW Leistung und einer Drehzahl von 1430 min habe beim Anlauf ein $GD^2 = 2 \text{ kgm}^2$, bezogen auf die Motordrehzahl, zu beschleunigen, wobei aber nur 50 % seines normalen Drehmomentes für die Beschleunigung zur Verfügung stehe. Das Beschleunigungsdrehmoment ist also 2,5 mkg, die «Beschleunigungsleistung» rund 3,7 kW. Man zieht vom Punkt 2,5 auf der M -Teilung eine Gerade durch den Punkt für n 1430 bis zur Hilfslinie 0—0.

¹⁾ Vgl. Brown-Boveri-Mitt. 1922, Nr. 9: «Beitrag zur Grössenbestimmung von Motoren für Zentrifugenantriebe.»

Vom Schnittpunkt mit dieser Linie durch den Punkt für $GD^2 = 2$ wieder eine Gerade gezogen, ergibt als Anlaufdauer rund 3 s.

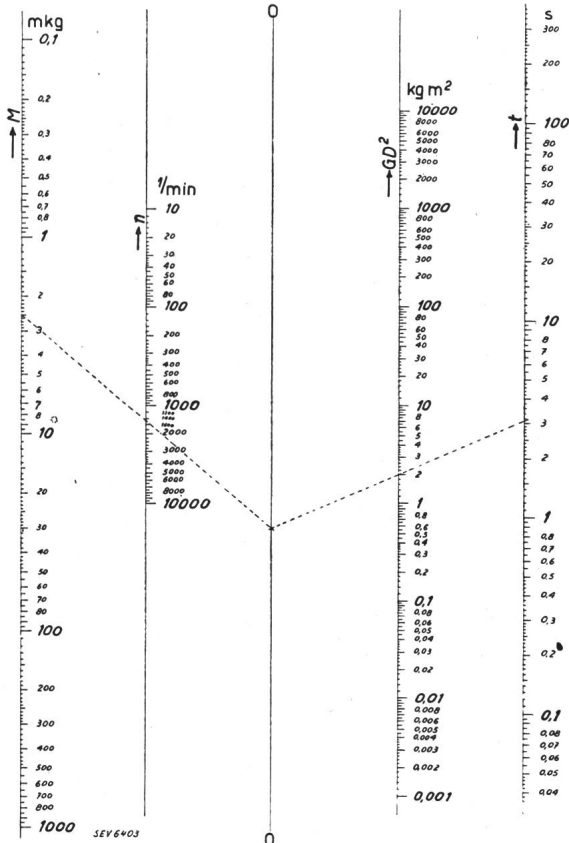


Fig. 1.

Fluchtlinien zur Bestimmung der Anlaufzeit.

- M für die Beschleunigung verfügbares Drehmoment in mkg.
- n Enddrehzahl pro min.
- GD^2 gesamtes Schwungmoment in kgm^2 , bezogen auf die Enddrehzahl n.
- t Anlaufzeit in Sekunden.
- 0—0 Hilfslinie.

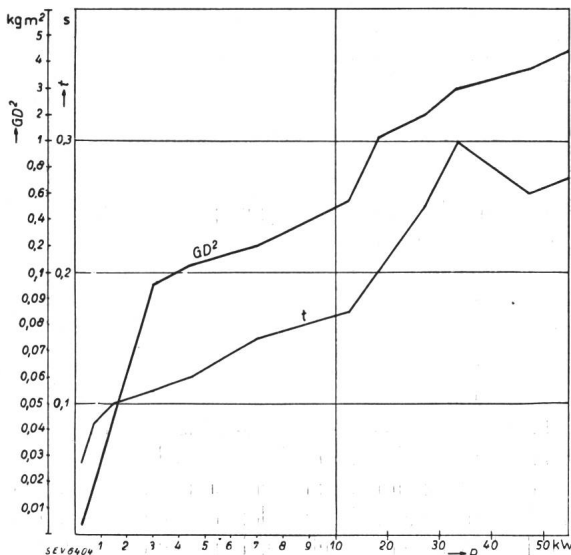


Fig. 2.

GD^2 und Eigenanlaufzeit (t) 4poliger Motoren mit Kurzschlussanker (50 Per./s) bei etwa 175% mittlerem Anlaufdrehmoment.

Um sich von den Anlaufzeiten, mit denen bei motorischen Antrieben zu rechnen ist, ein Bild zu machen, soll die Anlaufzeit unbelasteter Motoren

untersucht werden. In Fig. 2 ist für eine Reihe vierpoliger Dreiphasenmotoren mit Kurzschlussanker eines gegebenen Schwungmomentes die «Eigenanlaufzeit» unter der Voraussetzung eingetragen, dass ca. 175 % des der Nennleistung entsprechenden Drehmomentes für die Beschleunigung des Rotors zur Verfügung stehen, ein Drehmoment, das für solche Motoren eher zu niedrig als zu hoch gegriffen ist. Wie ersichtlich, sind die sich ergebenden Anlaufzeiten sehr kurz, viel kürzer als gemeinhin angenommen wird.

Der kleinste Motor der untersuchten Reihe mit 0,25 kW Leistung bei $n = 1420/min$ und einem $GD^2 = 0,004 kgm^2$ wird bei 175 % Beschleunigungsdrehmoment in der überraschend kurzen Zeit von etwa 0,055 s auf die volle Drehzahl beschleunigt. Dabei ist allerdings zu beachten, dass die Zeit, die zum Aufbau des magnetischen Feldes nötig ist und die etwa 1 Periode beträgt, nicht inbegriffen ist, so dass die Anlaufdauer, gemessen vom Augenblick des Einschaltens an, etwas länger als gerechnet sein wird. Ist aber das Motorfeld schon vorhanden, wie z. B. dann, wenn man den Motor im unmittel-

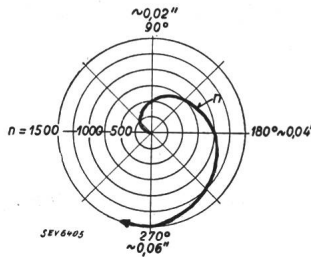


Fig. 3.

Unbelasteter Anlauf eines Dreiphasenmotors von 0,25 kW, 1420 U/min, $GD^2 = 0,004 kgm^2$

baren Anschluss an eine Gegenstrombremsung im andern Drehsinn anlässt, so wird die errechnete kurze Anlaufzeit auch tatsächlich auftreten. Wie schnell in einem solchen Fall der Motor sich beschleunigt, soll Fig. 3 zeigen. Hier ist im polaren Koordinaten-System — gewissermassen mit einem Blick auf die Motorwelle — ersichtlich, dass der Motor schon nach $3/4$ Umdrehung die volle Drehzahl erreicht. Ein Ruck von 90° , ausgeführt in ca. 0,02 s, genügt, um bereits eine Drehzahl von 500/min zu erreichen. Die Kenntnis dieser Verhältnisse ist für viele Fälle von Wichtigkeit.

In der Beurteilung der während des Anlaufs in den Uebertragungsgliedern auftretenden Beschleunigungskräfte wird oft der Form der Kurve, die den Verlauf des Anlaufdrehmomentes in Abhängigkeit von der Drehzahl darstellt, grosse Bedeutung beigemessen. Es lohnt sich, dieser Frage nachzugehen.

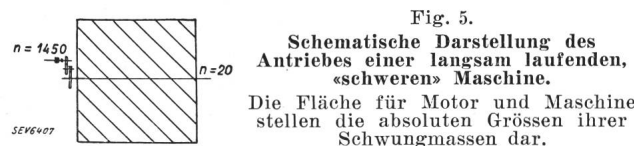
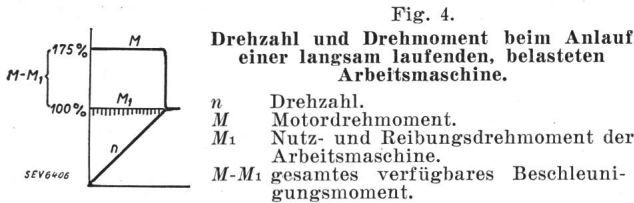
Während ein Motor im Lauf, gleichbleibende Drehzahl vorausgesetzt, stets nur soviel Drehmoment erzeugt und an seinem Wellenende abgibt, als die angetriebene Maschine benötigt, entwickelt er im Anlauf entsprechend seiner Drehmomentlinie ein Moment, das jenes der Arbeitsmaschine erheblich übersteigt, um die angestrebte Beschleunigung zu ermöglichen. Meistens nimmt man an, dass der Motor mit diesem Anlaufdrehmoment, das er ja tatsächlich entwickelt, auch die Maschine «hochreisst». Dass diese Annahme, wenigstens in

dieser allgemeinen Form, bei weitem nicht stimmt, zeigt eine einfache Ueberlegung:

Eine Maschine, die für den Antrieb durch einen 1-kW-Motor gebaut ist, werde mit einem Motor von 100 oder 1000 kW gekuppelt und mit diesem angeordnet. Läuft nun der Motor mit kräftigem Drehmoment an, dann müsste, wenn dieses Drehmoment sich auf die Maschine übertragen würde, diese durch die 100 bis 1000 Mal zu grossen Kräfte augenblicklich zerstört werden. Dass dies nicht eintritt und die Maschine den Anlauf ebenso gut oder sogar noch leichter übersteht, als wenn sie mit einem 1-kW-Motor angetrieben würde, unterliegt keinem Zweifel. Wie wirkt sich nun das grosse Anlaufdrehmoment aus? Das möge der Anschaulichkeit halber an einem Zahlenbeispiel untersucht werden:

Ein Kurzschlussankermotor von 7,5 kW Leistung und $n = 1450/\text{min}$, dessen GD^2 einschliesslich Kupplung $0,35 \text{ kgm}^2$ betrage, treibe über ein Getriebe eine schwere Maschine an, deren $GD^2 = 500 \text{ kgm}^2$ bei $n = 20/\text{min}$ betrage.

Das Nenndrehmoment des Motors beträgt $\frac{7,5}{1450} \cdot 975 = \text{ca. } 5 \text{ mkg}$, das mittlere Anlaufdrehmoment sei 175 % davon = $8,75 \text{ mkg}$. Angenommen, dass während des Anlaufs für die Ueberwindung des Nutz- und Reibungsmomentes 5 mkg aufzuwenden sind, verbleiben $3,75 \text{ mkg}$ als Beschleunigungs-Drehmoment (Fig. 4).



Die ungefähre Massenverteilung auf Motor und Maschine zeigt Fig. 5, wobei die gezeichneten Flächen den gegebenen Werten des GD^2 entsprechen. Diese Darstellung ist aber irreführend, weil sie nichts über die tatsächliche Bewertung der sich auf verschiedene Drehzahlen beziehenden Schwungmomente aussagt. Umgerechnet auf die Motordrehzahl beträgt das GD^2 der Arbeitsmaschine nur $500 \cdot \left(\frac{20}{1450}\right)^2 = 0,095 \text{ kgm}^2$, und somit das gesamte auf diese Drehzahl bezogene Schwungmoment $0,35 + 0,095 = 0,445 \text{ kgm}^2$.

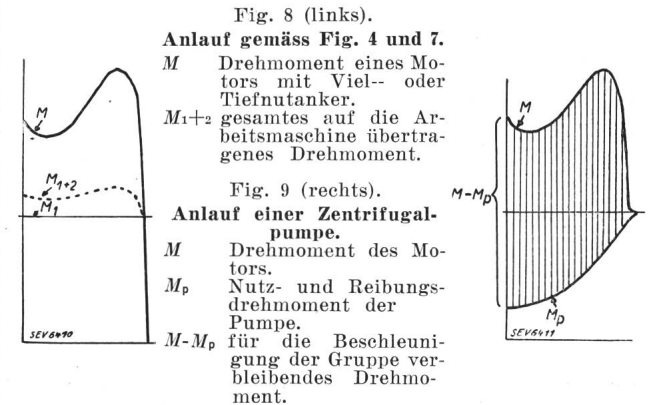
Fig. 6 stellt in einem etwas grösseren Maßstab diese richtig bewertete Massenverteilung dar. Das

Bild hat sich von Grund auf geändert. Trotz der «sehr schweren» Maschine liegt der überwiegende Anteil der Massen im Motor und dementsprechend entfällt auf ihn auch der weitaus grössere Aufwand für die Massenbeschleunigung. Nach der eingangs aufgestellten Beziehung ist, um die $0,445 \text{ kgm}^2$ mit einem Drehmoment von $3,75 \text{ mkg}$ auf 1450 U/min zu beschleunigen, eine Zeit von $0,46 \text{ s}$ nötig. Dabei werden von den $3,75 \text{ mkg}$ Beschleunigungsdrehmoment, entsprechend der Massenverteilung nach Fig. 6, für den Motor und seine Kupplung $2,95 \text{ mkg}$, und für die Arbeitsmaschine nur $0,8 \text{ mkg}$ verbraucht. Mit den für das Nutz- und Reibungsmoment erforderlichen 100 % werden daher während des Anlaufs 116 % des Motor-Nenndrehmomentes auf die Arbeitswelle abgegeben, während die verbleibenden



59 % zur Beschleunigung des Motors selbst und seiner Kupplung verbraucht werden (Fig. 7). Das lässt sich leicht nachweisen, denn das Drehmoment, das für die Beschleunigung des GD^2 von $0,35 \text{ kgm}^2$ auf 1450 U/min in $0,46 \text{ s}$ nötig ist, errechnet sich aus: $2,67 \frac{0,35}{0,46} \cdot 1,45 = 2,95 \text{ mkg}$, was 59 % von 5 mkg ausmacht.

Man ersieht daraus, dass in dem angenommenen Beispiel nur ein kleiner Teil des gesamten, für die Beschleunigung verfügbaren Drehmomentes über das Getriebe auf die Arbeitswelle übertragen wird. Verläuft das Anlaufdrehmoment des Motors nach Linie M, Fig. 8, und entspricht das zu 100 % angenommene Drehmoment der Nutzlast samt Reibung der Linie M_1 , so verläuft das gesamte, vom Motorwellenende während des Anlaufs übertragene Drehmoment nach Linie M_{1+2} . Die grossen Aenderungen des Anlaufdrehmomentes schrumpfen in dem



angenommenen Beispiel bei der Uebertragung auf die Arbeitsmaschine auf ein praktisch gleichbleibendes Drehmoment zusammen. Diese Feststellung ist wichtig. Nicht nur in Propagandaschriften, sondern

auch in der Fachliteratur wird häufig die Meinung vertreten, dass ein Motor mit flacher Drehmomentlinie, die beispielsweise dem Motor mit Doppelnutanker eigen ist, gleichmässige Massendrücke während der Beschleunigungsperiode verursache, was die Uebertragungsteile schonen. Dass dies in dieser allgemeinen Form bei weitem nicht stimmt, beweist nicht nur die eben angestellte Ueberlegung, sondern auch das Beispiel der Zentrifugalpumpe (Fig. 9). Man sieht, dass infolge des nahezu quadratisch mit der Drehzahl steigenden Pumpendrehmomentes gerade der übliche Drehmomentsverlauf des Motors mit Vielnut- oder Tiefnutanker eine praktisch gleichbleibende Beschleunigung verursacht.

Wesentlich anders dagegen liegen die Verhältnisse bei raschlaufenden Maschinen. Wenn z. B. ein Motor mit 3 kW Leistung, 1450 U/min, mit einem $GD^2 = 0,1 \text{ kgm}^2$, die mit 6000 U/min laufende Arbeitswelle einer Holz-Hobelmaschine antreibt, deren $GD^2 = 0,27 \text{ kgm}^2$ beträgt, was auf 1450 U/min bezogen 4,6 kgm^2 ausmacht, so ergibt sich für den unbelasteten Anlauf mit 175 % Drehmoment eine Anlaufzeit von etwa 5,2 s, gegenüber rund 0,1 s Eigenanlaufzeit des Motors. Hier wird also so gut wie das gesamte, vom Motor entwickelte Drehmoment als Beschleunigungsdrehmoment wirksam und wenn irgendwo, so liesse sich hier, oder ganz allgemein gesprochen, bei starker Uebersetzung ins Schnelle, die Verwendung eines Motors mit flacher Drehmomentcharakteristik zur Erzielung gleichmässiger Beschleunigungsdrücke rechtfertigen. Ob dies auch praktisch von Bedeutung ist, bleibe hier unerörtert.

Die angeführten Beispiele zeigen, dass die Beschleunigungsdrücke von ganz anderer Grössenordnung sind, als man nach oberflächlicher Beurteilung auf Grund des vom Motor entwickelten Anlaufdrehmomentes annimmt. Es geht aber daraus auch hervor, dass die Kenntnis des Motor-Anlaufdrehmomentes *allein* überhaupt keine Schlüsse auf den Verlauf des während des Anlaufes übertragenen Drehmomentes zulässt, sondern dass dieses Mo-

ment (oder die Beschleunigungsdrücke) sich nur ermitteln lässt, indem man die Verteilung der gesamten Schwungenergie auf Motor und Maschine berücksichtigt:

Bedeutet:

M	das vom Motor entwickelte (mittlere) Anlaufdrehmoment,	
M_1	das von der Maschine während des Anlaufes benötigte Nutz- und Reibungs-Drehmoment,	} auf die Motor-Drehzahl bezogen
GD^2_m	das Schwungmoment des Rotors des Motors (einschliessl. Kuppelung oder dergleichen),	
GD^2_a	das Schwungmoment der bewegten Teile der Arbeitsmaschine (einschliesslich Uebertragungsorganen),	

so ist das von den Uebertragungsorganen während des Anlaufes auf die Maschine übertragene Drehmoment = $M_1 + (M - M_1) \frac{GD^2_a}{GD^2_a + GD^2_m}$.

Zusammenfassend ergibt sich:

1. Bei langsamlaufenden Arbeitsmaschinen ist in der Regel die Beschleunigungsarbeit klein und die Anlaufzeit kurz, weil die in den bewegten Massen beim Anlauf aufzuspeichernden Energien durch das Quadrat der Drehzahl bestimmt sind und der Einfluss selbst grosser Massen zurücktritt.

2. Dagegen ist bei raschlaufenden Arbeitsmaschinen, auch wenn es sich um verhältnismässig kleine Massen handelt, die Beschleunigungsarbeit und damit die Anlaufzeit verhältnismässig gross.

3. Als Beschleunigungsdrehmoment wird vom Wellenende des Motors nicht die ganze Differenz zwischen dem Anlaufdrehmoment und dem Drehmoment der statischen Bewegungswiderstände übertragen, sondern nur ein Bruchteil davon, der durch die Verteilung der gesamten Schwungenergie auf Motor und Arbeitsmaschine bestimmt ist.

Der Verlauf des Anlaufdrehmomentes des Motors ist daher für die erzeugten «Beschleunigungsdrücke» nur recht bedingt von Einfluss.

Mesures et dispositifs à adopter en traction électrique pour réaliser des économies d'énergie.

621.331 : 625.1.003

A. Préambule.

Ce sujet fit l'objet d'une des questions portées à l'ordre du jour de la 13^e session de l'Association internationale du Congrès des Chemins de fer, session tenue en juin 1937 à Paris; il fut le complément de la question de l'électrification des chemins de fer au point de vue économique, traitée dans la 12^e session de 1933, qui incorpora deux questions auxiliaires, savoir: le choix de l'emplacement des usines et du système de courant. Ces dernières ne furent pas reprises, mais constituèrent la ligne de démarcation de la question à examiner.

Les rapports qui furent présentés sur la question de l'électrification des chemins de fer au point de vue économique relèvent entre autres qu'en électrifiant une ligne on cherche à économiser du charbon soit en utilisant des forces hydrauliques disponibles, soit en utilisant le charbon

dans des centrales thermiques, et que les électrifications de chemins de fer exigent de grands capitaux d'établissement, dont les intérêts et l'amortissement doivent être compensés par une forte diminution des frais d'exploitation. Cet aphorisme montre l'importance capitale que revêt le coût de l'énergie dans l'économie d'une exploitation électrique. Il n'est donc pas téméraire d'affirmer qu'en raison de cette nécessité de comprimer les dépenses d'exploitation, rien n'a été négligé pour diminuer la consommation d'énergie par tous les moyens économiques et rationnels connus et applicables à l'époque de la réalisation des diverses électrifications de chemins de fer.

La recherche de la solution la plus économique, à des époques différentes de l'évolution technique, devait donner lieu indubitablement à l'application des différents systèmes pratiques de traction électrique. Dès lors, tous les disposi-