

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 17 (1926)
Heft: 7

Artikel: Ueber Vorausbestimmung von Benutzungsdauer und Belastungsausgleich bei der Abgabe elektrischer Energie
Autor: Kummer, W.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1059805>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 16.01.2026

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

SCHWEIZ. ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

Generalsekretariat des
Schweiz. Elektrotechnischen Vereins und des
Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke

REDAKTION
Zürich 8, Seefeldstr. 301

Secrétariat général de
l'Association Suisse des Electriciens et de
l'Union de Centrales Suisses d'électricité

Verlag und Administration

Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei A.-G.
Zürich 4, Stauffacherquai 36/38

Editeur et Administration

Nachdruck von Text oder Figuren ist nur mit Zustimmung der
Redaktion und nur mit Quellenangabe gestattet

Reproduction interdite sans l'assentiment de la rédaction et
sans indication des sources

XVII. Jahrgang
XVII^e Année

Bulletin No. 7

Juli 1926
Juillet

Ueber Vorausbestimmung von Benutzungsdauer und Belastungsausgleich bei der Abgabe elektrischer Energie.

Von Professor Dr. W. Kummer, Ingenieur, Zürich¹⁾.

Da sich die Wahrscheinlichkeit für das zeitliche Zusammenfallen vieler Einzelleistungen bei den Energieabnehmern, mit entsprechender Bildung einer Höchstleistung im Elektrizitätswerk, im Zeitmass ausdrücken lässt, verwendet der Verfasser eine empirisch gewonnene Grenzzeit zur systematischen Berechnung des wahrscheinlichsten Schwankungsverhältnisses der Leistung im Elektrizitätswerk. Die Darstellung dieses Schwankungsverhältnisses über der Durchschnittsleistung des Werkes erlaubt, die Ermittlung des Zusammenhanges der Benutzungsdauern bei den einzelnen Abnehmern von Energie mit der resultierenden Benutzungsdauer im Werk in allgemeiner Weise vorzunehmen; damit wird gleichzeitig auch der Belastungsausgleich im Werk festgestellt. Für gleichartige Energieabnehmer lässt sich der Zusammenhang der Belastungsdauern beim Abnehmer und beim Werk für verschiedene Abnehmerzahlen durch allgemein gültige Kurvenbilder veranschaulichen.

La probabilité de coïncidence, dans le cas d'un grand nombre de puissances individuelles chez les consommateurs, provoquant une puissance maximum correspondante à la centrale, pouvant s'exprimer en unités de temps, l'auteur fait usage d'un temps-limite déduit empiriquement, pour calculer systématiquement le rapport le plus probable entre la puissance maximum et la puissance moyenne à l'usine. La représentation de ce rapport en fonction de la puissance moyenne de la centrale permet d'établir d'une façon générale la relation entre les durées d'utilisation chez les différents consommateurs d'énergie, et la durée d'utilisation résultante à la centrale; l'égalisation des marges à l'usine est déterminée par là même. Des courbes valables très généralement permettent de se rendre compte de la relation des durées de charge chez le consommateur et à l'usine, pour un nombre variable de consommateurs similaires.

Es ist allgemein bekannt, dass einem starken Anwachsen der Energieabgabe eines Elektrizitätswerkes in der Regel ein merkbares Abnehmen des Verhältnisses seiner höchsten zur durchschnittlichen Leistungsabgabe parallel geht; man spricht dann von einem erhöhten „Belastungsausgleich“. Als Masstab dieses Ausgleichs dient die „Benutzungsdauer“ des Elektrizitätswerkes, bzw. das damit im Zusammenhang stehende Schwankungsverhältnis der Leistung. Wir bezeichnen dasselbe mit K und verstehen es, bezogen auf die Sammelschienen des Kraftwerks, als unechten Bruch:

$$K = \frac{W_{\max}}{\bar{W}},$$

dessen Zähler den Maximalwert und dessen Nenner den Durchschnittswert der bezüglichen Leistung in kW darstellen. Wer je den tatsächlichen Verlauf der Aenderung von K bei verändertem \bar{W} beobachten konnte, hatte Gelegenheit, festzu-

¹⁾ Der vorliegende Aufsatz bringt die wissenschaftliche Grundlage zum gleichnamigen, gemeinverständlichen Vortrag des Verfassers vor dem V. S. E. am 14. August 1926.

stellen, dass bei natürlicher, d. h. ohne irgend einen äusseren Zwang (wie Arbeitszeit, Tarife usw.) bewirkter Steigerung des Verbrauchs elektrischer Energie die Aenderung von K der Aenderung von \bar{W} gesetzmässig entspricht, wobei offenbar der Zusammenhang vom sog. „Gesetz der grossen Zahlen“ beherrscht erscheint. Der Verfasser ist dieser Gesetzmässigkeit nachgegangen und hat vor Jahresfrist einen bezüglichen, mittelst der Wahrscheinlichkeitsrechnung ermittelten, und im besondern den elektrischen Bahnbetrieb berücksichtigenden, analytischen Zusammenhang veröffentlicht²⁾. In der nachfolgenden Darstellung soll die weitere praktische Anwendbarkeit der von uns vertretenen Lösungsform gezeigt werden.

In erster Linie seien folgende, allgemeine Beziehungen aufgestellt. Für eine pro Jahr – oder auch nur pro Tag, je nach Konvenienz, aufgefasste – je während der Stundenzahl H gemessene, elektrische Arbeit A , in kWh, eines Elektrizitätswerkes gilt:

$$A = H \bar{W} = T_w W_{\max},$$

sofern noch mit T_w die im Werk feststellbare, in Stunden (h) anzugebende Benützungsdauer bezeichnet wird. Mit der Definitionsbeziehung:

$$K = \frac{W_{\max}}{\bar{W}}$$

folgt dann:

$$T_w = \frac{H}{K}.$$

Führt man W_{\max} , \bar{W} , A und H mit Bezug auf den Tag ein, so beziehen sich auch K und T_w auf den Tag; wenn dagegen W_{\max} , \bar{W} , A und H mit Bezug auf das Jahr eingeführt werden, so erscheinen auch K und T auf den Jahresbetrieb bezogen. Gegenüber dem Tagesbetrieb liefert die Bezugnahme auf den Jahresbetrieb in der Regel kleinere Werte von K , bzw. grössere Werte von T_w , welches auch die Einheiten von H und T_w selbst sein mögen, d. h. im Jahresbetrieb erscheint der Belastungsausgleich in der Regel kleiner als im Tagesbetrieb.

Bedient ein Elektrizitätswerk nur einen einzigen Abnehmer von Energie, so ist, vernachlässigbare Unterschiede des Wirkungsgrades bei der Uebertragung von W_{\max} und von \bar{W} vorausgesetzt, die beim Abnehmer feststellbare Benützungsdauer T_a identisch mit der Benützungsdauer T_w im Werk. Bei Bedienung mehrerer Energieabnehmer ergibt sich im Werk eine von Fall zu Fall äusserst veränderliche Benützungsdauer, die natürlich mit dem Belastungsausgleich zusammenhängt; von diesen Beziehungen soll nun eingehend die Rede sein.

Wir bezeichnen die Zahl der von einem Werke bedienten Energieabnehmer mit Z und machen zunächst die einschränkende Annahme, diese Abnehmer seien insofern als „gleichartige“ zu betrachten, als sie alle ungefähr gleich grosse Leistungen, bei ungefähr denselben Benützungsdauern T_a , beanspruchen sollen. Den Mittelwert dieser Benützungsdauern wollen wir mit t_a bezeichnen und ihn in Teilen des Jahres – oder auch des Tages –, also als echten Bruch, messen. Nun kann aber t_a auch die Wahrscheinlichkeit dafür bedeuten, dass ein Abnehmer gerade eingeschaltet ist, während dann die Wahrscheinlichkeit dafür, dass er es nicht ist, gleich $1 - t_a$ sein muss. Angesichts des Vorhandenseins von Z Abnehmern können aber mehrere Einschaltungszustände auch gleichzeitig bestehen. Bezeichnen wir mit w_x die Wahrscheinlichkeit dafür, dass gerade x solcher Einschaltungen gleichzeitig vorhanden seien, so kann man w_x auf Grund der folgenden, dem Theorem von Jakob Bernoulli entsprechenden Gleichung, berechnen:

$$w_x = \binom{Z}{x} t_a^x (1 - t_a)^{Z-x}. \quad (1)$$

²⁾ Vergl. Seite 169 von Band 86 (3. Oktober 1925) der „Schweiz. Bauzeitung“.

Führen wir die Bezeichnung: $y = Z t_a$

ein, so lässt sich für grosse Werte von Z die Gleichung in die von *S. D. Poisson* mitgeteilte Form:

$$w_x = e^{-y} \frac{y^x}{x!} \quad (2)$$

überführen, in welcher $e = 2,718 \dots$ bedeutet. Während Gleichung (1) analytisch alle Abnehmerzahlen berücksichtigt, gilt Gleichung (2) nur für grössere Abnehmerzahlen, denen sie dann auch besser gerecht wird, als Gleichung (1).

Ob man nun w_x nach Gleichung (1) oder nach Gleichung (2) berechne, immer erreicht w_x , mit von null an steigendem x zunächst wachsend, ein Maximum, das stets bei dem charakteristischen Argumentwert x' liegt, für den die Beziehung:

$$x' = y = Z t_a$$

gilt; mit weiter steigendem x fällt dann w_x unaufhörlich und erreicht für $x = \infty$ den Wert Null. In Wirklichkeit kann aber das, durch die Wahrscheinlichkeit w_x erfasste, zeitliche Zusammenfallen mehrerer Einschaltungszustände nur bis zu derjenigen Höchstzahl x'' gleichzeitiger Einschaltungen vorkommen, für die der Wahrscheinlichkeitswert $w_{x''}$ gerade identisch gleich ist derjenigen relativ kurzen Zeit τ , bei der, nach Massgabe der in elektrischen Anlagen liegenden mechanischen und elektrischen Verluste usw., die entsprechende Höchstleistung W_{\max} gerade noch möglich ist. Der Zahl x' gleichzeitiger Einschaltungen, für die die Wahrscheinlichkeit maximal ist, entspricht aber das Leistungsmittel \bar{W} der Anlage; anderseits entspricht der Zahl x'' gleichzeitiger Einschaltungen, die die praktisch höchste ist, das Leistungsmaximum. Deshalb ergibt sich der wahrscheinlichste Wert des Schwankungsverhältnisses K der Leistungen zu:

$$K = \frac{x''}{x'} = \frac{x''}{y} = \frac{x''}{Z t_a} \quad (3)$$

Für die Festlegung von x'' benutzen wir einen Wert:

$$w_{x''} = \tau$$

im Betrage von ein paar Zeitsekunden, den wir aus zahlreichen Beobachtungen von direkt zeigenden und von registrierenden Wattmetern in elektrischen Kraftwerken als für die Bildung der Leistungsmaxima zutreffend halten³⁾. Durch Massangabe von τ in Bruchteilen des Tages folgt mit dem gleichwertigen $w_{x''}$ diejenige Zahl x'' , die das Schwankungsverhältnis K im Tagesverkehr ergibt; anderseits liefert die Massangabe von τ in Bruchteilen des Jahres diejenige Zahl x'' , die das Schwankungsverhältnis K im Jahresverkehr festlegt. Diese Zuordnung gilt für Rechnungen nach Formel (1) gleicherweise, wie für solche nach Formel (2); weiter muss also K für den Jahresverkehr stets grösser ausfallen als für den Tagesverkehr, da der Nenner von K , d. h. die Grösse:

$$y = Z t_a$$

im Jahresverkehr, wie auch im Tagesverkehr durch dieselbe absolute Zahl gekennzeichnet wird. Betrachtet man y als die in absolutem Mass gemessene Durchschnittsleistung \bar{W} , so kann man für die verschiedenen Werte, die sie annehmen kann, je den entsprechenden Wert von K rechnerisch, an Hand der Gleichungen (1) und (3), bzw. (2) und (3), vorausbestimmen und eine entsprechende Kurve:

$$K = f(y)$$

³⁾ Selbst Irrtümer von 50% nach unten oder von 100% nach oben im Schätzen von τ bewirken, gemäss der Struktur der Rechnung, in der Bestimmung von K kaum eine Aenderung.

aufzeichnen, die über die Änderung des Schwankungsverhältnisses K mit der Durchschnittsleistung orientiert. Diese Kurve ist für die Verhältnisse des Jahresverkehrs vom praktisch grössten Wert und wurde von uns deshalb, und zwar mittels des Ansatzes:

$$\tau = 0,2 \cdot 10^{-6} \text{ Jahr}$$

auch aufgestellt, wobei wir, wiederum mit Rücksicht auf die praktische Wichtigkeit, die Zahl Z der Abnehmer als eine grössere voraussetzten, d. h. also mit den Gleichungen (2) und (3) rechneten. Für die numerische Auswertung von w_x konnten an Stelle von Gleichung (2) die folgenden Näherungsformeln benützt werden:

$$\left\{ \begin{array}{l} w_y = \frac{1}{\sqrt{2 \pi y}}, \text{ für den wahrscheinlichsten Wert von } w_x. \\ w_{x+1} = w_x \frac{y}{x+1}, \text{ für alle folgenden Werte von } w_x. \end{array} \right.$$

Mittels dieser Näherungsformeln waren dann alle gewünschten Werte mit einem gewöhnlichen Rechenschieber in kürzester Zeit erhältlich. Die derart berechneten Werte von K sind in Fig. 1 über den entsprechenden Werten von y als Kurve aufgezeichnet.

Um die entsprechende, für kleine Werte von Z zu verwendende Kurve zu erhalten, würde man zur numerischen Ausrechnung von w_x , an Stelle von Gleichung (1), wiederum bequeme Näherungsformeln verwenden können, nämlich:

$$\left\{ \begin{array}{l} w_0 = (1 - t_a)^Z, \text{ für } x_0 = 0 \\ w_{x+1} = w_x \frac{Z - x}{x+1} \frac{t_a}{1 - t_a}, \text{ für alle folgenden Werte von } w_x. \end{array} \right.$$

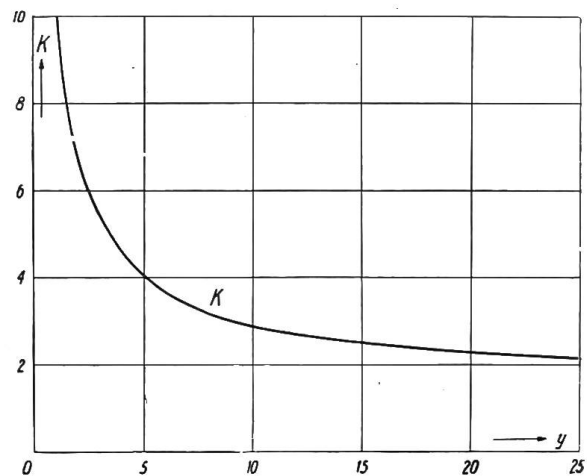


Fig. 1.
Kurve des Schwankungsverhältnisses im Jahresverkehr bei grosser Abnehmerzahl.

Die Fig. 1 dient für grosse Werte von Z als universell verwendbare Kurve des Schwankungsverhältnisses K im Jahresbetrieb. Um in einem bestimmten Falle, an Stelle der absoluten Massgrösse y der Abszissenaxe, die Durchschnittsleistung \bar{W} , bzw. die elektrische Arbeit A setzen zu können, führe man noch mit W_a die sogenannte Anschlussleistung eines Abnehmers samt ihren Uebertragungsverlusten in kW ein und beachte man die Gleichungen:

$$A = H \bar{W} = T_w W_{\max} = Z T_a W_a$$

sowie:

$$y = Z t_a.$$

Für den Jahresbetrieb, für den wir die Fig. 1 aufstellten, ist:

$$H = 8760 \text{ h/Jahr,}$$

wenn nicht ausdrücklich eine kürzere Betriebszeit, z. B. bei einer Sperrzeit, vorgesehen ist. Dann ist auch:

$$t_a = \frac{T_a}{8760}, \quad \text{bzw. es ist:} \quad y = \frac{Z T_a}{8760},$$

und liegt die Einheit des Abszissenmasstabes dann vor, wenn das Produkt, gebildet aus der Abnehmerzahl Z und aus der in h/Jahr beim Abnehmer gemessenen Benutzungsdauer T_a gleich der Zahl 8760 ist. Bei der Feststellung der Abnehmerzahl ist zu beachten, dass alle genau in dieselbe Phasenlage der Benutzungszeit fallenden Verbräuche von elektrischer Arbeit (z. B. alle Beleuchtungen in einer bestimmten Beleuchtungsklasse, wie Bureaubeleuchtung usw.) zusammen nur *einen* „Abnehmer“ bilden. Auch ist zu beachten, dass die Zahl Z nicht zu klein sei, z. B. für $H = 8760$ h/Jahr nicht unter 25, damit die Grundlagen der Gültigkeit der Gleichung (2) noch vorhanden sind. Auch für die Behandlung kleinerer Abnehmerzahlen, wofür dann Gleichung (1) zu benutzen ist, gibt es eine untere Grenze von Z , die wir für $H = 8760$ k/Jahr gleich 8 setzen, damit noch ein genügender Spielraum für die Wahrscheinlichkeitsrechnung gewahrt bleibe⁴⁾.

Zufolge der beiden Beziehungen:

$$y = \frac{Z T_a}{H}, \quad \text{sowie} \quad T_w = \frac{H}{K}$$

kann man die Kurve nach Fig. 1, bzw. jede analog gewonnene Kurve $K = f(y)$, sofort dazu benutzen, um festzustellen, welche Benutzungsdauern T_w sich in einem Elektrizitätswerk dann ergeben, wenn dasselbe ausschliesslich von Z gleichartigen Abnehmern, je mit T_a als Benutzungsdauer, in Anspruch genommen wird. Die auf Grund der Fig. 1 gewon-

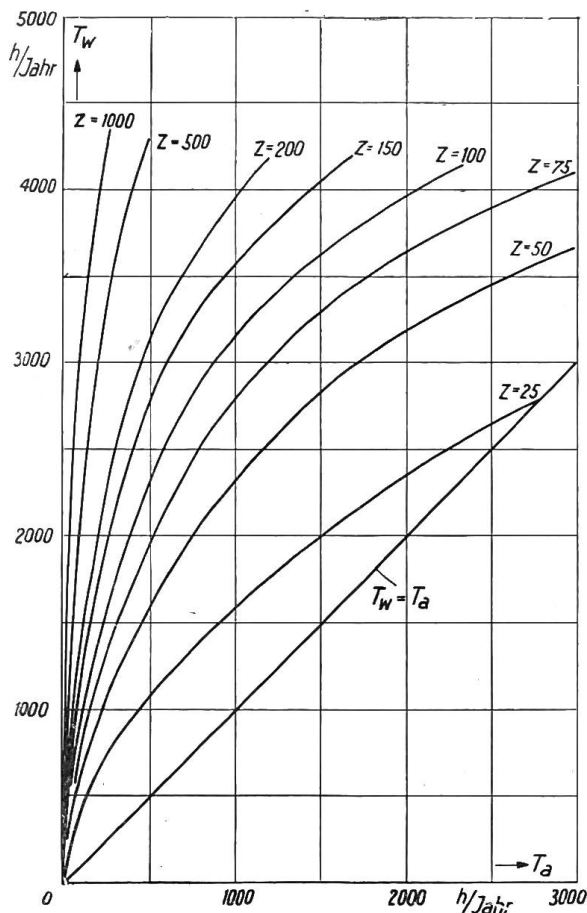


Fig. 2.

Kurven der Benutzungsdauer im Elektrizitätswerk bei verschiedener Anzahl Abnehmer gleicher Leistungen und Benutzungsdauer bei 8760 h/Jahr möglicher Betriebszeit.

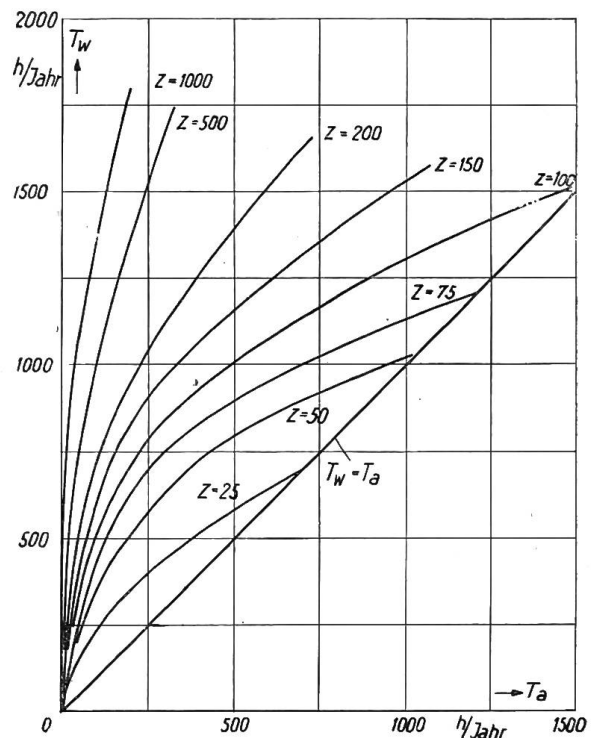


Fig. 3.

Kurven der Benutzungsdauer im Elektrizitätswerk bei verschiedener Anzahl Abnehmer gleicher Leistungen und Benutzungsdauer bei 2190 h/Jahr möglicher Betriebszeit.

nenen Fig. 2 und 3 stellen bezügliche Resultate dar; es liegen ihnen die Abnehmerzahlen 25, 50, 75, 100, 150, 200, 500, 1000 zugrunde. Für Fig. 2 wurde $H = 8760$ h/Jahr, für Fig. 3 dagegen wurde $H = 2190$ h/Jahr gewählt. Man

⁴⁾ Für Betriebszeiten $H < 8760$ h/Jahr erhöhen sich die Minimalwerte von Z entsprechend.

erkennt die stark ausgleichende Wirkung der grossen Abnehmerzahlen, sowie auch, dass bei grösserem H der Ausgleich ebenfalls besser wird. Die verschiedenen Kurven T_w schneiden die Diagonallinien $T_w = T_a$ jeweils an denjenigen Stellen, an denen, gemäss der Bestimmung von K , die Grösse x gerade gleich der Abnehmerzahl Z ist; jenseits der Diagonallinie wären die Kurven sinnlos, da grössere x , als solche gleich Z , unmöglich sind.

Für gleichartige Abnehmer lässt sich auch der in der Literatur etwa zur Kennzeichnung des Ausgleichs benützte, sog. „Verschiedenheitsfaktor“ gleich dem Verhältnisswert $\frac{T_w}{T_a}$ darstellen; der reziproke Wert entspricht dann dem sog. „Gleichzeitigkeitsfaktor.“

Wir können uns nun dem Allgemeinfall zuwenden, dass sich die von einem Elektrizitätswerk bedienten Abnehmer nicht mehr einheitlich als „gleichartige“ bezeichnen lassen, sondern dass sie als „*Abnehmer mit beliebig grossen Benützungsdauern und Leistungsansprüchen*“ zu betrachten seien. Es lassen sich jedoch auch in diesem Fall, und zwar noch auf verhältnismässig einfache Weise, der Belastungsausgleich und die im Elektrizitätswerk auftretende Benützungsdauer mit einer für praktische Zwecke ausreichenden Genauigkeit bestimmen; dazu ist folgenderweise vorzugehen. Man ordne zunächst die Abnehmer in solche mit konstantem Verbrauch und in solche mit intermittierendem Verbrauch; auch unter den letztern werden sich bei einzelnen Abnehmern als konstant zu betrachtende „Grundbelastungen“ aus dem Verbrauch ausscheiden lassen. Alle solchen konstanten Belastungen lasse man bis zum Schluss unberücksichtigt. Man teile die übrigbleibenden Abnehmer mit intermittierendem Verbrauch in Gruppen ein, die bezüglich der Benützungsdauern derart geordnet sind, dass diese für jede Gruppe sich mit Abweichungen von etwa $\pm 5\%$ je um einen arithmetischen Mittelwert, der in einer ersten Gruppe gleich T_g' sei, gruppieren lassen. Ist A_g' die von der betreffenden Gruppe beanspruchte elektrische Arbeit, die aus der Summe der Produkte, gebildet aus der Maximalleistung und aus der Benützungsdauer jedes Gruppenglieds, bekannt ist, so folgt mit:

$$W_g' = \frac{A_g'}{T_g'}$$

die *durchschnittliche* Maximalleistung W_g' jedes Gruppenmitglieds. Indem man nun jedem Gruppenmitglied dieselben Werte W_g' und T_g' zuschreibt, hat man die Gruppe gewissermassen homogenisiert, bezw. ersetzt durch eine gleichwertige von lauter „gleichartigen“ Abnehmern. Man kann jetzt nach den oben gegebenen Regeln feststellen, welchen Belastungsausgleich diese Gruppe, für sich allein betrachtet, im Elektrizitätswerk bewirkt und kann entsprechende Werte T_w' der Benützungsdauer im Werk und W_w' der Maximalleistung im Werk berechnen. Eine zweite, dritte m^{te} Gruppe wird analog behandelt, wobei sich die Werte T_w'' , W_w'' , sowie T_w''' , W_w''' ,, sowie endlich $T_w^{(m)}$, $W_w^{(m)}$ bilden lassen. Durch die Summe:

$$\sum (T_w^{(m)} W_w^{(m)})$$

wird neuerdings die ganze, intermittierend beanspruchte elektrische Arbeit dargestellt, die jetzt aber gewissermassen nur noch von m Teilnehmern beansprucht wird, deren individuelle Benützungsdauern T_w' , T_w'' , T_w''' $T_w^{(m)}$, zufolge der vollzogenen Ausgleichung, einander schon viel näher liegen, als die ursprünglichen Gruppenwerte T_g' , T_g'' , T_g''' Man kann nochmals die m Teilnehmer in neue Gruppen unterteilen, deren Benützungsdauern, mit gewissen kleinen Abweichungen nach oben und nach unten, um arithmetische Mittelwerte gelegen sind, sodann nochmals den Gruppenausgleich für ein vorgestelltes „Ueberwerk“ berechnen und

endlich das geschilderte Verfahren so oft wiederholen, bis man den endgültigen Ausgleich und die entsprechende endgültige Benützungsdauer T_w im Elektrizitätswerk mit der gewünschten grössern oder kleinern Wahrscheinlichkeit ermittelt hat. Zum Schluss sind nun auch noch die Abnehmer mit konstantem Verbrauch, sowie auch solche mit etwa abweichenden Betriebszeiten H , wieder in Betracht zu ziehen und die Zusammenlegung des gesamten intermittierenden mit dem gesamten konstanten Verbrauch vorzunehmen, was hinsichtlich der Feststellung, sowohl des totalen Leistungsmaximums als auch hinsichtlich der totalen Benützungsdauer, ohne weiteres geschehen kann.

Das Dämpfungsmoment der Synchronmaschine.

Von Dr. ing. L. Dreyfus, Västerås.

Die vorliegende Arbeit zerfällt in zwei Teile: Im ersten Teile wird das Hauptgewicht auf Einfachheit und Uebersichtlichkeit der Darstellung gelegt. Es wird gezeigt, dass man auch die Vorgänge bei pendelnder Maschine durch ebenso einfache Vektordiagramme darstellen kann wie bei pendelfreiem Betrieb, und es werden aus dieser Vektordarstellung die Gesetzmässigkeiten des Dämpfungsmomentes hergeleitet. Hierbei wird zur Vereinfachung der Rechnung eine Synchronmaschine mit konstantem Luftspalt zugrunde gelegt. Es zeigt sich, dass die elektrische Eigendämpfung einer Synchronmaschine ohne Querfelddämpfung in einem gewissen Belastungsbereich negativ ist, d. h., dass sie bestrebt ist, Schwingungen mit ständig wachsender Amplitude zu erzeugen. Erst die Querfelddämpfung stabilisiert den Betrieb.

Zur Eigendämpfung gesellt sich die Netzdämpfung. Es wird gezeigt, dass im allgemeinen die Dämpfung bei unbelastetem Netze am geringsten ist und mit zunehmender Belastung steigt, insbesondere, wenn die Belastung durch Zuschaltung von Asynchronmotoren erhöht wird.

Im zweiten Teil der Arbeit wird das Hauptgewicht auf eine möglichst strenge mathematische Behandlung gelegt. Die im ersten Teile gemachte Vernachlässigung wird fallen gelassen und die Synchronmaschine mit ausgeprägten Polen behandelt. Die sich hierfür ergebenden, zum Teil sehr komplizierten Gesetzmässigkeiten werden formuliert und die Abweichungen von den im ersten Teil gefundenen Resultaten untersucht.

L'auteur a partagé son travail en deux parties. Dans la première il se propose avant tout de donner une représentation simple et claire. Il montre qu'on peut traduire les phénomènes par des diagrammes vectoriels aussi simples les uns que les autres, que la machine soit ou non le siège d'oscillations pendulaires, et déduit de ces diagrammes les lois du moment d'amortissement. Pour simplifier les calculs, on a envisagé une machine synchrone à entrefer constant. Le calcul montre que l'auto-amortissement électrique d'une machine synchrone, sans amortissement du champ transversal, est négatif dans certaines limites de charge; autrement dit, il a la tendance à produire des oscillations d'amplitude croissante. L'amortissement dû au champ transversal seul stabilise le fonctionnement.

À l'amortissement propre vient s'ajouter celui du réseau. L'auteur montre qu'en général l'amortissement est le plus faible quand le réseau n'est pas chargé, et qu'il croît avec la charge, notamment quand celle-ci est due à la mise en circuit de moteurs asynchrones.

Dans la deuxième partie de son travail, l'auteur vise surtout à une représentation mathématique aussi rigoureuse que possible. La simplification introduite plus haut pour faciliter les calculs est abandonnée et l'auteur traite la machine synchrone à pôles saillants. Il formule ensuite les lois, en partie très compliquées, découlant de cet examen, et les compare aux résultats déduits dans la première partie.

I. Teil.

Das Dämpfungsmoment der Synchronmaschine mit konstantem Luftspalt.

In der jetzigen Zeit, in welcher der Zusammenschluss grosser Kraftnetze die Lösung bildet, kann das Dämpfungsmoment der Synchronmaschine von erhöhter Bedeutung werden. Wenn nämlich in einem Netz eine grosse Belastungsänderung auftritt, entstehen Energiependelungen zwischen den zusammengeschalteten Netzen. Da nun die Dämpfung derartiger Schwingungen mit der Entfernung zwischen den Kraftwerken abnimmt, ist es sehr wohl möglich, dass die Dämpfung unzureichend werden kann. Theoretisch ist sogar der Fall denkbar, dass das Dämpfungsmoment sein Vorzeichen wechselt, so dass es, anstatt die Schwingungen zu beruhigen, diese vielmehr anfachet. Wir sprechen dann von einer „negativen Dämpfung“. Eine Unter-