Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens

Herausgeber: Association suisse des électriciens

Band: 2 (1911)

Heft: 9

Artikel: Über den Ausgleich von Belastungsschwankungen in Strassenbahnzentralen durch Pufferbatterien

Autor: Bauer, Bruno

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1057207

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: 14.12.2025

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

SCHWEIZ. ELEKTROTECHNISCHER VEREIN
BULLETIN
ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

Erscheint monatlich mit den Jahres-Beilagen **„Statistik der Starkstromanlagen der Schweiz"** sowie **„Jahresheft"** und wird unter Mitwirkung einer vom Vorstand des S. E. V. ernannten Redaktionskommission herausgegeben.

Alle den Inhalt des „Bulletin" betreffenden Zuschriften sind zu richten an die

Redaktion: Ing.-Consulent Dr. W. Kummer, Mythenstrasse 15, Zürich II (Telephon 5806)

Alle Zuschriften betreffend Abonnement, Expedition und Inserate sind zu richten an den

Verlag: Fachschriften-Verlag A.-G., Zürich Bahnhofstrasse 61, Zürich I (Telephon 6741)

Est publié sous la direction d'une Commission de Rédaction nommée par le Comité de l'A. S. E.

Ce bulletin parait mensuellement et comporte comme annexes annuelles la **„Statistique des installations électriques à fort courant de la Suisse"**, ainsi que l'**„Annuaire"**.

Toutes les communications concernant la matière du „Bulletin" sont à adresser à la

Rédaction: Ing.-Conseil Dr. W. Kummer Mythenstrasse 15, Zurich II (Téléphone 5806)

Toutes les correspondances concernant les abonnements, l'expédition et les insertions sont à adresser à

l'éditeur: Fachschriften-Verlag A.-G., Zurich Bahnhofstrasse 61, Zurich I (Téléphone 6741)

II. Jahrgang / IIe Année — Bulletin No. 9 — September / Septembre **1911**

Ueber den Ausgleich von Belastungsschwankungen in Strassenbahnzentralen durch Pufferbatterien.

Von *Bruno Bauer,* dipl. Maschineningenieur, Baden.[1])

Die vorliegende kleine Studie entsprang dem Bedürfnis, einen Einblick in die elektrischen Betriebsverhältnisse von Strassenbahnzentralen mit Gleichstrombetrieb und Pufferung durch Akkumulatorenbatterien zu gewinnen. Puffersysteme mit ausgleichbefördernden Zusatzmaschinen sollen hier nicht berücksichtigt werden. Das Problem ist näher gekennzeichnet, wenn wir folgende zwei Fragen stellen:

1. Wie verteilen sich Belastungsschwankungen auf das System von parallelgeschalteter Batterie und Maschine?
2. Welchen Bedingungen müssen Batterie und Maschine genügen, um bei gegebener Belastungsschwankung einen Ausgleich innerhalb fester Grenzen zu ermöglichen?

Um zur Lösung der ersten Frage zu schreiten, soll in nachfolgendem eine graphische Methode entwickelt werden, die in einfacher Weise gestattet, den Zusammenhang zwischen Strom und Spannung des Systems zu überblicken. Ihr Prinzip ist den Vorträgen über Zentralanlagen von Prof. Dr. Wyssling an der eidgen. technischen Hochschule in Zürich entnommen und stützt sich auf die Kenntnis der Charakteristiken von Dynamo und Batterie, d. h. von Kurven, die die Variation der Klemmenspannung mit der Netzstromstärke veranschaulichen. Für den Generator fällt diese Kurve mit der sog. äusseren Charakteristik zusammen, sofern wir die Erregung als konstant annehmen. Bekanntlich können für Puffersysteme, wie sie hier behandelt werden, im allgemeinen nur Nebenschlussmaschinen Verwendung finden. Die Charakteristik einer Akkumulatorenbatterie ist nun keine unveränderlich feststehende Kurve mehr, vielmehr kann der Verlauf von Strom und Spannung nur durch eine Kurvenschaar festgelegt werden. Einerseits fallen diese Kurven für Ladung und Entladung nicht zusammen. Anderseits stellen sich — auch abgesehen von der langsamen Aenderung der Zellenspannung durch allmählige Entladung, die wir uns durch einen von Zeit zu Zeit nachgestellten Handzellenschalter für die ganze Batterie kompensiert denken können — für

[1]) Abschnitt 5 aus der, vom Verfasser eingereichten Ferienarbeit als Lösung der Preisaufgabe III 2, aufgestellt von der Gesellschaft ehem. Polytechniker, Zürich; siehe diesbezüglich „Schweiz. Bauzeitung", Seite 364 von Band LVI.

dieselbe Stromstärke verschiedene Klemmenspannungen ein, je nach der Zeitdauer der Stromentnahme resp. Stromzuführung. So ergaben sich für unser Beispiel nach den Versuchskurven der Akkumulatorenfabrik Oerlikon folgende Verhältnisse:

Ruhespannung der Batterie					:	550 Volt
Entladen mit	300 Amp.	10 Sek.			:	521 „
„ „	300 „	30 „			:	517 „
„ „	300 „	5 Min.			:	501 „

Für noch länger andauernde Stromentnahme bleibt die Spannung bei konstanter Stromstärke dann ungefähr die letztgenannte. Wir können also sagen: Die Charakteristik der Pufferbatterie ändert sich für kleine Pufferzeit mit letzterer als Parameter.

Es ist vorteilhaft, bei elektrischen Strassenbahnen die Generatoren stets möglichst voll zu beanspruchen, sie also für eine entsprechende mittlere Leistung zu berechnen; die parallel geschaltete Pufferbatterie wird dann nur bei positiven oder negativen Schwankungen über diesen Mittelwert in Mitleidenschaft gezogen. Die Generatorcharakteristik muss also bei normalem Maschinenstrom die Normalspannung aufweisen; die Batteriecharakteristik soll umgekehrt für diese Spannung durch den Nullwert des Stromes gehen. Berücksichtigt man weiterhin, dass für alle Spannungen die Stromgleichung des Systems lautet: Algebraische Summe von Maschinenstrom plus Batteriestrom ist gleich dem Netzstrom, so ist man im Stande, besagte zwei Charakteristiken sinngemäss in ein gemeinsames Axenkreux zu kombinieren. Aus dieser Kombination folgt dann, dass der zwischen den beiden Kurven liegende Axenabschnitt gleich dem Netzstrom sein muss und aus der Ordinatenaxe die gemeinsame Spannung herausschneidet, während die Abstände der beiden Kurven von der Ordinatenaxe den zugehörigen Maschinenstrom resp. Batteriestrom ergeben. Abbildung 1

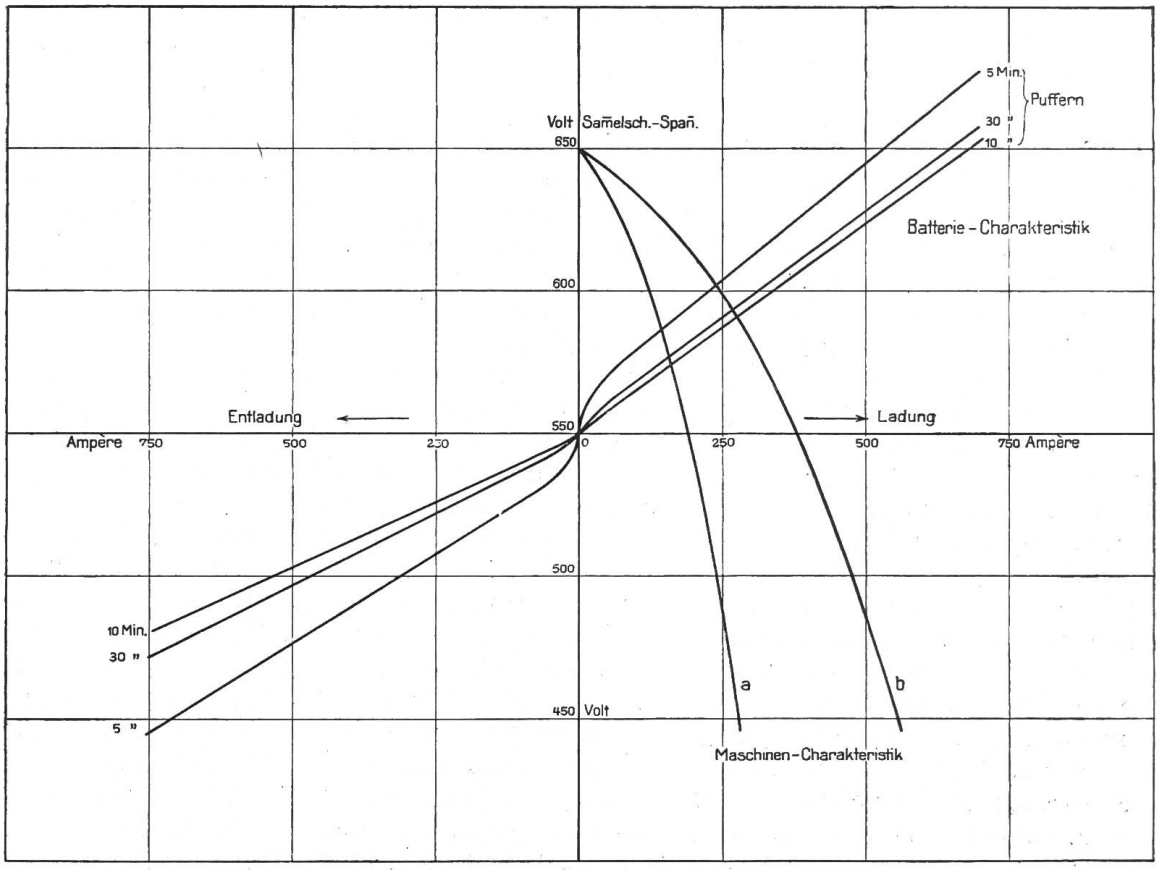

Abbildung 1 a. Kombination der Charakteristiken von Batterie und Maschinen; Gleichstrom-Nebenschluss-Generatoren von 105 KW bei 550 Volt (a wenn eine Maschine, b wenn zwei Maschinen im Betrieb sind); Pufferbatterie von 268 Elementen von 407 Ampèrestunden.

repräsentiert die Verhältnisse, wie sie sich für ein konkretes Zahlenbeispiel (dasjenige der erwähnten „Ferienarbeit") ergaben. Aus der Kombination der Charakteristiken sind für jede

Grösse des Netzstroms zugehörige Spannung und zugehöriger Maschinen- resp. Batteriestrom herausgegriffen und in ein rechtwinkliges Koordinatensystem eingetragen worden. Mit diesen Kurven haben wir ein Bild gewonnen, das uns den gewünschten Zusammenhang veranschaulicht; und damit ist auch die erste Frage beantwortet. Setzt man voraus, dass sich die Belastungsschwankungen im Mittel in Intervallen von 30 Sekunden folgen, so sagen uns für den Fall, dass eine Maschine im Betrieb ist, die Kurven:

Netzstrom = 0 Spannung = 105 %
Maschinenstrom = 82 %
Batteriestrom = —82 %
Netzstrom = 100 % Spannung = 100 %
Maschinenstrom = 100 %
Batteriestrom = 0
Netzstrom = 200 % Spannung = 96 %
Maschinenstrom = 112 %
Batteriestrom = +82 %

Während also der Netzstrom um 200 % variert, schwankt die Spannung um 9 % der Normalen, der Maschinenstrom um 30 % des Normalstroms; zu bemerken ist, wie auch in Abbildung 2 ersichtlich, dass die Stromschwankungen der Maschine

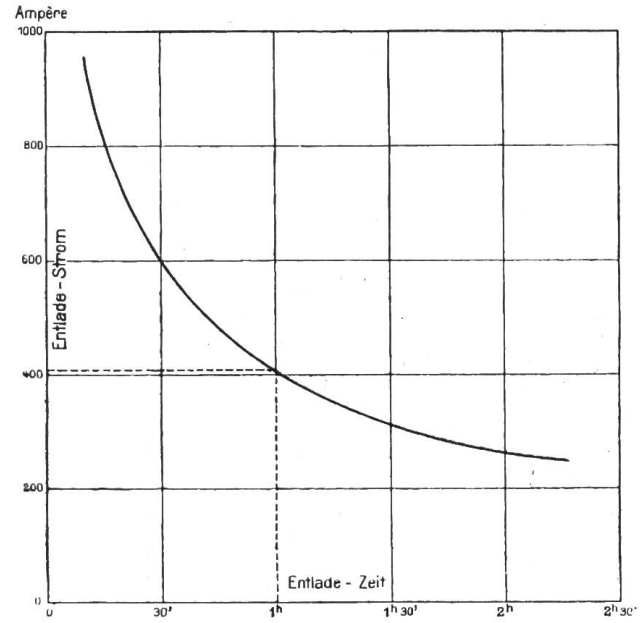

Abbildung 1 b. Zeit-Strom-Charakteristik der Batterie für den Entladevorgang bei verschiedenen und konstant gehaltenen Stromstärken. (Die Fläche gibt die jeweilige Kapazität.)

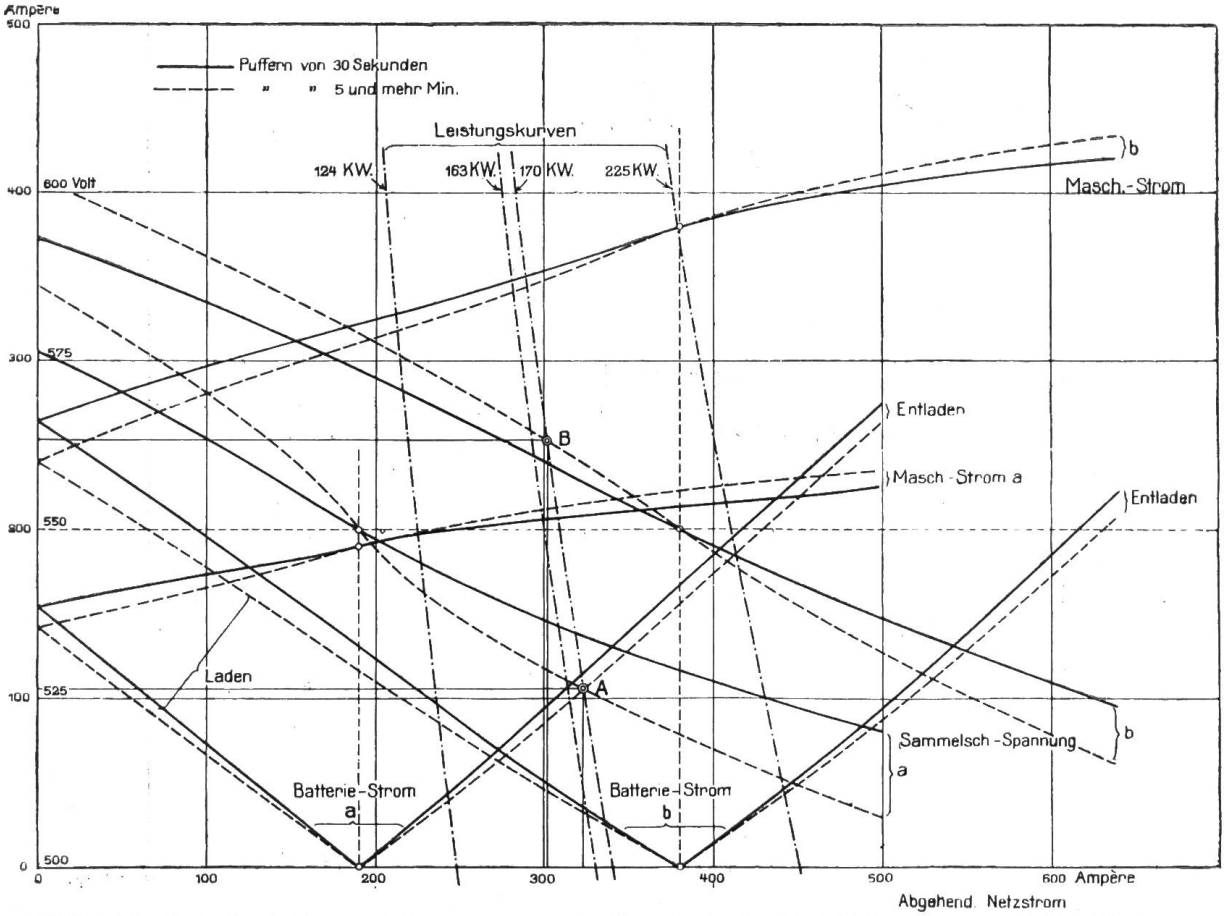

Abbildung 2. Verlauf von Strom und Spannung, wenn eine Maschine im Betrieb ist (a) und wenn zwei Maschinen im Betriebe sind (b).

im Sinne von Ueberlastung geringer sind, als im Gebiet der Leistungen, die kleiner als Normallast sind. Der Einfluss von Batteriegrösse, Maschinenstrom und Spannungsabfall

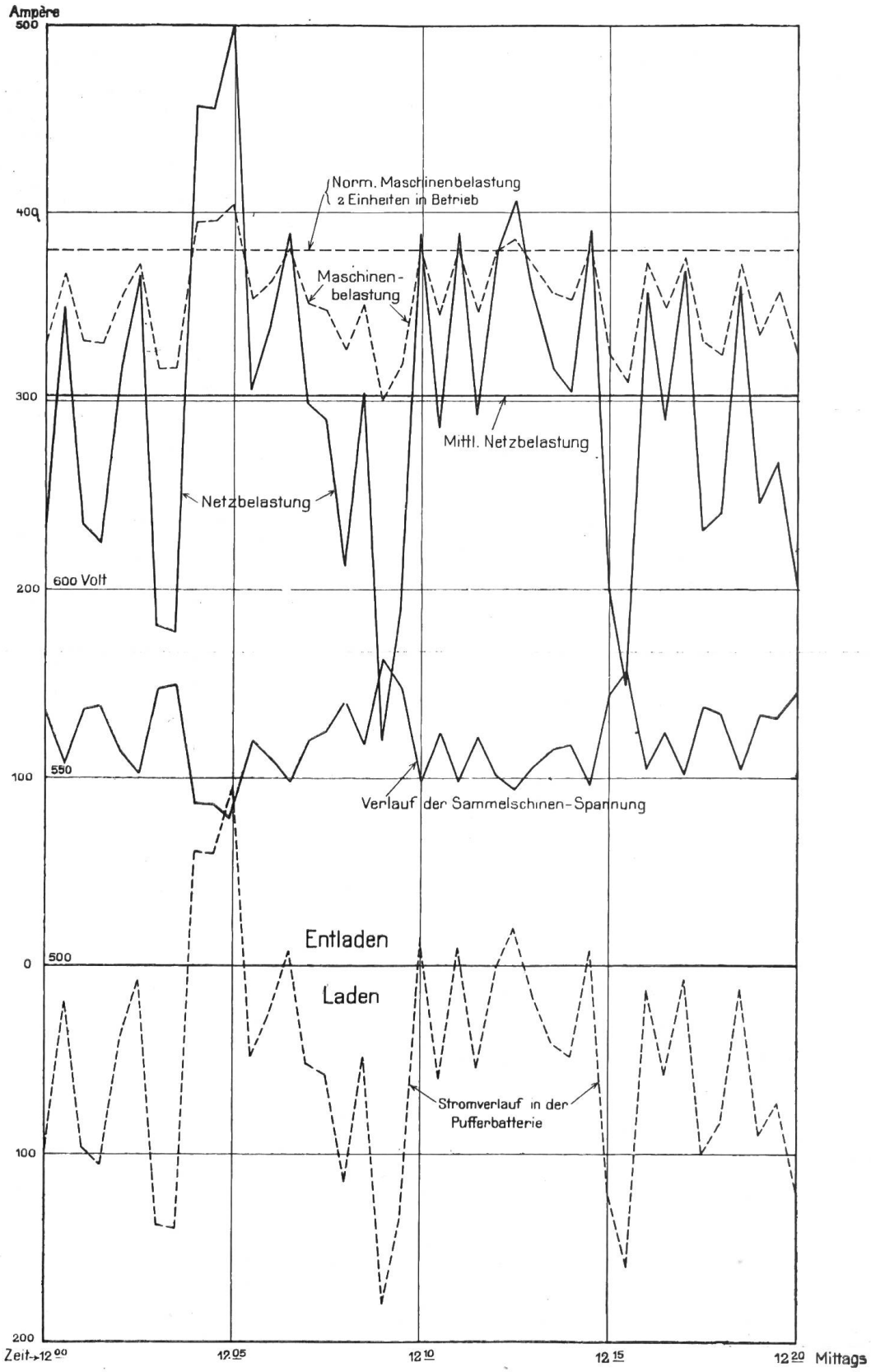

Abbildung 3. Strom- und Spannungskurven der angenommenen Bahnzentrale für eine Wochentags-Belastung von 12 Uhr bis 12 Uhr 20 Min. Mittags.

soll noch besonders erörtert werden. Die Abbildung 3 zeigt uns die tatsächliche Verteilung der Strombelastung an einem Beispiel. Für ein bekanntes Bahntracé und einen angenommenen Fahrplan sind unter Berücksichtigung von Haltestellen und Anfahrperiode die Belastungskurven sämtlicher Linien berechnet worden. Für die Zeit von 12^{00} bis 12^{20} Mittags bei Wochentagsbelastung wurde die resultierende Belastungskurve der Zentrale gebildet; die mittlere Leistung ergab sich zu 170 KW. Da die Zentrale entsprechend einem demnächst zur Ausführung kommenden zweiten Ausbau entworfen wurde, so war die Frage, soll mit einer Maschine (105 KW) überlastet, oder mit deren zweien (210 KW) gearbeitet werden. In Abbildung 2 sind die Kurven mittlerer Leistung eingezeichnet. Punkt *A* zeigt die Spannung wenn eine Maschine, Punkt *B* wenn zwei Maschinen in Betrieb sind. Die Abbildung 2 kann also auch Aufschluss über die Verteilung der mittleren Belastungen geben; eine Prüfung der beiden Fälle ergab, dass es wirtschaftlich vorteilhafter ist, mit zwei Maschinen zu arbeiten.

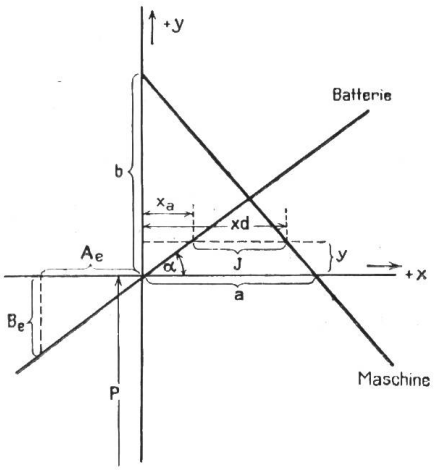

Abbildung 4. Schema für die analytische Untersuchung der Spannungs-Verhältnisse.

Es soll nun der *Versuch einer analytischen Behandlung des Problems* zum Zwecke der Beantwortung der Frage 2 unternommen werden. Dazu machen wir die Annahme, die Charakteristiken von Maschine und Batterie seien Gerade; in welchen Grenzen dies gerechtfertigt ist, wird später dargetan. Der Untersuchung legen wir die Kombination der Charakteristiken zu Grunde. Es bezeichne:

- a den normalen Maschinenstrom in Ampère,
- b den Spannungsanstieg bis Leerlauf in Volt,
- A_e den einstündigen Entladestrom der Batterie in Ampère,
- B_e den zugehörigen Spannungsabfall in Volt für 30 Sekunden-Pufferung,
- A_l den einstündigen Ladestrom in Ampère,
- B_l den zugehörigen Spannungs-Anstieg in Volt für 30 Sekunden-Pufferung.
- Y, J, x_a, x_d seien variable Grössen und
- P sei die Spannung des Nullpunkts.

Aus der Abbildung 4 folgen die Gleichungen:

(1) $J = x_d - x_a$

(2) $Y = x_a \cdot tg\alpha$ Gleichung der Batteriecharakteristik.

(3) $\frac{x_d}{a} + \frac{Y}{b} = 1$ „ „ Dynamocharakteristik.

Die Kombination der Gleichungen 1, 2 und 3 ergibt folgende Relationen:

(4) $J = a - Y\left(\frac{a}{b} + \frac{1}{tg\alpha}\right)$ (5) $x_d = \frac{J \cdot tg\alpha + b}{tg\alpha + \frac{b}{a}}$ (6) $x_a = \frac{a - J}{1 + tg \cdot \alpha \frac{a}{b}}$

Um mit diesen Gleichungen arbeiten zu können, müssen einzelne Grössen umgeformt werden. Wir setzen für den Spannungsabfall:

$b = \beta\,\%$ von P $\qquad b = \frac{\beta}{100} \cdot P$

$B_e = \alpha_e\,\%$ von P $\qquad B_e = \frac{\alpha_e}{100} \cdot P$

$B_l = \alpha_l\,\%$ von P $\qquad B_l = \frac{\alpha_l}{100} \cdot P$

Ferner sei die Spannungsschwankung $Y = p\,\%$ von P $\qquad Y = \frac{p}{100} \cdot P$

Im weitern wollen wir die variablen Stromstärken in Beziehung zur normalen Maschinenstromstärke setzen, nämlich:

$J = j \cdot a$: Variabler Netzstrom
$x_d = \delta \cdot a$: „ Maschinenstrom
$x_a = \varepsilon \cdot a$: „ Batteriestrom

Die Konstanten unserer Gleichungen lauten jetzt: a, A, β, α, die Variabeln: p, j, δ, ε. Wir haben drei Hauptgleichungen mit vier Variablen; wir müssen also über eine derselben noch verfügen. Nach Einführung unserer neuen Variablen werden obige Gleichungen zu:

$$(4a) \quad -p = \frac{a\,(j-1)}{\left(\frac{a}{\beta}+\frac{A}{\alpha}\right)} = \text{prozentuale Spannungsschwankung.}$$

$$(5a) \quad -\delta = j - \varepsilon = j - \frac{A\,(j-1)}{A+\frac{a\cdot\alpha}{\beta}} = \text{Maschinenstromschwankung im Verhältnis zum Normalstrom.}$$

$$(6a) \quad -\varepsilon = \frac{A\,p}{a\cdot\alpha} = \frac{A\,(j-1)}{A+\frac{a\cdot\alpha}{\beta}} = \text{Batteriestromschwankung im Verhältnis zum Maschinenstrom, normal.}$$

Diese Formeln sind nun allgemeine Ausdrücke für die Stromverteilung unseres Puffersystems. Fassen wir nur Schwankungen *über* den Mittelwert ins Auge, so lassen sich folgende Merkmale herauslesen: *Die Spannungsschwankung* ändert linear mit der Schwankung des Netzstroms. Für ein und denselben Wert der letzteren ist die Schwankung um so geringer, *je kleiner* der Spannungsabfall der Maschine gewählt wird. *Die Maschinenstromschwankung* ändert linear mit der Schwankung des Netzstroms. Für ein und dieselbe Grösse der letzteren ist die Schwankung um so geringer, *je grösser* der Spannungsabfall der Maschine. Wir erkennen, dass die Bedingungen bezüglich grosser Dämpfung der Spannungs- bezw. Maschinenstromschwankung zum Teil entgegengesetzte sind. Ein Vergrössern der Kapazität der Batterie wirkt auf beide Fälle beruhigend ein. Ueber die Grösse von α kann nicht verfügt werden; sie ist eine Konstante der Akkumulatorenzelle, die zur Verwendung gelangt. α ändert allerdings, wie schon bemerkt, mit der Pufferzeit, letztere aber ist für unseren Fall unabhängige Variable. Unserem Beispiel lagen folgende Werte für α zu Grunde (nach Angaben der Akkumulatorenfabrik Oerlikon):

$\alpha_{Ladung} = 11{,}7\ \%$, vorausgesetzt eine Pufferzeit von ca. 30 Sek.
$\alpha_{Entladung} = 8{,}0\ \%$

Der Einfluss der Spannungsregulierung ist aus obigen Gleichungen ohne weiteres ersichtlich. Wird die Maschinenspannung reguliert, so ändern sich a und b gleichsinnig derart, dass das Verhältnis $\frac{a}{b}$ konstant wird. Hierbei ergibt sich dann, dass die relativen Strom- und Spannungsschwankungen unabhängig von dem innerhalb einer Belastungsschwankung konstant gedachten Wert der Maschinen-Erregung sind. Wird letztere vergrössert, so verkleinert sich die mittlere Batteriebelastung unter gleichzeitigem Anwachsen der mittleren Netzspannung und umgekehrt.

Zum Schluss wollen wir noch die Fragen zu beantworten suchen: *Wie lassen sich diese Verhältnisse für eine neu zu entwerfende Anlage vorausberechnen?*

Wir nehmen an, es seien bekannt die Normalspannung P in Volt, der Maschinenstrom a in Ampère bei Normalbelastung, der einstündige Entladestrom A in Ampère und die Konstanten α_e und α_l der Zelle in $\%$. Es sollen weiter angenommen werden die mutmassliche Maximalschwankung j_{max} des Netzstroms als Verhältniszahl und die höchstzulässige Schwankung δ_{max} des Maschinenstroms als Verhältniszahl. Gesucht sind dann die Schwankung des Batteriestroms ε_{max} als Verhältniszahl, die Spannungsschwankung $p\,\%$ und der Spannungsabfall der Maschine $\beta\,\%$. Es sei ferner vorausgesetzt, dass $j > 1$ d. h. *dass wir nur Netzschwankungen berücksichtigen, die grösser sind als der normale Maschinenstrom.* Wir müssen diese Beschränkung einführen, weil für $j < 1$ die Abweichung unserer Formeln von der Wirklichkeit eine zu grosse würde. Aus dem gleichen Grunde können wir zur Berechnung von δ nicht den Mittelwert α brauchen, wir rechnen hier mit $\alpha_{Entladung}$.

Die Brauchbarkeit unserer Formeln soll nachher an einem Beispiel erprobt werden. Der Rechnungsgang ist nun der folgende:

1) berechnen wir ε_{max} aus: $\varepsilon_{max} = j_{max} - \delta_{max}$.

2) berechnen wir p_{max} aus: $\varepsilon = \dfrac{A \cdot p}{a \cdot \alpha_{max}}$; $p_{max} = \dfrac{\varepsilon_{max} \cdot a \cdot \alpha_{entl.}}{A}$

3) berechnen wir β aus: $p = \dfrac{a\,(j-1)}{\dfrac{a}{\beta} \cdot \dfrac{A}{\alpha_{mitt.}}}$; $\beta = \dfrac{a \cdot p_{max}}{a\,(j_{max}-1) - p_{max} \cdot \dfrac{A}{\alpha_{mitt.}}}$

für unser Beispiel war:

$a = 380$ Amp. wir wählen $j = 2$ ($J = 760^a$) dann wird:

$A = 407$ Amp. $\delta = 1{,}18$ (449^a) $\varepsilon = 2 - 1{,}18 = 0{,}82$

$\alpha_{entl.} = 8{,}0$ δ ist aus Abb. 1 entnommen worden.

$\alpha_{mitt.} = 9{,}85$

$$p = \frac{0{,}82 \cdot 380 \cdot 8{,}0}{407} = 6{,}11$$

$$\beta = \frac{380 \cdot 6{,}11}{380 \cdot 1 - \dfrac{6{,}11 \cdot 407}{9{,}85}} = 18{,}3\,\%$$

In nachfolgender Tabelle sind für unser Beispiel einige Punkte gerechnet und zugleich der Wert, wie er nach Abbildung 1 den wirklichen Charakteristiken entspricht, zugesetzt.

Unter Zugrundlegung von:

$a = 380$ Amp. $\beta = 18{,}2\,\%$

$A = 407$ Amp. $\alpha_{entl.} = 8{,}0\,\%$

$P = 550$ Volt $\alpha_{mittl.} = 9{,}85\,\%$

berechnet sich:

	$J = 380^a$; $j = 1$		$J = 570^a$; $j = 1{,}5$		$J = 760^a$; $j = 2$	
	berechnet	a. d. Kurve	berechnet	a. d. Kurve	berechnet	a. d. Kurve
$p =$	0		3,07 %		6,14 %	
$y =$	0	$P = 550$	16,9	$P = 532$	33,8	$P = 516$
$P =$	550		533		516,2	
$\varepsilon =$	0		0,41		0,82	
		$x_a = 0$		152^a		311^a
$x_a =$	0		156^a		312^a	
$\delta =$	1		1,09		1,18	
		$x_d = 380^a$		418^a		449^a
$x_d =$	380^a		415^a		449^a	

Die Vergleichung zeigt, dass eine schöne Übereinstimmung korrespondierender Werte besteht; zeichnet man in Abbildung 1 die angenommenen Charakteristiken neben die wirklichen, so erklärt sich diese Tatsache auf einfache Weise. Die Abweichungen der einen Kurve sind nahezu gleich und entgegengesetzt denjenigen der andern Kurve, also heben sich die Fehler auf; doch gilt dies, wie schon gesagt, nur für Netzschwankungen über den Mittelwert des Maschinenstroms. Damit dürften alle wesentlichen Punkte der Fragen 1 und 2 ihre Erwähnung gefunden haben. Ich möchte nicht schliessen, ohne auch an dieser Stelle den Herren Direktoren der Akkumulatorenfabrik Oerlikon, sowie der Strassenbahn Zürich-Oerlikon-Seebach herzlichen Dank auszusprechen für die bereitwillige Überlassung von Versuchskurven und Plänen.