

SAMMLUNG VIEWEG

**TAGESFRAGEN AUS DEN GEBIETEN
DER NATURWISSENSCHAFTEN
UND DER TECHNIK**

Heft 100

W. Kummer

**Die wissenschaftlichen
Grundlagen der Preisbildung
für die elektrische Arbeit**



Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH



Die „Sammlung Vieweg“ hat sich die Aufgabe gestellt, Wissens- und Forschungsgebiete, Theorien, chemisch-technische Verfahren usw., die im Stadium der Entwicklung stehen, durch zusammenfassende Behandlung unter Beifügung der wichtigsten Literaturangaben weiteren Kreisen bekanntzumachen und ihren **augenblicklichen Entwicklungsstand zu beleuchten**. Sie will dadurch die Orientierung erleichtern und die Richtung zu zeigen suchen, welche die weitere Forschung einzuschlagen hat.

Als Herausgeber der einzelnen Gebiete, auf welche sich die Sammlung Vieweg zunächst erstreckt, sind tätig, und zwar für:

- Physik** (theoretische und praktische, und mathematische Probleme):
Herr Geh. Reg.-Rat Prof. Dr., Dr.-Ing. E. h. **Karl Scheel**, Physikal.-Techn. Reichsanstalt, Charlottenburg;
- Chemie** (Allgemeine, Organische und Anorganische Chemie, Physikal. Chemie, Elektrochemie, Technische Chemie, Chemie in ihrer Anwendung auf Künste und Gewerbe, Photochemie, Metallurgie, Bergbau):
Herr Prof. Dr. **Bernhard Neumann**, Techn. Hochschule Breslau;
- Technik** (Wasser-, Straßen- und Brückenbau, Maschinen- und Elektrotechnik, Schiffsbau, mechanische, physikalische und wirtschaftliche Probleme der Technik):
Herr Prof. Dr.-Ing. E. h. **Fritz Emde**, Techn. Hochschule Stuttgart.

Neuere und neueste Hefte der „Sammlung Vieweg“

- Heft 31. Dr. Heinrich Faßbender: *Die technischen Grundlagen der Elektro-medicin*. Mit 77 Abbildungen. M. 4,—.
- Heft 32/33. Prof. Rudolf Richter: *Elektrische Maschinen mit Wicklungen aus Aluminium, Zink und Eisen*. Mit 51 Abbildungen. M. 6,—.
- Heft 34. Obering. Carl Beckmann: *Haus- und Geschäfts-Telephonanlagen*. Mit 78 Abbildungen. M. 3,—.
- Heft 35. Dr. Aloys Müller: *Theorie der Gezeitenkräfte*. Mit 17 Abb. M. 3,—.
- Heft 36. Prof. Dr. W. Kummer: *Die Wahl der Stromart für größere elektrische Bahnen*. Mit 7 Abbildungen. M. 2,50.
- Heft 37. Dr. Reinhold Rieke: *Die Arbeitsmethoden der Silikatchemie*. 2. Aufl. Mit 4 Abbildungen. M. 3,50.
- Heft 38. Prof. Dr. Albert Einstein: *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie. (Gemeinverständlich)*. 14. Auflage. (61. bis 65. Tausend.) Mit 4 Figuren. M. 3,—.
- Heft 39/40. Dr. Richard Grammel: *Die hydrodynamischen Grundlagen des Fluges*. Mit 83 Abbildungen. M. 5,—.
- Heft 41/42. Ingenieur Georg Duffing: *Erzwungene Schwingungen bei veränderlicher Eigenfrequenz und ihre technische Bedeutung*. Mit 23 Abb. M. 4,75.
- Heft 43. Dr. Robert Schwarz: *Feuerfeste und hochfeuerfeste Stoffe*. 2. vermehrte Auflage. Mit 10 Abbildungen. M. 2,—.
- Heft 44. Dr. Iwan Döry: *Einphasenbahnmotoren*. Mit 75 Abbildungen. M. 3,—.

Die wissenschaftlichen Grundlagen der Preisbildung für die elektrische Arbeit

Von

Dr. W. Kummer

Ingenieur

Professor an der Eidgen. Techn. Hochschule in Zürich



Mit 18 Abbildungen im Text

Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Herausgeber dieses Heftes:
Professor Dr.-Ing. h. c. Fritz Emde in Stuttgart

ISBN 978-3-663-00369-4 ISBN 978-3-663-02282-4 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-663-02282-4

Alle Rechte vorbehalten

Vorwort.

Nach 50 Jahren praktischen Elektrizitätswerkbetriebes liegen die wissenschaftlichen Grundlagen der Preisbildung für die elektrische Arbeit durchaus nicht so klar zutage, daß eine Schrift von abklärender Tendenz, wie sie hier beabsichtigt ist, etwa unnötig wäre. Auf den Vorschlag des Verfassers, eine solche Schrift für die „Sammlung Vieweg“ zu bearbeiten, ist der Herausgeber der technischen Hefte dieser Sammlung, Herr Prof. Dr.-Ing. e. h. Fritz Emde in Stuttgart, bereitwilligst eingegangen und hat den Verfasser mit wertvollen Ratschlägen unterstützt, für die der Verfasser auch an dieser Stelle seinen besten Dank abstattet.

Zürich, Juli 1929.

W. Kummer.

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
Einleitung	1
I. Die Analyse des Verbrauchs elektrischer Arbeit	3
1. Die Kennzeichnung der Betriebsverhältnisse beim einzelnen Verbraucher	3
2. Der Belastungsausgleich bei gleichartigen Verbrauchern	4
3. Die Eigenart der einzelnen Verbrauchergruppen	14
4. Der Belastungsausgleich gemischter Verbrauchergruppen	21
II. Die tatsächlichen Kosten der elektrischen Arbeit	24
1. Die Arbeitskosten beim Betrieb von Wärmekraftwerken	24
2. Die Arbeitskosten beim Betrieb von Wasserkraftwerken	28
3. Die Arbeitskosten bei abnormalem Leistungsfaktor	32
III. Die Verkaufspreise der elektrischen Arbeit	35
1. Die Bildung von Einheitspreisen	35
2. Die Berechtigung verschiedener Tariffornen	40
3. Die Möglichkeit der Vereinheitlichung im Tarifwesen	46
Anhang: Die Berechnung der Abbildungen 4 bis 9	48
1. Bei kleinen Werten von y	48
2. Bei größeren Werten von y	50

Einleitung.

Auf allen Gebieten der Technik wird zurzeit eifrig an der Rationalisierung der Betriebe und an der Normung der verwendeten Einrichtungen gearbeitet. Betrachten wir jedoch die im Verkauf elektrischer Arbeit übliche Praxis, so bemerken wir einen auffallenden Mangel an Einheitlichkeit sowohl in bezug auf die Verkaufsbestimmungen im allgemeinen, als auch in bezug auf die benutzten Meßinstrumente im besonderen. Offenbar macht sich in der Praxis des Verkaufs elektrischer Arbeit ein Übermaß von Empirie geltend, das auf das Fehlen allgemein anerkannter wissenschaftlicher Grundlagen schließen läßt. Eine Vereinheitlichung in der Verkaufspraxis elektrischer Arbeit ist also erst aussichtsreich, wenn die heute noch fehlende allgemeine Anerkennung von wissenschaftlichen Grundlagen vorhanden sein wird. Die Frage ist naheliegend, ob diese Grundlagen von der Wirtschaftswissenschaft, der sogenannten Ökonomik, oder von der Technik geboten werden sollen. An die Ökonomik wird man aus dem Grunde erinnert, weil die in der Verkaufspraxis der elektrischen Arbeit verwendeten Gesichtspunkte der „Wertschätzung“, der „Konkurrenzfähigkeit“ usw. auch in den wissenschaftlichen Urteilen der Ökonomik erscheinen. Eine jede Praxis, also auch die Verkaufspraxis, verwendet ihre Gesichtspunkte aber wertbetont, während die entsprechenden Begriffe in der Wissenschaft ohne eine Wertung erscheinen. Werturteile sind immer das Kennzeichen praktischer Stellungnahme zu einem Objekt. So sehr sich also die bestehende Literatur über den Verkauf elektrischer Arbeit bei solchen Werturteilen auch theoretisierend gebärden möge, so wenig können wir ihr das Zeugnis, sie schaffe wissenschaftliche Grundlegung, erteilen; ihre praktische Nützlichkeit wird dabei in keiner Weise an-

gezweifelt, obwohl zu beachten ist, daß sie mit solchen Urteilen eine Vereinheitlichung nicht zu fördern vermag. Wir prüfen nun, ob die Technik für sich allein imstande ist, ausreichende wissenschaftliche Grundlagen der Preisbildung für die elektrische Arbeit zu bieten. Im Hinblick auf die Gestehungskosten der elektrischen Arbeit ist eine bejahende Antwort auf unsere Frage evident, während im Hinblick auf die Gesichtspunkte der Verteilung dieser Kosten auf die Verkaufspreise elektrischer Arbeit an die verschiedenen, im allgemeinen durchaus ungleichartigen Gruppen von Arbeitsverbrauchern die Frage erst noch einer Antwort harret. In der Literatur, die sich mit der Preisbildung für die elektrische Arbeit befaßt, werden bezüglich der Abwälzung der Kosten der elektrischen Arbeit auf die verschiedenen Gruppen von Arbeitsverbrauchern technische Gesichtspunkte zwar reichlich erörtert, jedoch regelmäßig unter Herbeiziehung theoretisierender Betrachtungen aus dem Ideenkreis der Ökonomik, zwecks Ausbildung von Werturteilen. Der bedeutungsvolle, dabei herangezogene technische Gesichtspunkt ist derjenige des sogenannten Belastungsausgleichs zwischen zahlreichen Arbeitsverbrauchern. Die Bedeutung der Erscheinung dieses Ausgleichs für den Verkauf elektrischer Arbeit hat A. Wright erstmals dargelegt und im Jahre 1901 als bezügliche objektive Maßgröße den „Verschiedenheitsfaktor“ eingeführt. Aber weder von ihm, noch von anderen sich seither mit dem Belastungsausgleich befassenden Fachleuten konnte bisher eine zur allgemeinen Anerkennung gelangte Methode der Vorausbestimmung des Verschiedenheitsfaktors oder einer gleichwertigen Ausgleichsziffer mitgeteilt werden. Nach der Ansicht des Verfassers der vorliegenden Schrift bildet die Möglichkeit einer Vorausbestimmung des Belastungsausgleichs geradezu die bisher noch fehlende wissenschaftliche Grundlage, welche geeignet ist, die Technik als alleinige grundlegende Wissenschaft für die Preisbildung bei der Verteilung elektrischer Arbeit erscheinen zu lassen. Damit kennzeichnet sich das Programm der vorliegenden Schrift. Ihr Aufbau umfaßt zunächst, gestützt auf eine Analyse des Verbrauchs elektrischer Arbeit, die vom Verfasser entwickelte Methode zur Vorausbestimmung des Belastungsausgleichs. Nach der Betrachtung der tatsächlichen Gestehungskosten der elektrischen Arbeit kann dann die wissenschaftlich begründete Bildung der Verkaufspreise gezeigt werden.

I. Die Analyse des Verbrauchs elektrischer Arbeit.

1. Die Kennzeichnung der Betriebsverhältnisse beim einzelnen Verbraucher.

Als „Verbraucher“ oder „Abnehmer“ bezeichnen wir nicht etwa die physische oder juristische Person, die sich zum Bezuge elektrischer Arbeit verpflichtet hat, sondern die einzelne, als Einheit betrachtbare Anlage zum Verbrauch elektrischer Arbeit, d. h. einen Motor, einen Beleuchtungskörper, einen Ofen usw. Das hauptsächliche Kennzeichen der Arbeitsaufnahme ist die Periodizität des Verbrauchs, wobei in der Regel der von Mitternacht bis Mitternacht verstandene „Tag“ die praktisch nächstliegende Periodenzeit bildet. Doch bilden auch die Woche, der Monat, das Halbjahr und insbesondere das Jahr wichtige Periodenzeiten. Innerhalb einer Periodenzeit T wird die Arbeit in der Regel mit einer wechselnden, jeweils ein relatives Maximum aufweisenden Leistung aufgenommen. Man kann nun, in Abhängigkeit

von der innerhalb der Periode ablaufenden Zeit, die in jedem Zeitelement auftretende Leistungsaufnahme des Verbrauchers zur Darstellung bringen, d. h. sogenannte Belastungskurven bilden. In dieser unmittelbaren Form sind diese Kurven jedoch mit allen Zufälligkeiten der zeitlichen Verhältnisse behaftet, von denen man frei wird, wenn man nach der Methode von Wilh. Lynen¹⁾ das Kurvenbild umzeichnet, wobei man die Leistungen der einzelnen Zeitelemente, be-

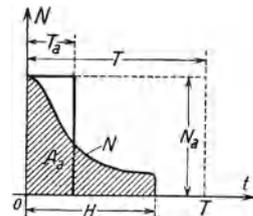


Abb. 1.

Geordnetes Belastungsbild des einzelnen Abnehmers.

ginnend mit dem relativen Leistungsmaximum, der Größe nach ordnet. Ein solches Bild bringen wir in Abb. 1 zur Darstellung, als sogenannte geordnete Belastungskurve. Die insgesamt eine Periode bildenden Zeitabszissen messen wir von 0 bis T . Für den Tag als Periodenzeit ist dann $T = 24$ h (Stunden), für das Jahr als Periodenzeit gilt dagegen $T = 24 \times 365 = 8760$ h bzw. $T = 1$ Jahr. In der Regel findet eine Leistungsaufnahme des Verbrauchers nicht von 0 bis T , sondern nur von 0 bis $H < T$ statt, wobei H die mögliche Ver-

¹⁾ Zeitschr. d. Ver. deutsch. Ing. 1895, S. 1225.

brauchszeit genannt wird¹⁾. Sie kann durch äußeren Zwang, gemäß der sogenannten Sperrzeit, innerhalb der Periode absolut festliegen oder auch nur als freiere Unterteilung der Periode von Bedeutung sein. Die größte Leistung N_a , im Abszissenpunkt 0 des geordneten Belastungsbildes, soll von nun an für Perioden, die kleiner als ein Jahr sind, als relatives Leistungsmaximum, für die Periode ein Jahr dagegen als absolutes Leistungsmaximum des „Abnehmers“ oder Verbrauchers gelten. Die in Abb. 1 schraffierte, zwischen der Kurve N und der Abszissenachse liegende Fläche A_a stellt die vom Verbraucher in der betrachteten Periode aufgenommene Arbeit dar. Diese Arbeit kann auch durch ein Rechteck von der Höhe N_a und der durch die Beziehung

$$T_a = \frac{A_a}{N_a}$$

festgelegten Basis T_a veranschaulicht werden. Die derart gewonnene Größe T_a nennen wir, in der Regel bei Zugrundelegung der Periode ein Jahr, die Benutzungsdauer des Verbrauchers oder Abnehmers; bei der Periode ein Jahr ist dann für genau passende Bemessung der Verbrauchsanlage das absolute Leistungsmaximum überdies identisch mit der sogenannten „Anschlußleistung“ des Verbrauchers. In den Größen N_a und T_a haben wir nun neben der Größe H die drei wichtigsten Begriffe zur Kennzeichnung der Betriebsverhältnisse von Arbeitsverbrauchern zu erblicken. Wir benutzen diese Begriffe nun gleich zur Unterscheidung von „gleichartigen“ und von „ungleichartigen“ Verbrauchern, indem wir festsetzen, daß erstere je durch ungefähr gleiche Zahlenwerte von H , von N_a und T_a , letztere untereinander je durch wesentliche Abweichungen in mindestens einem der drei Kennzeichen bestimmt sein sollen; die gleichartigen Verbraucher sollen überdies je nur auf wenige Prozente beschränkte Abweichungen gegeneinander in den drei kennzeichnenden Größen aufweisen.

2. Der Belastungsausgleich bei gleichartigen Verbrauchern.

Eine Zahl Z gleichartiger Verbraucher oder Abnehmer beansprucht in der möglichen Verbrauchszeit H eine Gesamtarbeit vom Betrage

$$A = Z \cdot A_a = Z \cdot N_a \cdot T_a.$$

¹⁾ Dabei braucht ein Abnehmer durchaus nicht immer im ganzen Bereiche von H Leistung aufzunehmen.

Diese Z Abnehmer bewirken aber für das sie bedienende Elektrizitätswerk, selbst bei der hier ausdrücklich gemachten Annahme verlustloser Arbeitsübertragung, ein Belastungsbild, das durchaus nicht etwa in der geordneten Darstellungsweise aus unserer Abb. 1 durch Z -fache Vergrößerung der Ordinaten gewonnen werden könnte. Vielmehr macht sich nun der sogenannte Belastungsausgleich deshalb geltend, weil die einzelnen Höchstwerte N_a nicht gleichzeitig aufzutreten brauchen. Der im Kraftwerk auftretende Höchstwert N_{\max} wird deshalb kleiner als $Z \cdot N_a$ sein. In Abb. 2 stellen wir das geordnete Belastungsbild des Elektrizitätswerkes für Z gleichartige Verbraucher dar, um die weiterhin notwendigen Begriffe klarlegen zu können. Man kann nämlich die Arbeit A wiederum, wie in Abb. 1, durch ein Rechteck von der Höhe der höchsten Ordinate darstellen; dessen Basis wird nunmehr durch

$$T_w = \frac{A}{N_{\max}}$$

bestimmt und als die Werk-Benutzungsdauer, im Gegensatz zur bisherigen Abnehmer - Benutzungsdauer T_a , bezeichnet. Weil N_{\max} kleiner als $Z \cdot N_a$ ist, folgt

$$T_w > T_a.$$

Nun stellen wir die Arbeit A nach Abb. 2 auch noch durch ein Rechteck von der Basis H dar, dessen Höhe \bar{N} sich nunmehr aus

$$\bar{N} = \frac{A}{H}$$

ergibt und als Durchschnittsleistung des Elektrizitätswerkes zu bezeichnen ist. Als weiteren Begriff führen wir noch das Schwankungsverhältnis K der Leistung im Elektrizitätswerk ein, und zwar mittels der Bestimmungsgleichung

$$K = \frac{N_{\max}}{\bar{N}} = \frac{N_{\max} H}{A},$$

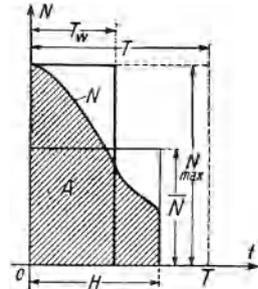


Abb. 2.
Geordnetes Belastungsbild einer aus gleichartigen Verbrauchern gebildeten Werkbelastung.

durch die K als unechter Bruch eingeführt wird. Man erkennt, daß ohne weiteres auch

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

folgt. Wir setzen zunächst ausdrücklich eine verlustlose Übertragung vom Elektrizitätswerk zu den einzelnen Abnehmern voraus, derart, daß im Falle der Arbeitslieferung an einen einzigen Abnehmer, also für $Z = 1$, die Abb. 1 und 2 ohne weiteres identisch, d. h. also $A_a = A$ und $T_a = T_w$ wird. Die Berücksichtigung der Arbeitsverluste bei der Arbeitsübertragung vom Werk zu den Abnehmern bleibt dem nächsten Abschnitt vorbehalten.

Da sich im tatsächlichen Auftreten des Belastungsausgleichs eine Regelmäßigkeit geltend macht, die man im Elektrizitätswerk durch eine mit dem Anwachsen der Arbeitsabgabe zusammenhängende Senkung des Schwankungsverhältnisses K leicht objektiv feststellen kann, so liegt hier unzweifelhaft eine Massenerscheinung vor. Da die Regelmäßigkeiten innerhalb der Massenerscheinungen nach dem sogenannten „Gesetz der großen Zahlen“, d. h. nach den Prinzipien der Wahrscheinlichkeitsrechnung auftreten, so handelt es sich also darum, dessen besondere Form beim Belastungsausgleich aufzufinden, um seine Wirkung geradezu von Fall zu Fall vorausberechnen zu können. Wir bedienen uns zur Vorausbestimmung der den Belastungsausgleich vorzüglich kennzeichnenden Größe K des Theorems von Jakob Bernoulli, mit dessen Hilfe man die Wahrscheinlichkeit für das vielmalige Eintreffen eines Ereignisses bei einer beliebigen Zahl von einander unabhängiger Ereignisse immer dann ermitteln kann, wenn man die Wahrscheinlichkeit für das einmalige Eintreffen des Ereignisses kennt. Im vorliegenden Problem ist das fragliche Ereignis gebildet durch das Eingeschaltetein eines Verbrauchers elektrischer Arbeit an die Anlage des speisenden Elektrizitätswerkes; weiterhin diene als Maß der Wahrscheinlichkeit seines einmaligen Eintreffens eine verhältnismäßig auf die mögliche Verbrauchszeit bezogene Abnehmer-Benutzungsdauer, d. h. eine Größe

$$t_a = \frac{T_a}{h T},$$

wobei

$$h = \frac{H}{T}; \quad 0 < h \leq 1.$$

Nach dem Theorem von Bernoulli ergibt sich nun als ebenfalls im relativen Zeitmaß erscheinende Wahrscheinlichkeit dafür, daß von Z Teilnehmern x gleichzeitig eingeschaltet sind,

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

Bildet man die Größe

$$y = Z \cdot t_a,$$

so geht für genügend große Werte der Abnehmerzahl Z der Ausdruck für w_x über in die von S. D. Poisson gefundene Form

$$w_x = e^{-y} \cdot \frac{y^x}{x!},$$

in welcher $e = 2,718\dots$ bedeutet. Da man doch nur für größere Z mit der Wirklichkeit genügend in Übereinstimmung bleibt, so kann man sich auf die Verwendung der Formel von Poisson beschränken. Die Größe w_x besitzt ein Maximum w'_x beim Sonderwert

$$x' = y = Z \cdot t_a.$$

Andererseits ist für x kein höherer tatsächlicher Zahlenwert mehr möglich, als er gemäß einem Grenzwert $w''_x = \tau$ der Funktion w_x als physikalisch zulässig erscheint. Es ist w''_x nämlich bestimmt durch eine Grenzzeit τT , gemäß welcher, weil die Einrichtungen zur Arbeitsübertragung absichtlich nicht reichlicher bemessen sind, eben nur x'' , also im allgemeinen nicht alle Z Abnehmer gleichzeitig mit elektrischer Arbeit bedient werden können. Der aus y und τ formelmäßig nach der Gleichung

$$\frac{y^x}{x!} = \tau e^y$$

berechenbaren Abnehmerzahl x'' entspricht deshalb die Maximalleistung

$$N_{\max} = x'' \cdot N_a,$$

während der Abnehmerzahl $x' = y$ die wahrscheinlichste, d. h. die Durchschnittsleistung

$$\bar{N} = x' \cdot N_a$$

entsprechen muß. Das gesuchte Schwankungsverhältnis K ergibt sich deshalb in der Form

$$K = \frac{N_{\max}}{\bar{N}} = \frac{x''}{x'} = \frac{x''}{y} = \frac{x''}{Z \cdot t_a}.$$

Die damit festgelegte Methode der Vorausberechnung von K bedient sich also der Betrachtung, daß die Leistungswerte N_{\max} und \bar{N} unmittelbar durch Einzelleistungen vom vollen Betrage N_a gebildet würden, deren jeweilige Anzahl gleich x'' bzw. gleich x' sei. Nun kommen zur Bildung der Werte N_{\max} und \bar{N} in Wirklichkeit natürlich irgendwelche Leistungswerte N der Z Abnehmer in Betracht; ein fehlerhaftes Resultat der Methode erscheint aber dadurch vermieden, daß den Zeitgrößen die Abnehmer-Benutzungsdauer zugrunde gelegt wird, und daß die Anzahlen x'' und x' nur fiktiv gemeint sind, dabei aber doch einen wahren Quotienten $\frac{x''}{x'}$ darstellen können. Der Verbrauch

$$\bar{N} = x' N_a = N_1 + N_2 + \dots + N_n$$

wird ja gewöhnlich dadurch zustande kommen, daß $n > x'$ Abnehmer einzeln einen Verbrauch $N_i < N_a$ ($i = 1, 2, \dots, n$) haben. Ähnliches gilt beim Verbrauch $x'' N_a$. Jedenfalls erscheinen nur Annahmen, wie sie in der Wahrscheinlichkeitsrechnung zulässig sind.

Zur zahlenmäßigen Festsetzung der Grenzzeit τT gelangen wir nun wie folgt: Als Wahrscheinlichkeitsmaß für die höchstmögliche Zahl gleichzeitiger Anschlüsse von Arbeitsverbrauchern muß sie einer empirischen Feststellbarkeit fähig sein. Diese liegt deshalb vor, weil die Stromkreise, in denen sich die Belastungsänderungen geltend machen, Zeitkonstanten aufweisen, die bei technisch richtiger Veranlagung der Stromkreise nur in verhältnismäßig engen Grenzen variieren¹⁾. Man muß also, von einem Normschema elektrischer Arbeitsübertragung ausgehend, zur Abschätzung der Zeitkonstanten schreiten und mittels dieser auf die Grenzzeit τT schließen können. In Abb. 3 stellen wir das Normschema der elektrischen Arbeitsübertragung dar, das sowohl die einzelnen Anlageteile als auch die einzelnen Arten von Stromkreisen zum Ausdruck bringt. Demnach wird normal bei einer Belastungsänderung in den Abnehmeranlagen in vier hintereinanderliegenden Stromkreisen eine durch die jeweiligen Zeitkonstanten in ihrem Ablaufe festgelegte Zustandsänderung eingeleitet. Sowohl aus den Zeitkonstanten der einzelnen Stromkreise, als auch aus der

¹⁾ Gemeint ist die eigentliche Zeitkonstante elektrischer Stromkreise, die z. B. bei einem Stromkreis, der nur einen konzentrierten Widerstand R und eine konzentrierte Selbstinduktion L enthält, gleich L/R ist.

Zeigerbewegung in den Instrumenten an den Sammelschienen des Kraftwerkes läßt sich τT abschätzen; wir halten einen Wert τT von etwa 6,0 bis 6,5 Sekunden für normal und bemerken, daß, nach der Struktur der Rechnung, selbst Irrtümer von 50 % nach unten oder von 100 % nach oben im Schätzen von τT kaum eine Änderung am Ergebnis der Größe K bewirken. Wie die Dauer τT der Maximallast aus den elektromagnetischen Zeitkonstanten der Stromkreise im einzelnen abzuleiten ist, wäre erst noch zu erforschen.

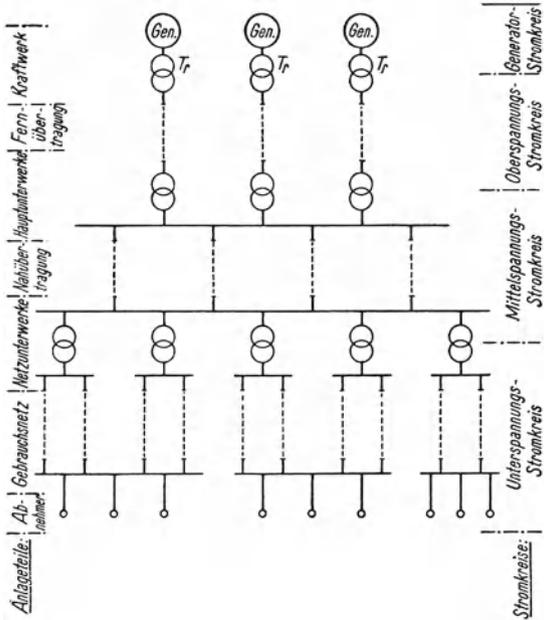


Abb. 3.

Normalschema der elektrischen Anlage eines Elektrizitätswerkes und ihrer Stromkreise.

Zur Rechnung selbst, die im Anhang, S. 48, durch Beispiele verdeutlicht ist, mag noch bemerkt werden, daß man für Werte $y > 5$ an Stelle der Auswertung der Gleichung von Poisson eine gute Näherung durch die Berechnung des wahrscheinlichsten Wertes von w_x aus

$$w_y = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot y}}$$

und, weiterschreitend, alle folgenden Werte von w_x aus der strengen Beziehung

$$w_{x+1} = w_x \cdot \frac{y}{x+1}$$

erhält. Natürlich geht man in dieser Rechnung nur so weit, bis man den Wert $w_x'' = \tau$ innerhalb zweier aufeinanderfolgender Werte w_x liegend erkennt. Man findet so zu gegebenen Werten von y und τ zunächst x'' und darauf $K = \frac{x''}{y}$.

Wir haben die Rechnung für verschiedene Perioden gemäß folgender Übersicht durchgeführt, wobei die Dauer τT der Maximalbelastung zu 6,3 Sekunden angenommen und τ in der Übersicht in Bruchteilen der verschiedenen Perioden T ausgedrückt worden ist:

Periode T	Zahlenwert τ	Bezeichnung für K
Tag	$0,73 \cdot 10^{-4}$	K_d
Monat	$2,4 \cdot 10^{-6}$	K_m
Halbjahr	$0,40 \cdot 10^{-6}$	K_s
Jahr	$2,0 \cdot 10^{-7}$	K_a bzw. K

Für die vier berücksichtigten Perioden stellen wir das Rechnungsergebnis, d. h. die Zahlenwerte K_d , K_m , K_s und K_a , im Bereiche kleiner Werte y (von 0 bis 1,00) in Abb. 4 dar. In der Regel braucht man nur K_a , das wir in der Folge als K schlechthin (also ohne Index) bezeichnen. In Abb. 5 sind die Werte K für Abszissen y von 0 bis 25 dargestellt.

Zufolge der beiden Beziehungen

$$y = \frac{Z \cdot T_a}{h T}, \quad T_w = \frac{H}{K} = \frac{h \cdot T}{K}$$

läßt sich auf Grund der Abb. 4 und 5 der Zusammenhang von T_w mit T_a bei verschiedenen Werten von H und von Z bildlich darstellen. Der Anschaulichkeit halber drücken wir T_a und T_w in h/Jahr aus, wobei also die Größe $T = 8760 \text{ h} = 1 \text{ Jahr}$ gewählt ist. Für die beiden Annahmen der möglichen Betriebszeit:

$$H = 8760 \text{ h}, \quad H = 2190 \text{ h},$$

($h = 1$ und $h = 0,25$) und für die Abnehmerzahlen

$$Z = 1, 25, 50, 75, 100, 150, 200, 500, 1000$$

ergeben sich dann die Kurvenbilder unserer Abb. 6 und 7, gemäß denen die verschiedenen über den Abszissen T'_a gezeichneten Kurven T_w

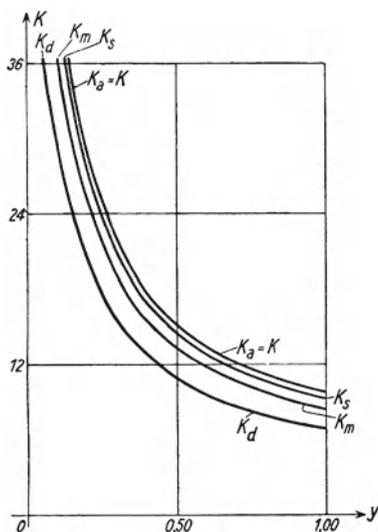


Abb. 4. Schwankungsverhältnisse K_d , K_m , K_a , K_s über kleinen Werten von y .

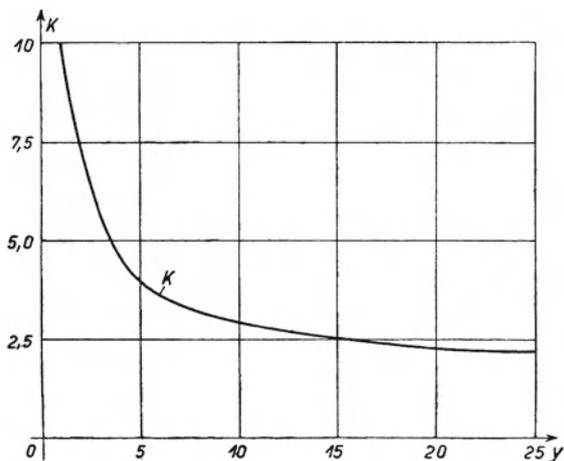


Abb. 5. Schwankungsverhältnis $K = K_a$ über normalen Werten von y .

die Diagonallinien $Z = 1$, für die $T_w = T_a$ ist, jeweils an denjenigen Stellen schneiden, an denen, gemäß der Rechnung, die

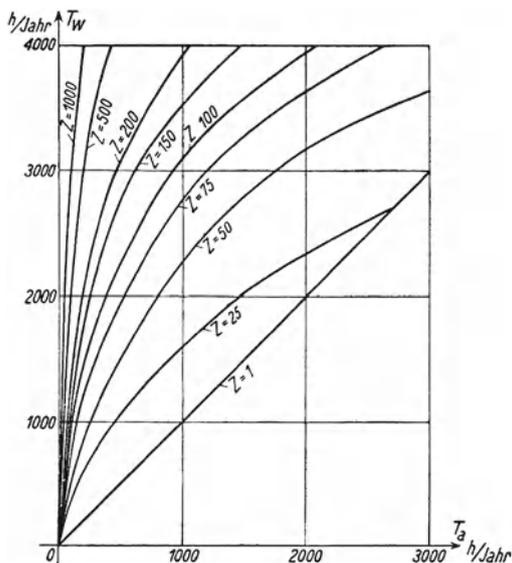


Abb. 6. Kurven der Benutzungsdauer T_w im Elektrizitätswerk über der Benutzungsdauer T_a von Z gleichartigen Abnehmern bei $H = 8760$ h.

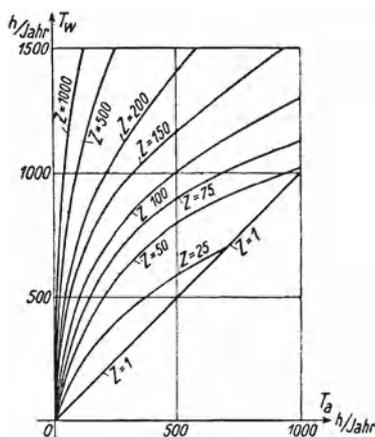


Abb. 7. Kurven der Benutzungsdauer T_w im Elektrizitätswerk über der Benutzungsdauer T_a von Z gleichartigen Abnehmern bei $H = 2190$ h.

Größe x gerade gleich der Abnehmerzahl Z ist; jenseits der Diagonallinien wären die Kurven sinnlos, da Werte von $x > Z$ unmöglich sind. Die Abb. 6 und 7 bringen außerordentlich deutlich zum Ausdruck, wie sehr der Belastungsausgleich bei gleichartigen Arbeitsverbrauchern von deren Zahl abhängt. Bei $Z = 1$ haben wir den Grenzfall fehlenden Ausgleichs; es ist dann für alle Werte H stets Gleichheit der Größen T_a und T_w vorhanden. Den anderen Grenzfall, denjenigen des maximalen Belastungsausgleichs, erhalten wir für $Z = \infty$; in diesem Falle wird T_w stets gleich dem gerade vor-

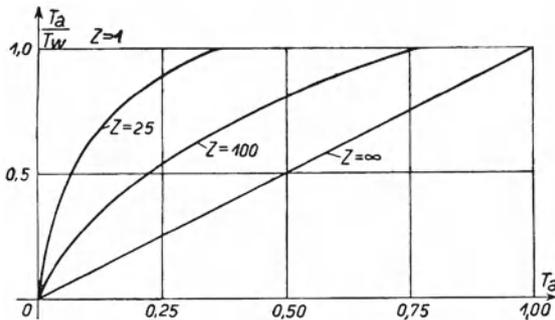


Abb. 8. Das Verhältnis der Benutzungsdauern für eine mögliche Verbrauchszeit gleich der Periodenzeit.

liegenden Wert der möglichen Betriebszeit H . Wie wir später sehen werden, ist für die Berücksichtigung des Belastungsausgleichs in der Preisbildung für die elektrische Arbeit das Verhältnis der Benutzungsdauern T_a/T_w von großer Bedeutung. Mit den in den Abb. 6 und 7 gegebenen Daten läßt sich das Verhältnis T_a/T_w sofort je für die passende Größe H über T_a kurvenmäßig darstellen. In den Abb. 8 und 9 ist diese Darstellung durchgeführt, wobei für T_a ein Absolutmaßstab, bei 1,0 für 8760 h/Jahr, zugrunde gelegt wurde. Statt T_a ist also eigentlich T_a/T aufgetragen. Die Kurven gelten dann für $T = 1$ Jahr. Das

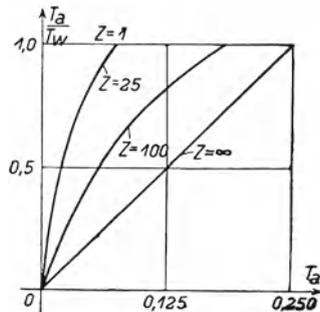


Abb. 9. Das Verhältnis der Benutzungsdauern für eine mögliche Verbrauchszeit gleich einem Viertel der Periodenzeit.

Verhältnis T_a/T_w , das in den Grenzen von 0 bis 1 liegt, entspricht grundsätzlich dem von A. Wright¹⁾ unter dem Namen „Verschiedenheitsfaktor“ eingeführten Kriterium des Belastungsausgleichs; dasselbe Verhältnis wird heute in der deutschen Fachliteratur, nicht besonders passend, meist „Gleichzeitigkeitsfaktor“ genannt und die Bezeichnung „Verschiedenheitsfaktor“ für den reziproken Wert benutzt.

3. Die Eigenart der einzelnen Verbrauchergruppen.

Zur Kennzeichnung eines Verbrauchers dienen uns die Maßgrößen H , N_a und T_a ; mit ihrer Hilfe haben wir übrigens die Begriffe des gleichartigen und des ungleichartigen Verbrauchers gebildet. Die Gesamtheit gleichartiger Verbraucher, die bei ihrer gemeinsamen Belieferung mit elektrischer Arbeit den Belastungsausgleich bewirken, den wir soeben betrachtet haben, bezeichnen wir nun als eine einzelne Verbrauchergruppe. Solche Verbrauchergruppen entsprechen je ohne weiteres den verschiedenen Formen der Dienstbarkeit der elektrischen Arbeit, d. h. der Beleuchtung, des Kraftbetriebes, der Wärmebereitung und der Elektrochemie; innerhalb des Kraftbetriebes kommt eine Sonderstellung namentlich den elektrischen Bahnen zu, während innerhalb der Wärmebereitung eine Sonderstellung von den Arbeitsverlusten der Übertragungs- und Verteilungsanlagen selbst behauptet wird. Alle diese Verbrauchergruppen wollen wir nun in bezug auf ihre Eigenart näher betrachten, wobei wir besonders auch ihre verschiedene Eignung zum Belastungsausgleich im Innern der Gruppe, je nach der normal zu erwartenden Anzahl von Gruppenteilnehmern, überblicken können; vor allem soll uns aber die Kenntnis der Eigenart der einzelnen Verbrauchergruppen in stand setzen, dem Problem des Belastungsausgleichs gemischter Verbrauchergruppen gerecht zu werden, von dem im nächsten Abschnitt die Rede sein wird.

Arbeitsverbrauch für Beleuchtung. Das Bedürfnis nach künstlicher Beleuchtung, das unter normalen Verhältnissen bestimmend auf die kennzeichnende Maßgröße H einwirkt, ergibt sich aus dem periodisch auftretenden Wechsel von Tageshelle und Nacht, über den die Abb. 10 für mittlere geographische Breiten die grundlegenden Daten zum Ausdruck bringt. Der Beleuchtungsdienst ist dann wiederum

¹⁾ „Electrician“ 48, 347 ff., London, 20. Dezember 1901.

individuell je ein anderer für die folgenden Untergruppen von Verbrauchern bzw. für die von ihnen bedienten Räume:

Wohn- und Gesellschaftsräume,

Räume für gewerblichen Betrieb in der normalen Arbeitszeit,

Räume für gewerblichen Betrieb außerhalb der normalen Arbeitszeit,

Räume der sogenannten öffentlichen Beleuchtung.

Im Hinblick auf den Belastungsausgleich innerhalb dieser Untergruppen stellt sich der gewerbliche Betrieb innerhalb der normalen Arbeitszeit am ungünstigsten; er kann in den Sommermonaten überhaupt voll-

ständig in die Tageshelle fallen, während er in der übrigen Zeit die periodisch Tag für Tag zunehmende bzw. Tag für Tag abnehmende mögliche Verbrauchszeit aufweist, über die Abb. 10 orientiert; er tritt unter Umständen mit sehr großen Werten N_a auf, da alle genau in der gleichen Zeitphase des Verbrauchs benutzten Lampen zusammen einen einzigen Abnehmer bilden, wobei relativ niedrige Benutzungsdauern T_a in Betracht kommen. Die Wohn- und Gesellschaftsräume stellen sich demgegenüber

als günstigste Untergruppe im Sinne der Ermöglichung des internen Belastungsausgleichs dar. Aber alle Beleuchtungsabnehmer haben wir doch grundsätzlich als Abnehmer mit minimaler Möglichkeit eines internen Belastungsausgleichs zu betrachten, da eben das Beleuchtungsbedürfnis, nach Maßgabe der Abb. 10, in einer Weise allgemeinverbindlich festgelegt ist, die normativen Charakter hat.

Arbeitsverbrauch im Kraftbetrieb. Der elektrische Kraftbetrieb stellt die allgemeinste Form des Verbrauchs elektrischer Arbeit dar, weil er auch die mit Motorgeneratoren ausgerüsteten Unterwerke umfaßt, in denen eine Änderung der Stromart vorgenommen wird, die letzten Endes im Dienste der Beleuchtung, im Dienste der Wärmebereitung oder im Dienste der Elektrochemie stehen kann; einen solchen Kraftbetrieb kann man allerdings einen „uneigentlichen“ nennen, da dabei die Drehmomenterzeugung nicht ein endgültiges

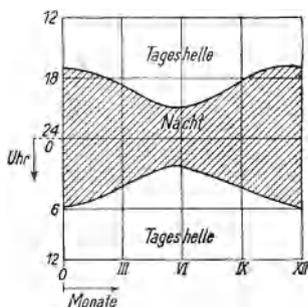


Abb. 10. Übersicht über die Grundlagen des Beleuchtungsbedarfs.

Betriebsziel darstellt, wobei aber, z. B. bei Anwendung einer Schwungradpufferung zu Regelungszwecken, wesentliche Merkmale des eigentlichen Kraftbetriebes gleichwohl vorhanden sein können. Im weiteren findet in der Regel auch die Stromversorgung der Schwachstromtechnik (Telegraph und Telephon) und des Radiodienstes über Motorgeneratoren statt, so daß also auch diese Anwendungen der Elektrotechnik uneigentliche Kraftbetriebe darstellen. Der Allgemeincharakter des elektrischen Kraftbetriebes macht sich auch insofern geltend, als die einen Abnehmer kennzeichnenden Größen N_a , T_a , H in den weitesten Grenzen variieren können. Es kann N_a winzig klein bzw. so groß wie das N_{\max} eines ganzen Kraftwerkes sein; weiter können T_a und H jeden Wert von 0 bis T einnehmen. Es erreichen T_a und H den Wert T bei ununterbrochenem Betrieb, wie ihn Pumpen, Ventilatoren und Kompressoren im Bergwerkbetriebe und im Hüttenbetriebe aufweisen, wie er auch bei zahlreichen Motorgeneratoren für Beleuchtung, Bahnbetrieb, Schwachstromanlagen usw. vorkommen kann. Von den unzähligen Untergruppen, die man beim elektrischen Kraftbetrieb feststellen kann, ist der interne Belastungsausgleich bei den ausgesprochen aussetzend betriebenen Hebezeugen besonders wirkungsvoll, eine genügende Zahl gleichartiger Abnehmer vorausgesetzt; ebenso können auch die Kleinmotoren gewisser Industrien und Gewerbe dasselbe Ergebnis bewirken.

Arbeitsverbrauch im Bahnbetrieb. Der elektrische Bahnbetrieb hat in seiner ältesten Sonderform, im Straßenbahnbetrieb, die Elektrotechnik zum erstenmal mit der Erscheinung der Gesetzmäßigkeit des mit zunehmender Abnehmerzahl wachsenden Belastungsausgleichs bekannt gemacht; die „Abnehmer“ werden dabei durch die einzelnen Motorwagen und ihre Anhänger gebildet. Bei größeren elektrischen Bahnen treten an die Stelle der Motorwagen und Anhänger die einzelnen Eisenbahnzüge. Wenn bei größeren elektrischen Bahnen die einzelnen Zugarten (Schnellzüge, Personenzüge, Güterzüge) individuelle Ausprägung zeigen, so sind sie meistens auch je in genügender Zahl vorhanden, um Untergruppen mit gleichartigen Einzelgliedern darzustellen, wobei diese Untergruppen den einzelnen Zugarten genau entsprechen. Ohne weiteres erscheint also für die rechnerische Erfassung die Abnehmerzahl Z als gleich einer Zahl fahrender Züge in derselben Zeitperiode, auf die T_a und H bezogen sind, wobei T_a

die in die Fahrzeit fallende Benutzungsdauer für die Effektaufnahme N_a aus der Fahrleitung ist. Die Mittelwertsgröße $y = Z \cdot t_a$ kann zugleich mit dem Maß des in der gewählten Zeitperiode (Tag, Monat, Halbjahr oder Jahr) bewältigten Verkehrs auch das Maß der Durchschnittsleistung darstellen, die die Züge zusammen aus der Fahrleitung aufnehmen; die Größe K wird jedoch nicht die Verkehrsschwankung, sondern, im Hinblick auf $w''_x = \tau$, die Leistungsschwankung zum Ausdruck bringen. Die Abb. 4 und 5 können also ohne weiteres auch das Schwankungsverhältnis K der Leistung im Bahnbetrieb, und zwar in Abhängigkeit von der Verkehrsgröße y , darstellen, wobei man, für die praktische Anwendung, y durch den entsprechenden Wert des Gesamtzuggewichts in Tonnenkilometern in der gewählten Zeitperiode ersetzen kann¹⁾. Eine wirtschaftliche Eigenart des elektrischen Bahnbetriebes liegt in der Verbindung aller Z Abnehmer (d. h. Züge) zu einer wirtschaftlichen Einheit. Deswegen ist es gewöhnlich überflüssig, die Vorausberechnung des Belastungsausgleichs bis zur Betrachtung von Verhältniswerten $\frac{T_a}{T_w}$ auszudehnen, indem praktisch schon die Kurve $K = f(y)$ ausreicht, wie sie aus unseren Abb. 4 und namentlich 5 hervorgeht.

Arbeitsverbrauch zur Wärmeerzeugung. Die elektrische Wärmeerzeugung, von der hier die Rede ist, umfaßt die elektrophysikalischen Verfahren der Elektrochemie nicht, da diese Verfahren in der Wärmeerzeugung nur ein Mittel, aber keinen endgültigen Zweck finden. Vielmehr handelt es sich bei der hier zu betrachtenden Wärmeerzeugung um Verfahren des Heizens von Wohnräumen und Betriebsräumen, um das Kochen, um Wärmebereitung für verschiedene

¹⁾ In seiner Arbeit „Die Wahl der Stromart für größere elektrische Bahnen“, die 1916 als Heft 36 der „Sammlung Vieweg“ erschien, hat der Verfasser auf S. 6 eine a posteriori (hauptsächlich aus umfangreichen Projektstudien) gewonnene Kurve des Schwankungsverhältnisses k am Radumfang über dem Jahresverkehr in Tonnenkilometern mitgeteilt, die im allgemeinen mit der a priori (mittels der Wahrscheinlichkeitsrechnung) gewonnenen Kurve $K = f(y)$ nach Abb. 5 der vorliegenden Arbeit eine gute Übereinstimmung aufweist, sofern man berücksichtigt, daß hier die Werte K die Schwankung in der elektrischen Anlage darstellen und deshalb je etwa 5 bis 10 % tiefer liegen müssen als die Werte k , und daß die in der Arbeit von 1916 berücksichtigten Bahnen, die übrigens normalen europäischen Hauptlinien entsprechen, durch Jahresverkehr so gekennzeichnet sind, daß der Einheit $y = 1$ gerade ein Jahresverkehr von rund 100 Millionen Tonnenkilometern entspricht.

gewerbliche und industrielle Zwecke, sowie auch um die Dampferzeugung im großen, wenn billige elektrische Überschubarbeit vorliegt. Die Entwicklung der hier betrachteten Anwendungen der elektrischen Arbeit ist neueren Datums und zurzeit besonders lebhaft. Man beginnt die relativ erhebliche Speicherrfähigkeit der Wärme in gewissen Substanzen mehr und mehr zu würdigen und gegenüber der Nichtspeicherrfähigkeit der elektrischen Arbeit als Ausgleichsmittel zu verwenden. Wir haben somit durch die elektrische Wärmeerzeugung geradezu Gelegenheit, den Belastungsausgleich sowohl innerhalb der hier in Frage stehenden Verbrauchsgruppe selbst, als auch innerhalb gemischter Verbrauchergruppen praktisch in weitgehendem Maße zu beeinflussen. Im elektrischen Arbeitsäquivalent der Wärme von 1,16 Wattstunden pro Kalorie erblickte man in den ersten Jahrzehnten des Bestehens der Starkstrom-Elektrotechnik ein objektiv schwerstes Hindernis des Wettbewerbs der Wärmeerzeugung aus elektrischer Arbeit mit der Wärmeerzeugung durch Verbrennen von Brennstoffen; bei gleichgebliebenen wissenschaftlichen Grundlagen ist heute die praktische Einstellung der Elektrotechniker eine von Grund auf andere. Die einzelnen Wärmeapparate können in bezug auf die sie kennzeichnenden Größen N_a , I_a , H ebenso in weitesten Grenzen variieren, wie wir es bezüglich des Arbeitsverbrauchs im Kraftbetriebe zu bemerken hatten.

Arbeitsverbrauch für die Elektrochemie. In gleicher Weise, wie wir es für die Wärmeerzeugung feststellen konnten, bietet auch der Verbrauch elektrischer Arbeit in der Elektrochemie Gelegenheit, den Belastungsausgleich innerhalb und außerhalb der Verbrauchsgruppe selbst praktisch nachhaltig zu beeinflussen, da ja die Elektrochemie stapelfähige Erzeugnisse hervorbringt. In den elektrischen Akkumulatoren hat die Elektrochemie überdies einen Energieverbraucher geschaffen, der energetisch derart umkehrbar ist, daß er ohne weiteres wieder elektrische Arbeit hergeben kann, und zwar sogar in einer veredelten Form, sofern ein Wellenstrom in ihn hinein, ein konstanter Gleichstrom aus ihm herausgeht. Der Akkumulator hat dank seines Ausgleichvermögens, sowie dank der Spannungskonstanz, bei der er während relativ langer Zeit entladen werden kann, der in den ersten Anfängen stehenden Starkstrom-Elektrotechnik, insbesondere auf dem Gebiete der elektrischen Beleuchtung, hervorragende Dienste

geleistet. Die seitherige Entwicklung der Elektrizitätswerke zu Großbetrieben und die Fortschritte in der Regelung der Kraftmaschinen der Elektrizitätswerke haben es bewirkt, daß heute die Bedeutung der Akkumulatoren ununterbrochen zurückgeht, wozu die relative Kleinheit der im Einheitsgewicht der Akkumulatoren, wie sie heute technisch möglich sind, elektrochemisch stapelbaren Arbeitsmenge wesentlich beiträgt; sollte es der Elektrochemie gelingen, einen Stoff darzustellen, der je Gewichtseinheit elektrochemisch eine Arbeitsmenge stapeln und entladen läßt, wie sie z. B. im Brennstoff Benzin quasi gestapelt erscheint, so würde damit ein Akkumulator von höchster Bedeutung geschaffen sein. Heute wird die ausgleichende Wirkung elektrochemischer Verbraucher namentlich im Großbetrieb bei der Wasserkraftausnutzung verwendet, wobei die in vielen Fällen, wie z. B. beim Carbidofen, zu beliebigen Zeitpunkten der Betriebsführung zulässige Unterbrechung der Arbeitsaufnahme ein Anpassen an die Belastungsverhältnisse anderer Arbeitsverbraucher ermöglicht, das weitgehenden Ansprüchen des Ausgleichs genügen kann.

Arbeitsverbrauch durch Übertragungs- und Verteilungsverluste. Wir haben bei der Gegenüberstellung der Arbeitsaufnahme A_a eines Verbrauchers und der Arbeitsabgabe A eines Elektrizitätswerkes alle Verluste der Übertragungs- und Verteilungsanlagen außer Betracht gelassen, denn nur unter dieser Annahme gilt bei Z gleichartigen Abnehmern die Beziehung

$$A = Z \cdot A_a.$$

Die Berücksichtigung der genannten Verluste nehmen wir nun in der Weise vor, daß wir diese Verluste als eine besondere Gruppe von Arbeitsverbrauchern einführen, wobei wir zur Kennzeichnung der Einzelverluste die Bezeichnungen Leerlaufverluste und Stromwärmeverluste benutzen. Alle Leerlaufverluste treten mit dem Spannungsetzen der Anlagen ein und gelten als konstant bei allen Belastungen; ihre Benutzungsdauer ist deshalb gleich der möglichen Verbrauchszeit, die in der Regel gleich der in Betracht gezogenen Periodenzeit ist. Die Stromwärmeverluste, für die wir wegen ihres Auftretens im Kupfer der Stromkreise und wegen ihrer Bestimmbarkeit im Kurzschlußversuch den Index k wählen, sind bei Belastung, je proportional dem Quadrat der maßgebenden Stromstärke, variabel. In Abhängigkeit von der Benutzungsdauer des Maximums der jeweils

maßgebenden Stromstärke lassen sich allgemeingültig Grenzwerte der Benutzungsdauer der Stromwärmeverluste angeben; die für diese Verluste maßgebenden Stromstärken werden durch die jeweils aufgenommenen Leistungen der bisher betrachteten Verbraucher, einschließlich der sinngemäß angerechneten Leerlaufverluste benutzter Anlageteile, hervorgerufen. Ein geordnetes Belastungsbild dieser Stromstärken bilden wir in Abb. 11 ab, indem wir für die Stromstärken den von 0 bis 1 gemessenen Verhältniswert $i = \frac{J}{J_{\max}}$ be-

nutzen; die Zeitabszissen kommen in der Regel über die ganze Periodenzeit T , die wir von 0 bis 1 messen wollen, zur Geltung, schon im Hinblick auf die berücksichtigten Leerlauf-

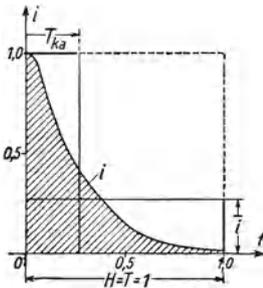


Abb. 11. Geordnetes Belastungsbild des Stromstärkenverhältnisses, mit $i_{\max} = 1$, zur Ermittlung der Benutzungsdauern von Stromwärmeverlusten.

verluste. Zwischen der Kurve i und der Abszissenachse liegt die schraffierte Belastungsfläche, deren Ordinatenquadrate die jeweiligen Stromwärmeverluste der Übertragung und Verteilung im Zeitelement verhältnismäßig festlegen. Diese Belastungsfläche kann inhaltsgleich auch durch zwei extreme Rechtecke zustande kommen, einerseits durch das an der Ordinatenachse anliegende Rechteck $i_{\max} \cdot T_{ka}$, andererseits durch das an der Abszissenachse anliegende Rechteck $\bar{i} \cdot T$. Das Rechteck $i_{\max} \cdot T_{ka}$ gilt im Grenzfall, daß der Arbeitsverbrauch der berücksichtigten Abnehmer samt anschließenden Leerlaufverlusten während der abnehmerseitig gültigen

Benutzungsdauer T_{ka} bei konstantem $i = i_{\max}$ stattfindet, wobei die Stromwärmeverluste der Größe $i_{\max}^2 \cdot T_{ka}$ proportional sind und für das Elektrizitätswerk eine Belastung bilden, deren Benutzungsdauer T_{kw} daselbst durch die Beziehung

$$T_{kw} = T_{ka}$$

festlegt. Das Rechteck $\bar{i} \cdot T$ gilt demgegenüber im Grenzfall, daß jenem Arbeitsverbrauch nur im Abszissennullpunkt ein Stromwert i_{\max} , sonst aber über der ganzen möglichen Verbrauchszeit $H = T = 1$ ein solcher von \bar{i} entspreche, wobei die Stromwärmeverluste der Größe

$$\bar{i}^2 \cdot T = (i_{\max} \cdot T_{ka})^2 / T$$

proportional sind und im Elektrizitätswerk eine Belastung bilden, deren Benutzungsdauer T_{kw} durch die Beziehung

$$T_{kw} = T_{ka}^2/T$$

bestimmt erscheint. Für jedes beliebige Belastungsbild, entsprechend der allgemeinen Kurve i der Abb. 11, liegen also die resultierenden Benutzungsdauern der Stromwärmeverluste der Übertragung und Verteilung im Elektrizitätswerke innerhalb der Grenzen:

$$T_{kw} = T_{ka} \text{ bzw. } T_{kw} = T_{ka}^2/T,$$

von denen die erste das Maximum, die zweite das Minimum festlegt. Man kann deshalb, wie Abb. 12 zeigt, das Gebiet aller Werte T_{kw} in Abhängigkeit von T_{ka} darstellen; nach oben

ist es durch die Gerade $T_{kw} = T_{ka}$, nach unten durch die Parabel $T_{kw} = T_{ka}^2/T$ begrenzt. Im Innern dieses Gebiets liegt bei den Koordinaten $T_{ka} = \frac{1}{2}$, $T_{kw} = \frac{1}{3}$ der Punkt M , für den das Belastungsbild in Abb. 11 durch die Diagonale vom Punkt 1 auf der Ordinatenachse bis zum Punkt 1 auf der Abszissenachse läuft; durch diesen Punkt in Abb. 12 kann man die mittlere punktierte Kurve ziehen, die als Ausdruck des höchstwahrscheinlichen Zusammenhanges von T_{kw} mit T_{ka} gelten kann.

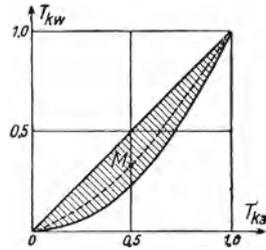


Abb. 12. Grenzkurven und Durchschnittskurve der Benutzungsdauern von Stromwärmeverlusten.

Während also für die Leerlaufverluste abnehmerseitig und werkseitig gleiche Benutzungsdauern bestehen, finden wir für die Stromwärmeverluste werkseitig stets die kleineren Werte der Benutzungsdauer als abnehmerseitig.

4. Der Belastungsausgleich gemischter Verbrauchergruppen.

Im Normalfall besteht die Belastung eines Elektrizitätswerkes aus einer größeren oder kleineren Zahl von Verbrauchergruppen, die unter sich größere oder kleinere Unterschiede in bezug auf die für den Belastungsausgleich maßgebenden Größen N_a , T_a , H der einzelnen Gruppenglieder aufweisen. Es soll nun die Vorausberechnung des Belastungsausgleichs in diesem Allgemeinfalle versucht werden. Mit einer für praktische Zwecke ausreichenden Genauigkeit führt die

folgende, verhältnismäßig einfache Rechnungsweise zum Ziel. Man ordne zunächst die Verbraucher in solche mit möglichen Verbrauchszeiten H , die gleich oder nahezu gleich der zugrunde gelegten Periodenzeit sind, und in solche mit verschiedenen, abgestuften Werten von H und beginne mit der Gesamtbetrachtung solcher Verbraucher, deren mögliche Verbrauchszeit unterhalb einer Grenze, z. B. unterhalb $\frac{2}{3}$ der Periodenzeit, liegt. Diese Verbraucher teile man, je nach den für sie in Betracht fallenden Benutzungsdauern T_a , in Gruppen ein, die derart geordnet sind, daß Verbraucher mit Benutzungsdauern T_a , die sich mit Abweichungen von etwa $\pm 5\%$ von einem arithmetischen Mittelwert unterscheiden, als Gruppenglieder erscheinen, die als gemeinsame Benutzungsdauern Werte $T'_g, T''_g, T'''_g \dots T_g^{(m)}$ aufweisen. Jede derart gebildete Gruppe beansprucht im ganzen eine Arbeitsmenge, die wir für das Allgemeingruppenglied mit dem Index m mittels $A_g^{(m)}$ kennzeichnen. Wir definieren nun durch

$$N_g^{(m)} = \frac{A_g^{(m)}}{T_g^{(m)}}$$

die durchschnittliche Anschlußleistung eines Gruppengliedes. Indem man nunmehr jedem Gruppengliede dieselben Werte N_g und T_g zuschreibt, erscheint die Gruppe homogenisiert. Man kann also nach der für gleichartige Verbraucher gültigen Rechnungsweise den innerhalb dieser Gruppe geltenden Belastungsausgleich ermitteln und entsprechende Werte $T_w^{(m)}$ und $N_w^{(m)}$ für das arbeitliefernde Elektrizitätswerk bilden. Alle m Gruppen beanspruchen aber eine Gesamtarbeit, die durch

$$\sum (N_w^{(m)} \cdot T_w^{(m)})$$

dargestellt erscheint. Zufolge der damit vollzogenen Ausgleichsrechnung liegen die neuen Benutzungsdauern $T_w^{(m)}$ einander näher und insgesamt höher als die ursprünglichen Benutzungsdauern $T_g^{(m)}$. Nun kann eine weitere Ausgleichoperation in der Weise vorgenommen werden, daß man nochmals die neuen Gruppenglieder mit den sie kennzeichnenden Größen $N_w^{(m)}$ und $T_w^{(m)}$ nach ihren Benutzungsdauern ordnet, wobei wiederum, bei Tolerierung kleiner Abweichungen nach unten und nach oben, die Ordnung um arithmetische Mittelwerte erfolgt.

Der neuerdings in Betracht fallende Ausgleich versteht sich nun für ein tatsächliches oder nur vorgestelltes „Überwerk“. Dieses

Ausgleichsverfahren kann man nun bei immer kleiner werdender Anzahl von Gruppen so oft wiederholen, bis nur noch eine einzige Gruppe mit einem endgültigen N_{\max} und einem endgültigen T_w übrigbleibt. Nun muß man noch die Synthese dieser Gruppe mit den seit dem Beginn der Ausgleichrechnung unberücksichtigt gebliebenen Verbrauchern mit großen, oberhalb der angenommenen Grenze liegenden möglichen Verbrauchszeiten H vornehmen. Diese Synthese erfolgt am sichersten an Hand graphisch veranschaulichter Belastungsbilder des genauen zeitlichen Verlaufs.

Unsere Betrachtung des Belastungsausgleichs gemischter Verbrauchergruppen wäre von unzulässiger Unvollständigkeit, wenn sie sich auf die Darlegung der Möglichkeit der Vorausberechnung dieses Ausgleichs beschränken würde; der Belastungsausgleich gemischter Verbrauchergruppen wird nämlich seitens der Elektrizitätswerke durch praktische Maßnahmen zielbewußt begünstigt und gefördert. Bei dieser Praxis wird in der Regel in den Verhältnissen des Arbeitsverbrauchs der Beleuchtung die Ausgangsstellung gefunden, d. h. es werden die Beleuchtungsverbraucher mit ihren aus Abb. 10 ersichtlichen Zwangsverhältnissen wegleitend für die möglichen Verbrauchszeiten, die anderen Verbrauchergruppen, insbesondere auf dem Gebiete der Wärmeerzeugung, zugebilligt werden. Man kombiniert gewissermaßen je einen Lichtverbraucher und je einen Wärmeverbraucher von etwa gleicher Anschlußleistung N_a , derart, daß die nicht oder nur unwesentlich beeinflussbare Benutzungsdauer der Beleuchtung mit der, dank der einigermaßen speicherfähigen, vom Wärmeverbraucher begehrten Wärme, beeinflussbaren Benutzungsdauer desselben zu einem Werte H der möglichen Verbrauchszeit zusammengesetzt wird, der im günstigsten Falle gerade gleich der in Betracht gezogenen Periodenzeit wird. Da das Licht- und Wärmebedürfnis der Wohnräume wie auch der Betriebsräume gleichzeitig maximale — im Winter — und gleichzeitig minimale — im Sommer — Werte erreicht, so läßt sich mit dieser Kombination der Ausgleich im Tage, im Monat, allenfalls noch im Halbjahr, dagegen nicht im ganzen Jahre erreichen. Um nun auch noch, z. B. im Wasserkraftbetrieb, den Ausgleich im Jahre praktisch zu fördern, erscheint es wünschenswert, mit den Licht- und Wärmebeziehern, mit ihrem Sommerminimum und ihrem Wintermaximum, Verbrauchergruppen zu kombinieren, die ein Sommer-

maximum und ein Winterminimum besitzen; als solche Verbraucher können beispielsweise Großverbraucher von Wärme in Betracht fallen, welche die im Sommer benötigte Wärme aus elektrischer Arbeit erzeugen, während sie im Winter eine Wärmeerzeugung aus Brennstoffen verwenden.

II. Die tatsächlichen Kosten der elektrischen Arbeit.

1. Die Arbeitskosten beim Betrieb von Wärmekraftwerken.

Das geordnete Belastungsbild eines Wärmekraftwerkes bringen wir in Abb. 13 mit mehreren uns bereits bekannten Größen zur Darstellung, wobei wir auch die Beziehungen:

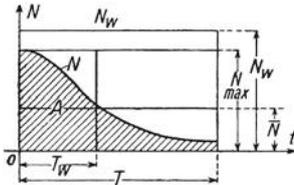


Abb. 13. Geordnetes Belastungsbild eines Wärmekraftwerkes mit ausgebauter Leistung N_w .

$$A = N_{\max} \cdot T_w = \bar{N} \cdot T,$$

$$K = \frac{N_{\max}}{\bar{N}} = \frac{T}{T_w}$$

im bisherigen Sinne benutzen, natürlich mit der für ein Kraftwerk mit Verbrauchern, deren mögliche Verbrauchszeit H sich für einzelne Glieder der Verbrauchergesamtheit über die ganze Periodenzeit T erstreckt, naheliegenden Erstreckung der Fläche A von 0 bis T . Als neuen Begriff haben wir nur die Größe der ausgebauten, also disponiblen Werkleistung N_w einzuführen. Grundsätzlich erscheint dann das Kraftwerk zur Hervorbringung einer elektrischen Arbeit $N_w \cdot T$ befähigt. Die Technik der Kraftwerke benutzt zur Behandlung der Bau- und Betriebsfragen der Kraftwerke neben dem Schwankungsverhältnis K bzw. neben dessen Reziprokwert m , dem sogenannten Belastungsfaktor

$$m = \frac{\bar{N}}{N_{\max}} = \frac{1}{K},$$

noch die zwei weiteren, mit N_w gebildeten Begriffe n und r , von denen der erstere, der Nutzungsfaktor n , durch

$$n = \frac{\bar{N}}{N_w},$$

und der andere, der Reservefaktor r , durch

$$r = \frac{N_w}{N_{\max}}$$

festgelegt erscheinen. Zwischen diesen Größen und K besteht der Zusammenhang

$$r = \frac{m}{n} = \frac{1}{K \cdot n}.$$

Da sich die Belastungsverhältnisse der Werke mit der Zeit ändern, und zwar normal im Sinne wachsender Arbeitsabgabe und wachsenden Belastungsausgleichs, so nimmt bei konstanter Ausbaugröße r mit der Zeit ab, und zwar bis zum Minimalwert $r = 1$. Sobald derselbe nahezu erreicht ist, muß N_w vergrößert werden, was stets nur stufenweise, je nach der Größe der Kraftwerksmaschinentypen, geschieht. Bei gutem Haushalt hat man hierzu bereits Mittel bereitgestellt; dies kann stetig, mit der Zunahme von \bar{N} und N_{\max} , in die Wege geleitet werden. Für die Kostenbetrachtungen kann man also sehr wohl mit einer kleineren Zahl von Begriffen auskommen als der hier der Vollständigkeit halber mitgeteilten. Gleiche Erwägungen wie für die Kraftwerke gelten auch für die anderen Anlageteile vollständiger Elektrizitätswerke, über die schon die Abb. 3 ein Normalschema lieferte.

Zur Kostenbetrachtung übergehend, deren Ziel wir in der geordneten Betrachtung der Betriebskosten zu erblicken haben, müssen wir zunächst einen Überblick über die Baukosten, als eine die Betriebskosten in wesentlichem Maße bestimmende Größe, gewinnen. Unter den in Abb. 3 veranschaulichten normalen Anlageteilen steht das Kraftwerk an erster Stelle. Für Wärmekraftwerke sind Dampfmaschinen bzw. Dieselmotoren die heute maßgebenden Arten von Wärmekraftmaschinen, mit deren Hilfe die heutige Technik die Einheit 1 Kilowattstunde (1 kWh) der elektrischen Arbeit unter günstigen und normalen Bedingungen, d. h. bei Vollast der benutzten Einzelmaschinen, mit einem Wärmeaufwand von rund 4000 Brennstoffkalorien gewinnen läßt. Da der Allgemeinfluss der heutigen Elektrizitätswirtschaft die Erzeugung der elektrischen Arbeit in Großkraftwerken mit Größen N_w von der Ordnung 10^5 Kilowatt (kW) voraussetzt, so kommt für die Gestaltung des Wärmekraftwerkes die Dampfturbine, als die Normalform der Großkraftmaschine, heute als bestimmend in Betracht. Bei Kraftwerken von dieser Größe begeh

man kaum einen Fehler, wenn man die Baukosten für das ausgebaute Werk-Kilowatt als einen Festwert betrachtet. Nach unseren oben mitgeteilten Erörterungen soll es dann auch noch als zulässig gelten, die Baukosten für das Kilowatt abgegebener Maximalleistung des Kraftwerkes als Festwert zu betrachten. Dieselbe Annahme machen wir nun auch bezüglich der anderen Anlageteile nach Abb. 3, deren Baukosten also ebenfalls für das Kilowatt vom Kraftwerk abgegebener Maximalleistung angegeben werden sollen. Für alle Gattungen elektrischer Leitungen erscheint zwar eine Bezugnahme der Baukosten auf das Kilometer Leitungslänge näherliegend. Weiterhin sind sowohl für Leitungen als auch für Unterwerke die zu ihrer Bemessung maßgebenden Leistungen im Hinblick auf die Verschiedenheit des Belastungsausgleichs in Anlageteilen verschiedener Reichweite nicht ohne weiteres durch die Maximalleistung im Kraftwerk gegeben. Trotzdem ist in summarischer Betrachtungsweise die Bezugnahme der Baukosten aller Anlageteile auf die vom Kraftwerk abgegebene Maximalleistung noch als zulässig zu betrachten. Auf Grund der heute geltenden Preise kann folgende Orientierung über die Baukosten nach dem Normalschema der Abb. 3, auch bei allfälligem Wegfall der Fernübertragungen und der Hauptunterwerke, gegeben werden:

Anlageteile	Anlagekosten in R.M./kW
Kraftwerke	250 bis 350
Fernübertragungen	0 „ 100
Hauptunterwerke	0 „ 150
Nahübertragungen	100 „ 200
Netzunterwerke	50 „ 100
Gebrauchsnetze	150 „ 300
Zusammen im Mittel	700 bis 1000

Die derart gekennzeichneten Anlagekosten sind maßgebend für denjenigen Teil der Betriebskosten, die den Elektrizitätsunternehmungen auch dann erwachsen, wenn gerade keine elektrische Arbeit an Verbraucher abgegeben werden könnte. Diese Betriebskosten, die deshalb als fest, d. h. als unabhängig von der Größe der Abgabe elektrischer Arbeit gelten, werden deshalb „feste Betriebskosten“ genannt; folgerichtig bezeichnet man dann den von der Arbeitsabgabe abhängigen

Teil der Betriebskosten als „veränderliche Betriebskosten“. Die festen Betriebskosten lassen sich in summarischer Betrachtungsweise durch einheitliche Prozentsätze der Anlagekosten darstellen, und zwar pro Jahr für die einzelnen Anlageteile etwa wie folgt:

Anlageteile	Zinsen o/o	Rücklagen o/o	Für den Betrieb o/o	Verschiedene Spesen o/o	Total o/o
Kraftwerke	5	3	1	1	10,0
Fernübertragungen . .	5	1,5	1,5	1	9,0
Hauptunterwerke . . .	5	1,5	1,5	1	9,0
Nahübertragungen . . .	5	2,0	1,5	1,5	10,0
Netzunterwerke	5	3,0	3,0	3,0	14,0
Gebrauchsnetze	5	5,0	5,0	5,0	20,0

Im Mittel dürfte für die Gesamtheit der im Elektrizitätswerke vereinigten Anlageteile mit einem Prozentsatz von 11 bis 12 % im ganzen gerechnet werden, d. h. im Jahre mit etwa 80 bis 120 RM pro kW, als einem Betrage c_1 der festen Betriebskosten. Für die Abschätzung der veränderlichen Betriebskosten sei als normal der möglichst beständige Vollastbetrieb der nur in der Zahl variierten Einzelmaschinen des Kraftwerkes vorausgesetzt; vor sehr starken Veränderungen des Anlagenwirkungsgrades im Betriebe ist man dann im wesentlichen gesichert. Es ist dann zulässig, die neben den festen noch in Betracht zu ziehenden veränderlichen Betriebskosten, die sich auf die Hauptbestandteile: Materialkosten (insbesondere für Brennstoffe, Schmierstoffe und Wasser), Personalkosten und Nebenkosten, verteilen lassen, durch einen Festwert c_2 derart zu kennzeichnen, daß die gesamten jährlichen Betriebskosten durch die Preisgleichung

$$P = N_{\max} \cdot (c_1 + c_2 \cdot T_w)$$

in RM für die Abgabe der elektrischen Arbeit:

$$A = N_{\max} \cdot T_w$$

dargestellt werden können. Um bequeme Zahlenwerte zu erhalten, sei die Zeiteinheit 1 Jahr auch für T_w zugrunde gelegt, so daß T_w durch eine zwischen 0 und 1 liegende Zahl ausgedrückt wird; die Größe c_2 ist dann in RM je Kilowattjahr gemessen und beträgt etwa 400 bis 600 RM/kW-Jahr. Für die Annahmen

$$N_{\max} = 10^5 \text{ kW}, \quad c_1 = 100 \text{ RM/kW}, \quad c_2 = 450 \text{ RM/kW-Jahr}$$

bilden wir den Preis P über der Werkbenutzungsdauer T_w in Abb. 14 ab. Zur Beurteilung der Angaben dieser Abbildung sei bemerkt, daß

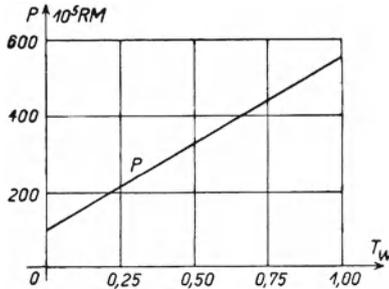


Abb. 14.

Jahreskosten der elektrischen Arbeit in RM für $N_{\max} = 10^6 \text{ kW}$ bei Wärmekraftbetrieb.

die in der Hauptsache durch Wärmekraftwerke bedienten Elektrizitätswerke des Deutschen Reiches im Durchschnitt eine Werkbenutzungsdauer von rund 0,2 aufweisen.

2. Die Arbeitskosten beim Betrieb von Wasserkraftwerken.

Das in Abb. 13 vorgeführte, geordnete Belastungsbild eines Wärmekraftwerkes kann nur unter ganz besonderen Umständen auch dem Betrieb eines Wasserkraftwerkes gerecht werden, nur dann, wenn N_w , die verfügbare und ausgebaute Wasserkraftleistung, während der ganzen betrachteten Periodenzeit T tatsächlich auch konstant vorhanden ist, was im Laufe eines Tages an Flußläufen der Ebene noch einigermaßen normal ist, im Laufe eines Jahres dagegen im allgemeinen durchaus nicht angenommen werden kann, da man im Allgemeinfalle der Wasserkraftnutzung eine Schluckfähigkeit der hydraulischen Anlageteile ausbildet, die etwa der maximalen Wasserführung eines Normaljahres entspricht und auch nur in beschränktem Maße Wasser speichern und alsdann gleichmäßig ausnutzen kann. Als Normalbild der Belastungsverhältnisse führen wir richtiger Abb. 15 ein, die sich auf die Periode 1 Jahr ausschließlich bezieht und die eine Ordnung der verbrauchten Leistungen N nach fallenden Werten von N , eine Ordnung der disponiblen Leistungen N_w dagegen nach steigenden Wassermengen eines Flußlaufes der Ebene berücksichtigt; der über-

raschende Verlauf der geordneten Ordinaten N_w ist dadurch begründet, daß N_w mit dem Wachsen der Wassermenge so lange mit wächst, bis die Schluckfähigkeit der Turbinen, entsprechend $N_{w\max}$, erreicht ist; für noch größere Wassermengen nimmt die Leistung N_w langsam mehr und mehr ab, da das mit zunehmender Wassermenge ausnutzbare Gefälle entsprechend zurückgeht. Durch die entgegengesetzt vorgenommene Ordnung der Ordinaten N und N_w soll das leicht mögliche zeitliche Zusammenfallen des Minimums N_{w0} mit dem Maximum N_{\max} , durch das eines der Hauptprobleme der Wasserkraftnutzung begründet wird, zum Ausdruck kommen. Es entsteht dann möglicherweise, gemäß der doppelt schraffierten Fläche in Abb. 15, ein Arbeits- und Leistungsmanko in gewissen Stunden bzw. an gewissen Tagen des Jahres, das irgendwie, am besten durch Hinübernehmen von disponiblen Arbeiten und Leistungen aus dem Gebiete mit Abszissen, die größer als t' sind, zu decken ist; eine genauere Einsicht in allfällige Fehlbeträge der Arbeiten und Leistungen gewähren Kurven des genauen zeitlichen Verlaufs; diese sind indessen einer zuverlässigen Vorausbestimmung natürlich auch nicht fähig. Die Extremwerte der Wasserkraftleistungen N_w können sich zeitlich von einem Jahr zum nächsten um einen oder gar um zwei Monate verschieben; die geordneten Disponibilitäts- und Belastungsbilder ändern sich von Jahr zu Jahr weniger als Bilder des genauen zeitlichen Verlaufs der Disponibilität und der Belastung. Zum Hinübernehmen von Arbeiten und Leistungen aus dem Gebiete der Abb. 15 mit Abszissen, die größer als t' sind, in das Gebiet, dessen Abszissen unterhalb t' liegen, kommen die verschiedenen Möglichkeiten der Speicherung von Wasser, d. h. die Tagesspeicherung, die Wochenspeicherung, die Monatsspeicherung und die Jahresspeicherung in Betracht. Diese Speicherung kann unmittelbar in der Höhenlage des Oberwasserspiegels, in ausgezeichneten Fällen, unter Verwendung von Pumpwerken, auch in wesentlich größeren Höhenlagen mit Gefällen, die zu besonderen Sätzen von Kraftwerkmaschinen führen, bewerkstelligt werden. Im Idealfall beseitigen die Speicher-

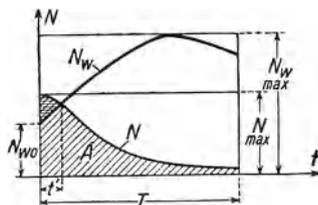


Abb. 15.

Geordnetes Belastungsbild eines Wasserkraftwerkes mit geordneten verfügbaren Leistungen N_w .

Ummer, Wissenschaftl. Grundlagen d. Preisbildung f. d. elektr. Arbeit. 3

anlagen im Belastungsbild nicht nur die Mankoflächen, sondern sie erlauben geradezu, den Verlauf der Kurve N_w dem der Kurve N anzupassen, sowohl hinsichtlich der geordneten Darstellungsweise, als besonders auch des genauen zeitlichen Verlaufs. Damit gewinnt der Gesichtspunkt einer restlosen Verwertung der überhaupt in Wasserkraftanlagen disponiblen Arbeit, d. h. der Fläche, die in Abb. 15 zwischen der Kurve N_w und der Abszissenachse liegt, eine besondere Bedeutung, die wir nach der Kenntnisaufnahme der Kosten noch besonders werden würdigen können. Diesem Gesichtspunkt kann nicht nur durch Speichereinrichtungen, sondern auch durch die Kombination von Wasserkraft- und Wärmekraftanlagen, sowie auch durch Beeinflussung des Arbeitsverbrauchs selbst, also durch einen „Belastungsausgleich“ besonderer Art, Genüge geleistet werden. Alle solchen Maßnahmen sind solche der „Elektrizitätswirtschaft“ in des Wortes reinstem Sinne. Damit wird häufig nicht mehr nur ein einzelnes Kraftwerk mit seinem Verbrauchsgebiet, sondern eine Gruppe wirtschaftlich zusammengehörender Kraftwerke mit einem gemeinsam bedienten Verbrauchsgebiet in den Kreis der Betrachtung gezogen. Für diese Betrachtung wird nun erst recht der Verbrauch, insbesondere die Leistung N_{\max} maßgebend; wir legen sie denn auch der Kostenbeurteilung des Wasserkraftbetriebes ebenso zugrunde, wie es im vorhergehenden Abschnitt für den ausschließlichen Wärmekraftbetrieb geschah.

Zur Beurteilung der Baukosten benutzen wir wiederum das Schema nach Abb. 3, dessen Nahübertragungen, Netzunterwerke und Gebrauchsnetze unverändert bleiben sollen; neben dem Ersatz der Wärmekraftwerke durch Wasserkraftwerke sollen weiter, dem Normalfall gemäß, bedeutendere Fernübertragungen mit entsprechenden Hauptunterwerken berücksichtigt werden. Damit kommen Anlagekosten von 500 bis 900 RM/kW für Kraftwerke, solche von maximal 120 RM/kW für Fernübertragungen und solche von maximal 180 RM/kW für Hauptunterwerke in Betracht. Insgesamt rechnen wir nun für ein vollständiges Elektrizitätswerk nach dem Schema der Abb. 3 mit Anlagekosten von 1100 bis 1600 RM/kW. Die Leistung, auf die sich alle diese Preise beziehen, ist N_{\max} , wie oben dargelegt wurde. Was nun die festen Betriebskosten angeht, so haben wir die im vorhergehenden Abschnitt gegebene Übersicht der Prozentsätze lediglich bezüglich der Kraftwerke zu modifizieren; für die Rücklagen

genügen, angesichts der langen Lebensdauer der Wasserbauten, im Mittel etwa 1,5 %; für Betrieb und Spesen sind nun zusammen etwa 4,5 % zu rechnen; angesichts des bei 5 % belassenen Zinsfußes kommen wir für die Kraftwerke nunmehr auf einen Totalprozentsatz von 11 % Für die Gesamtheit der Anlagen möge wieder mit 11 bis 12 % im ganzen gerechnet werden, wobei nun immerhin der Zahl 12 % das größere Gewicht zukommt. Für die Preisgleichung pro Jahr ergibt sich dann eine Konstante $c_1 = 150$ bis 200 RM pro kW. Die veränderlichen Betriebskosten fallen beim Wasserkraftbetrieb wesentlich kleiner als beim Wärmekraftbetrieb aus, und zwar namentlich wegen des Wegfalls der Kosten des Brennstoffs. Wir rechnen mit einer Konstante $c_2 = 200$ bis 300 RM/kW-Jahr.

Auf Grund unserer Preisgleichung

$$P = N_{\max} \cdot (c_1 + c_2 \cdot T_w)$$

bilden wir mit Hilfe der Annahmen

$N_{\max} = 10^6$ kW, $c_1 = 175$ RM/kW, $c_2 = 200$ RM/kW-Jahr die Jahreskosten P über der Werkbenutzungsdauer T_w , letztere wieder in Bruchteilen des Jahres ausgedrückt, in Abb. 16 ab.

Vergleichen wir die Kosten nach Abb. 16 mit denen nach Abb. 14, so ergibt sich eine Kostengleichheit für $T_w = 0,3$. Für kleinere Benutzungsdauern ist also bei unseren Annahmen die höhere Wirt-

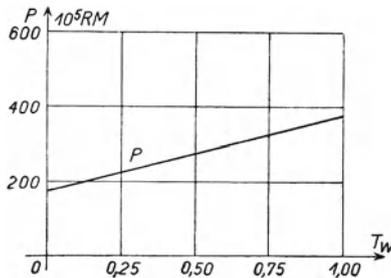


Abb. 16.

Jahreskosten der elektrischen Arbeit in RM für $N_{\max} = 10^6$ kW bei Wasserkraftbetrieb.

schaftlichkeit auf der Seite des Wärmekraftbetriebes, für größere Benutzungsdauern auf der Seite des Wasserkraftbetriebes. Es ist denn auch aus dieser auch im allgemeinen zutreffenden Sachlage der große

Anreiz zur Hebung der Benutzungsdauer T_w der Wasserkraftwerke verständlich; er läßt sich auch tatsächlich für die Gebiete mit entwickelter Wasserkraftnutzung statistisch feststellen. Angesichts des zunächst nicht zusammenpassenden Verlaufs der Kurven N_w und N läuft die Hebung der Benutzungsdauer T_w offenbar stets auf die Ausfüllung des zwischen diesen Kurven noch unbenutzten Spielraumes hinaus, d. h. auf die bereits erörterten Maßnahmen der „Elektrizitätswirtschaft“.

3. Die Arbeitskosten bei abnormalem Leistungsfaktor.

Mit der Ausbreitung der elektrischen Arbeitsversorgung in Gebiete mit schlechter Ausnutzung der Gebrauchsnetze und Netzunterwerke begann man vielfach ein Sinken des Leistungsfaktors, d. h. des Verhältnisses der in Kilowatt gemessenen Leistungen zu den in kVA (Kilovoltampere) gemessenen Scheinleistungen der Arbeitsabgabe, festzustellen, wobei geradezu eine vorzeitige Erschöpfung der Stromlieferungsfähigkeit der Generatoren befürchtet werden konnte. Um durch das Mittel einer Preisdifferenzierung auch auf der Seite der Verbraucher elektrischer Arbeit einen Anreiz zur Hochhaltung des Leistungsfaktors zu erzeugen, wurden mehr und mehr Untersuchungen über die Abhängigkeit der Arbeitskosten von einem abnormalen Leistungsfaktor angestellt und entsprechende Berichtigungen in die Tarife für den Verkauf elektrischer Arbeit eingeführt. Die Grundlagen solcher Untersuchungen sind naheliegende: Dem Leistungsfaktor umgekehrt proportional muß im allgemeinen das Kupfergewicht der stromdurchflossenen Anlageteile wachsen, was auf die festen Betriebskosten zurückwirkt. Andererseits wachsen auch die Stromwärmeverluste, und zwar bei gleichbleibendem Kupfer umgekehrt proportional dem Quadrat des Leistungsfaktors, was auf die veränderlichen Betriebskosten einwirkt. Nun erfordert aber ein erhöhtes Kupfergewicht auch erhöhte Eisengewichte in Maschinen- und Transformatoren, sowie analoge allgemeine Gewichtserhöhungen bei Leitungen, Schaltern usw. Weiterhin kompliziert sich auch die Erhöhung der Stromwärmeverluste, insofern als Anlagen von verschiedenem Leistungsfaktor auch verschiedene Kupfergewichte und verschiedene, für die Stromwärmeverluste maßgebende effektive Widerstände aufweisen. So naheliegend also die Grundlagen für die Untersuchung der Abhängig-

keit der Arbeitskosten von einem abnormalen Leistungsfaktor auch sind, so sehr erscheint die Durchführung einer einwandfreien Untersuchung bei genauerem Zusehen erschwert. Unter verschiedenen, durch die Literatur bekanntgewordenen bezüglichen Untersuchungen bevorzugen wir diejenige von H. Nissel¹⁾ und folgen ihr, wenn auch in formal anderer Darstellung, in den anschließenden Darlegungen. In der Preisgleichung

$$P = N_{\max} \cdot (c_1 + c_2 \cdot T_w)$$

kann die Rücksichtnahme auf den Leistungsfaktor in der Weise vor sich gehen, daß die Festwerte c_1 und c_2 in $c_1 \cdot \alpha$ und in $c_2 \cdot \beta$ erweitert werden, so daß die Preisgleichung die Form

$$P = N_{\max} \cdot (c_1 \cdot \alpha + c_2 \cdot \beta \cdot T_w)$$

erlangt. Die Berichtigungsgröße α ist aus dem Unterschied der Anlagekosten der Anlageteile bei verschiedenem Leistungsfaktor ($\cos \varphi$) abzuleiten und besteht aus der Summe

$$\alpha = \alpha_0 + \cos \varphi \cdot (\alpha_1 \cdot \xi_1 + \alpha_2 \cdot \xi_2 + \alpha_3 \cdot \xi_3 + \dots),$$

entsprechend der Zahl Anlageteile, die in verschiedener Weise in ihren Anlagekosten vom Leistungsfaktor abhängig sind. Alle Größen α_0 , α_1 , α_2 , α_3 , ... stellen Verhältnisse von Anlagekosten, je des bezüglichen Teiles zur ganzen Anlage, dar, und ihre Summe ist gleich 1 für $\cos \varphi = 1$. Das Verhältnis α_0 berücksichtigt den Anlageteil, dessen Kosten vom Leistungsfaktor unabhängig sind, während alle anderen Werte α_1 , α_2 , α_3 , ... vom Leistungsfaktor abhängige Verhältnisse der Kosten des Teiles zum Ganzen darstellen, wobei die Abweichungen der Abhängigkeiten von der Proportionalität durch die mit Hilfe der Preislisten feststellbaren weiteren Berichtigungsgrößen ξ_1 , ξ_2 , ξ_3 , ... berücksichtigt werden. Diese Methode der Ermittlung einer resultierenden Berichtigungsgröße α für die festen Betriebskosten bedient sich der Annahme, für alle Anlageteile dürfe derselbe Prozentsatz benutzt werden, um diese Kosten aus dem bezüglichen Anlagekapital zu berechnen. Angesichts der nur unwesentlichen Unterschiede der für die einzelnen Anlageteile gerechtfertigten Prozentsätze, über die wir in den zwei vorhergehenden Abschnitten orientierten, darf zur Ermittlung von α sehr wohl demgemäß gerechnet werden.

¹⁾ Der Einfluß des $\cos \varphi$ auf die Tarifgestaltung der Elektrizitätswerke. Berlin, Verlag von Julius Springer, 1928.

Für ein Anlageschema, gemäß unserer Abb. 3, mit Spannungen von 6 Kilovolt (kV) im generatorischen Kreis und im Mittelspannungskreis, von 30 kV im Oberspannungskreis und von 220 Volt im Unterspannungskreis, wobei alle Leitungsanlagen aus Kabeln bestehen, hat Nissel für α Werte von $\frac{1,00 \text{ bis } 0,83}{\cos \varphi}$ für $\cos \varphi = 1$ bis 0,5 ausgerechnet.

Die Berichtigungsgröße β zur Berücksichtigung der Abhängigkeit des mit der Belastung veränderlichen Teiles der Arbeitskosten vom Leistungsfaktor $\cos \varphi$ wird von Nissel in der Form

$$\beta = 1 + \frac{V_k}{A} \cdot \left(\frac{1}{\cos \varphi} - 1 \right)$$

dargestellt, wobei V_k die beim Leistungsfaktor 1 auftretenden Stromwärmeverluste und A , wie bisher, die vom Elektrizitätswerk total abgegebene Arbeit bedeuten; diese Beziehung, bei der angenommen wurde, daß der Zahlenwert des effektiven Widerstandes bei verschiedenem Leistungsfaktor in umgekehrtem Verhältnis zur entsprechenden Stromstärke steht, beruht auf der durch $\left(\frac{1}{\cos \varphi} - 1 \right)$ bestimmten Zunahme der Stromwärmeverluste für Werte $\cos \varphi < 1$. Beim Werte $\cos \varphi = 1$ ist die Verlustzunahme gleich Null; beim Werte $\cos \varphi = 0,5$ hat sie 100 % erreicht. Die Berichtigungsgröße β ändert sich, indem sie mit abnehmendem $\cos \varphi$ wächst; wird beispielsweise $\frac{V_k}{A} = 0,2$ gesetzt, so wächst β von 1,0 auf 1,2, wenn $\cos \varphi$ von 1 auf 0,5 fällt.

Nun werden im allgemeinen die elektrischen Anlagenteile der Elektrizitätswerke nicht für $\cos \varphi = 1$, sondern etwa für $\cos \varphi = 0,8$ bemessen; in den Festwerten c_1 und c_2 der Kostengleichung erscheint dann der Einfluß des dimensionsbestimmenden $\cos \varphi$ eingeschlossen, indem die Größen c_1 und c_2 Berichtigungsfaktoren α und β enthalten, deren Aussonderung nach den oben gegebenen Gleichungen indessen möglich ist und vorgenommen werden soll, wenn man die Abhängigkeit der Kosten vom Leistungsfaktor zu kennen wünscht. Im praktischen Betrieb der Elektrizitätswerke wird man sich zu solchen Untersuchungen hauptsächlich beim Fallen des Leistungsfaktors unter den angenommenen Normalwert, von beispielsweise 0,8, veranlaßt sehen.

Tariftechnische Maßnahmen zur Hochhaltung des Leistungsfaktors haben Großverbraucher der elektrischen Arbeit in erster Linie zu gewärtigen, während gegenüber Kleinverbrauchern die Trennung der Kosten in solche, die abhängig, und in solche, die unabhängig vom $\cos \varphi$ sind, durch die Nebenumstände, insbesondere den Belastungsausgleich, in der Bedeutung zurückgedrängt wird.

III. Die Verkaufspreise der elektrischen Arbeit.

1. Die Bildung von Einheitspreisen.

Die Betrachtung der Jahreskosten der elektrischen Arbeit führte uns auf die Preisgleichung

$$P = N_{\max} \cdot (c_1 + c_2 \cdot T_w).$$

Indem wir diese Gleichung durch N_{\max} dividieren, erhalten wir einen Einheitspreis, der auf die gelieferte Maximalleistung des Elektrizitätswerkes bezogen ist. Dividieren wir die angeschriebene Preisgleichung durch $N_{\max} \cdot T_w$, so ergibt sich ein anderer Einheitspreis, ein auf die gelieferte Arbeit bezogener. Beide Einheitspreise können z. B. dazu dienen, die Wirtschaft verschiedener Elektrizitätswerke zu vergleichen. Indessen sind es nicht diese Einheitspreise, sondern solche, die dem Verkauf der elektrischen Arbeit zugrunde gelegt werden können, denen jetzt unsere Aufmerksamkeit zu gelten hat. Es handelt sich also namentlich darum, die Tatsache des Belastungsausgleichs in die Preisbetrachtung aufzunehmen; damit ist offenbar eine gerechte Grundlage für die Verkaufspreise zu gewinnen.

Zu diesem Behufe denken wir uns zunächst die vom Elektrizitätswerk abzugebende Arbeit A an Z gleichartige Abnehmer, mit den jeweiligen Anschlußleistungen N_a und den Benutzungsdauern T_a , ausschließlich geliefert, so daß wir wieder die Arbeitsgleichung

$$A = N_{\max} \cdot T_w = Z \cdot N_a \cdot T_a$$

benutzen können. Die Jahreskosten P der elektrischen Arbeit sind auf die Z Abnehmer nach Maßgabe des von einem Abnehmer zu entrichtenden Jahrespreises P_1 gleichmäßig zu übertragen, so daß

$$P_1 = \frac{P}{Z} = \frac{N_{\max}}{Z} \cdot (c_1 + c_2 \cdot T_w)$$

folgt. Aus der Arbeitsgleichung folgt

$$\frac{N_{\max}}{Z} = \frac{N_a \cdot T_a}{T_w}$$

und damit

$$P_1 = N_a \cdot \left[c_1 \cdot \left(\frac{T_a}{T_w} \right) + c_2 \cdot T_a \right].$$

Durch diese Darstellung hat unsere Kostengleichung bereits die gewünschte, dem Belastungsausgleich nach Maßgabe des Verhältniswertes $\left(\frac{T_a}{T_w} \right)$ Rechnung tragende Form erlangt. Die Gleichung gilt natürlich für eine Verbraucherzahl $Z > 1$. Für $Z = 1$ wird ohne weiteres $P_1 = P$ und $T_a = T_w$. Den Zusammenhang des Verhältnisses $\left(\frac{T_a}{T_w} \right)$ mit Z und mit T_a haben wir bereits in den Abb. 8 und 9 dargestellt. Aus P_1 lassen sich jetzt die gewünschten Einheitspreise bilden.

Dividieren wir die Gleichung für P_1 durch die Abnehmerleistung N_a , so erhalten wir einen Einheitspreis p_π , der für den Einheitspreis des später zu erörternden sogenannten Pauschaltarifs grundlegend ist und folgenden Ausdruck erhält

$$p_\pi = c_1 \cdot \left(\frac{T_a}{T_w} \right) + c_2 \cdot T_a.$$

Nach den Abb. 8 und 9 steht das Verhältnis $\frac{T_a}{T_w}$ in Abhängigkeit von T_a , und zwar derart, daß es für $Z > 1$ mit von 0 bis 1 wachsendem T_a ebenfalls von 0 bis 1 wächst; die beiden Summanden von p_π nehmen deshalb mit wachsendem T_a von Null an stetig zu, wobei für $1 < Z < \infty$ der erste Summand die Grenze c_1 schon für $T_a < 1$ erreicht, während der zweite Summand die Grenze c_2 stets für $T_a = 1$ erreicht. Für Abnehmer mit minimaler Benutzungsdauer T_a fallen die Einheitspreise p_π ebenfalls minimal aus, während sie sich mit wachsendem T_a der Grenze $c_1 + c_2$ nähern. Nun kann aber eine Gesamtarbeit

$$A = Z \cdot N_a \cdot T_a$$

sehr wohl bei sehr weit auseinanderliegenden Abnehmerzahlen Z stattfinden, wobei außerdem auch das Produkt $N_a \cdot T_a$ entsprechender Variationen fähig ist. Nach Maßgabe eines Preises p_π ist aber bei extremen Werten von Z eine Rücksichtnahme auf die vielleicht sehr

verschiedenen Anlagekosten zur Bedienung relativ weniger bzw. relativ vieler Abnehmer nur in sehr beschränktem Maße möglich. Offenbar leidet schon die Ausgangsgleichung für P grundsätzlich an der Nichtberücksichtigung der Abnehmerzahl. Die Aufstellung eines Einheitspreises p_π läßt nun erkennen, daß die Nichtberücksichtigung von Z in der ursprünglichen Gleichung der Jahreskosten die Folge hat, daß sie die Benutzung von p_π nicht allgemein zuläßt. Für kleinste Werte T_a bei gleichzeitig vorkommenden kleinsten Werten N_a und größten Werten Z kann es nämlich in der Tat fraglich sein, ob die nach der Formel für p_π resultierenden Minimalpreise den tatsächlichen Kosten gerecht werden.

Ein Einheitspreis, der von dieser Problematik frei ist und der doch von der ursprünglichen Gleichung der Jahreskosten abgeleitet ist, entsteht bei der Bezugnahme der auf den einzelnen Abnehmer entfallenden Jahreskosten P_1 auf die vom Abnehmer durchschnittlich verbrauchte Arbeit

$$A_a = N_a \cdot T_a.$$

Dieser Einheitspreis, den wir mit p_γ bezeichnen, weil er, wie wir später sehen werden, mit dem sogenannten Gebührentarif eng verknüpft ist, weist im Zusammenhang mit T_a einen wesentlich anderen Funktionsverlauf auf als p_π und erscheint in der Form

$$p_\gamma = \frac{c_1}{T_a} \cdot \left(\frac{T_a}{T_w} \right) + c_2.$$

Man erkennt, daß p_γ auch für kleinste Werte von T_a nicht zu Null wird; vielmehr weist p_γ gerade für $T_a = 0$ maximale, jedenfalls nicht kleinere Werte auf als für $T_a > 0$. Für $T_a = T_w$, d. h. für $Z = 1$, stellt p_γ über der Abszisse T_a eine Hyperbel dar. Es ist ersichtlich, daß bei Benutzung des Einheitspreises p_γ der Belastungsausgleich berücksichtigt werden kann, ohne daß zu befürchten ist, es könnten für kleinste Werte T_a , bei gleichzeitig kleinsten Werten N_a und größten Abnehmerzahlen Z , formelmäßig befriedigende, aber sachlich unbefriedigende Werte von p_γ entstehen.

Es ist nun zu untersuchen, ob die für den Arbeitsverkauf zu benutzenden Einheitspreise andere werden, wenn die von Z gleichartigen Verbrauchern aufgenommene Arbeit $Z \cdot N_a \cdot T_a$ nicht mehr gleich, sondern wesentlich kleiner ist als die vom Elektrizitätswerk im ganzen gelieferte Arbeit A , bzw. ob also für eine beliebige Verbrauchergruppe

unter vielen Verbrauchergruppen eines Werkes andere Grundlagen der Verkaufspreise bestehen als im Durchschnitt. Offenbar bestimmt jetzt der größere oder kleinere Wert der Benutzungsdauer T_a der Gruppenglieder nur noch den im Werk feststellbaren Gruppenausgleich, entsprechend einer Benutzungsdauer T_{wg} , die im allgemeinen verschieden ist vom Werte T_w für das ganze Werk. Es können jedoch der Wert T_{wg} einer betrachteten Gruppe und T_w zufällig gerade gleich sein, wobei dann die Verhältnisse für die betreffende Verbrauchergruppe dieselben sind wie für den Durchschnitt aller Verbraucher. Wenn dagegen für eine beliebige Gruppe $T_{wg} \geq T_w$ ausfällt, dürften die auf den Belastungsgrad des ganzen Werkes, also gemäß T_w , bezogenen Einheitspreise für die betreffende Gruppe kaum genau zutreffend sein. Indem man sich aber der Kostenabhängigkeit von T_w an Stelle einer solchen von T_{wg} bedient, können doch kaum große Fehler entstehen, und zwar, wenigstens für das ganze Werk, um so kleinere, je besser sich verschiedene, analog beurteilte Verbrauchergruppen relativ zu einem Benutzungsdauer-Schwerpunkt, der gerade T_w entspricht, verteilen. Man darf deshalb die Einheitspreise, auch im betrachteten Allgemeinfall, daß die Gruppenarbeit $Z \cdot N_a \cdot T_a$ nicht mit der ganzen Werksarbeit A übereinstimmt, auch wieder so festlegen, wie wir es für die Identität von A mit $Z \cdot N_a \cdot T_a$ gezeigt haben. Berücksichtigt man weiter noch, daß die Verbrauchergesamtheit eines Werkes Elemente ein und derselben Massenerscheinung bilden, so wird man eine derartige Solidarität in bezug auf das Entstehen der Einheitspreise durchaus als evident halten müssen.

Auf Grund der Preisgleichung, die wir für den Wärmekraftbetrieb als Beispiel benutzten und durch Abb. 14 veranschaulichten, wollen wir nun die bei verschiedenen Werten von T_a und von $\left(\frac{T_a}{T_w}\right)$ resultierenden Einheitspreise p_γ ermitteln. Die Verhältniszerte $\frac{T_a}{T_w}$ entnehmen wir den in den Abb. 8 und 9 für $h = 1$ und $= 1/4$ gegebenen Kurven und stellen demgemäß unsere Werte p_γ auch wieder in zwei entsprechenden Kurvenbildern dar, die in unseren Abb. 17 und 18 wiedergegeben sind. In diesen Abbildungen haben wir p_γ nicht mit der aus der ursprünglichen Preisgleichung folgenden Einheit RM/kW-Jahr, sondern mit der praktischeren Einheit RM/kWh ausgedrückt;

für die T_a der Abszissenachse wurde dagegen die Einheit 1 Jahr bei-
behalten. Je die zu äußerst rechts gelegene Kurve der Abb. 17 und 18

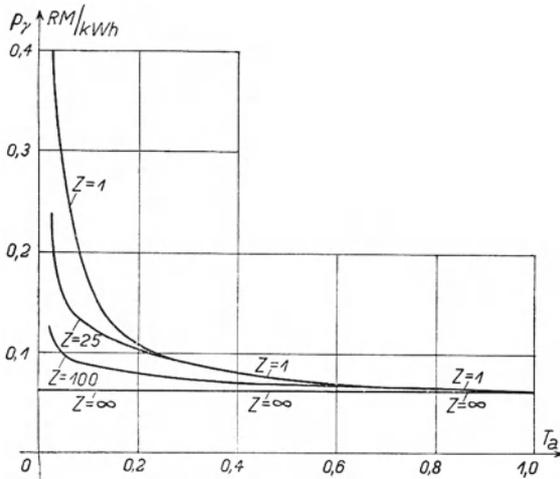


Abb. 17. Einheitspreise p_γ für Wärmekraftbetrieb ohne und bei Belastungsausgleich für $h = 1,0$.

ist die Hyperbel, die bei $T_a = T_w$, d. h. bei fehlendem Ausgleich, d. h. für $Z = 1$, gilt. An diese Grenzkurven schließen sich nun für verschiedene Abnehmerzahlen $Z > 1$ je die bezüglichen Preiskurven p_γ bei den jeweiligen, den Abb. 8 und 9 entnommenen Werten von $\left(\frac{T_a}{T_w}\right)$ an, wobei sich die preissenkende Wirkung des Belastungsausgleichs besonders bei den größeren Abnehmerzahlen aufs deutlichste feststellen läßt.

Sowohl die auf den einzelnen Abnehmer entfallenden gesamten Jahreskosten P_1 als auch die Einheitspreise p_π und p_γ weisen im Falle des vollständigen Belastungsausgleichs, d. h. für $Z = \infty$, Sonderwerte

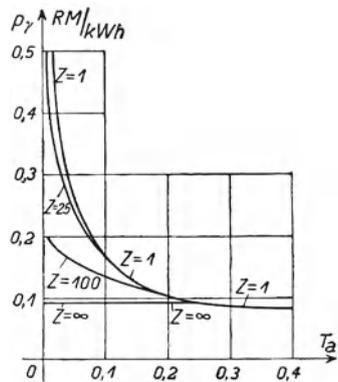


Abb. 18. Einheitspreise p_γ für Wärmekraftbetrieb ohne und bei Belastungsausgleich für $h = \frac{1}{4}$.

auf, denen eine grundsätzliche Bedeutung zukommt. Für $Z = \infty$ ist unverändert $T_w = H = \text{konstant}$, so daß

$$P_{1\infty} = N_a \cdot T_a \cdot \left(\frac{c_1}{H} + c_2 \right) = N_a \cdot T_a \cdot c$$

wird; die Einheitspreise haben dann die Form

$$p_{\pi\infty} = T_a \cdot c; \quad p_{\gamma\infty} = c.$$

Für Abnehmer mit bekanntem und festem T_a (z. B. Treppenbeleuchtungen) ist $p_{\pi\infty}$ konstant, wobei die wissenschaftlich einwandfreie Möglichkeit der Anwendung des sogenannten Pauschaltarifs vorliegt, der nur die Ermittlung des in Betracht fallenden Wertes N_a erfordert. Demgegenüber liefert $p_{\gamma\infty}$ die wissenschaftlich einwandfreie Möglichkeit der Anwendung des sogenannten Zählertarifs, der nur die Ermittlung der Arbeit A_a erfordert.

2. Die Berechtigung verschiedener Tariffornen.

Die uns aus dem letzten Abschnitt bekannten Formen des Pauschaltarifs und des Zählertarifs sind ebenso alt wie der gewerbsmäßige Verkauf elektrischer Arbeit, da für die rund 50 Jahre zurückliegenden ersten Blockstationen elektrischer Beleuchtung entweder eine Pauschalabrechnung oder eine Abrechnung auf Grund der Angaben der damals allein bekannten elektrochemischen Zähler stattfand. Demgegenüber stellt der im letzten Abschnitt ebenfalls erwähnte Gebührentarif eine spätere, im wesentlichen empirisch aus der organischen Verbindung der beiden älteren Tariffornen entstandene und dann aus den tatsächlichen Arbeitskosten theoretisch begründete Hauptform eines Tarifs dar. Neben diesen drei Hauptformen sind mit der Zeit zahlreiche Nebenformen von Tarifen entwickelt und in die Praxis eingeführt worden. Über die Berechtigung der wichtigsten, heute in der Praxis anzutreffenden Tariffornen wollen wir uns an Hand der gewonnenen wissenschaftlichen Grundlagen ein Urteil zu bilden suchen.

Der Pauschaltarif. Im letzten Abschnitt haben wir festgestellt, daß für unendlich viele Abnehmer mit bekannter und fester Anschlußdauer T_a der Einheitspreis $p_{\pi\infty}$ den wissenschaftlich einwandfreien Pauschaltarif begründet. Der rechnungsmäßig erforderlichen Abnehmerzahl $Z = \infty$ kommt man bei der Arbeitsversorgung von Kleingeräten, wie Kleintransformatoren zum Betrieb von Klingelanlagen, Signal-

einrichtungen, Fernsprechanruf, Türöffnern, Starkstromuhren usw., sowie bei gewissen Sonderanwendungen der Beleuchtung (Treppenbeleuchtung) und bei gewissen Klein-Wärmeapparaten in großstädtischen Netzen praktisch genügend nahe, derart, daß für die genannten Verbrauchsarten der für den geschäftlichen Verkehr so außerordentlich bequeme Pauschaltarif in jeder Hinsicht wohlbegründet ist. Man findet aber in der Praxis des Verkaufs elektrischer Arbeit zahlreiche Anwendungen des Pauschaltarifs, die nicht berechtigt sind; erstens handelt es sich dabei um alle diejenigen Fälle, in denen nach Maßgabe der Größen Z und T_a eine durchaus andere Berücksichtigung des Belastungsausgleichs stattfinden sollte, als sie dem Pauschaltarif zugrunde liegt, weiter ist in der Regel der Wert von T_a viel zu schwankend, um im Sinne des Pauschaltarifs für konstant gehalten zu werden. Von Elektrizitätswerken mit Wasserkraftbetrieb, bei denen der Pauschaltarif in einzelnen Ländern noch vielfach ausschließlich angewendet wird, wird zu seiner Rechtfertigung die relative Kleinheit der Preiskonstanten c_2 neben c_1 geltend gemacht und mit einem vergrößerten c_1 neben $c_2 = 0$ gerechnet; damit fällt wohl im zweiten Gliede der Preisgleichung der Einfluß von T_a dahin, während im ersten Gliede dieser Gleichung die Schwierigkeit in der Rücksicht auf den Belastungsausgleich nicht behoben wird. Es bleibt deshalb auch bei Wasserkraftbetrieb die Berechtigung des Pauschaltarifs auf den Fall mit

$$Z = \infty \text{ und } T_a = \text{konstant}$$

beschränkt.

Der einfache und der mehrfache Zählertarif. Im letzten Abschnitt lernten wir für die Abnehmerzahl $Z = \infty$ den wissenschaftlich einwandfreien Zählertarif, entsprechend dem festen Einheitspreis $p_{\gamma\infty} = c$, kennen. Je einem Werte von H entspricht ein besonderer Wert

$$c = \frac{c_1}{H} + c_2.$$

Wenn nun die Periode T in mehrere, z. B. drei Teile eingeteilt ist, gemäß

$$T = H_1 + H_2 + H_3,$$

so entsteht ein mehrfacher, z. B. dreifacher Zählertarif, wobei entsprechende Einheitspreise c' , c'' , c''' resultieren, die um so höher sind, je kürzer die entsprechende mögliche Betriebszeit H ist. Da sich, ab-

gesehen von den durch die äußeren Jahreszeiteinflüsse bedingten Abweichungen, die Periodenteile H_1 , H_2 , H_3 nicht nur im Jahre, sondern auch im Tage wiederholen, so entstehen Tageszeiten mit hohem Tarif, mit mittlerem Tarif und mit niedrigem Tarif. Falls aber in einen der drei Periodenteile ein vorwiegender Beleuchtungsverbrauch fällt, dann müßte im Winter, mit den langen Beleuchtungszeiten, für die Beleuchtung ein niedrigerer Tarif entstehen als im Sommer, wenn nicht auch noch die Differenzierung zwischen Sommer- und Winterhalbjahr vorgenommen wird, die dann aber schon in den Gesteungskosten, d. h. in den Festwerten c_1 und c_2 , zu begründen ist; für Wasserkraftbetrieb ist dies ohne weiteres selbstverständlich; für Wärmekraftbetrieb ist dies auch zutreffend, sobald im Winter ein höherer Wert N_{\max} für das ganze Elektrizitätswerk in Betracht fällt als im Sommer. An Hand der Abb. 10 wird man die praktisch für die Sommer- und Winterbeleuchtung in Betracht fallenden mittleren Werte von H als Bruchteile des 24stündigen Tages abschätzen können, während an Hand von Belastungsbildern nach Abb. 13 bzw. Abb. 15 die im Sommer und im Winter in Betracht fallenden Festwerte c_1 und c_2 zu ermitteln sind. Da in Wirklichkeit auf eine unendlich große Abnehmerzahl nicht zu rechnen ist, sondern nur auf eine endliche, größere oder auch kleinere, so ist weiter an Hand der Abb. 17 und 18 abzuschätzen, ob durch horizontale Mittelwertlinien, die bei den wahrscheinlichsten Werten T_a durch die genauen, für $1 < Z < \infty$ geltenden Preiskurven hindurchlaufen, ein Kurvenersatz durch solche Gerade noch praktisch zulässig ist, bzw. ob der Zählertarif selbst noch zulässig ist. Dies wird in der Regel in weitgehendem Maße der Fall sein, weshalb wir den mehrfachen Zählertarif, insbesondere in der für die Praxis meist ausreichenden einfachsten Form des Doppeltarifs, als besonders leicht anwendbare, leicht zu handhabende Tarifform betrachten. Die Anwendung dieses Tarifs führt selbstverständlich auf Arbeitszähler mit mehreren Zählwerken, je nach der Unterteilung der Periodenzeit „1 Tag“. Zum Gebrauch in Abnehmeranlagen, die neben der Lichtbelastung eine im gleichen oder höheren Anschlußwerte N_a liegende Wärmebelastung bilden, sind für die letztere speichernde Apparate mit Arbeitssperrung in der Hauptbeleuchtungszeit erforderlich, um den dem Tarifsystem zugrunde liegenden weitgehenden Belastungsausgleich zu gewährleisten. Für reine Beleuchtungsabnehmer liegen die Ver-

hältnisse für den Belastungsausgleich erst dann hinreichend günstig, wenn unmittelbar neben ihnen andere Verbraucher angeschlossen sind, deren mögliche Verbrauchszeit sich zu derjenigen der Lichtverbraucher im Sinne der Ergänzung zur vollen Periode gestaltet; dann gelten für die beiden Verbraucherkategorien die Bedingungen eines gemeinsamen Doppeltarifs, jedoch bei getrennter Zählung und getrennter Verrechnung. In heutigen Großstädten liegen solche Verbrauchsverhältnisse in weitgehendem Maße vor, vorausgesetzt, daß die Elektrizitätswerke in der Zulassung der Wärmeverbraucher nicht mehr die Zurückhaltung früherer Zeiten, in denen die wärmespeichernden Wärmeapparate noch zu wenig entwickelt waren, üben.

Der Gebührentarif. Eine Arbeitsverrechnung, die den tatsächlichen Jahreskosten für den einzelnen Abnehmer gemäß unserer Gleichung

$$P_1 = N_a \cdot \left[c_1 \cdot \left(\frac{T_a}{T_w} \right) + c_2 \cdot T_a \right]$$

angepaßt ist, begründet den sogenannten Gebührentarif, genauer ausgedrückt, einen Tarif mit sogenannten Grundgebühren, wobei nach Maßgabe von $N_a c_1$ das für den Tarif grundlegende Element gebildet wird; dieses Element bedingt also, wie beim Pauschaltarif, eine Messung von N_a bzw. die Festsetzung einer die Anschlußleistung N_a kennzeichnenden Ersatzgröße. Dieser Tarif ist selbstverständlich allen Großabnehmern zugrunde zu legen; für Kleinabnehmer kommt er grundsätzlich immer dann in Frage, wenn die Bedingungen für die Anwendbarkeit des Pauschaltarifs oder des einfachen bzw. mehrfachen Zählertarifs nicht gegeben sind. Der für die Arbeitseinheit vom Abnehmer nach diesem Tarif zu bezahlende Preis p_γ entspricht der Gleichung

$$p_\gamma = \frac{c_1}{T_a} \cdot \left(\frac{T_a}{T_w} \right) + c_2$$

und ist beispielsweise durch die Abb. 17 und 18 veranschaulicht. Maßgebend für die Verrechnung bleibt aber die Gleichung für P_1 , wobei richtigerweise N_a mit einem Belastungsmesser und $N_a \cdot T_a$ mit einem Arbeitsmesser festgestellt wird. Im sogenannten „Zähler mit Höchstverbrauchszeiger“ sind diese zwei Meßgeräte in einem einzigen Apparat in glücklichster Weise vereinigt, wobei der Höchstverbrauchszeiger von der Systemachse des Zählers während einer bestimmten kurzen Registrierperiode, von beispielsweise 15 oder 30 Minuten, betätigt und hierauf entkuppelt wird, so daß er die erlangte Stellung

behält, während der Antriebsmechanismus von neuem funktionsbereit ist und den Zeiger weiterstößt, falls eine Registrierperiode von noch größerer Belastung folgt; je nach der Bemessung der Registrierperiode werden die Höchstbelastungen schärfer oder weniger scharf erfaßt. Bei der Anwendung des Gebührentarifs kommt der richtigen Einschätzung des Belastungsausgleichs eine große Bedeutung zu, die aus den verschiedenen Preiskurven der Abb. 17 und 18 gut beurteilt werden kann. Der Belastungsausgleich beeinflußt die sogenannte Grundgebühr. Auf diese wirken noch weitere Elemente der Abnehmer-eigenart ein. Beispielsweise beziehen Großabnehmer in der Regel die elektrische Arbeit nicht bei der gewöhnlichen Verbrauchsspannung, bei der c_1 seinen maximalen Wert erlangt, wie er z. B. auch in den Abb. 17 und 18 verwertet ist, sondern in einer Mittelspannung, die weniger Anlageteile des Schemas nach Abb. 3 erfordert und deshalb den Gebrauch eines kleineren Festwertes c_1 rechtfertigt. Die aus diesem Grunde berechnete Verkleinerung der Grundgebühr und die bei dem Großverbrauch unter Umständen eintretende Abnahme des Belastungsausgleichs mit entsprechender Vergrößerung der Grundgebühr können sich, kompensierend, auf den Preis auswirken. Zweifelsfrei kann durch den Gebührentarif dem Ideal objektiv richtiger Preisbemessung im allgemeinen nachgelebt werden.

Zählertarife mit Anpassung an das Gebührenprinzip. Die beim Gebührentarif notwendige Feststellung von N_a oder einer brauchbaren Ersatzgröße bildet gegenüber der einfachen Arbeitsmessung mittels normaler Elektrizitätszähler eine Erschwerung. Man hat deshalb verschiedene Tarifformen entwickelt, die als einzige Ermittlungsgröße die elektrische Arbeit benutzen, für deren Anrechnung jedoch Einheitspreise dienen, die angenähert durch die Gleichung für p_γ :

$$p_\gamma = \frac{c_1}{T_a} \cdot \left(\frac{T_a}{T_w} \right) + c_2,$$

befriedigt sind. Diese Tarife entstehen aus dem einfachen Zählertarif besonders bei Benutzung gewisser Regeln der Rabattgewährung. Eine besonders einfache Rabattregel begründet den sogenannten Mengenrabatt, wobei die gemessene Arbeit A in Einzelmengen

$$A = A_1 + A_2 + A_3 + \dots$$

aufgeteilt wird und wobei die je in runden großen Zahlen (10^4 , 10^5 z. B.) nacheinander in der Rechnungsperiode gemessenen Einzelmengen A_1 ,

A_2, A_3 mit fortschreitend abnehmenden Einheitspreisen, je Arbeits-einheit, angerechnet werden. Im sogenannten Benutzungsdauer-rabatt, der entweder für sich allein oder in Verbindung mit dem Mengenrabatt angewendet wird, wird eine Rabattskala in Abhängig-keit von der Benutzungsdauer T_a verwendet, die aus

$$T_a = \frac{A}{N_a}$$

ermittelt wird, wobei, falls man N_a nicht durch Ersatzgrößen fest-stellt, meßtechnisch wieder ebenso, wie beim Geböhrentarif vorzugehen ist; vom wissenschaftlichen Standpunkt aus ist dann die unmittelbare Benutzung des Geböhrentarifs richtiger.

Die relative Richtigkeit irgend eines Zählertarifs mit Anpassung an das Geböhrenprinzip läßt sich aus der Aufzeichnung der tarif-gemäß in Abhängigkeit von T_a folgenden Einheitspreise, je Arbeits-einheit, beurteilen; deckt sich diese Darstellung genau oder wenigstens nach Maßgabe kürzerer Staffeln mit dem richtig festgestellten p_γ , dann kann auf völlige bzw. praktisch ausreichende Richtigkeit des be-treffenden Tarifs geschlossen werden.

Tarifmäßige Rücksicht auf den Leistungsfaktor. Bei der Betrachtung der tatsächlichen Kosten der elektrischen Arbeit haben wir den Einfluß eines abnormalen Leistungsfaktors kennen-gelernt und die Abhängigkeit der Preiskonstanten c_1 und c_2 von $\cos \varphi$ überblicken können. Zur tarifmäßigen Berücksichtigung eines ab-normalen Leistungsfaktors benutzt die heutige Tarifpraxis hauptsäch-lich drei Wege, über die die folgende Betrachtung am Platze ist:

Im sogenannten Scheinleistungstarif wird an Stelle der korrekten Preisgleichung

$$P = N_{\max} \cdot (c_1 \cdot \alpha + c_2 \cdot \beta \cdot T_w)$$

aus meßtechnischen Gründen die vereinfachte Form

$$P = N_{\max} \cdot \left(c_1 \cdot \frac{1}{\cos \varphi} + c_2 \cdot T_w \right)$$

benutzt, bzw. es wird dem Leistungsfaktor nur in der Grundgeböh-rechnung getragen. Im sogenannten Blindverbrauchtarif wird eine Preisgleichung von der Form

$$P = N_{\max} \cdot \left(c_1 + \frac{A + 0,2 \cdot A_{b1} - 0,5 \cdot A_{b2}}{A} \cdot c_2 \cdot T_w \right)$$

zugrunde gelegt, wo A_{b_1} den Blindverbrauch unter $\cos \varphi = 0,8$ und wo A_{b_2} den Blindverbrauch über $\cos \varphi = 0,8$ bezeichnet, mit Bezugnahme auf dieselbe Periode, in der die Arbeit (d. h. der Wirkverbrauch) A gemessen wird; dieser Tarif bringt eine Preissteigerung für $\cos \varphi < 0,8$, während er für $\cos \varphi > 0,8$ eine Vergütung gewährt. Im sogenannten gemischten $\cos \varphi$ -Tarif bedient man sich einer Preisgleichung von der Form

$$P = N_{\max} \cdot \left(c_1 \cdot \frac{1}{\cos \varphi} + c_2 \cdot \frac{0,8 - \cos \varphi}{a} \cdot T_w \right),$$

wo $a = 1$ für $\cos \varphi < 0,7$ und wo $a = 2$ für $\cos \varphi > 0,7$ bedeutet; in diesem Tarif wird also dem Leistungsfaktor sowohl in der Grundgebühr als auch in dem mit der Belastung veränderlichen Kostenteil Rechnung getragen. Der Scheinleistungstarif kommt der korrekten Preisgleichung am nächsten und ist auch in meßtechnischer Hinsicht den anderen Tarifen mit einer Rücksichtnahme auf den Leistungsfaktor überlegen.

Daß eine Rücksichtnahme auf den Leistungsfaktor besonders bei der Bedienung von Großverbrauchern elektrischer Arbeit von Bedeutung ist, wurde bei der Betrachtung der tatsächlichen Arbeitskosten bereits bemerkt. Kleinverbraucher weisen im allgemeinen gruppenweise nicht nur ähnliche Leistungsfaktoren, sondern auch noch weitere, von Gruppenglied zu Gruppenglied nur unwesentlich abweichende Merkmale auf, die bei der Tarifwahl sämtlich in Betracht gezogen werden können und Ermittlungen des Leistungsfaktors für das einzelne Gruppenglied in der Regel entbehrlich machen.

3. Die Möglichkeit der Vereinheitlichung im Tarifwesen.

Daß im Tarifwesen heute eine Vereinheitlichung wünschenswert ist, wird von den Fachleuten unbedingt bejaht; über den Umfang der anzustrebenden Vereinheitlichung besteht jedoch noch nicht volle Klarheit. Verschiedene Territorien und Wirtschaftsgebiete weisen zudem oft stark voneinander abweichende Bedingungen des Arbeitsverbrauchs und der Möglichkeiten der Arbeitsversorgung auf; es kann deshalb eine Vereinheitlichung in der Hauptsache nur in grundsätzlicher Hinsicht, kaum aber in den Einzelheiten der Anwendung erfolgreich sein. Aber auch bei Beschränkung auf das Grundsätzliche ist die zu lösende Aufgabe weitschichtig. Vor allem fehlen noch vielfach eindeutige

Begriffe. Dies gilt besonders im Hinblick auf den Belastungsausgleich; von der Zweideutigkeit des Wortes „Verschiedenheitsfaktor“ haben wir bereits gesprochen, weitere zweideutige Begriffe wären leicht namhaft zu machen. Nach einer, am richtigsten gleich in internationaler Verständigung vorzunehmenden Begriffsreinigung sollte, wiederum am richtigsten auf internationaler Grundlage, eine Beschränkung in den Zählerbauarten vorgenommen werden. Zu den normalen Arbeitszählern sind im Hinblick auf die Berücksichtigung des Leistungsfaktors die Blindverbrauchszähler und die Scheinverbrauchszähler geschaffen worden. Hat man sich überzeugt, daß die Berücksichtigung des Leistungsfaktors auf Grund des Scheinleistungstarifs nicht nur besonders einfach, sondern auch den tatsächlichen Kosten besser gerecht wird als jede andere bezügliche Tarifgrundlage, dann erkennt man die Überflüssigkeit aller Blindverbrauch- und Scheinverbrauchszähler, indem man für Messung und Verrechnung nach dem Scheinleistungstarif nur die wirkliche Arbeit und das Scheinleistungsmaximum benötigt.

Ein richtig aufgebauter Gebührentarif macht die sogenannten Überverbrauchszähler mit oder ohne Gesamtzählwerk (als Konstruktionsvarianten) entbehrlich. Solche Zähler kommen zudem für drei Stromarten (Gleichstrom, Wechselstrom, Drehstrom), die vorher genannten für zwei Stromarten (Wechselstrom und Drehstrom) in Betracht.

Mit dem Hinweis auf die bereits weit fortgeschrittene Normung der Spannungen erinnern wir an die Spannungsabhängigkeit der Zählerkonstruktionen. Abgesehen von der Rückwirkung auf die Zählerbauarten empfiehlt sich eine Beschränkung in der Anzahl gebrauchter Tarifformen auch in allgemeiner Hinsicht, wie die Gewinnung des öffentlichen Vertrauens, die erleichterte Übersicht über die kaufmännische Arbeit usw. Es sind namentlich verschiedene Zählertarife mit Anpassung an das Gebührenprinzip, die man als abbaufähig und reif für die Ersetzung durch den richtigen Gebührentarif bezeichnen kann.

Wie alles in langer Entwicklung groß gewordene, wird sich auch das heute bestehende Tarifwesen Änderungsbestrebungen gegenüber als widerstandsfähig erweisen. Die grundsätzliche Wünschbarkeit der Vereinheitlichung wird dadurch natürlich nicht in Frage gestellt. Andererseits darf die Vereinheitlichung auch nicht, bloß ihrem Prinzip

zuliebe, praktisch gut eingebürgerte und sachlich einwandfreie, wenn auch vielleicht unnötig verwickelte Tarife kurzer Hand beseitigen wollen. Das praktisch anzuwendende Verfahren der Vereinheitlichung ist von Fall zu Fall nach rein praktischen Erwägungen festzusetzen. Von der wissenschaftlich orientierten Besinnung her mußten aber sowohl die Möglichkeit im allgemeinen als auch die Angriffspunkte der Vereinheitlichung im besonderen klargelegt werden.

Anhang.

Die Berechnung der Abbildungen 4 bis 9.

1. Bei kleinen Werten von y .

Die Berechnung von Kurvenpunkten der Abb. 4 und 5 möge für

$$y = 1,$$

d. h. an den Stellen, an denen diese Abbildungen die tiefsten (Abb. 4) bzw. die höchsten (Abb. 5) Werte K aufweisen, an Hand der aufeinanderfolgenden Werte der Poisson-Funktion, die für $y = 1$ den Ausdruck

$$w_x = e^{-1} \cdot \frac{1^x}{x!}$$

erhält, gezeigt werden. Dazu genügen die zwölf folgenden Werte von w_x :

x	w_x	x	w_x	x	w_x
0	0,3679	4	0,015 329	8	0,000 009 124
1	0,3679	5	0,003 066	9	0,000 001 016
2	0,1839	6	0,000 511	10	0,000 000 102
3	0,0613	7	0,000 073	11	0,000 000 009

Nun muß festgestellt werden, für welche Werte $x = x''$ die Funktion w_x bei einer in Betracht gezogenen Periode T gerade gleich der Zahl τ ist. Bei der Periode $T = 1$ Tag trifft dies genau zu für $x = 7$; also ist nach der Regel $K = x''/y$, für die Periode $T = 1$ Tag:

$$K_d = \frac{7}{1} = 7.$$

Für die Periode $T = 1$ Monat liegt der entsprechende Wert $\tau = 0,000\ 002\ 4$ zwischen den Werten w_x bei $x = 8$ und $x = 9$; eine genaue Interpolation liefert

$$x'' = 8,7; \text{ d. h. } K_m = \frac{8,7}{1} = 8,7.$$

In analoger Rechnung ergibt sich für die Periode $T = 1$ Halbjahr der Wert $K_s = 9,5$ und für die Periode $T = 1$ Jahr der Wert $K_a = K = 9,8$.

Das Wertepaar $y = 1; K = 9,8$

soll nun zum Nachweis von Punkten der in den Abb. 6 und 7 dargestellten Kurven verwendet werden. Der relativ kleinen Größe $y = 1$ können auf Grund der Beziehungen

$$y = \frac{Z \cdot T_a}{h T}; \quad h = \frac{H}{T}$$

bei den praktisch bedeutsamen Benutzungsdauern T_a von einigen hundert bis zu wenigen tausend Stunden im Jahre auch nur kleine Abnehmerzahlen Z gerecht werden. Wir wählen $Z = 25$ und erhalten bei $T = 8760 \text{ h} = 1 \text{ Jahr}$

$$T_a = \frac{1}{25} \text{ Jahr} = 350,4 \text{ h bei } h = 1$$

und

$$T_a = \frac{0,25}{25} \text{ Jahr} = 87,6 \text{ h bei } h = \frac{1}{4}.$$

Die entsprechenden Werte T_w , als Quotienten H/K gebildet, ergeben sich nun folgendermaßen:

$$T_w = \frac{8760 \text{ h}}{9,8} = 894 \text{ h} = 0,102 \text{ Jahr bei } h = 1$$

und

$$T_w = \frac{2190 \text{ h}}{9,8} = 223,5 \text{ h} = 0,0255 \text{ Jahr bei } h = \frac{1}{4}.$$

In Abb. 6 entspricht dem Wertepaar $T_a = 350,4 \text{ h}$, $T_w = 894 \text{ h}$, und in Abb. 7 dem Wertepaar $T = 87,6 \text{ h}$, $T_w = 223,5 \text{ h}$ je ein Punkt der Kurve für $Z = 25$.

Ohne weiteres folgen nun auch Punkte der Kurven der Abb. 8 und 9, nämlich:

$$\frac{T_a}{T_w} = \frac{350,4 \text{ h}}{894 \text{ h}} = 0,39 \text{ bei } T_a = 350,4 \text{ h} = 0,04 \text{ Jahr, in Abb. 8,}$$

sowie

$$\frac{T_a}{T_w} = \frac{87,6 \text{ h}}{223,5 \text{ h}} = 0,39 \text{ bei } T_a = 87,6 \text{ h} = 0,01 \text{ Jahr, in Abb. 9.}$$

2. Bei größeren Werten von y .

Die meisten der in Abb. 5 zur Darstellung der Kurve K benutzten Punkte wurden nach der Näherungsformel für w_y berechnet. Diese entsteht wie folgt. Bei $x = y$ lautet die Gleichung nach Poisson:

$$w_y = e^{-y} \cdot \frac{y^y}{y!}.$$

Ersetzt man $y!$ durch den von Stirling angegebenen Ausdruck

$$y! = y^y \cdot e^{-y} \cdot \sqrt{2 \pi y},$$

der bei großen Werten von y eine gute Näherung darstellt, so folgt

$$w_y = \frac{e^{-y} \cdot y^y}{y^y \cdot e^{-y} \cdot \sqrt{2 \pi y}} = \frac{1}{\sqrt{2 \pi y}}.$$

Da die weitere Beziehung

$$w_{x+1} = w_x \cdot \frac{y}{x+1}$$

streng gültig ist, folgen also auf w_y ohne weiteres Werte w_{y+1} , $w_{y+2} \dots$ mühelos.

Wir zeigen diese Berechnungsweise für

$$y = 17,1,$$

d. h. für einen Wert, an den sich Werte x anschließen, die nicht einmal ganzzahlig zu sein brauchen, und stellen das Ergebnis für $w_x = w_y$ und für 26 weitere Punkte tafelmäßig dar, wie folgt:

x	w_x	x	w_x	x	w_x
17,1	0,0965	26,1	0,010 207	35,1	0,000 048 37
18,1	0,0911	27,1	0,006 440	36,1	0,000 022 91
19,1	0,0816	28,1	0,003 919	37,1	0,000 010 56
20,1	0,0694	29,1	0,002 303	38,1	0,000 004 74
21,1	0,0563	30,1	0,001 308	39,1	0,000 002 07
22,1	0,0435	31,1	0,000 719	40,1	0,000 000 88
23,1	0,0322	32,1	0,000 383	41,1	0,000 000 37
24,1	0,0229	33,1	0,000 203	42,1	0,000 000 15
25,1	0,0156	34,1	0,000 099	43,1	0,000 000 06

Nun muß wieder festgestellt werden, für welche Werte $x = x''$ die Funktion w_x bei einer in Betracht gezogenen Periode T gerade gleich der Zahl τ ist. Bei der Periode $T = 1$ Tag liegt der entsprechende Wert $\tau = 0,000\,073$ zwischen den Werten w_x für $x = 34,1$ und $x = 35,1$; eine genaue Interpolation liefert $x'' = 34,5$ und damit

$$K_d = \frac{34,5}{17,1} = 2,02.$$

Analog findet man für die weiteren üblichen Perioden:

$$\text{Periode } T = 1 \text{ Monat: } K_m = \frac{38,9}{17,1} = 2,27,$$

$$\text{Periode } T = 1 \text{ Halbjahr: } K_s = \frac{41,0}{17,1} = 2,40,$$

$$\text{Periode } T = 1 \text{ Jahr: } K_a = \frac{41,9}{17,1} = 2,45 = K.$$

Um die Abb. 5 nicht mit den weiterhin unverwendeten Werten von K_d , von K_m und von K_s zu belasten, sind nur die Werte $K_a = K$ als Kurve eingetragen worden.

Mit dem Wertepaar

$$y = 17,1; \quad K = 2,45$$

ergeben sich nun Punkte der Abb. 6 und 7 wie folgt: Für die Beziehungen:

$$y = 17,1 = \frac{Z \cdot T_a}{h T}; \quad h = \frac{H}{T}; \quad T = 8760 \text{ h} = 1 \text{ Jahr}$$

wählen wir $Z = 150$ und erhalten:

$$T_a = \frac{17,1}{150} \text{ Jahr} = 1000 \text{ h bei } h = 1,$$

$$T_a = \frac{17,1 \cdot 0,25}{150} \text{ Jahr} = 250 \text{ h bei } h = 1/4$$

Die entsprechenden Werte T_w als Quotienten H/K ergeben sich wie folgt:

$$T_w = \frac{8760 \text{ h}}{2,45} = 3575 \text{ h bei } h = 1,$$

$$T_w = \frac{2190 \text{ h}}{2,45} = 894 \text{ h bei } h = \frac{1}{4}.$$

In Abb. 6 entspricht dem Wertepaar $T_a = 1000$ h, $T_w = 3575$ h und in Abb. 7 dem Wertepaar $T_a = 250$ h, $T_w = 894$ h, je ein Punkt der Kurve für $Z = 150$.

Da in den Abb. 8 und 9 Kurven für $Z = 150$ nicht enthalten sind, wohl aber solche für $Z = 100$, so sollen für $Z = 100$ nun auch noch Kurvenpunkte der Abb. 6 und 7 rechnerisch nachgewiesen werden, wozu wiederum das Wertepaar

$$y = 17,1; \quad K = 2,45$$

benutzt werden soll. Es folgt also:

$$T_a = \frac{17,1}{100} \text{ Jahr} = 1500 \text{ h bei } h = 1,$$

$$T_a = \frac{17,1 \cdot 0,25}{100} \text{ Jahr} = 375 \text{ h bei } h = \frac{1}{4}.$$

Für die entsprechenden Werte T_w erhält man, wie für $Z = 150$:

$$T_w = \frac{8760 \text{ h}}{2,45} = 3575 \text{ h bei } h = 1,$$

$$T_w = \frac{2190 \text{ h}}{2,45} = 894 \text{ h bei } h = \frac{1}{4}.$$

Die Kurven für $Z = 100$ in den Abb. 6 und 7 enthalten je das entsprechende Wertepaar T_a, T_w .

Punkte der Kurven $Z = 100$ in den Abb. 8 und 9 ergeben sich nun wie folgt:

$$\frac{T_a}{T_w} = \frac{1500 \text{ h}}{3575 \text{ h}} = 0,42 \text{ bei } T_a = 1500 \text{ h} = 0,171 \text{ Jahr, in Abb. 8,}$$

$$\frac{T_a}{T_w} = \frac{375 \text{ h}}{894 \text{ h}} = 0,42 \text{ bei } T_a = 375 \text{ h} = 0,043 \text{ Jahr, in Abb. 9.}$$

Aus den mitgeteilten Berechnungsbeispielen geht die Entstehungsweise der in den Abb. 4, 5, 6, 7, 8, 9 dargestellten Kurven deutlich hervor.

Neuere und neueste Hefte der „Sammlung Vieweg“

- Heft 45. Prof. Dr. K. Fajans: *Radioaktivität und die neueste Entwicklung der Lehre von den chemischen Elementen*. 4. Auflage. Mit 11 Abbildungen und 14 Tabellen. M. 5,—.
- Heft 46. Dr. Bruno Alexander-Katz: *Quarzglas und Quarzgut*. Mit 43 Abb. M. 2,50.
- Heft 47. Prof. Dr. G. Berndt: *Radioaktive Leuchtfarben*. Mit 28 Abbildungen im Text und auf einer Lichtdrucktafel. M. 4,—.
- Heft 48. Dr. R. Fürth: *Schwankungserscheinungen in der Physik*. Mit 5 Abb. M. 3,50.
- Heft 49. Dr. Hans Georg Möller: *Die Elektronenröhren und ihre technischen Anwendungen*. 2., vollständig umgearbeitete Auflage. Mit 208 Textabbildungen und einer Tafel. M. 7,50.
- Heft 50. Prof. Dr. C. Dorno: *Klimatologie im Dienste der Medizin*. Mit 11 Abbildungen. M. 3,—.
- Heft 51. Prof. Dr. C. Isenkrahe: *Zur Elementaranalyse der Relativitätstheorie*. M. 4,50.
- Heft 52. Dr.-Ing. Max Moeller: *Das Ozon. Eine physikalisch-chemische Einzeldarstellung*. Mit 32 Textfiguren. M. 6,—.
- Heft 53. Dr. V. Geilen: *Mathematik und Baukunst als Grundlagen abendländischer Kultur. — Wiedergeburt der Mathematik aus dem Geiste Kants*. M. 3,—.
- Heft 54. Dr. H. Heinrich Franck: *Die Verwertung von synthetischen Fettsäureestern als Kunstspeisefette in wirtschaftlicher, physiologischer und technischer Beziehung*. Mit 3 Abbildungen. M. 3,25.
- Heft 55. Dr. Alfred Wegener: *Die Entstehung der Mondkrater*. Mit 9 Abbild. im Text und auf 3 Tafeln. M. 2,25.
- Heft 56. Niels Bohr: *Drei Aufsätze über Spektren und Atombau*. 2. Auflage. Mit 13 Abbildungen. M. 5,—.
- Heft 57. Prof. Dr. Hans Cloos: *Der Mechanismus tiefvulkanischer Vorgänge*. Mit 24 Zeichnungen und einer Karte. M. 4,—.
- Heft 58. Dr. Walther Gerlach: *Die experimentellen Grundlagen der Quantentheorie*. 2. Auflage. Mit 43 Abbildungen.
- Heft 59. Prof. Dr. E. Study: *Denken und Darstellung in Mathematik und Naturwissenschaften*. 2. verbesserte und erweiterte Auflage. Mit 10 Abbildungen. M. 3,75.
- Heft 60. Prof. Dr. techn. Milan Vidmar: *Theorie der Kreiselpumpe*. Mit 39 Abbildungen. M. 4,75.
- Heft 61. Reg.-Rat Dr. W. Meissner: *Entfernungs- und Höhenmessung in der Luftfahrt*. Mit 66 Abbildungen. M. 4,—.
- Heft 62. Dr. K. Siebel: *Die Elektrizität in Metallen*. M. 3,50.
- Heft 63. Dr.-Ing. M. Dolch: *Die rationelle Verwertung der niederwertigen Braunkohlen*. Mit 7 Abbildungen. M. 3,—.
- Heft 65. E. Study: *Mathematik und Physik*. Eine erkenntnistheoretische Untersuchung. M. 1,50.
- Heft 66. Dr. Walter Schallreuter: *Über Schwingungserscheinungen in Entladungsröhren*. Mit 14 Abbildungen. M. 1,50.
- Heft 67. Prof. Dr. Eberhard Buchwald: *Das Korrespondenzprinzip*. M. 5,50.
- Heft 68. Direktor Dr. Iwan Döry: *Die Schlütelerschnellungen elektrischer Lokomotiven mit Kurbelantrieb*. Mit 12 Abbildungen. M. 1,50.
- Heft 69. Prof. Dr.-Ing. Fritz Emde: *Sinusrelief und Tangensrelief in der Elektrotechnik*. Mit 18 Bildern. M. 4,50.
- Heft 70. Laurenz Bock: *Die Konstitution der Ultramarine*. Mit 3 Abb. M. 2,40.