

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 61 (1970)
Heft: 9

Artikel: Die Definitionen und Grundverfahren zur Berechnung der elektrischen Belastungen von Industriebetrieben
Autor: Weidner, H.-J.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-915938>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 21.02.2026

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

Die Definitionen und Grundverfahren zur Berechnung der elektrischen Belastungen von Industriebetrieben

624 - 626

Von H.-J. Weidner, Leipzig

621.311.153

Die Ermittlung der Kenngrößen des elektrischen Leistungs- und Energiebedarfes ist eine wesentliche Voraussetzung für die Planung und Auslegung der Anlagen zur elektrischen Energieerzeugung und -verteilung. Vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit den wichtigsten Definitionen und den bekannten Grundverfahren zur Berechnung der Belastungen von Industriebetrieben. Darauf aufbauend, werden in einem weiteren Beitrag die Grundlagen eines allgemeingültigen Berechnungsverfahrens zur Ermittlung des elektrischen Leistungs- und Energiebedarfes dargestellt, das vorzugsweise für Stromversorgungsanlagen gedacht ist, die eine grosse Zahl voneinander unabhängiger Abnehmer mit unbekanntem zeitlichem Verlauf der Belastung aufweisen.

La détermination des caractéristiques de la demande de puissance et d'énergie électrique constitue une condition essentielle de la planification et de l'aménagement d'installations de production et de distribution d'énergie électrique. Le travail précité se rapporte aux définitions essentielles et aux procédés de base connus, utilisés pour le calcul des charges dans les exploitations industrielles. Basée sur ces données, une contribution ultérieure illustre les bases d'un procédé de calcul d'une validité universelle, destiné à la détermination de la demande de puissance et d'énergie, procédé spécialement conçu pour les installations d'approvisionnement en courant comportant un grand nombre de clients indépendants l'un de l'autre, avec une allure chronologique inconnue de la charge.

1. Gegenwärtiger technischer Stand und Problematik

Über die Ermittlung der elektrischen Belastungen nach einem wissenschaftlich begründeten Berechnungsverfahren sind aus der Literatur zahlreiche Veröffentlichungen bekannt, die im Zusammenhang mit der Erarbeitung des Verfahrens des geordneten Belastungsdiagramms erschienen sind [8]¹⁾. Darüber hinaus liegen verschiedene Grundverfahren vor, die entweder empirischen Charakter bzw. einen begrenzten Anwendungsbereich besitzen oder auf den Methoden der mathematischen Statistik aufbauen. Hierzu rechnen das Verfahren des Bedarfskoeffizienten, das Verfahren der Zweigliederformel, das Verfahren des spezifischen Energieverbrauchs, die statistischen Verfahren, das Verfahren der Überlagerung von zweistufigen Belastungsmodellen, das Verfahren der Analyse typischer Belastungsdiagramme und verschiedene Regressionsverfahren zur Auswertung vorhandener Belastungsdiagramme.

Von diesen Grundverfahren können lediglich das der Überlagerung zweistufiger Modelle und das des geordneten Belastungsdiagramms als wissenschaftlich begründet angesehen werden und als Ausgangsbasis für ein allgemeingültiges Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Kenngrößen der Belastung dienen. Die übrigen Verfahren besitzen entweder einen begrenzten Anwendungsbereich oder entbehren auf Grund ihres empirischen Charakters und infolge von Begriffsunklarheiten einer exakten wissenschaftlichen Begründung. Wegen der Mängel einiger Grundverfahren zur Ermittlung der elektrischen Belastungen und auf Grund fehlender Angaben wurden bisher bei der Planungstätigkeit zahlreiche Annahmen getroffen, die zu einer ungenauen Berechnung der Belastungsgrößen in einzelnen Netzteilen führten und eine Verschiebung gegenüber dem technisch-wirtschaftlichen Optimum bei der Auslegung der elektrischen Anlagenteile zur Folge haben konnten.

So führen u. a. die Annahme einer gleichbleibenden Lastdichte über einen Versorgungsbereich, die Nichtbeachtung der Lastentwicklung und der zeitlichen Änderung der Belastungen über die Schichten und Jahreszeiten, die Annahme einer konstanten Benutzungsstundenzahl für alle Netzteile und einer relativ gleichbleibenden Abnehmerstruktur zu nicht abschätzbaren Fehlern bei der Berechnung der Kenngrößen.

Allen Grundverfahren ist gemeinsam, dass sie zwar ein Verfahren zur Ermittlung der Belastungen beschreiben, aber nur teilweise oder überhaupt nicht die anderen Einflussfaktoren in die Betrachtungen einbeziehen. Diese Faktoren sind aber für die Höhe der Belastungen von ebensolcher Bedeutung wie das Grundverfahren selbst. Darüber hinaus wird bei vielen Verfahren den Definitionen der verwendeten Kenngrößen eine untergeordnete Bedeutung beigemessen. Es soll deshalb die Frage der Definitionen an den Anfang der Betrachtungen gestellt werden.

2. Definitionen wichtiger Begriffe ²⁾

Im Rahmen vorliegender Arbeit können nur die wichtigsten Definitionen für die Belastungsermittlung sowie teilweise für die Auslegung von elektrischen Stromversorgungsanlagen angeführt werden. Bei ihrer Formulierung wird stets von den Er-

²⁾ Kenngrößen und Verhältniszahlen von Einzelabnehmern erhalten als Kurzzeichen kleine Buchstaben, die von Abnehmergruppen grosse. Die wichtigsten Kurzzeichen und Grundgleichungen werden bei den Begriffsdefinitionen angeführt. Verhältniszahlen, die aus Wirkleistungs-, Blindleistungs- oder Stromwerten gebildet worden sind, unterscheidet man durch die Kurzzeichen k , K (Wirkleistung), l , L (Blindleistung) und g , G (Strom). Die Definitionen von Leistungskenngrößen können analog für die Kenngrößen des Stromes benutzt werden und umgekehrt.

Von einer Angabe von Summierungsgrenzen ist bei vielen Gleichungen abgesehen worden, da es sich stets um die Anteile aller Abnehmer handelt.

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

forderungen der Abnehmerseite ausgegangen. Die vorliegenden Begriffsdefinitionen enthalten einige neue Begriffe und einige entsprechend den Erfordernissen einer digitalen Berechnung der Belastungen notwendige Neuformulierungen. Sie stützen sich teilweise auf bereits früher durchgeführte Untersuchungen (Vergl. [8; 12]).

2.1 Allgemeine Begriffe

2.1.1 Elektrisches Betriebsmittel. «Elektrisches Betriebsmittel» ist der Oberbegriff für Abnehmer, Reserveabnehmer und elektrische Anlagenteile.

2.1.2 Abnehmer. Abnehmer sind elektrische Betriebsmittel zur Umwandlung der elektrischen Energie in eine andere Energieform (beispielsweise mechanische Energie, Lichtenergie). Es wird unterschieden zwischen «unabhängigen Abnehmern», bei denen der zeitliche Verlauf der Belastung der einzelnen Abnehmer voneinander unabhängig ist, und «abhängigen Abnehmern», bei denen er voneinander abhängig ist.

2.1.3 Reserveabnehmer. Reserveabnehmer sind Abnehmer, die nur als Ersatz für einen defekten oder zu wartenden Abnehmer in Betrieb genommen werden, im Normalbetrieb jedoch stets in Reserve stehen.

2.1.4 Abnehmertyp. Der Abnehmertyp stellt eine Gruppierung der Abnehmer nach konstruktiven Gesichtspunkten und nach ihrem Belastungsverhalten dar (z. B. Leuchtstofflampen, Motoren mit Kurzschlussläufer).

Bei der digitalen Belastungsberechnung kann in der Bezeichnung des Abnehmertyps auch auf die Art der zur Verfügung stehenden Kenngrößen der Belastung oder ein Zusatzverfahren der Bilanzierung Bezug genommen werden (z. B. Berechnung über ein Belastungsdiagramm oder nach dem Verfahren des spezifischen Energieverbrauchs).

2.1.5 Elektrische Anlagenteile. Elektrische Anlagenteile sind Einrichtungen, die unmittelbar zur Übertragung und Verteilung von elektrischer Energie dienen.

2.1.6 Bilanzierung. Die Bilanzierung ist das Ermitteln von Kenngrößen und Verhältniszahlen, die für eine energiewirtschaftliche Planung und/oder eine Dimensionierung nach bestimmten Gesichtspunkten als Grundlage dienen. Beispielsweise sind bei der Leistungs- und Energiebilanzierung die Maximal-, Mittel- und Minimallast sowie der Energiebedarf zu bestimmen.

2.1.7 Modellierung eines Belastungsdiagramms. Die Modellierung eines Belastungsdiagramms ist eine näherungsweise Berechnung des zu erwartenden zeitlichen Verlaufs der Belastung.

2.1.8 Schichtregime. Das Schichtregime ist die durch den technologischen Prozess und die Jahreszeiten bedingte Festlegung des Arbeitsrhythmus der Produktionsanlagen und damit auch der Abnehmer. Es enthält keine Aussage über die tatsächliche Einschalt-dauer der einzelnen Abnehmer innerhalb der Schichten.

2.1.9 Kenngrösse der Belastung. Eine Kenngrösse der Belastung ist eine Grösse, die zur quantitativen Darstellung einer Belastung oder ihres zeitlichen Verlaufes dient. Es ist dabei zwischen den Kenngrößen der Leistung bzw. des Stromes und denen der Zeit zu unterscheiden.

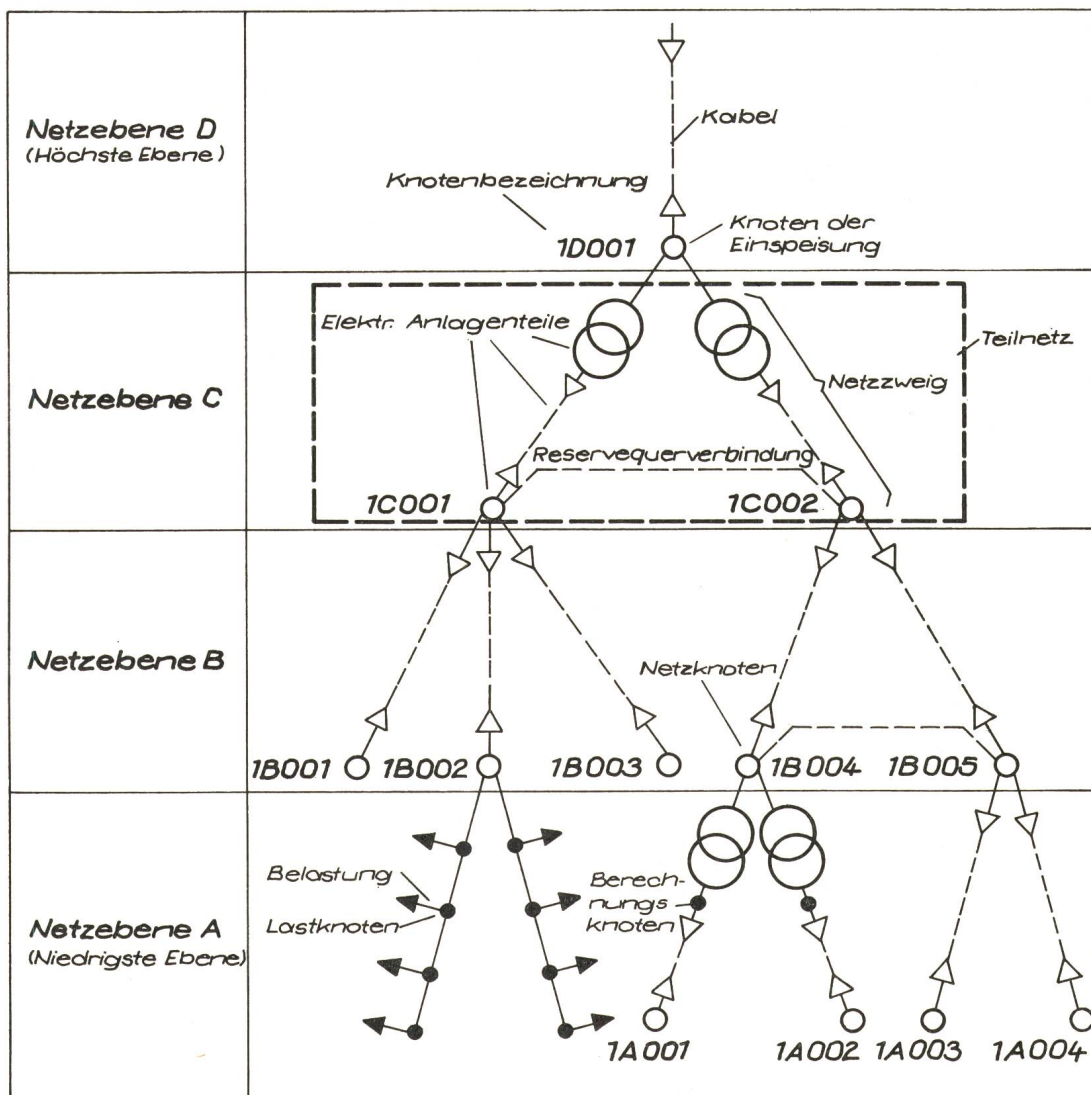


Fig. 1
Zur Definition der Begriffe für die Struktur eines Netzschemas
(Strahlennetz mit Reservequerverbindungen)

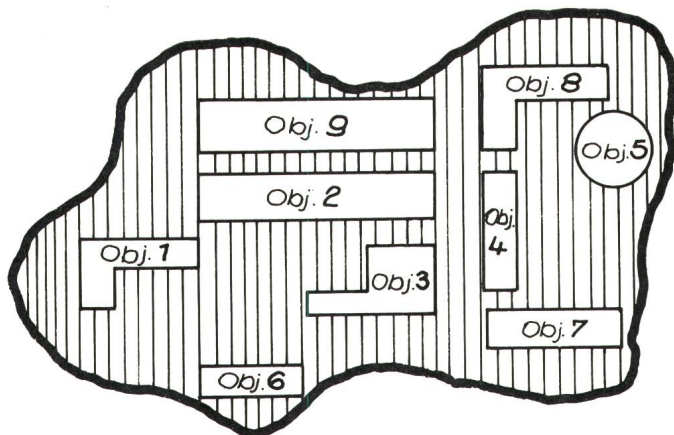


Fig. 2
Technologische Objekte als Bereichsnamen

2.2 Definitionen für die Struktur von elektrischen Stromversorgungsanlagen und für Bereiche

2.2.1 Netzschema (kurz «Netz»). Das Netzschema ist eine vereinfachte Darstellung der Struktur elektrischer Stromversorgungsanlagen. Es kann Hinweise auf mögliche Schaltzustände und Reserveverbindungen enthalten. Es setzt sich aus Netzweigen zusammen (Fig. 1).

2.2.2 Teilnetz. Ein Teilnetz ist eine genau definierte Menge von Netzweigen, im allgemeinen ein abgegrenzter Bereich eines Netzschemas. Es setzt sich ebenso wie das Netzschema aus Netzweigen zusammen (Fig. 1).

2.2.3 Netzebene. Eine Netzebene in einem Netzschema ist eine gedachte «Ebene» durch diejenigen Knoten und Netzweige, die mit dem Knoten der Einspeisung über eine gleich grosse Zahl anderer Knoten und Netzweige oder direkt verbunden ist. Der Einspeisungsknoten selbst liegt in der höchsten Netzebene. Die Netzebenen müssen nicht mit den Spannungsebenen übereinstimmen (Fig. 1). Es können auf einer Netzebene Knoten unterschiedlicher Spannung vorhanden sein.

2.2.4 Netzweig. Ein Netzweig ist die Gesamtheit aller elektrischen Anlagenteile zwischen zwei Knoten (einschliesslich des Knotens bzw. der Verteilung der niedrigeren Netzebene).

2.2.5 Knoten. Unter «Knoten» sollen allgemein sowohl Netz- als auch Last- und Berechnungsknoten verstanden werden (Fig. 1).

2.2.6 Netzknoten. Ein Netzknoten ist ein Punkt des Netzes, an dem mindestens zwei Netzweige oder Abnehmerzuleitungen von der speisenden Verbindung abgehen. In der Regel ist ein Netzknoten mit einer Verteilung (Schaltanlage bzw. Sammelschiene) gleichzusetzen.

2.2.7 Lastknoten. Ein Lastknoten ist ein Punkt des Netzes, an dem (zumindest für die Berechnung) eine Belastung direkt wirksam ist, ohne dass an diesem Knoten eine Netzverzweigung vorhanden sein muss.

2.2.8 Berechnungsknoten. Ein Berechnungsknoten ist ein beliebiger Punkt eines Netzes, für den bestimmte Kenngrössen und Verhältniszahlen zu berechnen sind. Er entspricht im allgemeinen einem Last- oder Netzknoten, kann sich aber auch aus einer Netzbildung ergeben.

2.2.9 Knotendaten. Knotendaten sind Zahlen und andere Angaben, die für eine Bilanzierungs- bzw. Dimensionierungsrechnung einem Knoten zugeordnet werden. Hierzu zählen u. a. Daten über den Netzweig und den technologischen Prozess.

2.2.10 Abnehmerdaten. Abnehmerdaten sind Zahlen und andere Angaben, die für eine Bilanzierungs- bzw. Dimensionierungsrechnung einem Abnehmer zugeordnet werden. Hierzu rechnen u. a. die Kenngrössen und Verhältniszahlen der Belastung sowie Angaben über das Schichtregime und das Zuleitungskabel des Abnehmers.

2.2.11 Bereich. Ein Bereich ist ein Unterscheidungsmerkmal (z. B. die Bezeichnung von technologischen Objekten oder Flächenbezirken), nach dem eine Bilanzierung von Abnehmerbelastungen unabhängig von einem Netzschema möglich ist (Fig. 2).

2.3 Allgemeine Begriffe für Belastungsuntersuchungen

2.3.1 Belastung, Last. Belastung (Last) ist der Oberbegriff für den Leistungs- und Energiebedarf von Abnehmern. Unter einer Belastung können auch Stromwerte verstanden werden. Bei Wechsel- bzw. Drehstrom ist eine Trennung nach Wirk- und Blindkomponenten der einzelnen Belastungskenngrössen üblich.

2.3.2 Belastungsdiagramm. Ein Belastungsdiagramm ist die graphische Darstellung des zeitlichen Verlaufes einer Kenngrösse der elektrischen Belastung.

2.3.3 Gestuftes Belastungsdiagramm. Ein gestuftes Belastungsdiagramm ist die graphische Darstellung des zeitlichen Verlaufes einer Kenngrösse der Belastung in Stufen konstanter Intervalldauer. Innerhalb der Stufen wird ein Mittelwert gebildet.

2.3.4 Geordnetes Belastungsdiagramm. Ein geordnetes Belastungsdiagramm ist eine graphische Darstellung der Momentanwerte bzw. Stufen einer Kenngrösse des Belastungsdiagramms, bei der diese unabhängig von ihrem tatsächlichen zeitlichen Auftreten nach ihren Beträgen geordnet sind. Mit Rücksicht auf den thermisch ungünstigsten Belastungsfall des Normalbetriebes wird hierbei mit dem niedrigsten Wert der Belastung begonnen.

2.3.5 Belastungsmodell. Ein Belastungsmodell ist die vereinfachte graphische Darstellung des zeitlichen Verlaufes einer Kenngrösse der elektrischen Belastung. Es dient als Ersatz für den tatsächlichen Verlauf. Für Einzelabnehmer sind trapezförmige und gestufte Belastungsmodelle üblich.

2.3.6 Feld V. Ein Feld ist eine Menge von Grössen bzw. Elementen v_{jk1} , die sich durch Indizes voneinander unterscheiden. Bei Belastungsuntersuchungen stellen Zwischenwerte sowie bestimmte Kenngrössen der Belastung derartige Elemente dar, die in Form eines Feldes V nach den ihnen zugeordneten Indizes zusammengestellt werden können.

2.4 Kenngrössen der elektrischen Belastung und ihres zeitlichen Verlaufes bzw. ihrer Entwicklung

2.4.1 Kenngrössen der Belastung

2.4.1.1 Nennleistung p_n , q_n , s_n . Die Nennleistung eines elektrischen Betriebsmittels ist die Leistung, nach der es benannt, gebaut und bemessen ist. Unter der Nennwirkleistung von Motoren versteht man die Motorwellenleistung, bei anderen Abnehmern, die von ihnen benötigte oder übertragene elektrische Leistung [8].

Die Nennblindleistung eines Abnehmers ist diejenige Blindleistung, die er bei seiner Nennwirkleistung und Nennspannung aus dem Netz entnimmt oder an das Netz abgibt. Bei Synchronmotoren ist die Blindleistung auf den Nennerergerstrom bzw. den Nennleistungsfaktor zu beziehen [12].

2.4.1.2 Installierte Leistung P_n , Q_n . Die installierte Leistung ist die Summe der Abnehmernennleistungen. Sie wird üblicherweise nach Bereichen (Abnehmertypen, Nennspannungen) oder bestimmten Anlagenteilen untergliedert. Beispielsweise gilt für die installierte Wirkleistung:

$$P_n = \sum p_n \quad (1)$$

2.4.1.3 Anschlusswert p_a , q_a , s_a . Der Anschlusswert ist der elektrische Leistungsbedarf eines Abnehmers bei Nennbelastung. Bei Motoren ermittelt man ihn aus:

$$p_a = \frac{p_n}{\eta_n} \quad (2)$$

$$s_a = \frac{p_n}{\eta_n \cos \varphi_n} \quad (3)$$

Bei Leuchtstofflampen und Leuchtröhren ist zu beachten, dass zur Nennleistung der Lampe bzw. Röhre noch die der zugehörigen Drosselspule addiert werden muss.

2.4.1.4 Bedarfsleistung p_{bed} , q_{bed} . Die Bedarfsleistung eines Abnehmers ist der Leistungsbedarf in dem am höchsten belasteten

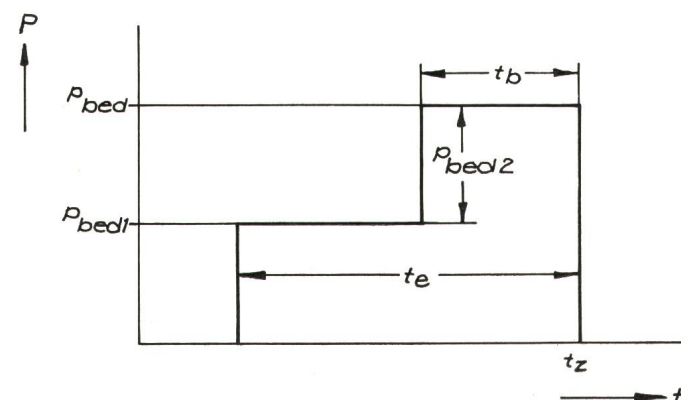


Fig. 3

Kenngrössen des zweistufigen Belastungsmodells eines Abnehmers nach [12]

Zyklus innerhalb eines Jahres bzw. Halbjahres (Fig. 3). Für eine Abnehmergruppe gilt:

$$P_{\text{bed}} = \sum p_{\text{bed}} \quad (4)$$

2.4.1.5 Konstanter Anteil der Bedarfsleistung p_{bed1} , q_{bed1} . Der konstante Anteil der Bedarfsleistung eines Abnehmers ist derjenige Teil der Belastung, der während der Einschaltdauer des Abnehmers unveränderlich ist (für den am höchsten belasteten Zyklus) (Fig. 3).

2.4.1.6 Variabler Anteil der Bedarfsleistung p_{bed2} , q_{bed2} . Der variable Anteil der Bedarfsleistung eines Abnehmers ist derjenige Teil der Belastung, der während der Einschaltdauer des Abnehmers Schwankungen unterliegt (für den am höchsten belasteten Zyklus) (Fig. 3).

2.4.1.7 Maximallast P_{maxT} , Q_{maxT} . Die Maximallast ist der höchste Leistungsbedarf einer Abnehmergruppe in dem am höchsten belasteten Zyklus. Sie ist als arithmetischer Mittelwert über eine bestimmte Zeitdauer (in der Regel $T_1 = 10; 15; 30$ oder 60 min) anzugeben.

2.4.1.8 Mittellast P_m , Q_m . Die Mittellast ist der arithmetische Mittelwert des Leistungsbedarfes über eine bestimmte Zeitdauer T_1 :

$$P_m = \frac{1}{T_1} \int_{(T_1)} P(t) dt \quad (5)$$

2.4.1.9 Minimallast P_{minT} , Q_{minT} . Die Minimallast ist der niedrigste Leistungsbedarf einer Abnehmergruppe in dem am niedrigsten belasteten Zyklus. Sie ist als arithmetischer Mittelwert über eine bestimmte Zeitdauer (in der Regel $T_1 = 10; 15; 30$ oder 60 min) anzugeben.

2.4.1.10 Spitzenstrom i_s , I_s . Der Spitzenstrom ist der höchste Momentanwert des Stromes bei Normalbetrieb bzw. beim Anlauf eines Abnehmers.

2.4.1.11 Energiebedarf W , V . Der Wirkenergiebedarf ergibt sich aus:

$$W = \int_{(T)} P(t) dt \quad (6)$$

Darin sind T der Zeitraum der Bedarfsermittlung und $P(t)$ der zeitliche Verlauf der Belastung der Abnehmergruppe.

2.4.2 Kenngrößen der Zeit

2.4.2.1 Leerlaufdauer t_l . Die Leerlaufdauer ist die Zeit, in der ein elektrisches Betriebsmittel unter Spannung steht, aber keine Nutzarbeit verrichtet oder Energie überträgt.

2.4.2.2 Belastungsdauer t_b . Die Belastungsdauer ist die Zeit innerhalb eines Zyklus, in der ein elektrisches Betriebsmittel Arbeit verrichtet oder Wirkenergie überträgt.

2.4.2.3 Einschaltdauer t_e . Die Einschaltdauer ist die Zeit, in der ein elektrisches Betriebsmittel ununterbrochen unter Spannung steht. Sie setzt sich aus der Leerlauf- und Belastungsdauer zusammen:

$$t_e = t_l + t_b \quad (7)$$

2.4.2.4 Zyklusdauer t_z , T_z . Die Zyklusdauer ist die Zeit, nach der sich ein charakteristischer Belastungsverlauf wiederholt bzw. er beendet wird. Sie wird meist durch den technologischen Prozess bestimmt.

2.4.2.5 Intervalldauer t_i , T_i . Die Intervalldauer ist die Zeitdauer einer Mittelwertbildung (insbesondere bei der Ermittlung der Höchstlast). Sie ist gleichzeitig die Stufenbreite von gestuften Belastungsdiagrammen.

2.4.2.6 Schichtdauer t_{Sch} , T_{Sch} . Die Schichtdauer ist die Anzahl der Arbeitsstunden je Schicht und Halbjahr bzw. Jahr.

2.5 Verhältniszahlen bei Belastungsuntersuchungen

2.5.1 Ausnutzungsgrad k_a , K_a . Der Ausnutzungsgrad ist das Verhältnis der mittleren Belastung eines Abnehmers bzw. einer Abnehmergruppe zum Anschlusswert:

$$K_a = \frac{P_m}{P_a} \quad (8)$$

2.5.2 Relative Belastungsdauer k_b , K_b . Die relative Belastungsdauer ist das Verhältnis der Belastungsdauer zur Zyklusdauer:

$$k_b = \frac{t_b}{t_z} \quad (9)$$

2.5.3 Relative Einschaltdauer k_e , K_e . Die relative Einschaltdauer ist das Verhältnis der Einschaltdauer zur Zyklusdauer:

$$k_e = \frac{t_e}{t_z} \quad (10)$$

2.5.4 Bedarfskoeffizient k_c , K_c . Der Bedarfskoeffizient ist das Verhältnis der Maximallast zum Anschlusswert:

$$K_c = \frac{P_{\text{max}}}{P_a} \quad (11)$$

2.5.5 Bedarfsausnutzungsgrad k_d , K_d . Der Bedarfsausnutzungsgrad ist das Verhältnis der Mittellast zur Bedarfsleistung:

$$k_d = \frac{p_m}{p_{\text{bed}}} \quad (12)$$

2.5.6 Formfaktor k_{fb} , K_{fb} . Der Formfaktor der Belastung ist das Verhältnis der effektiven Belastung zur Mittellast für den zeitlich veränderlichen Belastungsanteil:

$$k_{fb} = \frac{p_{\text{eff}}}{p_m} \quad (13)$$

2.5.7 Gleichzeitigkeitsfaktor K_g . Der Gleichzeitigkeitsfaktor ist das Verhältnis der Maximallast einer Gruppe zur Summe der Einzelhöchstlasten der Abnehmer dieser Gruppe in einem definierten Zeitraum:

$$K_g = \frac{P_{\text{max}}}{\sum p_{\text{max}}} \quad (14)$$

2.5.8 Schwankungskoeffizient der Maximallast k_{max} , K_{max} . Der Schwankungskoeffizient der Maximallast ist das Verhältnis der Maximallast zur Mittellast:

$$K_{\text{max}} = \frac{P_{\text{max}}}{P_m} \quad (15)$$

2.5.9 Schwankungskoeffizient der Minimallast k_{min} , K_{min} . Der Schwankungskoeffizient der Minimallast ist das Verhältnis der Minimallast zur Mittellast:

$$K_{\text{min}} = \frac{P_{\text{min}}}{P_m} \quad (16)$$

2.5.10 Energieausnutzungsgrad k_w , K_w . Der Energieausnutzungsgrad ist das Verhältnis der tatsächlich übertragenen oder benötigten Energie W in einem definierten Zeitraum T zu derjenigen Energie, die sich aus dem Produkt der Maximallast des am höchsten belasteten Zyklus und der betrachteten Zeitdauer ergibt. Beispielsweise gilt für den Zeitraum eines Jahres [7]:

$$K_{wJ} = \frac{W_J}{P_{\text{max}} T_J} \quad (17)$$

2.5.11 Spezifischer Energieverbrauch w_0 , v_0 . Der spezifische Energieverbrauch ist das Verhältnis des Wirk- bzw. Blindenergiebedarfs zu einer Bezugsgröße A_0 (beispielsweise Produktionsfläche, Produktionsmenge):

$$w_0 = \frac{W}{A_0} \quad (18)$$

2.5.12 Effektive Abnehmeranzahl n_{eff} . Die effektive Abnehmeranzahl ist eine rechnerische Anzahl von fiktiven Abnehmern gleichen Anschlusswertes, die dieselben Belastungskenngrößen hat wie die untersuchte Gruppe von Abnehmern mit unterschiedlichen Anschlusswerten. Sie wird ermittelt aus:

$$n_{\text{eff}} = \frac{\left(\sum p_a\right)^2}{\sum p_a^2} \quad (19)$$

2.5.13 Lastentwicklungsfaktor f . Der Lastentwicklungsfaktor ist das Verhältnis aus der zu erwartenden oder vorhandenen mittleren Belastung $P_{10}(t)$ im Jahr $a_n = a_0 + 10$ und der mittleren Belastung $P_0(t)$ im Bezugsjahr a_0 :

$$f = \frac{P_{10}(t)}{P_0(t)} \quad (20)$$

2.5.14 Faktor der optimalen Transformatorauslastung K_{OT} . Der Faktor der optimalen Transformatorauslastung ist das Verhältnis der Scheinleistung S_{OT} für die wirtschaftliche Betriebsweise des Transformators zu seiner Nennleistung S_n :

$$K_{OT} = \frac{S_{OT}}{S_n} \quad (21)$$

3. Darstellung und Einschätzung der Grundverfahren der Belastungsermittlung

3.1 Allgemeines

Im Stadium der Planung der Stromversorgungsanlagen wird im allgemeinen der zeitliche Verlauf der Belastung der Abnehmer unbekannt sein und es sich ausserdem vorzugsweise um die Berechnung einer grossen Anzahl von Abnehmern handeln. Diesen Verhältnissen sollten auch die Grundverfahren der Belastungsermittlung entsprechen.

Im Rahmen vorliegender Arbeit werden die aus der Planungspraxis bekannten Grundverfahren kurz dargestellt und kritisch eingeschätzt. Aus diesen Betrachtungen lassen sich die Forderungen an ein weitgehend allgemeingültiges Berechnungsverfahren ableiten.

Der eigentlichen Darstellung der Grundverfahren sollen noch einige Hinweise über den zu berechnenden Belastungswert vorangestellt werden.

Für das Grundverfahren des geordneten Belastungsdiagramms sind in [7] ausführlich alle Zusammenhänge zwischen der Leitererwärmung und einem zeitlich schwankenden Belastungsverlauf dargestellt. Dabei wird vom Vorhandensein zweier Erwärmungseffekte eines Kabels ausgegangen, der Temperaturerhöhung und dem Wärmeverschleiss der Isolation. Hieraus ergibt sich als Forderung an den zu berechnenden Belastungswert, dass die Alterung der Isolation infolge der Wärmewirkung des zu berechnenden fiktiven Stromes gleich der Alterung bei der tatsächlichen, sich ändernden Belastung ist. Andererseits darf das betreffende Betriebsmittel unter den Bedingungen der sich ändernden Belastung keinen unzulässigen Übertemperaturen ausgesetzt sein, deren Folgen Änderungen der Werkstoffeigenschaften der Isolierstoffe oder gar des konstruktiven Aufbaus sein können.

Während man der Forderung nach Äquivalenz bezüglich der Erwärmung weitgehend gerecht werden kann, lässt sich das Problem der unzulässigen Übertemperaturen theoretisch schlecht erfassen.

In den sowjetischen Richtlinien [11] wird in Ermangelung exakten Zahlenmaterials über den Wärmeverschleiss und die zulässige Übertemperatur festgelegt, dass die Temperatur bei den Nenndaten des elektrischen Betriebsmittels zu keinem Zeitpunkt um mehr als 50 % überschritten werden darf. Als fiktiver Belastungswert wird der 30-min-Mittelwert der Maximallast berechnet, weil er in der Nähe des dreifachen Wertes der Erwärmungszeitkonstanten der Kabel kleinen und mittleren Querschnitts liegt. Da die anderen Anlagenteile grössere Erwärmungszeitkonstanten aufweisen, wird in der Sowjetunion — auch im Hinblick auf eine Vereinfachung der Berechnungen — der 30-min-Mittelwert der Maximallast berechnet und der Dimensionierung der Anlagenteile zugrunde gelegt.

Beim Grundverfahren der Überlagerung zweistufiger elektrischer Belastungsmodelle kann die Maximallast für jede gewünschte Intervalldauer T_1 berechnet werden. Es wird $T_1 = 15$ min empfohlen, da der 15-min-Maximalwert ebenfalls für die energiewirtschaftliche Planung benötigt wird. Die Ermittlung der rechnerischen Ersatzbelastung für die Dimensionierung fusst dabei erstmals auf der Erwärmungszeitkonstanten jedes Anlagenteils.

Diese Verfahrensweise stellt gegenüber dem sowjetischen Verfahren eine wesentliche Verfeinerung dar und ist bisher in keinem anderen Grundverfahren enthalten. Mit ihr ist leider eine erhebliche Vergrösserung des Rechenaufwandes verbunden.

3.2 Grundverfahren der Belastungsermittlung

3.2.1 Verfahren des Bedarfskoeffizienten

Die Maximallast, nach der die Anlagenteile zu dimensionieren sind, wird aus der Summe der Nennleistungen P_n der betreffenden Abnehmergruppe und dem meist grob geschätzten Bedarfskoeffizienten K_c errechnet:

$$P_{\max} = K_c P_n \quad (22)$$

Üblicherweise wird Q_{\max} aus P_{\max} und einem geschätzten, mittleren Leistungsfaktor bestimmt.

Oft trifft man auch eine «verfeinerte» Form dieses Verfahrens an. An Stelle des Bedarfskoeffizienten K_c werden der Bedarfskoeffizient K_{c0} («Ausnutzungsgrad») und eine Verhältniszahl K_{g0} («Gleichzeitigkeitsfaktor») berücksichtigt. K_{g0} ist dabei das Verhältnis aus der Anzahl der maximal gleichzeitig eingeschalteten Abnehmer einer Gruppe zu ihrer Gesamtzahl und K_{c0} der Bedarfskoeffizient für die jeweils gleichzeitig eingeschalteten Abnehmer. Der maximale Leistungsbedarf ergibt sich aus:

$$P_{\max} = K_{c0} K_{g0} P_n \quad (23)$$

Das Verfahren des Bedarfskoeffizienten kann nicht Grundlage eines allgemeingültigen Verfahrens sein, da nur ein Teil der Belastungswerte ermittelt werden kann und die Genauigkeit des Ergebnisses, schon im Hinblick auf die fehlenden Angaben für K_c , sehr gering ist. Das Verfahren des Bedarfskoeffizienten berücksichtigt nur sehr wenige der Einflussgrössen der elektrischen Belastung und ist deshalb nur für überschlägliche Ermittlungen zulässig.

3.2.2 Verfahren der Zweigliederformel

Livsic schlug 1948 vor, die Belastungen über eine Zweigliederformel zu berechnen. Dieses Verfahren ist lange Zeit von grossen sowjetischen Projektierungsbüros angewandt worden und dient heute noch als Grundlage für die Ermittlung elektrischer Belastungen von Industriebetrieben in der ČSSR [8; 10].

Bei der theoretischen Erläuterung des Verfahrens der Zweigliederformel geht man von einer Gruppe mit einer variablen Anzahl unabhängiger elektrischer Abnehmer aus, die bei dieser Betrachtung stets eine konstante installierte Leistung aufweisen soll. Die tatsächlich benötigte Leistung (in Prozent der installierten Leistung) fällt nach einer Hyperbel mit steigender Abnehmeranzahl, strebt aber sehr bald einem Grenzwert zu. Der erste Teil dieser Hyperbelfunktion kann durch die Zuschaltung einiger weniger grosser Abnehmer verändert werden, während der zweite Teil nur durch gleichzeitiges Zuschalten einer sehr grossen Anzahl kleinerer Abnehmer verändert werden kann. Das ist aber in Wirklichkeit für unabhängige Abnehmer nicht wahrscheinlich. Dem geschilderten Umstand trägt die Zweigliederformel Rechnung, bei der zwei Koeffizienten a und b — getrennt nach grossen und kleinen Abnehmern — diesen Einfluss berücksichtigen. Erfahrungsgemäss interessieren nur die 3...5 grössten Abnehmer. Die Zweigliederformel lautet:

$$P_{\max} = aP_{n1} + bP_n \quad (24)$$

Darin sind P_{n1} die Summe der installierten Leistungen der 3...5 grössten Abnehmer und P_n die der installierten Leistung der Gruppe einschliesslich P_{n1} .

In Versorgungsnetzen, in denen Abnehmergruppen mit unterschiedlichen Konstanten a und b vorhanden sind, wird die zu erwartende Maximallast aus den Anteilen der Gruppen berechnet:

$$P_{\max} = (aP_{n1})_{\max} + \sum_{i=1}^{i=r} (bP_n)_i \quad (25)$$

Darin ist r die Anzahl der Gruppen $(aP_{n1})_{\max}$ stellt den Anteil des ersten Gliedes derjenigen Gruppe dar, die die 3...5 grössten Abnehmer enthält.

Über die theoretischen Grundlagen dieser empirischen Gleichung kann man streiten, insbesondere auch, da die Originalliteratur einige ungenaue Festlegungen enthält. Die Zahl der Ausgangsdaten für eine Berechnung nach der Zweigliederformel ist gering. Die Rechnung selbst ist schnell und leicht durchführbar. Sie dürfte bei vorhandenem Kennziffernmaterial gegenüber dem Verfahren des Bedarfskoeffizienten wegen der besseren Berücksichtigung des Einflusses grosser Abnehmer im allgemeinen zu genaueren Bilanzierungsergebnissen führen.

3.2.3 Verfahren des spezifischen Energieverbrauches

Sind genaue Werte des spezifischen Energieverbrauches w_0 und die Anzahl n_0 von Bezugseinheiten (z.B. Stück, m^2 , kg) bekannt, so können der Energieverbrauch und über die Benutzungstundenzahl T_{\max} der Maximalwert auch die Maximallast berechnet werden:

$$W = n_0 w_0 \quad (26)$$

$$P_{\max} = \frac{n_0 w_0}{T_{\max}} \quad (27)$$

Da der spezifische Energieverbrauch in der Regel nur für den Wirkverbrauch ermittelt wird, kann der Blindverbrauch nur bei bekanntem Leistungsfaktor berechnet werden.

Das Grundverfahren der Belastungsermittlung über den spezifischen Energieverbrauch kann in erweiterter Form in die Überlagerungsrechnung für die zweistufigen Belastungsmodelle (s. Abschnitt 3.2.6) einbezogen werden. Dabei sind folgende Voraussetzungen zu erfüllen:

- Vorhandensein von begründeten Werten des spezifischen Energieverbrauches;
- Keine extremen Belastungsschwankungen;
- Feine Untergliederung des spezifischen Energieverbrauches (nach der Technologie, Beleuchtung u. ä.);
- Einhaltung des Gültigkeitsbereiches der Gesetze der Wahrscheinlichkeitsrechnung für die Kenngrössen der Belastung.

Durch eine Verfeinerung dieses Verfahrens kann der empirische Charakter der Belastungsermittlung nicht verändert werden. Lediglich einige Einflussfaktoren sind besser berücksichtigt.

Bei der Erfassung der Ausgangsdaten sind die spätere Aufteilung nach Bereichen, Knoten und Spannungen sowie der Abnehmertyp und die örtliche Lage zu beachten, d.h. dass meist mehrere Einzelmodelle für einen Versorgungsbereich aufgestellt werden müssen.

In Übereinstimmung mit der Definition der Kenngrösse «Spezifischer Energieverbrauch» geht man bei der Berechnung von der mittleren Belastung aus:

$$p_m = \frac{E w_{0E}}{T_{\text{Sch}}} \quad (28)$$

$$p_m = \frac{M w_{0M}}{T_{\text{Sch}}} \quad (29)$$

$$p_m = \frac{A_0 a_1 a_2 w_{0A}}{T_{\text{Sch}}} = \frac{A w_{0A}}{T_{\text{Sch}}} \quad (30)$$

Darin sind: E Anzahl der Erzeugnisse in Stück/Halbj. u. Schicht; M Menge des Produktes in m^3 ; kg/Halbj. u. Schicht; A Rechnerische Grösse der Produktionsfläche in m^2 ; A_0 Bezugsfläche

in m^2 ; a_1 Leerraumfaktor ($a_1 \leq 1$); a_2 Minderbelastungsfaktor ($a_2 \leq 1$); w_{0E} , w_{0M} , w_{0A} Spezifischer Energieverbrauch, bezogen auf E , M oder A in kWh/Einheit, Halbj. u. Schicht.

Während der Leerraumfaktor Gebiete ohne Belastungen innerhalb der Produktionsfläche berücksichtigt, erfasst der Minderbelastungsfaktor den Einfluss von Gebieten mit niedrigerer und in Sonderfällen höherer Belastung, als es der spezifische Energieverbrauch widerspiegelt.

Das Verfahren des spezifischen Energieverbrauches eignet sich für die digitale Berechnung des Leistungs- und Energiebedarfes. Es sind nur wenige Ausgangsdaten erforderlich. Jedoch ist eine Bilanzierung über mehrere Netzebenen von der Bereitstellung der Werte des spezifischen Energieverbrauches für alle Abnehmergruppen abhängig.

Das Verfahren des spezifischen Energieverbrauches kann bei Vorplanungen und in begründeten Fällen auch für genaue Ermittlungen verwendet werden. Eine Grenze für den Anwendungsbereich lässt sich nicht angeben, da sie stark von der Genauigkeit und den Grundlagen der Ausgangsdaten (auch des technologischen Prozesses) abhängt. Das Verfahren bietet eine gute Kontrollmöglichkeit für den nach anderen Grundverfahren ermittelten Leistungs- und Energiebedarf.

3.2.4 Verfahren des geordneten Belastungsdiagramms

Auf der Grundlage vieler Einzeluntersuchungen erarbeitete 1961 die Kommission für Belastungen der Abteilung Elektroenergieversorgung von Industriebetrieben (ZENTOEP) für die Sowjetunion eine vorläufige Richtlinie über die Ermittlung elektrischer Belastungen [11]. Kernstück dieser Richtlinie für die Berechnung des elektrischen Leistungsbedarfes von Abnehmern mit unbekanntem zeitlichem Verlauf der Belastung ist das Verfahren des geordneten Belastungsdiagramms. Die Untersuchung der geordneten Belastungsdiagramme von Abnehmergruppen ergab, dass sie mit ausreichender Genauigkeit durch ein dreieckiges bzw. trapezförmiges Belastungsmodell (mit steigenden Belastungswerten und gleichem Formfaktor) ersetzt werden können und somit die weitere mathematische Behandlung, insbesondere der Erwärmungsvorgänge, möglich wird. Der höchsten Erwärmung des Anlagenteils entspricht dabei ein äquivalenter Dauerstrom.

Wie bereits erwähnt, werden beim Verfahren des geordneten Belastungsdiagramms die 30-min-Maximalwerte der Belastung berechnet und der Dimensionierung der Anlagenteile nach der Erwärmung zugrunde gelegt. Die Maximallast ergibt sich aus:

$$P_{\max 30} = K_{\max 30} P_m \quad (31)$$

$$P_{\max 30} = K_{\max 30} K_a P_n \quad (32)$$

Darin sind: P_m Mittelwert der Wirkleistung für die am höchsten belastete Schicht; P_n Summe der Nennwirkleistungen der Abnehmer; $K_{\max 30}$ Schwankungskoeffizient des Maximalwertes der Wirkleistung für $T_i = 30$ min; K_a Mittlerer Ausnutzungsgrad der Wirkleistung der Abnehmergruppe in der am höchsten belasteten Schicht.

Die Blindleistungskomponente wird über den für die angeschlossenen Abnehmer charakteristischen Wert des Leistungsfaktors bestimmt:

$$Q_{\max 30} = P_{\max 30} \tan \varphi \quad (33)$$

Der Ausnutzungsgrad einer Abnehmergruppe wird durch Mittelwertbildung aus den Anteilen der einzelnen Abnehmer bestimmt:

$$K_a = \frac{\sum (k_a p_n)}{P_n} \quad (34)$$

Die effektive Abnehmerzahl ergibt sich — abweichend von Gl. (19) — aus:

$$n_{\text{eff}} = \frac{P_n^2}{\sum p_n^2} \quad (35)$$

$K_{\text{max}30} = f(K_a, n_{\text{eff}})$ ist in den sowjetischen Richtlinien als Kurvenschar und in Tabellenform wiedergegeben.

Das Verfahren des geordneten Belastungsdiagramms war das erste Grundverfahren, nach dem alle für eine Bilanzierung und Dimensionierung nach der Erwärmung benötigten Belastungskenngrößen und -verhältniszahlen ermittelt werden konnten. Es ist durch zahlreiche Messergebnisse bestätigt worden. Die Genauigkeit dieses Grundverfahrens wird mit $\pm 10\%$ angegeben.

Der Aufwand zur Ermittlung der Ausgangsdaten und für die Durchführung der Rechnungen ist gegenüber den bereits erläuterten Grundverfahren hoch. Da sich das Verfahren jedoch gut für eine Berechnung mit maschinellen Datenverarbeitungsanlagen eignet, treten dadurch keine Nachteile ein.

Die Ergebnisse der Berechnung der zweistufigen Belastungsmodelle (s. Abschn. 3.2.6) sind auch für Berechnungen nach dem Grundverfahren des geordneten Belastungsdiagramms geeignet. Doch kann hierauf an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden.

3.2.5 Statistisches Verfahren

Ein statistisches Verfahren der Belastungsermittlung wurde von B. W. Gnedenko und B. S. Meschel auf die Dimensionierung von Anlagenteilen angewandt. Eine umfassende Darstellung ist von Meschel 1964 veröffentlicht worden [7]. Danach ist die zu berechnende Maximallast eine Funktion der Mittelast P_m und der Streuung σ_T des Belastungsdiagramms. Den Betrachtungen wird die Gaußsche Normalverteilung $W(\xi)$ zugrundegelegt. Für die Maximallast, die über die Zeitdauer $T_1 = T$ gemittelt wurde, gilt:

$$P_{\text{max}T} = P_m + \xi \sigma_T \quad (36)$$

In dieser Gleichung ist ξ ein Mass für die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Ereignis — die rechnerisch ermittelte Maximallast — überschritten wird.

Die mittlere Belastung (mathematische Erwartung) kann aus dem in n Abschnitte der Zeitdauer T unterteilten Belastungsdiagramm mit den Stufen P_n berechnet werden:

$$P_m = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{n} \quad (37)$$

Hieraus ergibt sich der Wert der Streuung für dieselbe Zeitdauer zu:

$$\sigma_T = \sqrt{\frac{(P_1 - P_m)^2 + (P_2 - P_m)^2 + \dots + (P_n - P_m)^2}{n}} \quad (38)$$

Für grosse Werte von n nähern sich P_m und σ_T den Grenzwerten, die für das tatsächliche Belastungsdiagramm gelten.

Das statistische Verfahren berücksichtigt die Kenngrößen und Verhältniszahlen der elektrischen Belastung nur bedingt. Die Bestimmung der für die Berechnung benötigten Werte von σ_T für alle vorkommenden Typen von Abnehmergruppen bereitet Schwierigkeiten und ist zudem an bestimmte technologische Bedingungen gebunden. Das Grundverfahren ist für eine Berechnung auf Datenverarbeitungsanlagen geeignet.

3.2.6 Verfahren der Überlagerung zweistufiger Belastungsmodelle

Das Grundverfahren der Überlagerung zweistufiger elektrischer Belastungsmodelle bei unbekanntem zeitlichem Verlauf der elektrischen Belastung wurde von W. Sandner entwickelt [12]. Bei diesem Grundverfahren wird davon ausgegangen, dass die Gruppenbelastungen durch Überlagerung von Belastungsmodellen einzelner Abnehmer nach den Gesetzen der Wahrscheinlichkeitsrechnung bestimmt werden können. Die Zulässigkeit dieses Berechnungsverfahrens ist durch Messungen bestätigt worden.

Das zweistufige Belastungsmodell eines Abnehmers wird durch folgende Kenngrößen beschrieben (Fig. 3):

- Konstanter Anteil der Bedarfsleistung $p_{\text{bed}1}$;
- Variabler Anteil der Bedarfsleistung $p_{\text{bed}2}$;
- Belastungsdauer t_b (bezogen auf die Bedarfsleistung p_{bed});
- Einschaltdauer t_e ;
- Zyklusdauer t_z ;
- Formfaktor der Belastung k_{fb} .

k_{fb} berücksichtigt die Schwankungen des zeitlich veränderlichen Belastungsanteils $p_{\text{bed}2}$.

Indem man die Belastungswerte normiert, sie als Zufallsgrößen x auffasst und ihrer Dauer die Wahrscheinlichkeiten $W(x) = t_b/t_z$ zuordnet, ist es möglich, diese Modelle nach den Gesetzen der Binomialverteilung zu überlagern. Dabei wird vereinfachend angenommen, dass alle $p_{\text{bed}1}$ addiert werden können und somit die Überlagerungsrechnung für ein einstufiges Modell mit $p_{\text{bed}2}$ durchzuführen ist, d. h. also, dass angenommen eine Überlagerung für einstufige Modelle vorgenommen wird. Die sich aus dieser Überlagerung ergebende Verteilungsfunktion ist identisch mit der des geordneten Belastungsdiagramms.

Bei unbekanntem zeitlichem Verlauf der Belastung wird ein zweistufiges Belastungsmodell für jeden Abnehmer den Untersuchungen zugrundegelegt. Die rechnerische Ersatzbelastung einer Abnehmergruppe erhält man aus der Überlagerung dieser gleichartigen Belastungsmodelle. Zur Umwandlung in gleichartige Modelle ist eine Mittelwertbildung für $(t_b/t_z)_m$ bzw. für T_z der Abnehmergruppe erforderlich:

$$K_b = \left(\frac{t_b}{t_z}\right)_m = \frac{\sum \left[\left(\frac{t_b}{t_z}\right) p_{\text{bed}2}\right]}{P_{\text{bed}2}} \quad (39)$$

$$T_z = \frac{\sum (t_z p_{\text{bed}2})}{P_{\text{bed}2}} \quad (40)$$

Die effektive Abnehmerzahl n_{eff} wird, abweichend von Gl. (19) und (35), aus $p_{\text{bed}2}$ berechnet:

$$n_{\text{eff}} = \frac{P_{\text{bed}2}^2}{\sum p_{\text{bed}2}^2} \quad (41)$$

Zur Verbesserung des Belastungsmodells dient der Formfaktor K_{fb} . Mit Rücksicht auf die Kompliziertheit der Überlagerung zweistufiger Modelle wird K_{fb} bei den Mittelwerten $(t_b/t_z)_m$ und bei n_{eff} berücksichtigt:

$$K_b^* = \left(\frac{t_b}{t_z}\right)^* = \frac{K_b}{1 + \sqrt{K_{fb}^2 - 1}} \quad (42)$$

$$n_{\text{eff}}^* = n_{\text{eff}} \frac{1 + \sqrt{K_{fb}^2 - 1} - K_b}{K_{fb}^2 - K_b} \quad (43)$$

Ausgehend von dem Modell, das aus der Überlagerungsrechnung bzw. der Verteilungsfunktion der Belastung erhalten

wurde, kann unter Einbeziehung der Erwärmungsgleichungen der äquivalente Dauerstrom der Erwärmung berechnet werden.

Als Grundbeziehungen für die Zusammenfassungen sowie die Bilanzierung ergeben sich — neben den bereits angeführten Formeln — folgende Gleichungen:

$$P_{bed1} = \sum p_{bed1} \quad (44)$$

$$P_{bed2} = \sum p_{bed2} \quad (45)$$

$$P_m = \sum \left(p_{bed1} + p_{bed2} \frac{t_b/t_z}{1 + \sqrt{k_{fb}^2 - 1}} \right) \quad (46)$$

Analog sind die Blindleistungswerte zu ermitteln.

Maximal- und Minimallast (für die Intervalldauer $T_i = T$):

$$P_{maxT} = P_{bed1} + P_{bed2} I'_{max2} \quad (47)$$

$$P_{minT} = P_{bed1} + P_{bed2} I'_{min2} \quad (48)$$

Hierbei werden für $n_{eff}^* > 4$ die Koeffizienten I'_{max2} und I'_{min2} aus den Überlagerungsfunktionen f_1 bzw. f_2 berechnet [12]:

$$I'_{max2} = f_1 \left[n_{eff}^*, \left(\frac{t_b}{t_z} \right)^*, T_z, T_i \right] \quad (49)$$

$$I'_{min2} = f_2 \left[n_{eff}^*, \left(\frac{t_b}{t_z} \right)^*, T_z, T_i \right] \quad (50)$$

Rechnerische Ersatzbelastung I_r für die Dimensionierung:

$$I_r = \frac{1}{\sqrt{3} U_N} \sqrt{P_{bed1}^2 + Q_{bed1}^2 + 2(P_{bed1} P_{bed2} + Q_{bed1} Q_{bed2}) I'_{r12} + (P_{bed2}^2 + Q_{bed2}^2) I'_{r22}} \quad (51)$$

Hierbei werden für $n_{eff}^* > 4$ die Koeffizienten I'_{r12} und I'_{r22} aus den Überlagerungsfunktionen f_3 bzw. f_4 ermittelt [12]:

$$I'_{r12} = f_3 \left[n_{eff}^*, \left(\frac{t_b}{t_z} \right)^*, T_z, \tau \right] \quad (52)$$

$$I'_{r22} = f_4 \left[n_{eff}^*, \left(\frac{t_b}{t_z} \right)^*, T_z, \tau \right] \quad (53)$$

τ ist die mittlere Erwärmungszeitkonstante eines Kabels oder einer isolierten Leitung.

Für $n_{eff}^* \leq 4$ gilt:

$$I'_{r12} = I'_{r22} = \sqrt{\frac{1 - e^{-\left(\frac{t_b}{t_z}\right)^* \cdot \frac{T_z}{\tau}}}{1 - e^{-T_z/\tau}}} \quad (54)$$

Bei Öltransformatoren werden für die Zeitkonstanten τ_{wi} der Wicklung und $\tau_{öl}$ des Öles die Ersatzbelastungen I_{rI} und I_{rII} ermittelt und anschliessend in einen Wert der rechnerischen Ersatzbelastung umgerechnet [12].

Die Erwärmungszeitkonstante ist vom Querschnitt eines Kabels bzw. von der Nennleistung eines Transformators abhängig. Man wird deshalb zunächst das Anlagenteil nach der Höchstlast auswählen, mit diesem Wert I_r berechnen und prüfen, ob der Wert von I_r einem anderen als dem vorgewählten Betriebsmittel entspricht. Gegebenenfalls ist die Rechnung zu wiederholen (Iterationsverfahren).

3.2.6.1 Zusatzverfahren des mittleren Ausnutzungsgrades K_{am} [12]. Das Verfahren der Überlagerung der zweistufigen Modelle kann auch auf Abnehmergruppen ausgedehnt werden, von denen an Stelle der Bedarfsleistungen jeweils nur der

mittlere Ausnutzungsgrad K_{am} und der Anschlusswert P_a bekannt sind. Der rechnerische Ausnutzungsgrad k_{ar} für einen Abnehmer ist der Wert des Ausnutzungsgrades k_{am} , der nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit überschritten wird (s. Abschn. 3.2.5). Er ergibt sich zu:

$$k_{ar} = k_{am} + \xi \sigma_{ka} \quad (55)$$

Den rechnerischen Ausnutzungsgrad erhält man aus:

$$K_{ar} = \frac{k_{am1} \sum p_{a1} + \dots + k_{amy} \sum p_{ay}}{\sum p_a} + \xi \sqrt{\frac{(f_{ka}^2 - 1) (k_{am1}^2 \sum p_{a1}^2 + \dots + k_{amy}^2 \sum p_{ay}^2)}{(\sum p_a)^2}} \quad (56)$$

Hierbei ist f_{ka} der Formfaktor des Ausnutzungsgrades. Der Index 1 bzw. y dient zur Unterscheidung der Anteile für die einzelnen Abnehmergruppen.

Für die Berechnung der Bedarfswirkleistung gilt:

$$P_{bed2} = \frac{K_{ar} (1 + \sqrt{k_{fbm}^2 - 1}) (\sum p_a)^2}{\left(\frac{t_b}{t_z} \right)_{m1} \sum p_{a1} + \dots + \left(\frac{t_b}{t_z} \right)_{my} \sum p_{ay}} \quad (57)$$

Für die Bedarfsblindleistung gilt die Beziehung:

$$Q_{bed2} = \frac{P_{bed2}}{\sum p_a} \left[\tan \varphi_1 \sum p_{a1} + \dots + \tan \varphi_y \sum p_{ay} \right] \quad (58)$$

P_{bed1} und Q_{bed1} sind bei diesen Ermittlungen gleich Null. Mit den Gln. (57) und (58) wird die Beziehung zum Grundverfahren der Überlagerung zweistufiger Belastungsmodelle hergestellt.

Entsprechend der Definition des Ausnutzungsgrades ergibt sich für die Mittelwerte der Belastung:

$$P_m = K_{ar} \sum (np_a) \quad (59)$$

$$Q_m = K_{ar} \sum (nq_a) \quad (60)$$

Die Berechnung von P_{bed2} und Q_{bed2} ist erst möglich, wenn alle Abnehmer eines Berechnungsknotens berücksichtigt worden sind. Hierdurch wird der Ablauf einer digitalen Berechnung erschwert.

3.2.6.2 Zusatzverfahren für Belastungsdiagramme. Eine Anwendung des Verfahrens der Umwandlung von bekannten elektrischen Belastungsdiagrammen in zweistufige Belastungsmodelle ist nur zulässig, wenn sich die Diagramme der Abnehmer den Gesetzen der Wahrscheinlichkeitsrechnung unterordnen.

Die Kenngrössen des zu berechnenden zweistufigen Belastungsmodells können in gleicher Weise wie die übrigen Abnehmermodelle in die Bilanzierung einbezogen werden. Die Belastungsdiagramme müssen in Form der Kenngrössen der elektrischen Belastungen vorliegen. Für die Belastung p_k der

Stufe k mit der Stufenbreite t_k (Intervalldauer) sind also vorgegeben: $p_k, \cos \varphi_k, t_k$. Ausser diesen Angaben müssen noch die Zahl der Belastungsspiele n_{sp} je Schicht und die Schichtdauer t_{sch} (bezogen auf einen Tag) bekannt sein.

Das Rechenverfahren ist so aufgebaut, dass die Belastungsstufe mit der höchsten Belastung als Spitzenbelastung p_s angesehen wird. Dies ist bei der Aufstellung des Diagrammes zu beachten:

$$\{p_s, \cos \varphi_s\} = \max_{p_k} \{p_k, \cos \varphi_k\} \quad (61)$$

Es wird weiterhin angenommen, dass die zweithöchste Belastungsstufe die Bedarfsleistung p_{bed} darstellt.

Für alle Stufen können nach der Beziehung:

$$q_k = p_k \tan \varphi_k \quad (62)$$

die Blindleistungswerte ermittelt werden.

Nach der Bedarfsleistung p_{bed} und dem sich daraus ergebenden Strom ist überschlägig nach den Tabellen der Kabeldaten die Zeitkonstante τ der Erwärmung zu bestimmen, da Gl. (64) nur für eine Zyklusdauer anzuwenden ist, für die gilt:

$$t_z = \frac{t_{sch}}{n_{sp}} \leq \tau \quad (63)$$

Für diesen Fall ergibt sich die rechnerische Ersatzbelastung (Bedarfsleistung) zu:

$$p_{bed} = \sqrt{\frac{n_{sp}}{t_{sch}} \sum (p_k^2 t_k)} \quad (64)$$

Für den konstanten Teil der Belastung (p_{bed1}, q_{bed1}) gilt als Kriterium:

$$\{p_{bed1}, q_{bed1}\} = \min_{p_k} \{p_k, q_k\} \quad (65)$$

Zeiten der Abschaltung im Zyklus sind bei dieser Auswahl nicht mit zu berücksichtigen.

Für $t_z > \tau$ ist auch eine genaue Berechnung der Ersatzbelastungen möglich [12]. Im Hinblick auf eine Verringerung des Rechenaufwandes kann man meist annehmen, dass die Bedarfsleistung p_{bed} gleich der rechnerischen Ersatzbelastung ist. Die übrigen Belastungsstufen sind dann ebenfalls auf diesen Wert p_{bed} umzurechnen; d. h., es werden neue Werte für die Belastungs- und die Einschaltdauer berechnet. Hieraus folgt für x Stufen:

$$t_e = n_{sp} \sum_{k=1}^x t_k \quad (66)$$

$$t_b = \frac{n_{sp}}{p_{bed} - p_{bed1}} \sum_{k=1}^x [t_k (p_k - p_{bed1})] \quad (67)$$

Mit den Gln. (61)...(67) ist es möglich, vorgegebene Belastungsdiagramme in zweistufige Belastungsmodelle umzurechnen und so in die Bilanzierung einzubeziehen.

Mit den vorangegangenen Betrachtungen (Abschn. 3.2.6) sei die Darstellung dieses Grundverfahrens abgeschlossen. Im Gegensatz zu allen anderen Verfahren wird von den Bedarfsleistungen der Einzelabnehmer bzw. den Kenngrößen der Abnehmergruppe ausgegangen und die Voraussetzung für eine detaillierte Berücksichtigung aller Typen von Abnehmern geschaffen. Alle für die Bilanzierung und Dimensionierung wichtigen Größen können berechnet werden. Dabei sieht das Ver-

fahren eine Auslegung jedes Anlagenteils nach der Erwärmungszeitkonstanten vor und erweitert so die Zahl der berücksichtigten Einflussgrößen.

Durch ein besonderes Zusatzverfahren können auch Stromrichteranlagen in die Belastungsermittlung einbezogen werden.

Es besteht die Möglichkeit, den Einfluss von höheren Stromharmonischen durch eine Zerlegung nach belastungsunabhängigen und -abhängigen Anteilen zu berücksichtigen.

Das Verfahren erscheint auf Grund der geschilderten Vorteile für die Anwendung als sehr geeignet. Jedoch sind in der vorliegenden Form Schwierigkeiten zu erwarten, da die Erfassung der Ausgangsdaten und die Berechnungen einen sehr hohen Zeit- und Kostenaufwand erfordern und die Kenntnis des komplizierten Verfahrens voraussetzen. Die Anwendung der maschinellen Datenverarbeitung ist deshalb notwendig.

3.2.7 Verfahren der Überlagerung von Belastungsdiagrammen

Das Verfahren der Überlagerung von Belastungsdiagrammen durch eine schrittweise Addition der Einzelwerte erscheint zunächst für die Ermittlung von Belastungen und die energiewirtschaftliche Planung als vorteilhaft. Wie nützlich diese Methode sein kann, zeigt Womaczka [9] am Beispiel des Dauerbetriebes von Glühöfen.

Grundlage der Ermittlungen sind die Belastungsdiagramme $P = f(t)$ und evtl. Angaben über den Ablauf des technologischen Prozesses. Aus der Überlagerung — d. h. schrittweisen Addition — der Einzeldiagramme der Belastung ergibt sich das Summendiagramm.

Das Verfahren eignet sich für die Ermittlung des Energiebedarfes bzw. des Energieausnutzungsgrades. Es stellt eines der wenigen Verfahren dar, die das zeitliche Auftreten charakteristischer Belastungswerte im Stadium der Planung erkennen lassen. Die Überlagerung von Belastungsdiagrammen wird bei gesteuerten Grossabnehmern mit feststehenden Arbeitsdiagrammen empfohlen. Sie ist dabei aber mit relativ hohem Arbeitsaufwand verbunden.

Das Verfahren der Überlagerung kann keinesfalls als Grundlage eines allgemeingültigen Verfahrens für die Planung von Stromversorgungsanlagen dienen, da die erforderlichen Ausgangsdaten im Planungsstadium im allgemeinen unbekannt sind.

3.2.8 Verfahren der Analyse typischer Belastungsdiagramme

Eine sehr gute Darstellung über die Analyse typischer Belastungsdiagramme enthalten die Arbeiten von Grosskopf [1]. Danach ist es möglich, für einzelne Industriebetriebe und auch ganze Industriezweige gestufte Belastungsdiagramme $P = f(t)$ zu ermitteln, die typisch für die betreffende Produktion sind. Zum Zwecke ihrer Anwendung bei der energiewirtschaftlichen Perspektivplanung und Leistungskontingentierung können aus ihnen sog. «Summenkurven der relativen Belastung» berechnet werden, indem man die einzelnen Belastungsstufen durch den Betrag der Höchstlast dividiert. Es wurde von Grosskopf bewiesen, dass die so ermittelten relativen Belastungskurven der untersuchten Betriebe charakteristisch auch für andere Werke mit ähnlicher Produktion sind.

Da diese Belastungsdiagramme für Industriebetriebe insgesamt gültig sind, besteht keine Möglichkeit für eine Belastungsermittlung innerhalb des eigentlichen Versorgungsnetzes. Es sind aber die Voraussetzungen für eine Planung der Eigenzeugung von elektrischer Energie bzw. eines eventuellen Fremdbezuges gegeben.

3.2.9 Regressionsverfahren zur Auswertung vorhandener Belastungsdiagramme

In der Literatur sind zahlreiche Arbeiten über die Anwendung von Regressionsverfahren bekannt geworden. Mit Methoden der Statistik werden Belastungsdiagramme vorhandener Anlagen im allgemeinen über eine längere Zeitdauer analysiert. Durch Korrelationsfunktionen stellt man einen mathematischen Zusammenhang zu den interessierenden Einflussgrößen her. Meist liegt das «Prinzip der kleinsten Fehlerquadrate» den Berechnungen zugrunde. Das sog. «Bestimmtheitsmass» ist ein Ausdruck für die «Straffheit» des funktionellen Zusammenhanges. Durch eine Mehrfachregression ist die Erfassung mehrerer Einflussgrößen möglich. Die Messung und Auswertung vorhandener Belastungsdiagramme kann sehr aufwendig sein und teilweise durch Verwendung von Datenverarbeitungsanlagen (Lochstreifengeräte und Rechenautomaten) erleichtert werden.

Korrelationsbeziehungen sind u. a. hergestellt worden zwischen dem Leistungsbedarf und den Kenngrößen der Zeit (Zeitdauer eines Jahres o. ä.), dem Produktionssortiment, den Abnehmertypen, der Versorgungsfläche, der Bevölkerungsdichte und der Anzahl von Abnehmern. Die Korrelationsbeziehungen sind auch auf Verhältniszahlen von Belastungskenngrößen ausgedehnt worden. Für die Planung der Versorgungsnetze von Industriebetrieben eignen sich diese Verfahren nur selten. Sie sind als Hilfe bei der Lastverteilung für Anlagen der öffentlichen Energieversorgung gedacht.

Die Veröffentlichungen von Schaefer [4], Schiller [6], Schenkel [5] und Morel/Piffaretti [3] sollen als Beispiele für die Anwendung des Verfahrens der Regression angeführt werden.

3.3 Forderungen an ein allgemeingültiges Berechnungsverfahren

Die kurze Darstellung der wichtigsten Grundverfahren der Belastungsermittlung und ihre Einschätzung lassen bereits erkennen, dass nur das Grundverfahren des geordneten Belastungsdiagramms und das der Überlagerung von zweistufigen Belastungsmodellen als Grundlage für ein allgemeingültiges Berechnungsverfahren dienen können. Das schließt nicht aus, dass in gewissen Anwendungsbereichen die übrigen Grundverfahren u. U. zu genauen Ergebnissen führen.

An ein allgemeingültiges Berechnungsverfahren sind folgende wissenschaftlich-technische Forderungen zu stellen:

- a) Berechnung aller benötigten Belastungskenngrößen und Verhältniszahlen für einen zeitlich unbekannten Belastungsverlauf zum Zwecke der Planung der Stromversorgungsanlagen sowie der energiewirtschaftlichen und ökonomischen Einschätzung des technologischen Prozesses;
- b) Kombination bzw. wahlweise Verwendung unterschiedlicher Grund- und Zusatzverfahren der Belastungsermittlung entsprechend der Planungsphase sowie den vorhandenen Kenngrößen und Verhältniszahlen;
- c) Verwendung der tatsächlich vorhandenen Ausgangsdaten (insbesondere Belastungskenngrößen);
- d) Berücksichtigung der Besonderheiten der einzelnen Abnehmertypen;
- e) Keine Einschränkungen hinsichtlich der Abnehmerstruktur;
- f) Vervollständigung von Ausgangsdaten nach den Standardreihen der Abnehmertypen (z. B. Einheitsreihe der Motoren);
- g) Berücksichtigung von Reserveabnehmern;
- h) Bilanzierung und Auslegung von Blindstrom-Kompensationseinrichtungen (Kondensatorbatterien, stufenweise von Hand gesteuerte und automatisch geregelte Kompensationsanlagen);
- j) Berechnung für beliebige Netzschemata bzw. Teilnetze von offen betriebenen Netzen;
- k) Berücksichtigung des Schaltzustandes und der technologisch bedingten Reservehaltung im Netz;

- l) Bilanzierung der Transformatorenverluste;
- m) Berücksichtigung der Umgebungstemperatur und des Faktors der optimalen Auslastung bei Transformatoren sowie der Mindefaktoren der Verlegungsart bei Kabeln und Leitungen;
- n) Änderung der Belastung mit dem Schichtregime und den Jahreszeiten;
- o) Berechnung der Lastentwicklung;
- p) Ermittlung des Zeitpunktes für das Auftreten der Höchstlast;
- q) Bereichsbilanzierung nach technologischen und örtlichen Gesichtspunkten (Aufteilung der Abnehmer nach Knoten);
- r) Nachrechnung oder Überprüfung vorhandener Anlagenteile;
- s) Einschätzung des zu erwartenden prozentualen Fehlers der Endergebnisse;
- t) Ermittlung von Kenngrößen und Verhältniszahlen der Belastung für künftige Planungsarbeiten;
- u) Berücksichtigung aller sich während des Planungsprozesses ergebenden Änderungen für die Abnehmer- und Knotendaten (Netzdaten).

Mit der Zusammenstellung dieser Forderungen ist gleichzeitig die Aufgabenstellung für ein allgemeingültiges Berechnungsverfahren gegeben. In einem weiteren Beitrag wird auf die Möglichkeiten einer digitalen Belastungsermittlung und Auslegung von elektrischen Stromversorgungsanlagen unter Beachtung des dynamischen Verhaltens der Belastung eingegangen und über die bisherigen Erfahrungen bei der Erprobung berichtet.

4. Zusammenfassung

Ausgehend vom gegenwärtigen technischen Stand der Belastungsermittlung für Industriebetriebe werden die wichtigsten — für eine umfassende Berechnung der Belastungen benötigten — Definitionen angeführt, so Definitionen für die Struktur von elektrischen Netzen, für die Kenngrößen der Belastung und Zeit sowie für Verhältniszahlen. Die bekannten Grundverfahren der Belastungsermittlung für einen unbekannten zeitlichen Verlauf der Belastung eines Einzelabnehmers werden dargestellt. Es wird eingeschätzt, dass nur das Verfahren der Überlagerung zweistufiger Modelle und das des geordneten Belastungsdiagramms als Grundlage für ein allgemeingültiges Berechnungsverfahren dienen können.

Literatur

- [1a] H. Grosskopf: Typische Belastungskurven. Teil 1: Braunkohlenindustrie. Mitt. Institut für Energetik, Leipzig —(1961)34, S. 185...201.
- [1b] H. Grosskopf: Typische Belastungskurven. Teil 2: Metallverarbeitende Industrie. Mitt. Institut für Energetik, Leipzig —(1962)48, S. 441...463.
- [2] G. M. Kajalow: Grundlagen einer allgemeinen Theorie der Belastungen elektrischer Industriernetze. Dissertation. Institut für Energetik der Polytechnischen Hochschule, Nowotscherkask, 1963. (russ.)
- [3] C. Morel, O. Herbatschek, F. Piffaretti und E. Marciani: Die Analyse der Belastungskurven und die Gleichzeitigkeit. Bull. SEV 55(1964)19, S. 992...999.
- [4] H. Schaefer: Analyse des Leistungsbedarfes und ihre Bedeutung für die Energiewirtschaft. ETZ-A 85(1964)15, S. 463...469.
- [5] G. Schenkel: Die Ermittlung von Energieverbrauchsfunktionen. Beiträge zur praktischen Energiewirtschaft. München und Karlsruhe, Technischer Verlag H. Resch, 1961.
- [6] P. Schiller: Methoden der Belastungsuntersuchung in Grossbritannien. Bull. SEV 50(1959)5, S. 217...220 + Nr. 7, S. 357...361.
- [7] S. D. Volobrinzky, G. M. Kajalow, P. N. Klein und B. S. Meschel: Die elektrischen Belastungen von Industriebetrieben. Moskau/Leningrad, Verlag Energie, 1964. (russ.)
- [8a] H.-J. Weidner: Zur Ermittlung elektrischer Belastungen in Industriebetrieben. Teil 1: Definition der wichtigsten Begriffe. Energietechnik 13(1963)11, S. 511...515.
- [8b] H.-J. Weidner: Zur Ermittlung elektrischer Belastungen in Industriebetrieben. Teil 2: Methodik der Ermittlungen, vorhandenes Kennziffermaterial und Schlussfolgerungen. Energietechnik 13(1963)12, S. 538...544.
- [9] F. Womacka: Gleichzeitigkeitsfaktor und Leistungsfaktor industrieller Anlagen. Elin-Z. 3(1951)–, S. 158...162.
- [10] Ermittlung von Belastungen. ČSN 341610, § 16 134. (tschech. Norm)
- [11] Vorläufige Richtlinien über die Ermittlung elektrischer Belastungen von Industriebetrieben. Moskau/Leningrad, Staatlicher energetischer Verlag, 1962. (russ.)
- [12] Methoden zur Bestimmung elektrischer Belastungen in Industriebetrieben. Der VEM-Elektro-Anlagebau 5(1969)1, S. 65...112.

Adresse des Autors:

H.-J. Weidner, Dipl.-Ing., Leiter der Abt. Wissenschaftlich-technische Berechnungen im VEB Chemie-Ingenieurbau Leipzig, Kloßstrasse 31, DDR-7034 Leipzig.