

Der Gleichzeitigkeitsgrad – Historie, aktuelle Bedeutung und Hinweise für die Kalkulation von Durchleitungsentgelten

– von Dr. Ing. Peter Grünberg*), Geilenkirchen –

1. Einleitung

Die Verbändevereinbarung über Kriterien zur Bestimmung von Durchleitungsentgelten¹ sieht vor, daß die Jahresleistungspreise für Übertragungsnetze, Verteilungsnetze und Umspannungen jeweils je Spannungsebene sowie für Systemdienstleistungen entsprechend der Durchmischung aller Durchleitungen in den Netzen mit Gleichzeitigkeitsgraden korrigiert werden. Die Vorgehensweise ist in Anlage 2 a. a. O. erläutert und anhand eines Beispiels auch quantifiziert. In einem Kommentarband zur Umsetzung der Verbändevereinbarung² wird hierauf noch einmal Bezug genommen, indem 3 Varianten zur Ermittlung der Gleichzeitigkeitsgradkurven vorgestellt werden. Besonders wichtig ist in diesem Zusammenhang die Verknüpfung mit der Kostenträgerrechnung sowie mit dem Nachweis der Nichtdiskriminierung von Durchleitungen gegenüber der Vollversorgung.

Dabei sei an dieser Stelle der Hinweis erlaubt, daß der Gleichzeitigkeitsgrad in der Verbändevereinbarung nicht zwangsläufig mit der klassischen Definition dieser Größe identisch sein muß.

In den Begriffsbestimmungen in der Energiewirtschaft³ ist der Gleichzeitigkeitsgrad gleich dem Quotienten aus der gemeinsamen Höchstleistung einer Anzahl von Abnehmern und der Summe der Einzelhöchstleistungen dieser Abnehmer in der gleichen Zeitspanne; Gleichung (1) gibt diesen Sachverhalt formelmäßig wieder, wobei mit Blick auf die Verbändevereinbarung die Anzahl der Abnehmer auf die jeweilige Netzebene/Umspannung zu projizieren ist.

$$g = \frac{P_{\max}}{\sum P_{\max i}} \quad (1)$$

Die Ermittlung dieses Gleichzeitigkeitsgrades geht auf gemessene Größen zurück, wobei jede Veränderung etwa durch Hinzukommen eines Durchleitungsvorganges den Quotienten verändern würde mit der Folge erneuter Messungen in der jeweiligen Netzebene/Umspannung. Deshalb ist der Gleichzeitigkeitsgrad entsprechend der o. g. Definition für die Anwendung zur Kalkulation von Durchleitungsentgelten nicht geeignet. Hierfür stellt sich vielmehr die Frage, mit welchem Anteil seiner individuellen Höchstleistung (Klemmenleistung) ein Durchleitungskunde bei vorgegebener Wahrscheinlichkeit (z. B. 95% bzw. 90%) auf die Höchst-

last der jeweiligen Netzebene/Umspannung durchgreift. Die zeitgleiche Höchstlast ergibt sich dann gemäß Gleichung (2) als Summe der Produkte aus dem »individuellen Gleichzeitigkeitsgrad« g_i und der individuellen Höchstleistung $P_{\max i}$.

$$P_{\max} = \sum (g_i \cdot P_{\max i}) \quad (2)$$

Man erkennt sofort, daß Gleichung (2) in Gleichung (1) übergeht, wenn g_i konstant und gleich g ist. Untersuchungen zu dieser Problematik konzentrieren sich in der älteren Literatur namentlich auf gleichartige Abnahmefälle und dabei insbesondere auf jene, für die aus abrechnungstechnischen Gründen kaum Leistungswerte vorliegen – also auf Haushaltkunden. Den ersten systematischen auf wahrscheinlichkeitstheoretische Überlegungen zurückgehenden Ansatz machte Mollwitz⁴ in den 50er Jahren und verglich ihn mit älteren empirisch gefundenen Abhängigkeiten. In den 70er Jahren wurde das Thema erneut aufgegriffen und anhand von umfangreichen Messungen Datenmaterial zusammengetragen, das jedoch ebenfalls fast ausnahmslos auf Wohnsiedlungen – also Haushaltkunden – beschränkt blieb. Die Ergebnisse wurden zum Teil graphisch dargestellt^{5,7} als auch analytisch^{5,8}, wobei die in Gleichung (3) gefundene Abhängigkeit sich im übrigen leicht aus dem Ansatz von Mollwitz herleiten läßt.

$$g(n) = g_{\infty} + \frac{1-g_{\infty}}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

Darin bedeuten n die Anzahl der Kunden und g_{∞} den Gleichzeitigkeitsgrad bei unendlich vielen Kunden.

Ende der 80er Jahre ist der Ansatz von Mollwitz bzw. die daraus ableitbare Gleichung (3) im Zuge der Entwicklung eines Verfahrens für die Ermittlung der Schlüsselzahlen zur Verteilung leistungsabhängiger Kosten in der Elektrizitätsversorgung auf einzelne Kundengruppen von nahezu gleichartigen Abnahmefällen auf ungleichartige ausgedehnt worden⁹.

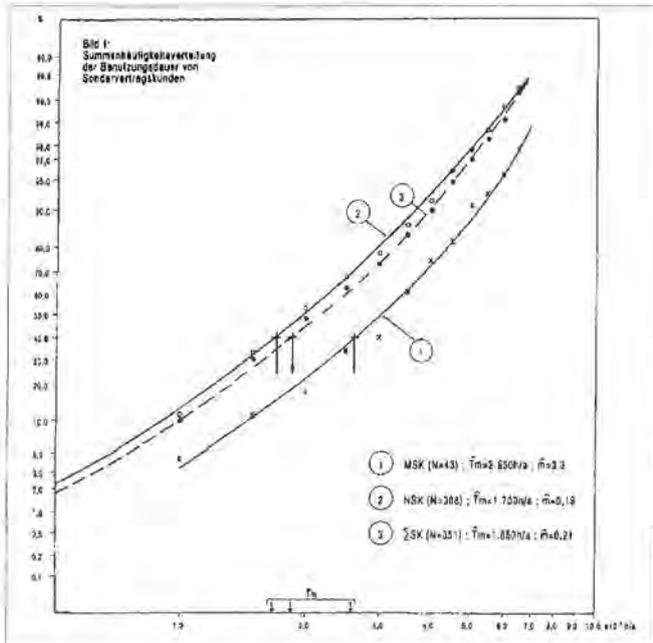
2. Die Ermittlung von »individuellen« Gleichzeitigkeitsgraden für nichtgleichartige Abnahmefälle

Die Lösung dieses Problems baut auf den Überlegungen zur Behandlung gleichartiger Fälle auf, für g_i in Gleichung (3) ist der in Gleichung (4) wiedergegebene Ausdruck abgeleitet worden⁹.

*) Der Autor ist Sprecher der Geschäftsführung der Kreiswerke Heinsberg GmbH.

$$g_w = \frac{1}{1 + t \cdot \sqrt{\frac{1}{p}} - 1} \quad (4)$$

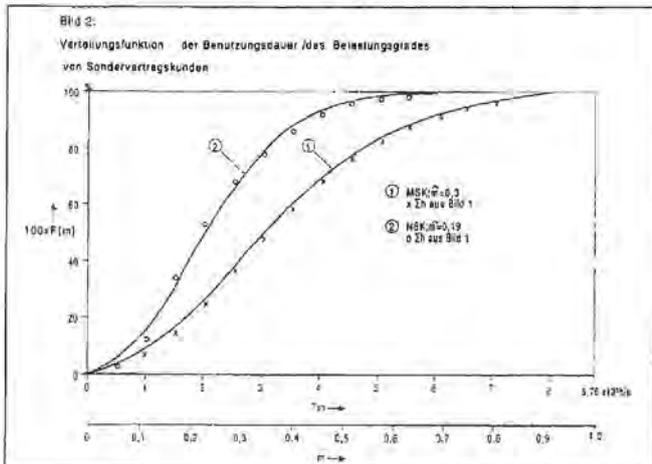
Hierin bedeutet p die Wahrscheinlichkeit, daß von der Grundgesamtheit n Kunden eingeschaltet sind, t ergibt sich aus Student's t-Verteilung für eine vorgegebene Sicherheitschwelle (z. B. 2,33 für 99%, 1,65 für 95% und 1,28 für 90% bei unendlich vielen Freiheitsgraden entsprechend der Definition von g_w^{10}).



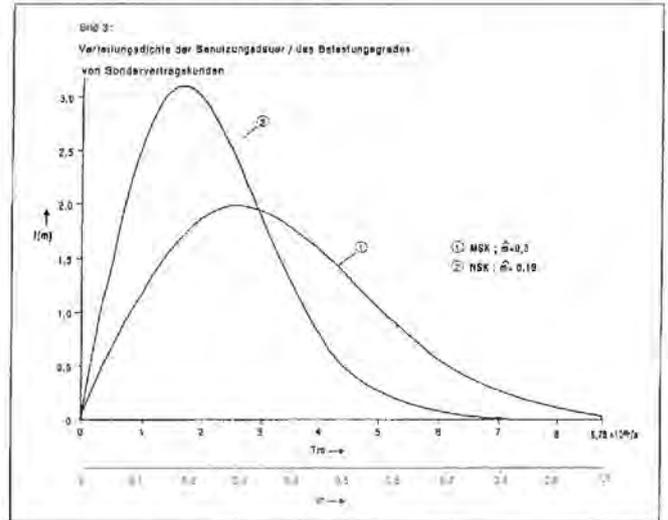
Der Quantifizierung der Wahrscheinlichkeit p liegt der Gedanke zugrunde, daß p mit jeder Zunahme des Belastungsgrades in $T_m/8760$ steigt. Für die folgenden Überlegungen wird anstelle der sonst üblichen Benutzungsdauer T_m in h/a die normierte Größe des Belastungsgrades m verwendet. Den einfachsten denkbaren Fall gibt Gleichung (5) wieder.

$$p = \int_0^1 c \cdot dm = c \cdot m = F(m) \quad (5)$$

Aus der Randbedingung $P(m=1) = 1$ folgt zwangsläufig $c = 1$ und damit $p = m$. Dies entspricht aber vom Ansatz her der Verteilungsfunktion $F(m)$ in der gebräuchlichen Terminologie der mathematischen Statistik (vgl. u. a.¹⁰). Die Verteilungsdichte $f(m)$ ist deren erste Ableitung und damit gleich $1 - m$ - sie beschreibt demnach gleichartige Abnahmefälle. Für den typischen Haushaltskunden mit einer Benutzungsdauer



der Leistung an den Zählerklemmen von 450 bis 500 h/a und den daraus errechneten Belastungsgraden ergibt sich auf dem 95%-Niveau die in der Literatur mehrfach zu findende Größe für g_w von 0,1 bis $0,15^{3,8}$.



Zur Fortschreibung dieses Ansatzes wurden die Summenhäufigkeitsverteilungen der Benutzungsdauer von Sondervertragskunden im Mittel- und Niederspannungsnetz eines kleinen Regionalunternehmens herangezogen. Bild 1 zeigt die Auswertungen im Wahrscheinlichkeitsnetz mit logarithmischem Merkmal. Aus Bild 2, in das die Punkte aus Bild 1 eingetragen sind, geht hervor, daß sich die Verhältnisse sehr gut durch die in Gleichung (6) wiedergegebene Verteilungsfunktion (durchgezogene Kurven) approximieren lassen.

$$F(m) = 1 - e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{m}{c}\right)^2} \quad (6)$$

Die Verteilungsdichte ist als deren erste Ableitung in Gleichung (7) analytisch und in Bild 3 graphisch wiedergegeben.

$$f(m) = F'(m) = \frac{m}{c^2} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{m}{c}\right)^2} \quad (7)$$

Deren Maximum - also der Modalwert \hat{m} - liegt nach den Regeln der Differentialrechnung bei $m = c$. Die Konstante c ist damit als Modalwert der Verteilungsfunktion bestimmt. Die Verteilungsfunktion $F(m)$ nimmt - wie man leicht zeigen kann - für den Modalwert den Wert 0,393 also ungefähr 0,4 ein. Damit ist der Modalwert der Verteilungsfunktion leicht bei 40% aus der Summenhäufigkeitsverteilung in Bild 1 abgreifbar, was für die praktische Auswertung sehr hilfreich ist. Aus diesem Grunde empfiehlt sich auch die Berechnung des arithmetischen Mittelwertes \bar{m} entsprechend Gleichung (8).

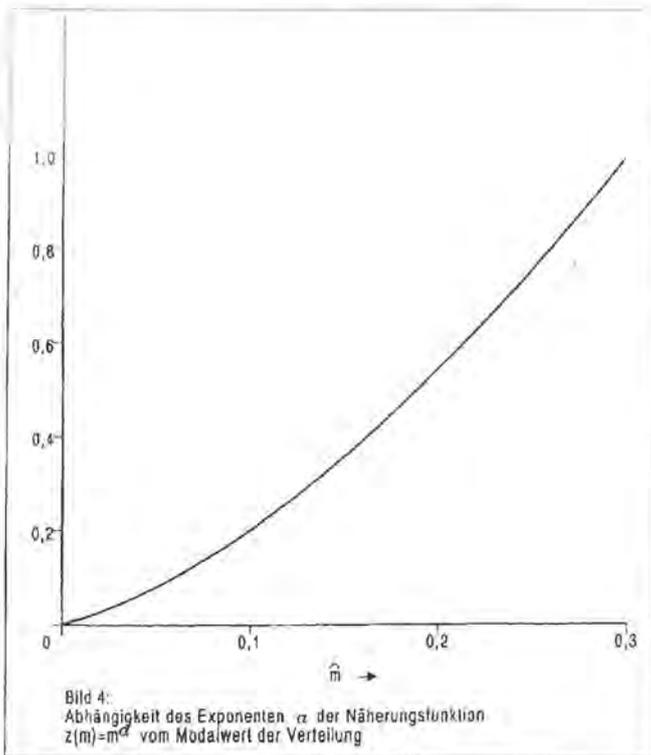
$$\bar{m} = \int_0^1 m \cdot f(m) \cdot dm = \int_0^1 \left(\frac{m}{c}\right)^2 \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{m}{c}\right)^2} \cdot dm \quad (8)$$

Dieses bestimmte Integral ist in den Grenzen von 0 bis ∞ bekannt¹¹ und für die hier vorliegenden Verhältnisse in Gleichung (9) gelöst.

$$\int_0^{\infty} \left(\frac{m}{c}\right)^2 \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{m}{c}\right)^2} \cdot dm = \frac{c \cdot \Gamma\left(\frac{3}{2}\right)}{2 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{3}{2}}} = 1,253 \cdot \hat{m} \quad (9)$$

mit $c = \hat{m}$, $\Gamma\left(\frac{3}{2}\right) = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\pi}$

Sofern das Integral in den Grenzen von 0 bis 1 viel größer ist als in den Grenzen von 1 bis ∞ , gilt die in Gleichung (10) beschriebene Näherung; dies ist, wie man durch numerische In-



(6) zur Ermittlung des Gleichzeitigkeitsgrades g_c in Gleichung (4) eingeführt werden. Alternativ wird versucht, für g_c eine Näherungslösung als einfache Exponentialfunktion $z(m) = m^\alpha$ durch Minimierung des Integrals der quadratischen Abweichungen in den Grenzen von 0 bis 1 zu finden. Durch numerische Integration von Gleichung (4) in Verbindung mit Gleichung (6) in den Grenzen von 0 bis 1 wurde die Abhängigkeit des Exponenten α vom Modalwert der Verteilung bestimmt und im Bild 4 graphisch dargestellt. Für die Niederspannungs-sonderkunden (Modalwert gerundet 0,2) ergibt sich α zu 0,5 und für Mittelspannungs-sonderkunden (Modalwert 0,3) wird α ungefähr 1.

Der Vergleich der Näherung mit den aus Gleichung (4) in Verbindung mit Gleichung (6) ermittelten Werten für g_c sind in Bild 5 a für Niederspannungs-sonderkunden und 5 b für Mittelspannungs-sonderkunden dargestellt. Hierbei wurden in Gleichung (4) mit 2 Signifikanzschwellen gerechnet. Die Näherung für die Niederspannungs-sonderkunden kann bei niedrigen Belastungsgraden als befriedigend und bei Mittelspannungs-sonderkunden im Bereich höherer Belastungsgrade als gut angesehen werden.

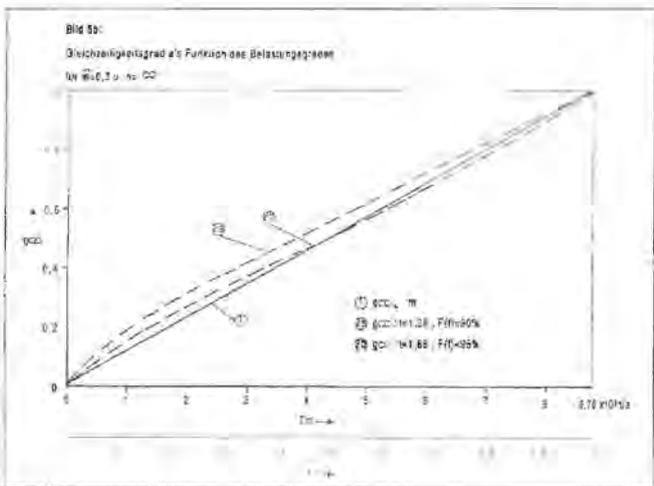
3. Ermittlung von einheitlichen Gleichzeitigkeitsgraden als Funktion des Belastungsgrades

Nachdem durch die vorangestellten Überlegungen der Gleichzeitigkeitsgrad bei Niederspannungs-sonderkunden von der Quadratwurzel des Belastungsgrades abhängig und für Mittelspannungs-sonderkunden eine direkte Proportionalität gegeben ist, soll im nächsten Schritt aufgrund der tatsächlichen Abnahmeverhältnisse im Netz eines kleinen

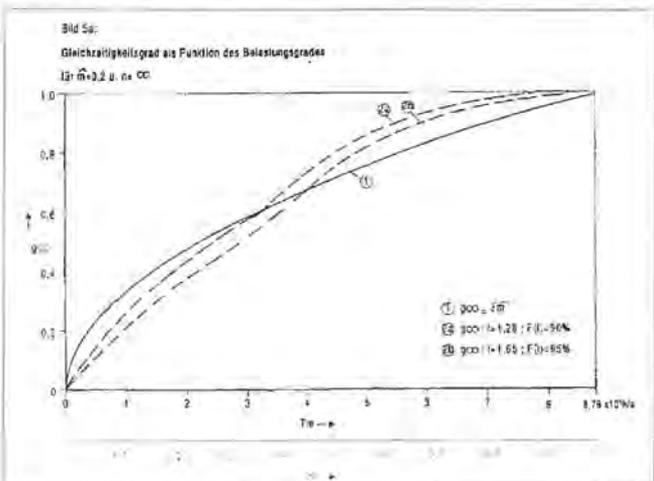
tegration leicht zeigen kann, dann der Fall, wenn der Modalwert höchstens 0,25 bzw. arithmetische Mittelwert höchstens 0,31 beträgt. Damit kann unter gegebenen Voraussetzungen auf die Darstellung der Summenhäufigkeitsverteilung im Wahrscheinlichkeitsnetz verzichtet werden.

$$\bar{m} \approx 1,25 \cdot \hat{m} ; \quad \begin{matrix} 0 \leq \hat{m} \leq 0,25 \\ 0 \leq \bar{m} \leq 0,31 \end{matrix} \quad (10)$$

Die beschriebenen Überlegungen zur Verteilungsfunktion des Belastungsgrades wurden zunächst wegen des verfügbaren Datenmaterials auf Sondervertragskunden beschränkt, sie gelten jedoch mindestens näherungsweise auch für Haushaltskunden, deren Jahresstromabnahme zu ähnlichen Kurven für die Verteilungsfunktion bzw. deren Dichte führt¹², was unter Berücksichtigung einer bis auf Ausnahmefälle konstanten Benutzungsdauer der Höchstleistung unabhängig vom Grad der Elektrifizierung¹³ zu ähnlichen Abhängigkeiten der Verteilungsfunktion bzw. der -dichte vom Belastungsgrad führen muß.



Regionalunternehmens die Abhängigkeit des Gleichzeitigkeitsgrades nach Gleichung (3) ermittelt werden. Dabei werden aus dem Mittelspannungsnetz bezogen auf die einzelnen Netzbereiche um ein Umspannwerk zwischen 2 und 4 Mittelspannungs-sonderkunden versorgt, aus dem Niederspannungsnetz zwischen 10 und 20 Niederspannungs-sonderkunden je Netzstation. Um zu symbolisieren, daß es sich hierbei um unternehmensspezifische und nicht unbedingt allgemeinverbindliche Angaben handelt, wurde anstelle von n der entsprechende Großbuchstabe gewählt. Bild 6 zeigt die graphische Auswertung, die im Bereich höherer Belastungsgrade – durch die direkte Proportionalität – der Geraden in Anlage 2 zur Verbändevereinbarung sehr entgegenkommt. Eine Annäherung im Bereich niedriger Belastungsgrade durch eine zweite Gerade entsprechend der Verbändevereinbarung erscheint nach diesen Ergebnissen nur bedingt vertretbar, weil dadurch kurzzeitige Durchleitungen stark begün-



Nach dieser Zwischenbetrachtung über die Verteilungsfunktion bzw. deren Dichte muß nun $p = F(m)$ aus Gleichung

stigt werden könnten. Hierauf wird in Zukunft ein besonderes Augenmerk zu richten sein.

Aus Bild 6 wird ferner deutlich, daß sich die Abhängigkeit des Gleichzeitigkeitsgrades von der Quadratwurzel des Belastungsgrades für höhere Belastungsgrade unter den gegebenen Verhältnissen an die für Mittelspannungs- und Hochspannungsnetze gefundene lineare Abhängigkeit anpaßt. Dies wird für die nun folgenden Überlegungen von Bedeutung sein.

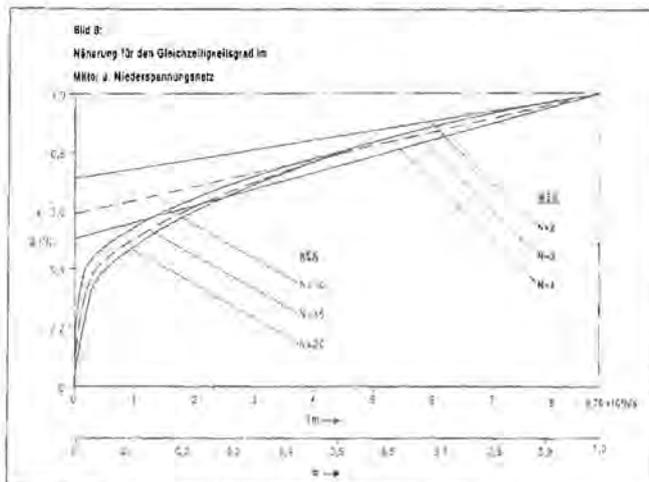
4. Überprüfung der theoretisch abgeleiteten Gleichzeitigkeitsgrade mit gemessenen Werten

Nach den vorangegangenen wahrscheinlichkeitstheoretischen Betrachtungen zur Ermittlung von »individuellen« Gleichzeitigkeitsgraden stellt sich die Frage, ob die in Bild 6 gefundenen Ergebnisse auch mit der »klassischen Definition« des Gleichzeitigkeitsgrades in Gleichung (1) in Einklang zu bringen sind. Im folgenden soll gezeigt werden, daß dies auch ohne erheblichen Meß- und damit Kostenaufwand möglich ist. Im Bereich des hier betrachteten kleinen Regionalunternehmens bestehen mit dem Vorlieferanten 9 Umspannwerke 110/10 kV. Die zeitgleiche Höchstleistung geht aus der Strombezugsrechnung hervor, die zeitungleichen Höchstleistungen in den 9 Umspannwerken sind ebenfalls bekannt, so daß sich für die Hochspannungsebene der Gleichzeitigkeitsgrad mühelos errechnen läßt. Für die Mittelspannungsebene ist dies in den 9 Umspannwerken nur näherungsweise möglich, da zwar die zeitgleiche Höchstleistung bekannt ist, nicht jedoch die zeitungleiche Höchstleistung der einzelnen Kabelabgänge – hier verfügt man nur über die höchsten Strombelastungen und damit über die Scheinleistungen. Für deren Umrechnung in die entsprechenden Wirkleistungen wurde näherungsweise ein einheitlicher Leistungsfaktor von 0,95 zugrunde gelegt. Die Ergebnisse dieser Rechnungen sind in Bild 7 über dem – aus der jeweiligen Stromabgabe ermittelten – Belastungsgrad eingetragen.

Da die Anzahl der Umspannwerke bzw. die Anzahl der Kabelabgänge bekannt sind, lassen sich über Gleichung (11) auf dem anderen Wege – nämlich dem wahrscheinlichkeitstheoretischen – die Gleichzeitigkeitsgrade ebenfalls berechnen.

$$g(N) = \sqrt{m} + \frac{1 - \sqrt{m}}{\sqrt{N}} \quad (11)$$

Die Ergebnisse stimmen bis auf wenige Ausnahmen gut mit den zuvor ermittelten überein; Abweichungen sind möglicherweise durch unterschiedlich große Leistungsfaktoren erklärbar. In Gleichung (11) wurde bewußt anstelle von n der entsprechende Großbuchstabe gewählt, weil es sich um unternehmensspezifische Angaben handelt und zum anderen,



weil damit die jeweilige Grundgesamtheit erfaßt worden ist, für die der Großbuchstabe in der Statistik allgemein verwendet wird. Die Punkte liegen aus der Natur der Sache heraus sämtlich oberhalb von 2500 Benutzungsstunden pro Jahr und werden – wie Bild 7 zeigt – durch die »mittlere Verbändekurve« eher nach unten begrenzt.



Für den Bereich von 0 bis 2500 Benutzungsstunden pro Jahr besteht üblicherweise die Möglichkeit für eine analoge Betrachtungsweise nicht. Da aber für den oberen Bereich Messung und Rechnung zu recht guten Übereinstimmungen geführt haben, ist es vertretbar, sich in diesem Bereich auf die Berechnung der Gleichzeitigkeitsgrade gemäß Gleichung (11) zu beschränken. Aus der Jahresverbrauchsabrechnung sind zu diesem Zweck von 1500 bis 2000 Benutzungsstunden pro Jahr in Intervallen von jeweils 100 h/a Cluster gebildet worden, für die aus der mittleren Benutzungsdauer der entsprechende mittlere Belastungsgrad leicht ermittelt werden konnte und – weil die Anzahl der Kunden je Cluster bekannt ist – aus Gleichung (11) auch der Gleichzeitigkeitsgrad. Die so errechneten Werte liegen nach den vorangegangenen Betrachtungen nicht unerwartet über dem »steilen Ast« der »mittleren Verbändekurve«.

Man kann aus dieser vergleichenden Betrachtung den Schluß ziehen, daß die »mittlere Verbändekurve« als Geradenpaar für die Kalkulation von Durchleitungsentgelten geeignet ist, wobei sie im Bereich kleiner Belastungsgrade zugunsten des Durchleitungskunden abweicht. Die Anwendung einer komplizierteren Funktion für die Abhängigkeit des Gleichzeitigkeitsgrades vom Belastungsgrad und damit von der Benutzungsdauer pro Jahr erscheint trotz dieses Nachteils nicht angezeigt gegenüber dem Vorteil, über die lineare Abhängigkeit das Durchleitungsentgelt in Leistungs- und Arbeitspreise aufteilen zu können, was auch vom System her mit den Preisregelungen für letztverbrauchende Sondervertragskunden übereinstimmt.

5. Schlußbemerkung

Da die Ermittlung von Gleichzeitigkeitsgraden bei der Kalkulation der Durchleitungsentgelte von besonderer Bedeutung ist, und jeder Netzbetreiber im Sinne der eigenen Erfolgsrechnung aber auch zum Nachweis der Nichtdiskriminierung der Verbändevereinbarung folgend entsprechende Unterlagen erarbeiten muß, wurden hier Wege aufgezeigt, wie man ohne nennenswerten meßtechnischen Aufwand – zumindest beim Betrieb von 2 Spannungsebenen – entsprechendes Datenmaterial erhalten kann. Sofern der wahrscheinlichkeitstheoretische Weg beschritten werden soll, wurde die Vorgehensweise durch Hinweise zur vereinfachten Aufbereitung des Datenmaterials gegeben. Es wurde ferner nachgewiesen, daß die »Geradenpaare« aus der Verbändevereinbarung einen brauchbaren Ansatz darstellen,

um die Gleichzeitigkeitsgrade einfach und praktikabel abzubilden. Im Bereich niedriger Belastungsgrade wird man dies jedoch durch die Ermittlung und Überlagerung von entsprechenden Belastungskurven erhärten müssen.

¹ BDI, VIK, VDEW: Verbändevereinbarung über Kriterien zur Bestimmung von Durchleitungsentgelten vom 22.5.1998. Versorgungswirtschaft 1998, S. 258, **Vl-Dok.Nr. 16001544**

VDEW: Umsetzung der Verbändevereinbarung – Kommentarband vom 22.12.1998

VDEW: Begriffsbestimmungen in der Energiewirtschaft Bd 1, Teil 1, 4. Ausg. VDEW 1973

² Mehlwitz: Die Abhängigkeit der Gruppenhöchstlast von der Einzelhöchstlast, Elektrizitätswirtschaft 1956, II 11

³ Heueck: Stromverbrauch und Leistungsbedarf in Wohnsiedlungen mit unterschiedlichem Elektrifizierungsgrad Elektrizitätswirtschaft 1971, H 8

Krüger: Kabelnetze für vollelektrisch versorgte Wohngebiete Elektrizitätswirtschaft 1977, II 26

⁴ Turvey u. Anderson: Electricity Economics London 1977

ISBN 0-8018-1867-2

⁵ Eitzel, Grünberg u. a.: Der Leistungsanteil von Haushaltkunden an der städtischen Elektrizitätsversorgung

Sigillum-Verlag GmbH 1978

ISBN 3-87750-021-8

Grünberg: Ermittlung der Schlüsselzahlen zur Verteilung leistungsabhängiger Kosten in der Elektrizitätsversorgung auf einzelne Kundengruppen über stufenweise angewandte Mehrfachregressionsrechnungen

Sigillum-Verlag GmbH 1988

ISBN 3-87750-029-3

⁶ Kreyszig: Statistische Methoden und ihre Anwendungen

Vandenhoeck u. Ruprecht, Göttingen 1968

⁷ Hütte I: Des Ingenieurs Taschenbuch

W. Ernst u. Sohn, Berlin 1955

⁸ Grünberg, Ohlms: Die Haushaltsstromabgabe in verschiedenen Versorgungsgebieten in Abhängigkeit von der Anzahl der Tarifräume

Brennstoff-Wärme-Kraft 1980, H 7