Rückwirkungen von Lichtbogenöfen auf die Betriebsverhältnisse der Verteilnetze

Autor(en): **Senn, P.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins : gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)**

Band (Jahr): **55 (1964)**

Heft 13

PDF erstellt am: **27.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-916736

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Energie-Erzeugung und -Verteilung

Die Seiten des VSE

Rückwirkungen von Lichtbogenöfen auf die Betriebsverhältnisse der Verteilnetze

Von *P. Senn*, unter Mitarbeit der Herren *Lemmenmeier, Schläpfer* und *Utz* im Auftrag der Schweiz. Kommission für Elektrowärme (SKEW)

Die technischen und wirtschaftlichen Vorteile des Lichtbogenofens zur Erzeugung von Stahl und Grauguss führen nicht nur zur Aufstellung neuer, sondern auch zum Einsatz grösserer Ofeneinheiten. Das spezifische Betriebsverhalten der Lichtbogenöfen kann stark störende Rückwirkungen auf das anspeisende Netz verursachen, wodurch meistens grössere Netzteile betroffen werden.

Diese Entwicklung gab Anlass zu der vorliegenden Studie: Ausgehend vom Verhalten des Lichtbogenofens und den dadurch bedingten Rückwirkungen auf das anspeisende Netz werden die Begriffe «Flackern» und «Flimmern» charakterisiert und kurz die Rückwirkungen insbesondere der letzteren Erscheinung auf die Lichtemission der Glühlampen dargestellt. Von den als Sichtbarkeits- und Störgrenzen entwickelten Spannungsschwankungen ausgehend, wird eine Relation zwischen den als Bemerkbarkeits- und Störgrenze anzunehmenden Spannungsschwankungen gesucht und an Hand eines Ersatzschaltbildes und Vektordiagrammes eine rechnerische Beziehung hergeleitet und mit anderen Veröffentlichungen verglichen. Während man in der Literatur und früheren Untersuchungen davon ausgeht, dass in einem Netzpunkt nur ein einzelner Ofen betrieben wird, wird hier ein Vorschlag über die Beurteilung der Störungen von mehreren Öfen gleicher oder ungleicher Leistung am gleichen Ort ausgearbeitet.

Als Ziel des vorliegenden Berichtes gilt der Entwurf für schweizerische Richtlinien zur Behebung von Störungen in bestehenden Lichtbogen-Anlagen und zur Vermeidung von Störungen in neuen Anlagen. Es wird auf die Notwendigkeit zur Aufstellung von Richtlinien zur Erlangung schlüssiger und vergleichbarer Messungen an Lichtbogenofen-Anlagen und im anspeisenden Netz hingewiesen.

Dem Bericht wurden zu Grunde gelegt:

— Die Ergebnisse einer Umfrage bei den schweizerischen Elektrizitätswerken, die Lichtbogenöfen beliefern.

— Ein Teil der zahlreichen und eingehenden Veröffentlichungen, die den Bau und den Betrieb von Lichtbogenöfen zum Gegenstand haben und gemäss den Anmerkungen im Text im Literaturverzeichnis zusammengestellt sind.

— Studien und Richtlinien ausländischer Institutionen, die sich mit demselben Problem in andern Ländern auseinandergesetzt haben.

Dieser Bericht lag dem 5. Internationalen Elektrowärmekongress in Wiesbaden 1963 vor. In einem Nachtrag sind die an diesem Kongress gewonnenen neuen Einsichten zum zitierten Problem wiedergegeben.

Les avantages techniques et économiques des fours à arcs pour la production de l'acier et de la fonte grise conduisent non seulement à l'installation de nouveaux fours, mais également à l'introduction d'unités plus grosses. Le fonctionnement spécifique des fours à arcs peut provoquer de fortes perturbations sur le réseau d'alimentation, qui touchent généralement d'assez grandes parties du réseau.

Ce développement a donné lieu à l'étude présentée. Partant du comportement du four à arc et des perturbations qu'il provoque sur le réseau d'alimentation, on définit les expressions «flicker» et «papillotement» et on expose rapidement les perturbations causées, en particulier par ce dernier, sur l'émission lumineuse des lampes à incandescence. Partant des variations de tension considérées comme limites de sécurité et de perturbation, on recherche une relation entre les variations de tensions admissibles comme limite perceptible et limite de perturbation, et au moyen d'un schéma équivalent et d'un diagramme-vecteur on tire une relation arithmétique qui est comparée avec d'autres résultats déjà publiés. Tandis que dans la littérature et les recherches antérieures on partait du fait qu'un seul four fonctionnait en un point du réseau, on fait ici une proposition pour l'appréciation des perturbations causées par plusieurs fours de même puissance ou de puissances différentes en service en un même point.

L'un des buts de ce rapport est le projet d'établissement de directives permettant d'éliminer les perturbations causées par les installations existantes et de les éviter dans les nouvelles installations. On attire l'attention sur la nécessité d'établir des directives en vue d'arriver à des mesures concluantes et comparables en ce qui concerne les installations des fours à arcs et du réseau d'alimentation.

Ont servi de base à ce rapport:

— Les résultats d'une enquête auprès des centrales électriques suisses qui alimentent des fours à arcs.

— Une partie des nombreuses publications spéciales qui ont pour sujet la construction et le fonctionnement des fours à arcs, suivant les notes bibliographiques récapitulées dans le texte.

— Les études et les directives des institutions étrangères, en ce qui concerne ce problème, tel qu'il se pose dans les autres pays.

Ce rapport a été présenté au 5e Congrès International d'Electrothermie à Wiesbaden 1963. Comme supplément, les lumières y gagnées sur le problème précité sont nommées.

1. Veranlassung und Zweck des vorliegenden Berichtes

Die technischen und wirtschaftlichen Vorteile des Lichtbogenofens zur Erzeugung von Stahl und Grauguss führen nicht nur zur Aufstellung neuer, sondern auch zum Einsatz grösserer Ofeneinheiten. Das spezifische Betriebsverhalten der Lichtbogenöfen kann stark störende Rückwirkungen auf das speisende Netz verursachen, wodurch meistens grössere Netzteile betroffen werden.

Diese Entwicklung gab Anlass zu der vorliegenden Studie, die folgendes zum Gegenstand hat:

— Beschreibung der Rückwirkungen des Anschlusses von Lichtbogenöfen auf die Betriebsverhältnisse der schweizerischen Verteilnetze;

— Entwurf für Richtlinien zur Behebung von Störungen in bestehenden Anlagen und zur Vermeidung von Störungen für neue Anlagen;

— Anregung zur Aufstellung von Richtlinien zur Erlangung schlüssiger und vergleichbarer Messungen an Lichtbogenofenanlagen und im speisenden Netz.

Dieser Bericht enthält nicht eine eingehende wissenschaftliche Darstellung der physikalischen Vorgänge im Lichtbogen-

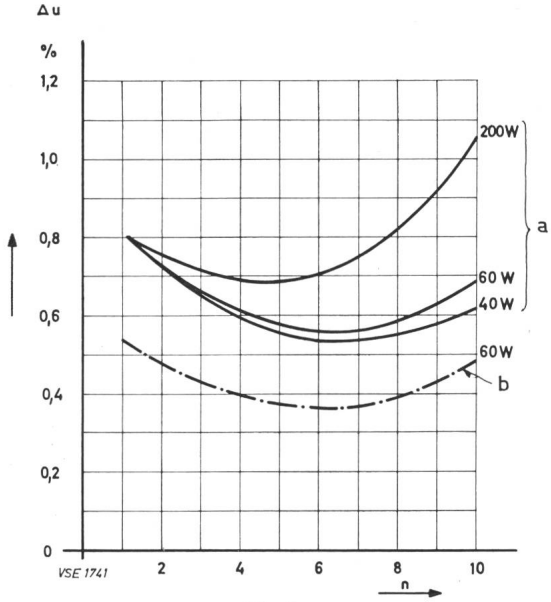


Fig. 1

Als Stör- und Bemerkbarkeitsgrenze zulässige Spannungsschwankungen bei Glühlampen 225 V

ΔU	Zulässige Spannungsschwankung
n	Schwankungen je Sekunde
a	Störgrenzen
b	Bemerkbarkeitsgrenze

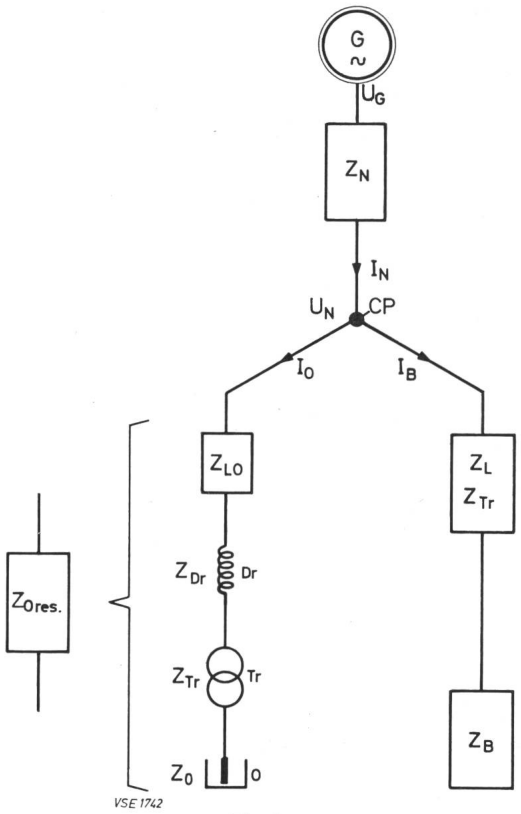


Fig. 2

Ersatzschaltbild des speisenden Netzes und der Ofenanlage (Phasenwerte)

G	Generatoren
U_G	Starre Generatorspannung
Z_N $[R_N, X_N]$	Resultierende Netzimpedanz (Ersatzimpedanz) am Punkt CP
CP	Verknüpfungspunkt (common coupling point)
P_k	Kurzschlußleistung des Netzes am Verknüpfungspunkt
U_N	(veränderliche) Netzspannung am CP
$\Delta U_{N\,stat.}$	Spannungsabfall im CP durch $\vec{I_N} = \vec{I_O} + \vec{I_B}$
$\Delta U_{N\,dyn}$	Spannungsabfall im CP durch $\Delta I_N = \Delta I_O$
Z_L, Z_{Tr}	Leitungs- und Trafoimpedanzen nach dem CP
Z_B	Belastungsimpedanz der störanfälligen Verbraucher
Z_{Lo}	Impedanz der Ofenzuleitung
ZD_r	Impedanz der Drossel
Z_{Tr}	Impedanz des Ofentransformators
Z_O	Impedanz des Ofens
$Z_{O\,res}$	Resultierende Impedanz der Ofenanlage ab CP
I_N	Resultierender Netzstrom, fliesst durch Z_N
$\vec{I_N}$	$\vec{I_O} + \vec{I_B}$
I_O	Ofenstrom, gerechnet am CP
I_B	Belastungsstrom der störanfälligen Verbraucher (bleibe für diese Betrachtungen konstant)
I_{On}	Ofen-Nennstrom
S_{OT}	Ofentransformator-Nennleistung

ofen, sondern beschreibt lediglich die im Betrieb auftretenden Erscheinungen. Ferner wird auf wirtschaftliche und tarifliche Betrachtungen verzichtet.

Dem Bericht wurden zu Grunde gelegt:

— Die Ergebnisse einer Umfrage bei den schweizerischen Elektrizitätswerken, die Lichtbogenöfen beliefern.

— Ein Teil der zahlreichen und eingehenden Veröffentlichungen, die den Bau und den Betrieb von Lichtbogenöfen zum Gegenstand haben, gemäss dem Literaturverzeichnis und den mit [] gekennzeichneten Anmerkungen.

— Studien und Richtlinien ausländischer Institutionen.

2. Verhalten des Lichtbogenofens; Rückwirkungen auf das speisende Netz

2.1 Beim Ablauf einer Charge, die je nach metallurgischen Erfordernissen zwei bis neun Stunden dauert, sind das Einschmelzen, das Frischen und das Feinen zu unterscheiden. Während der Einschmelzperiode, die sich über eine bis zwei Stunden erstreckt, wird die feste Charge durch Lichtbogeneinwirkung zusammengeschmolzen. Das Einschmelzen bedingt die grösste und stark schwankende Leistungsentnahme aus dem speisenden Netz. Das Frischen und Feinen dienen der metallurgischen Aufbereitung der geschmolzenen Charge. Dabei hat der Leistungsbezug aus dem Netz im wesentlichen die Wärmeverluste des Ofens zu decken und verursacht keine störenden Rückwirkungen auf das Netz. Demnach beziehen sich die nachfolgenden Ausführungen lediglich auf die Einschmelzperiode.

Während des Einschmelzens wechseln bei einstürzender Charge Kurzschlüsse zwischen Schrott und den Elektroden mit Lichtbogen und gänzlichen Unterbrüchen. Die Folgen sind: unregelmässige und starke Laststösse auf das Netz, wobei sich der Ofenstrom von Null bis zum zweifachen Nennstrom, mit einer Folgezeit von 0,5 bis zu mehreren Sekunden, ändert. Diese Störungen lassen sich durch eine raschwirkende, automatische Elektrodenregelung und durch die Wahl einer möglichst hohen Einschmelzspannung beeinflussen, indem die Dauer des Laststosses begrenzt wird. Die Spitze des Laststosses bleibt jedoch unbeeinflusst. Die dadurch verursachten Spannungsschwankungen können zu Lichtschwankungen führen, die wegen ihrer Unregelmässigkeit als *Flackern* bezeichnet werden [1; 2].

Die Vorgänge im Lichtbogenofen, die zu dem sogenannten *Flimmern,* d.h. einer mit 4...8 Hz pulsierenden Leistungsaufnahme des Ofens führen, lassen sich wie folgt beschreiben: Die Leitfähigkeit der Lichtbogenzone ändert sich dauernd mit der Verdampfung verschiedener Legierungsbestandteile. Der Lichtbogen zündet vorzugsweise auf den Spitzen des Schrotts wegen der dort erhöhten Feldstärke. Mit dem Abbrennen (Abbrenndauer 0,1...0,4 s) der als Lichtbogenfusspunkt dienenden Spitze wird die Feldstärke reduziert und führt so zum

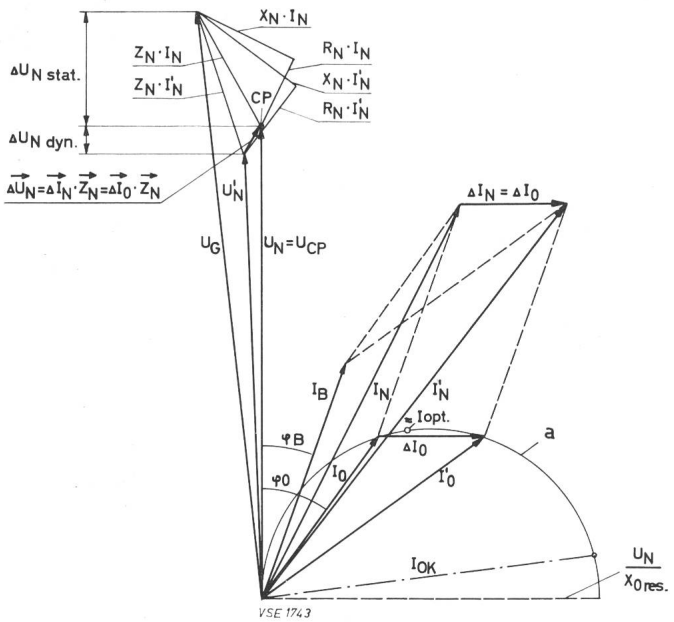


Fig. 3

Vektorbild der Strom- und Spannungsverhältnisse am Verknüpfungspunkt *CP* zur Beurteilung der Beeinflussung von Lichtabnehmern durch Lichtbogenöfen (Phasenwerte)

a Ort für I_0 bei U_N = konstant und $X_{0\,res}$ = konstant

Wandern des Lichtbogens auf dem Schrott, unter ständiger Änderung seiner Länge. Eine weitere Ursache für die Änderung der Länge des Lichtbogens ist dessen Auslenkung durch das Magnetfeld einer Nachbarphase, die momentan Kurzschlußstrom führt. Die genannten Einflüsse verursachen in ihrem Zusammenwirken rasch wechselnde Änderungen des Lichtbogenwiderstandes, und damit die störenden Spannungsschwankungen im Netz [3]. Die das Flimmern bewirkenden Stromschwankungen erreichen ca. 40% der Schwankung des Ofenstromes vom Nennwert auf den dreiphasigen Kurzschlusswert und lassen sich durch eine Elektrodenregelung nicht beeinflussen.

2.2 Die Rückwirkungen auf das Netz in Form von Spannungsschwankungen wirken sich hauptsächlich auf die Lichtemission von Glühlampen aus. Einer mit 4...8 Hz wechselnden Lichtemission vermag die Pupille des menschlichen Auges noch zu folgen, was zu sehr rascher Ermüdung führt. Statistisch-physiologische Messungen ergeben eine höchstzulässige Spannungsschwankung von 0,5% bei 4...8 Hz und ca. 1% für Spannungsänderungen, die höchstens einmal pro Sekunde auftreten [2; 10].

Die als Sichtbarkeits- und Störgrenzen ermittelten Spannungsschwankungen in Abhängigkeit ihrer Frequenz sind für verschiedene Glühlampentypen in Fig. 1 dargestellt [2; 10].

2.3 Um die Rückwirkungen eines Lichtbogenofens auf das Versorgungsnetz beurteilen zu können, soll eine Relation zwischen den als Bemerkbarkeits- und Störgrenze anzunehmenden Spannungsschwankungen und geeigneten, die Anschlussverhältnisse einer Lichtbogenofenanlage charakterisierenden Werten gesucht werden.

Die Erfahrung weist hierfür auf das Verhältnis zwischen Ofenleistung und Kurzschlussleistung des Netzes hin [1; 3; 4].

Nachfolgend wird die gesuchte Relation an Hand des Ersatzschaltbildes (Fig. 2) und des Vektordiagrammes von Fig. 3 abgeleitet. Zunächst wird die Spannungsänderung beim störanfälligen Verbraucher (ΔU) in Funktion der Änderung des Ofenstromes (ΔI) gesucht. Durch die Annahme, dass die Belastung der störanfälligen Verbraucher konstant sei, wird die Spannungsänderung beim Verbraucher gleich derjenigen im Verknüpfungspunkt *CP*. Als Verknüpfungspunkt definieren wir diejenige Stelle im Netz, wo die ausschliesslich zur Anspeisung der Ofenanlage dienenden Netzteile mit dem allgemeinen Versorgungsnetz gekuppelt sind (in Deutschland oft Anschlußstelle, im englischen Sprachgebiet common coupling point genannt).

Bei den relativ kleinen Schwankungen des Ofenstroms I_0 beim *Flimmern,* besonders, wenn beim Einschmelzen annähernd der Optimalstrom eingehalten wird, liegt der Vektor ΔI_0 angenähert rechtwinklig zu $U_{CP} \equiv U_N$ (I_0 bewegt sich bei variablem Lichtbogenwiderstand und konstanter Spannung und Reaktanz auf dem Kreisdiagramm). Auch ist meistens $R_N < X_N$ und damit $Z_N \approx X_N$. Deshalb gilt:

$$\Delta U_{N_{dyn}} = \Delta I_0 \left(\underbrace{R_N}_{\text{klein}} \underbrace{\cos \varphi_{\Delta I_0}}_{\approx 0} + X_N \underbrace{\sin \varphi_{\Delta I_0}}_{\approx 1} \right) \tag{1}$$

also

$$\Delta U_{N_{dyn}} \approx \Delta I_0 \, Z_N$$

Aus Erfahrung und Messung [1; 3] wird ΔI_0 ca. 30...50% vom Ofennennstrom $I_{0\,n}$ angenommen und deshalb hier $\Delta I_0 = 0{,}4\, I_{0\,n}$ gesetzt. Aus Fig. 1 wird für eine Schwankungshäufigkeit von 4...8/s eine maximale Spannungsschwankung am Verknüpfungspunkt von $\Delta U_{N_{dyn}} = 0{,}5\%$ als Störgrenze und 0,35% als Bemerkbarkeitsgrenze angenommen.

Für Z_N gilt:

$$Z_N = \frac{3\, U^2_{Nph}}{P_k} \tag{2}$$

Mit einer Ausnahme [4] wird in der Literatur die in Rechnung gesetzte Kurzschlussimpedanz bzw. -leistung entweder als Dauerwert angenommen oder gar nicht präzisiert; das American Institute of Electrical Engineering (AIEE) [4] verwendet subtransiente Reaktanzen. Weil nun die Flimmerschwankung eine «Periodendauer» von ca. 0,2...0,3 s hat, rechtfertigt es sich, die transiente Reaktanz bzw. den *Stoss-Kurzschluss-Wechselstrom* (sog. «Anfangs-Kurzschluss-Strom») anzuwenden. Da aber meistens nur die Dauer-Kurzschlussleistung angegeben werden kann, wird hier (wie im Ausland) mit diesem letzteren Wert operiert. Aus Netzmodellmessungen ist bekannt, dass P_{KSW} = ca. 1,2...1,3 P_{KD} beträgt, ausser in unmittelbarer Nähe der Generatoren, wobei:

P_{KSW} = Stoss-Kurzschluss-Wechselstrom-Leistung (3phasig);
P_{KD} = Dauer-Kurzschluss-Leistung.

Ferner ist, um die Störschwelle auch in der bevorzugten Zeit der Lichtbenützung nicht zu überschreiten, die *minimale* Kurzschlussleistung zu berücksichtigen.

Es gilt deshalb:

$$Z_{N(SW)} = \frac{3\, U_N^2}{P_{K(SW)}} = \frac{3\, U_N^2}{1{,}25\, P_{KD}}$$

Die Forderung für die Störgrenze (bzw. Bemerkbarkeitsgrenze) lautet demnach:

$$\Delta U_{N_{dyn}} = \Delta I_0 \cdot Z_N \leqq \frac{0{,}5}{100} \cdot U_N \quad \text{Störgrenze}$$

$$\left(\frac{0{,}35}{100} \cdot U_N \quad \text{Bemerkbarkeitsgrenze} \right) \tag{3}$$

$$\Delta I_0 = 0{,}40 \cdot I_{0_N} = 0{,}40 \cdot \frac{S_{OT}}{3\, U_N} \tag{4}$$

also

$$0{,}40\,\frac{S_{OT}}{3\,U_N}\cdot\frac{3\,U_N^2}{1{,}25\,P_{KD}} \leqq \frac{0{,}5}{100}\,U_N\left(\frac{0{,}35}{100}\,U_N\right) \qquad (5)$$

und

$$P_{KD} \geqq S_{OT}\cdot\frac{0{,}40}{1{,}25}\cdot\frac{100}{0{,}5} = 64\,S_{OT}\left(\frac{0{,}40}{1{,}25}\cdot\frac{100}{0{,}35} = 91\right) \qquad (6)$$

$P_{KD} \geqq$ ca. 60 S_{OT} Störgrenze

$P_{KD} \geqq$ ca. 90 S_{OT} Bemerkbarkeitsgrenze

oder:

$S_{OT} \leqq$ ca. 1,6% von P_{KD} Störgrenze

$S_{OT} \leqq$ ca. 1,2% von P_{KD} Bemerkbarkeitsgrenze

Der Quotient $\frac{S_{OT}}{P_{KD}}$ sei im folgenden *Leistungsverhältnis* λ genannt.

Diese einfache Beziehung wurde von mehreren Autoren [1; 3] unter verschiedenen Annahmen berechnet und gilt unseres Erachtens mit Recht als geeignetes Hilfsmittel, um vor dem Anschluss eines einzelnen Lichtbogenofens an ein Versorgungsnetz rasch beurteilen zu können, ob bei normalen, mittleren Betriebsbedingungen Flimmerstörungen von Lichtabnehmern auftreten dürften oder nicht. Diese Beziehung wurde deshalb im Vorschlag SKEW übernommen.

2.4 Wie im Abschnitt 8 behandelt wird, hat in den USA eine Arbeitsgruppe der AIEE eine ähnliche Beziehung zwischen den zulässigen Spannungsschwankungen und dem Leistungsverhältnis auf statistischem Wege entwickelt, die sich von der hier gezeigten hauptsächlich dadurch unterscheidet, dass die Grenzen des Leistungsverhältnisses (Ofentransformatorleistung zu Kurzschlussleistung) eine Funktion der Ofentransformatorleistung sind. Die nach zwei verschiedenen Verfahren ermittelten Grenzkurven gemäss Fig. 4 stimmen ziemlich gut überein, wenn berücksichtigt wird, dass es sich in beiden Fällen um Näherungslösungen handelt [4].

2.5 Die obigen Darlegungen gelten nach den gemachten Voraussetzungen nur für die als *Flimmern* bezeichnete Störerscheinung. Das im Abschnitt 2.1 beschriebene *Flackern* ist, da diese Erscheinung sehr von der Ofen-Betriebsführung abhängig ist, quantitativ schwerer zu erfassen. Ausserdem ist die Kadenz der Flackerstösse wesentlich geringer als beim Flimmern, weshalb das Flackern weniger störend empfunden wird und höhere Spannungssprünge zulässig werden ($\geqq$ 1%). Aus diesen Gründen kann die Flackerstörung nicht mit einer entsprechenden zahlenmässigen Beziehung generell erfasst werden. Die Erfahrung zeigt, dass wenn obige, für das Flimmern gültige Grenzen nicht überschritten werden, bei normalen Betriebsbedingungen auch keine Störungen durch das Flackern zu erwarten sind (vgl. Nachtrag in nächster Nummer).

2.6 Wie die vorausgehende Ableitung der Beziehung für das Leistungsverhältnis zeigt, kann für das Flimmern der *Leistungsfaktor* der Ofenanlage bei nicht extremen Betriebsbedingungen unberücksichtigt bleiben.

2.7 Die bisherigen Darlegungen gelten lediglich, wenn in einem Netzpunkt nur ein einzelner Ofen betrieben wird. Wenn *mehrere Öfen* gleicher oder ungleicher Leistung am gleichen Ort vorhanden sind, stellt sicht die Frage, wie die zulässige Grenze für das Leistungsverhältnis für z.B. den grössten Einzelofen der Anlage oder für die Leistungssumme der ganzen Anlage anzusetzen ist.

2.7.1 Die Untersuchung der AIEE [4] stellt hierzu fest, dass keine Grenzkurven für diese Fälle gegeben werden können; sie empfiehlt lediglich, konkrete Einzelfälle ähnlicher Daten zu vergleichen.

2.7.2 In andern amerikanischen Veröffentlichungen [5; 6] wird ausgesagt, die nötige Kurzschlussleistung sei der 4. Wurzel aus der Störfrequenz proportional. Unter der diskutablen Annahme, dass zwei gleiche Öfen miteinander eine doppelte Störfrequenz erzeugen, wird daraus der Schluss gezogen, dass für zwei Öfen

$$P_{K_{2\,öfen}} = \sqrt[4]{2}\,P_{K_{1\,ofen}}$$

sein müsse.

Wird nun diese Beziehung für mehr als zwei Öfen extrapoliert und wird, um das Leistungsverhältnis bei mehreren Öfen ungleicher Grösse zu beurteilen, mit der Ofen-*Summen*leistung gearbeitet (Tabelle II, Kol. 5, 30, 31), so ergeben sich folgende Verschiebungsfaktoren der einzuhaltenden Grenzen für das Leistungsverhältnis:

$$\frac{P_{Kn\,öfen}}{n\cdot S_{OT}} = \frac{P_{Kn\,öfen}}{\sum\limits_1^n S_{OT}} = \frac{\sqrt[4]{n}}{n}\cdot\underbrace{\left(\frac{P_K}{S_{OT}}\right)_{1\,ofen}}_{\text{Grenzen gemäss Fig. 4}} \qquad (7)$$

oder

$$\underbrace{\frac{\sum\limits_1^n S_{OT}}{P_K}}_{\text{für } n \text{ Öfen zulässige Grenzen}} = \frac{n}{\sqrt[4]{n}}\cdot\underbrace{\frac{S_{OT}}{P_K}}_{\text{für Einzelofen zulässige Grenze}}$$

d. h.

$$\lambda_\Sigma = \frac{n}{\sqrt[4]{n}}\cdot\lambda_1$$

Tabelle I

$n =$	1	2	3	4	5
$\frac{n}{\sqrt[4]{n}} =$	1	1,67	2,3	2,8	3,3
$\frac{\sqrt[4]{n}}{n} =$	1	0,60	0,44	0,35	0,30
$\lambda_{soll} =$	1,2...1,6%	2,0...2,7%	2,8...3,7%	3,4...4,5%	4,0...5,3%
$\frac{1}{\lambda_{soll}} =$	90...60	54...36	40...27	31...21	27...18

Die AIEE-Grenzkurven wurden für $n > 1$ entsprechend um den Faktor $\frac{n}{\sqrt[4]{n}}$ nach oben verschoben.

Anstelle dieser Verschiebung der Grenzkurven nach oben können auch die Werte des Leistungsverhältnisses der einzelnen Ofenanlagen mit dem Faktor $\frac{\sqrt[4]{n}}{n}$ reduziert und mit den ursprünglichen Grenzkurven verglichen werden.

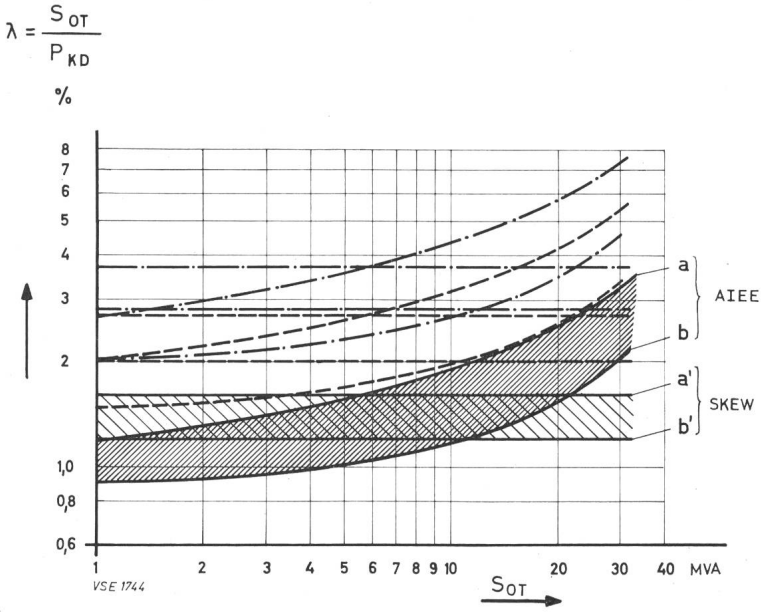
2.7.3 Eine andere Lösung für das Problem der Mehr-Ofen-Anlage kann versucht werden, indem n Öfen, die gleichzeitig in Betrieb stehen, zunächst als ein Einzelofen mit der Summenleistung $\sum\limits_1^n S_{OT}$ betrachtet werden. Die Amplituden der Strom- und Spannungsschwankungen können sich addieren oder aber auch ausgleichen, so dass vermutlich die tatsächlichen Rückwirkungen aller Einzelöfen zusammen kaum stärker, sondern eher schwächer als diejenigen eines solchen Ersatzofens $\sum\limits_1^n S_{OT}$ sein dürften. Damit wird diese Betrach-

Fig. 4

Stör- und Bemerkbarkeitsgrenzen nach AIEE und Vorschlag SKEW in Funktion des Leistungsverhältnisses λ und der Ofentransformator-Nennleistung

a, a' Störgrenzen
b, b' Bemerkbarkeitsgrenzen
λ Leistungsverhältnis
S_{OT} Transformatoren-Nennleistung

für einen Einzelofen λ_1
für 2 Öfen $\lambda_2 = 2/\sqrt[4]{2} \cdot \lambda_1$
für 3 Öfen $\lambda_3 = 3/\sqrt[4]{3} \cdot \lambda_1$



tungsweise wahrscheinlich eine sichere, eher zu pessimistische Beurteilung des Falles ergeben.

Ob die letztere (2.7.3) oder die erstere (2.7.2) $\left(\frac{n}{\sqrt[4]{n}}\right)$ Methode für mehrere Öfen anzuwenden ist, soll anhand der Auswertung der Umfrage in Abschnitt 3 beurteilt werden. Allerdings wird ein richtiges Urteil noch erschwert, da meist unbekannt ist, ob in Mehrofenanlage gleichzeitig oder gestaffelt eingeschmolzen wird. Fig. 4.

2.8 Alle diese hier genannten zulässigen Grenzen für das Leistungsverhältnis $\lambda = \frac{S_{OT}}{P_{KD}}$ können auf Grund ihrer Herkunft (verschiedene Annahmen und Vereinfachungen) nur für eine ungefähre erste Beurteilung des Störverhaltens einer Ofenanlage dienen. Wenn das Leistungsverhältnis einer Anlage in das Gebiet zwischen den Grenzlinien fällt, empfiehlt sich eine genauere Berechnung der Netzrückwirkungen anhand zusätzlicher Anlagedaten [2; 7; 8].

3. Umfrage über die in der Schweiz in Betrieb stehenden Lichtbogenöfen

3.1 Durch eine Umfrage bei den schweizerischen Elektrizitäts-Unternehmungen, welche Lichtbogenöfen beliefern, wurden Unterlagen eingeholt. Die Antworten sprechen sich über 41 Öfen mit einer Ofenleistung von total 150 MVA aus, was ca. 90% der gesamten, in der Schweiz installierten Lichtbogenofenleistung entspricht. Dabei wurden lediglich Öfen mit festem Einsatz (Schrott, Masseln) berücksichtigt, nicht aber Öfen mit kontinuierlichem Betrieb (Erzverhüttung) oder flüssigem Einsatz. Ausgewertet wurden die Daten von insgesamt 29 Öfen mit 127 MVA Leistung, einige kleinere Anlagen jedoch ausser Betracht gelassen. Der Bericht befasst sich dementsprechend nur mit den für schweizerische Verhältnisse in Betracht fallenden Ofengrössen von 0,8...40 t Nenncharge. Die Daten sind in der beigehefteten Tabelle II zusammengestellt. Im folgenden sind zu einzelnen Kolonnen (Kol.) und gewissen Werten ergänzende Bemerkungen beigefügt.

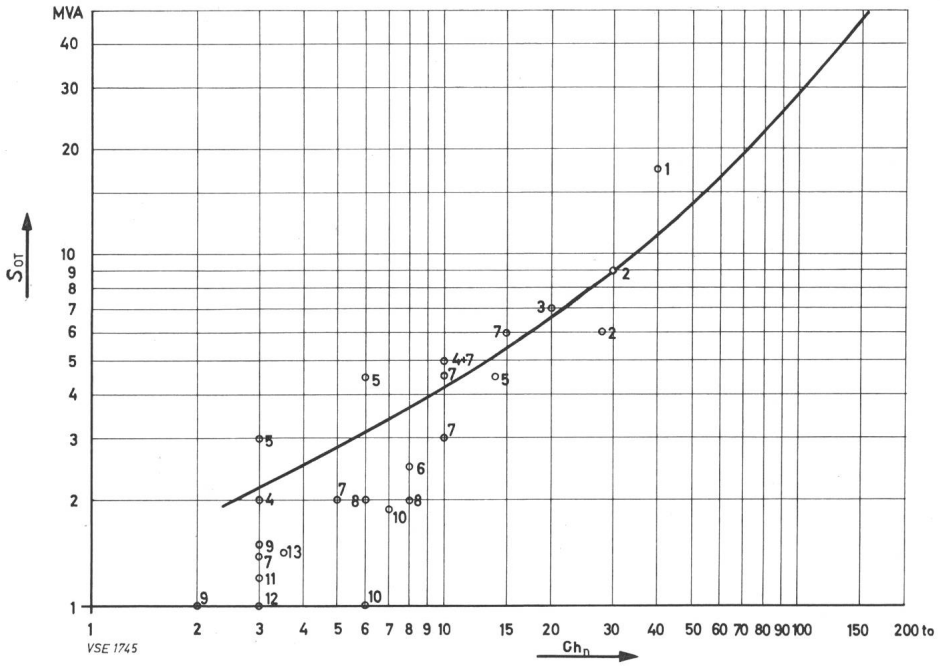


Fig. 5

Transformator-Nennleistung und Nenncharge der schweizerischen Anlagen, verglichen mit der Angabe (Fig. 1 in [5])

S_{OT} Transformator-Nennleistung
Ch_n Nenn-Charge

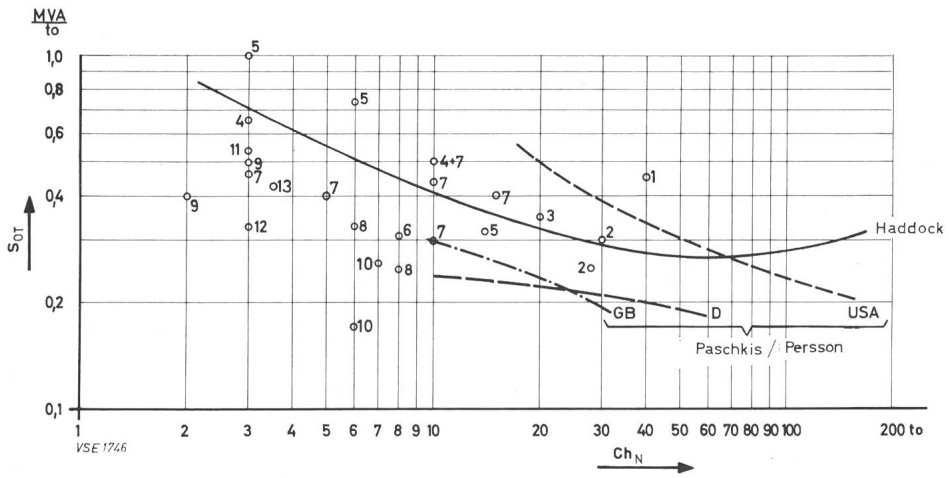


Fig. 6

Spezifische Ofentransformatorleistungen, verglichen mit den Angaben von Haddock [5] und Paschkis/Persson [9]

s_{OT} Spezifische Transformatorleistung
Ch_n Nenncharge

Kol. 3/4: Die minimale Kurzschlussleistung wurde zu 70% des angegebenen Maximalwertes angenommen.

Kol. 14: Das Verhältnis Nennleistung des Ofentransformators zu Nenncharge, also die nominelle spezifische Leistung, die für die Dauer der Einschmelzperiode massgebend ist.

Die Werte bewegen sich in den Grenzen von 0,17...1,0 und lassen mit zunehmender spezifischer Leistung abnehmende Chargendauer erkennen (siehe Bemerkung zu Kol. 27). Die Werte der Tabelle wurden in die von *Haddock* [5] angegebene Graphik der Ofennennleistung (und spezifischen Leistung) in Funktion der Nenncharge eingetragen (Figuren 5 und 6); in Fig. 6 zum Vergleich auch gebräuchliche Werte in Deutschland, England und USA aus [9].

Kol. 17: Das Elektrodenmaterial ist fast durchwegs Graphit. Hohlelektroden werden nicht verwendet.

Kol. 20/21: Mit einer Ausnahme ist der im Betrieb erreichte Leistungsfaktor zum Teil wesentlich besser als der vom Energielieferanten vorgeschriebene. Mit einer Ausnahme (Anlage 11), wo Parallelkondensatoren eingebaut sind, wurden keine besonderen Massnahmen zur Verbesserung des Leistungsfaktors getroffen. Die in Kol. 21 aufgeführten Leistungsfaktoren sind Mittelwerte für die ganze Chargendauer. Während der Einschmelzperiode ist der Leistungsfaktor meistens kleiner als während des Frischens und Feinens.

Einige Anhaltspunkte über die Betriebsführung während dem Einschmelzen in den einzelnen Anlagen ergeben sich aus den in den folgenden Kolonnen enthaltenen Werten.

Kol. 27: Die Chargendauer bewegt sich für die Erzeugung von Rohstahl in den Grenzen von 3...4,5 Stunden, während für Stahl- und Grauguss 2...9 Stunden angegeben werden. Die Chargendauer nimmt mit zunehmender spezifischer Leistung ab, wie z.B. die Anlagen 1, 5, 11 zeigen.

Kol. 30/31: Auf Grund der Daten der Kolonnen 3 und 4 sowie 5 wurden diejenigen der Kolonnen 28/29/30/31 berechnet.

3.2 Die *Auswertung des Leistungsverhältnisses* wird wie folgt vorgenommen: Anhand der Beobachtung (Kol. 33), ob Störungen auftraten oder nicht, unterscheiden sich die in der Tabelle 1 angegebenen Fälle als störende (+) und nicht störende (○).

Die erhaltenen Leistungsverhältnisse werden in Fig. 7 (Einzelöfen) und Figuren 8 und 9 für mehrere Öfen mit den Grenzkurven gemäss Abschnitt 2.3 und 2.7 verglichen, und man versuchte daraus die Gültigkeit dieser Grenzkurven zu beurteilen.

Nur das aus $P_{K\,min}$ errechnete Leistungsverhältnis (Kol. 29 und 31) wird ausgewertet. Es wird angenommen, dass aus Werten, die zwischen Bemerkbarkeits- und Störgrenze liegen, nicht entschieden werden kann, ob Störungen auftreten werden

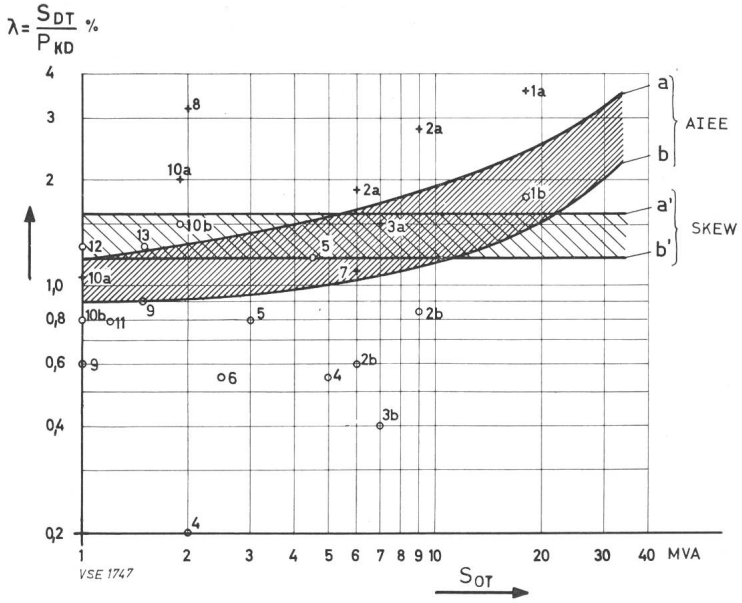


Fig. 7

Vergleich der Leistungsverhältnisse aus der Umfrage mit den Grenzkurven SKEW und AIEE Einzelöfen

S_{OT} Ofentransformator-Nennleistung
λ Leistungsverhältnis
a, a' Störgrenzen
b, b' Bemerkbarkeitsgrenzen
+ störend
○ nicht störend

Tabelle II

Anlage Nr.	Nennspannung am Verknüpfungspunkt	Dauer-Kurzschlussleistung am Verknüpfungspunkt		Ofen-Transformator					Drossel			Ofen			
		Maximum	Minimum	Nenn-leistung	Nenn-Spannungen	Kurzschluss-spannung	Nennstrom sek. bei max. Sek-Spg.	Schaltung	Nenn-durchgangs-leistung	Kurzschluss Spannung	Bemerkungen	Nenn-charge	Trafo-nennleistung / Nenncharge	Chargen-Material	Schmelz-produkt
	kV	MVA	MVA	MVA	kV/V	%	kA		MVA	%		t	MVA/t		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1*a*	50	700	500	18	50/120...370	10...21	28	⅄⅄/Δ⅄	5,6	32		40	0,45	Schrott	Rohstahl
b	220	1450°	1000*	2 × 18							ausser Betrieb	2 × 40			
2*a*	8	470	320*	9	8/114...280	8...13	18,6	ΔΔ	keine			30	0,3	Schrott	Rohstahl
b	150	1500	1050*	6		11...16	12,3	Δ⅄				28	0,25		
3*a*	50	700°	460*	2 × 7	50/90...290	11...12	14	Δ	keine			2 × 20	0,35	Schrott	Rohstahl
b	150	2600	1800*									2 × 20			
4	50	1300	920*	2 × 5 2	3,7/70...180		16 6,4					2 × 10 3	0,5 0,67	Schrott	Rohstahl
5	50	545	380*	2 × 4,5 3	10/75...260	4,5 3,5	10 8 5	Δ — ⅄Δ ⅄Δ ⅄Δ	? 0,4 0,25	4,5 8 8		14 6 3	0,32 0,75 1,0	Schrott	Stahlguss Grauguss
6	50	660	460*	2 × 2,5	6/90...130	7	11	⅄⅄				2 × 8	0,31	Schrott	Grauguss
7	50	770	540*	1,4...6 Σ 22	10/145...270 6 Stück	5...7,3	5,6...12,8	⅄Δ (5 x) ⅄Δ — ⅄⅄(1x)	0,4/0,6		bei Öfen 1,4/3 MVA	3...15	0,4...0,47	Schrott Schrott	Stahlguss Grauguss
8	8,6	90	63*	2 × 2	8,3/110... 180 150	6,5	6,4	⅄⅄				8 6	0,25 0,33	Schrott	Stahlguss
9	12	230	160*	1 5 1 0	12/72...153 12/80...155	16,4 4,5	12 7,2	Δ⅄	0,12...0,09	11...15	3 Stufen	3 2	0,5 0,4	Schrott	Grauguss
10*a* 10*b*	10 10	135 180	95* 125*	1,87 1,0	10/87...156 10/75...121	4,6	6,9 4,8			0...15		7 6	0,26 0,17	Schrott	Grauguss
11	11	220	154*	1,2	11/80...160	6,2	4,3	⅄⅄				3	0,55	Schrott	Grauguss
12	3,5	111	77*	1	3,1/65...96	5,3 8,2	6,0	⅄⅄				3	0,33	Schrott	Grauguss
13	16	265	113*	0,5,..1,5 Σ 3,5	16/75...130 4 Stück	5...7	4,0...6,7	Δ⅄ ⅄Δ ⅄⅄				2,5/1,5 3,5/0,8	0,6...0,4	Schrott	Stahlguss Grauguss

Legende:
* Geschätzt
° Durch Versuche ermittelt
R_L Lichtbogenwiderstand
I_L Lichtbogenstrom
P Ofenleistung

Kol. 1:
Nr.: Anlagenummer
a: Zustand *vor* Änderung } der gleichen Anlage
b: Zustand *nach* Änderung

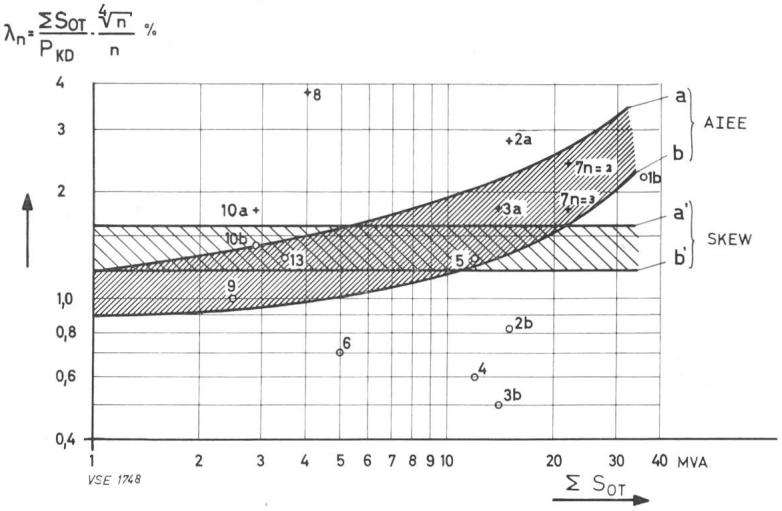
Fortsetzung von Tabelle II

Anlage Nr.	Ofen: Elektroden: Material	Ofen: Elektroden: Regulierung auf konstant	Ofen: Elektroden: Antrieb	Ofen: cos φ der gesamten Ofenanlage (Oberspg. Trafo) soll	Ofen: cos φ der gesamten Ofenanlage (Oberspg. Trafo) tatsächl.	Ofenbetrieb: Einschmelzen: Max. Leistung MW	Ofenbetrieb: Einschmelzen: Zugehörige Spannung V	Ofenbetrieb: Einschmelzen: Ofenstrom kA	Ofenbetrieb: Einschmelzen: u in % der Nennspg. %	Ofenbetrieb: Einschmelzen: i in % des Nennstr. %	Ofenbetrieb: Chargendauer total h	Leistungsverhältnisse: Ofennennleistung / Netz-Kurzschlussleistung = S_{oT}/P_k %: Einzelofen bei P_k max.	Einzelofen bei P_k min.	Summenleistung bei P_k max.	Summenleistung bei P_k min.	Störungen: Gemessene Spannungs-Schwankungen %	Störungen: Beobachtete Störungen	Störungen: Abhilfe-Massnahmen
	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
1 *a*	Kohle + Graphit	R_L	hydr.	0,75	0,9...0,95	15	300...370	26	80...100	93	3	2,6	3,6	—	—	1,5...2,3	Flimmern mit 4...6 Hz	Übergang auf direkte Speisung aus 220 kV-Netz
1 *b*				0,85								1,25	1,8	2,5	3,6		keine	
2 *a*	Graphit	R_L I_L	hydr.			10,8	280	22	100	120	3	1,9 1,3	2,8 1,9	3,2	4,7		Flackern + Flimmern	Übergang auf Speisung 150 kV über sep. 8 kV-Betrieb
2 *b*						6,5	280	16	100	130	3,5	0,6 0,4	0,85 0,6	1,0	1,4		keine	
3 *a*	Graphit	I_L	hydr.		0,9	6,5	290	14,5	100	100	4,5	1,0	1,5	2,0	3,0	≤ 2 8	wenig Flimmern, starkes Flackern	Übergang auf Speisung 150 kV.
3 *b*												0,27	0,4	0,54	0,8			
4												0,38 0,15	0,55 0,2	0,9	1,3		keine	
5	Graphit	I_L	elektr. hydr.	0,85	0,86	3,6 2,9 1,8	260 260 200	10,8 10 7,8	100 110 100	110 90 90	2,5 2 1,5	0,8 0,8 0,55	1,2 1,2 0,8	2,2	3,1		keine	
6	Graphit	R_L	hydr.	0,9	0,8	2,2	130	11	100	100	3	0,38	0,55	0,76	1,1		keine	
7	Graphit	P I_L	hydr.	0,85	0,9	1,1 S_n	145...270	6...16	≥ 100	200...100	4,5...8	≤ 0,78	≤ 1,1	2,85	4,1	≤ 1	Flimmern	sep. Betrieb
8	Graphit	R_L	hydr.		0,87	1,7 1,5	80 110	15,5 10	44 60	240 160	5,3 4	2,2	3,2	4,4	6,4		Flackern	
9	Graphit	R_L	hydr.			1,5 0,8	99	3...5	64	40...70	4...6	0,65 0,45	0,9 0,6	1,1	1,6		keine	
10a	Graphit	R_L I_L	hydr.	0,9	0,9	1,8	156	7	100	100	9	1,4 0,75	2,0 1,05	2,1	3,0		Flimmern + Flackern	Übergang auf höhere Netztrafoleistung
10b					0,85	1,3	121	7	100	145	9	1,0 0,56	1,44 0,8	1,6	2,3		keine	
11	Graphit	R_L	hydr.	0,85		1,65	136	7	85	160	4	0,55	0,8	—	—			
12	Graphit	R_L	hydr.	0,85	0,97	0,95	96	6	100	100	3,5	0,9	1,3	—	—		keine	
13	Graphit	R_L	hydr.	0,85	0,9	0,5...1,5	75...130	4,0/6,7	100	100	3	0,2 ...0,6	0,4 ...1,3	1,3	3,1		keine	

Fig. 8

Vergleich der Leistungsverhältnisse aus der Umfrage mit den Grenzkurven SKEW und AIEE, Mehrofen-Anlagen, Beurteilung nach 2.7.2

S_{OT} Ofentransformator-Nennleistung
λ_n Leistungsverhältnis (reduziert für n Öfen)
a, a' Störgrenzen
b, b' Bemerkbarkeitsgrenzen
\+ störend
○ nicht störend



oder nicht. Solche Punkte (+ und o) werden daher als bestätigende Fälle taxiert.

Bei der Auswertung von Kol. 29 hinsichtlich Einzelöfen wurden auch die Öfen der Mehrofenanlagen berücksichtigt; es wurde jeder Einzelofen gezählt (bei zwei Betriebsfällen *a*, *b* zweimal).

Bei der Auswertung von Kol. 31 hinsichtlich Mehrofenanlagen wurde pro Anlage ein Fall gezählt (Fälle *a*, *b* zweimal).

Bei der Beurteilung nach Einzelöfen können einzelne, die Regel nicht bestätigende Werte (+ oder o im entgegengesetzten Feld) als richtig umgewertet werden, wenn berücksichtigt wird, dass die Aussage über das Stören der Öfen für den gleichzeitigen Betrieb mehrerer Öfen und nicht eines Einzelofens gemacht wurde (ein Einzelofen muss nicht unbedingt stören, während es mehrere zusammen tun; 7; 10*a*).

Die Kol. 31 wurde nach den in 2.7 genannten zwei Methoden ausgewertet:

Methode 2.7.2: Für mehrere Öfen werden die Grenzkurven nicht verschoben, sondern es wird das Leistungsverhältnis λ jeder Anlage mit dem Faktor $\frac{\sqrt[4]{n}}{n}$ multipliziert, um diese Werte graphisch mit denjenigen nach (2.7.3) vergleichen zu können, Fig. 8.

Methode 2.7.3: Die Summe der Ofenleistungen einer Anlage wird als *ein* Ersatzofen betrachtet, Fig. 9.

Die Werte des Leistungsverhältnisses werden gesondert nach den Grenzen des Vorschlages SKEW (gemäss der in 2.3 abgeleiteten Formel) und AIEE 2.4 beurteilt; das Ergebnis der Auszählung ist in Tabelle III enthalten:

Auswertung der Umfrage SKEW: Leistungsverhältnis λ und Störverhalten (Kolonnen 5, 29, 31, 33 in Tabelle II, Fig. 7, 8 und 9)

Tabelle III

Beurteilung: richtig: + über oder in Grenzband; ○ unter oder in Grenzband; falsch: + unter Grenzband; ○ über Grenzband	Beurteilung nach Grenzen			
	SKEW		AIEE	
	richtig	falsch	richtig	falsch
Einzelöfen: 38 Fälle (Öfen + Fälle *a*/*b*) . .	29	9	30	8
korrigiert entsprechend Bemerkung	36 95 %	2 5 %	35 92 %	3 8 %
Mehrofen-Anlagen:				
Methode 2.7.2	13 93 %	1 7 %	14 100 %	0 0 %
Methode 2.7.3.	10 72 %	4 28 %	10 72 %	4 28 %

\+ störende Öfen ○ nicht störende Öfen

Kol. 32/33: In einzelnen Fällen wurden die Spannungsschwankungen im Netz der Allgemeinversorgung oder im Verknüpfungspunkt gemessen. Ein Vergleich mit den beobachte-

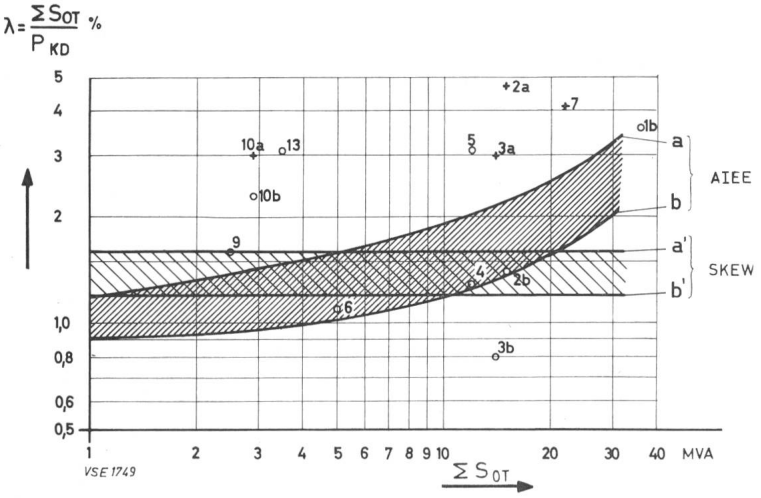


Fig. 9

Vergleich der Leistungsverhältnisse aus der Umfrage mit den Grenzkurven SKEW und AIEE, Mehrofenanlagen, Beurteilung nach 2.7.3

S_{OT} Transformator-Nennleistung
λ Leistungsverhältnis
a, a' Störgrenzen
b, b' Bemerkbarkeitsgrenzen
\+ störend
○ nicht störend

ten Störungen (Kol. 33) bestätigt den angenommenen Grenzwert von 0,5% für Flimmerstörungen.

Kol. 34: Mit einer Ausnahme (Anlage 8), wo der Lichtbogenofen erst nach Mitternacht in Betrieb kommt, wurden die Störungen behoben, und zwar ausnahmslos durch den Anschluss der Anlagen an ein Netz höherer Spannung und damit höherer Kurzschlussleistung, wozu auch ein Übergang auf Separatbetrieb zu rechnen ist.

4. Schlussfolgerungen aus der Umfrage

4.1 Mit Ausnahme des Leistungsverhältnisses konnten keine Relationen der erhaltenen Daten zum Auftreten von Störungen gefunden werden.

4.2 Die Auswertung der Umfrage ergibt eine gute Bestätigung der Grenzkurven sowohl nach Vorschlag SKEW als auch nach AIEE. Die geringe Anzahl Testfälle der Umfrage erlaubt jedoch kein eindeutiges, statistisch gesichertes Urteil darüber, ob die Grenzwerte gemäss Vorschlag SKEW oder der AIEE wahrscheinlicher seien. Es gilt dies hauptsächlich für Öfen mittlerer Leistung, für die sich die Grenzbänder teilweise überdecken. Einzelfälle (10*b*, 12, 13; 1*b*) lassen vermuten, dass für kleine Öfen eher die Grenzen nach Vorschlag SKEW, für grosse Öfen eher die AIEE-Grenzen richtig seien. Die letztere Vermutung ist berechtigt, weil die mit wachsender Ofenleistung steigenden Grenzkurven der AIEE Ausdruck für die Erfahrungstatsache sind, dass bei gleichem Leistungsverhältnis grössere Öfen weniger stören als kleine [11].

4.3 Die Resultate von Anlagen mit mehreren Öfen bestätigen nach der unter 2.7.2 beschriebenen Methode der Reduktion der Werte die Grenzkurven besser als nach der unter 2.7.3 erläuterten Methode (Ersatzofen). Die letztgenannte Ermittlung ergibt zu grosse Werte des Leistungsverhältnisses und damit eine zu strenge (pessimistische) Beurteilung der Wahrscheinlichkeit der Rückwirkungen.

4.4 In einigen Fällen ergeben Störverhalten und Leistungsverhältnis der betreffenden Anlagen keine Bestätigung der als Richtwerte bestimmten Störgrenzen. Diese Abweichungen von der Regel können folgende Ursachen haben:

Die der Berechnung zu Grunde gelegten Daten mussten zum Teil geschätzt werden (z. B. $P_{K\,min}$ im Verknüpfungspunkt).

Zur Berechnung der Grenzkurven wurden für die Grösse der Stromschwankung ΔI_0 und die Lage des Stromvektors ($\cos\varphi$) mittlere übliche Werte angenommen, die bei den tatsächlichen, stark unterschiedlichen Betriebsverhältnissen nicht immer zutreffen.

Die Formel für das Leistungsverhältnis berücksichtigt weder die Impedanz von Leitungen und Transformatoren zwischen dem Verknüpfungspunkt und der Ofenanlage noch diejenige zwischen Verknüpfungspunkt und Verbraucher. Beide Impedanzen dämpfen etwas die Netzrückwirkungen beim Verbraucher [12].

4.5 Die Art der Betriebsführung einer Ofenanlage hängt von vielen Faktoren ab, und kann von Anlage zu Anlage verschieden sein. Solche Unterschiede sind vor allem durch das Schmelzprodukt (Stahlblöcke, Stahlguss, Grauguss) bedingt. Die über die Betriebsführung aus der Umfrage erhaltenen Unterlagen genügen nicht, um deren Einfluss auf die Netzrückwirkungen beurteilen zu können.

4.6 Interessant ist die Feststellung, dass dort, wo die Störungen unertragbar wurden, durchwegs die Erhöhung der Kurzschlussleistung des speisenden Netzes als Sanierungsmassnahme mit Erfolg zur Anwendung kam.

4.7 Die Resultate und die daraus erkennbaren Schlussfolgerungen dieser Umfrage erlauben noch keine abschliessende Stellungsnahme zum Problem der Netzrückwirkungen, da die Umfrage nur eine beschränkte Anzahl von Anlagen erfasste.

Die Fragen waren zum Teil auch zu wenig präzisiert. So hätte z. B. die Anzahl der beim Auftreten von Störungen in Betrieb stehenden Öfen einer Anlage eine genauere Bestimmung des kritischen Leistungsverhältnisses erlaubt. Auch wäre die Unterscheidung des direkt beim Einschmelzen angewandten Leistungsfaktors vom mittleren $\cos\varphi$ über die ganze Chargendauer wertvoll.

5. Literatur

Die reichen Erfahrungen des Auslands und viele wissenschaftliche Untersuchungen finden ihren Niederschlag in zahlreichen Veröffentlichungen, in denen die spezifischen Probleme des Lichtbogenofen-Betriebes zum Teil sehr eingehend behandelt werden. Verschiedene Fragen, die aus unserer Umfrage allein nicht gelöst werden können, werden in der Literatur erörtert und beantwortet. Deshalb beruhen die nachfolgenden Empfehlungen besonders für die Betriebsführung der Anlagen auch vorwiegend auf der Auswertung des einschlägigen Schrifttums.

Das «Jahrbuch der Elektrowärme» [13] enthält jeweils ausführliche Stichwortverzeichnisse über das Wissensgebiet der Lichtbogenöfen.

6. Vorschlag für Richtlinien für den Anschluss und den Betrieb von Lichtbogenöfen

Die Ergebnisse der von der SKEW durchgeführten Umfrage und die Auswertung der einschlägigen Literatur erlauben, folgenden Vorschlag für Richtlinien für den Anschluss und den Betrieb von Lichtbogenöfen aufzustellen.

6.1 *Anschlussverhältnisse*

Diese Vorschläge dienen sowohl der Planung für den Anschluss neuer Ofenanlagen wie auch der Sanierung vorhandener, störender Ofenbetriebe.

Wenn eine Ofenanlage keine störenden Rückwirkungen auf das Versorgungsnetz verursachen soll, ist es wesentlich, sie an einen Netzpunkt mit einer genügenden Kurzschlussleistung anzuschliessen.

Diese Forderung gilt als erfüllt, wenn das *Leistungsverhältnis Ofentransformator-Nennleistung* zu minimaler *Netz-Dauer-Kurzschlussleistung* am Verknüpfungspunkt die Werte

1,2...1,6% für einen Ofen,
2,0...2,7% für zwei Öfen und
2,8...3,7% für drei und mehr Öfen,

die gleichzeitig in Betrieb stehen, *nicht überschreitet* (Grenzen nach Vorschlag SKEW). Dabei ist für Anlagen mit mehreren Öfen die *Summe* der Nennleistungen der Ofentransformatoren einzusetzen.

Für Ofenanlagen grosser Leistungen empfiehlt sich eine Kontrolle des errechneten Leistungsverhältnisses anhand der Grenzkurven nach AIEE (Fig. 4).

Die so gewonnenen Sollwerte für das Leistungsverhältnis der vorgesehenen Anlage sind lediglich als *Richtwerte* zu betrachten.

Ist das *Leistungsverhältnis kleiner* als der untere Soll-Grenzwert, so sind *keine Störungen* zu erwarten, während für Werte *grösser* als die obere Soll-Grenze mit grosser Wahrscheinlichkeit *Störungen auftreten* werden.

Liegt das errechnete Verhältnis *innerhalb* der angegebenen Grenzen, dann empfiehlt es sich, die Ausgangsdaten möglichst genau zu ermitteln, so vor allem die Dauer-Kurzschlussleistung am Verknüpfungspunkt, die resultierende Ofenimpedanz (R, X), den Leistungsfaktor beim Einschmelzen und die max. Stromschwankungen. Hierauf lassen sich die zu erwartenden Netzrückwirkungen genauer errechnen [2], [7], [8].

Zur genauen Bestimmung der minimalen Kurzschlussleistung des Netzes im Verknüpfungspunkt sind, wenn nötig, Messungen durchzuführen. Allgemein sei empfohlen, bei Kurzschluss-Messungen oder -Berechnungen in vermehrtem Masse als bisher mit den Maximalwerten gleichzeitig auch die Minimalwerte zu bestimmen.

Eine spätere Inbetriebnahme weiterer Lichtbogenöfen in der gleichen Anlage muss bei einem Neuanschluss im voraus berücksichtigt werden. Der Anschluss soll wenn irgend möglich so dimensioniert sein, dass keine Einschränkungen in der Betriebsführung der Ofenanlage gefordert werden müssen.

Auch dürfen die in einem gewissen Masse sich addierenden Störwirkungen von Öfen an verschiedenen, aber benachbarten Standorten nicht übersehen werden. Diesem Umstand kann in einer strengeren Beurteilung des Leistungsverhältnisses Rechnung getragen werden.

Die richtige Dimensionierung der vorgeschalteten *Drosselspule* ist eine wesentliche Voraussetzung für eine optimale Betriebsführung wie auch zur Vermeidung von störenden Netzrückwirkungen. Mit der Drosselspule lässt sich die Gesamtreaktanz der Ofenanlage auf die für den Ofenbetrieb optimalen Werte einstellen. Die genügend grosse Eigenreaktanz grösserer Öfen (grösser als ca. 12 MVA) macht das Vorschalten von Drosseln meist entbehrlich.

Die *Kurzschlussleistung* am Verknüpfungspunkt kann *erhöht* werden, indem:

1. dieser in ein Netz höherer Spannung verlegt wird, worunter auch der Anschluss über einen separaten Transformator zu verstehen ist;

2. der Verknüpfungspunkt an eine Netzstelle derselben Spannungsebene mit grösserer Kurzschlussleistung verlegt wird, wie durch Speisung der Ofenanlage über separate Leitungen.

Kann die Kurzschlussleistung nicht oder nur mit grossem Aufwand erhöht werden, lassen sich folgende, die Störwahrscheinlichkeit vermindernde Mittel anwenden:

Synchronmaschinen, d.h. Generatoren oder Kompensatoren, welche an die Ofensammelschiene oder in ihrer Nähe angeschlossen werden. Bei richtiger Auslegung (Kompromiss!) können verschiedene Aufgaben erfüllt werden: Deckung des stationären Blindlastbedarfs der Ofenanlage, Ausgleich von Wirk- und Blindlaststössen des Ofens, Ausgleich der unsymmetrischen Ofenlast [1], [2], [14], [15], [16].

Einbau von *Serie-Kondensatoren* an einer (*vor* Verknüpfungspunkt) oder mehreren Netzstellen [17], [18], [19], [2].

Diese beiden Massnahmen wirken zum Teil auch durch Erhöhung der Kurzschlussleistung.

Parallelkondensatoren, die zur Kompensation der stationären Blindlast der Ofenanlage eingebaut sind, können die Netzrückwirkungen durch die Stromstösse nicht verringern.

Einbau von *Serie-Drosseln* in die Ofenzuleitung, also *nach* dem Verknüpfungspunkt; als sog. «buffer reactor» besonders zusammen mit Synchronmaschinen [14], [20], [5].

Vor dem Anschluss neuer oder zusätzlicher Öfen ist die Kontaktnahme zwischen dem energieliefernden Werk und dem Hersteller der Ofenanlage unerlässlich, vor allem für die Dimensionierung der Drosselspulen und für die Einhaltung des vom Werk verlangten Leistungsfaktors.

Für das liefernde Elektrizitätswerk empfiehlt es sich, im Energielieferungsvertrag mit dem Ofenbesitzer Vorbehalte aufzunehmen, die, wenn Störungen auftreten sollten, die Finanzierung allfällig notwendig werdender Abhilfemassnahmen eindeutig regeln.

6.2 *Betriebsführung der Ofenanlage*

Es hat sich gezeigt, dass sich für die positive Beeinflussung von Netz-Rückwirkungen folgende Massnahmen günstig auswirken:

Das *Einschmelzen* mit möglichst grossem Strom und veränderlicher Spannung (anfangs reduziert, sobald wie möglich gesteigert auf möglichst hohen Wert, ausser bei Grauguss). Immerhin sollen die maximalen Stromstösse das 2,5fache des Nennstromes nicht überschreiten (für kleinere Öfen deshalb Drosselspule nötig!). Wenn die Ofencharakteristik es zulässt, ist der Betrieb mit dem *Optimalstrom* anzustreben (bei grösseren Öfen) [1; 11; 21; 22].

Der guten *Chargierung* ist alle Sorgfalt zu widmen: Zu empfehlen sind Sortierung und gute Packung des Schrotts (evtl. Zugabe von max. 20% Feinschrott), Hohlräume sind zu vermeiden (besonders nötig bei hoher Ofenspannung!). Die Korbbeschickung ermöglicht sorgfältige Packung und doch rasches Chargieren [1; 12].

Als Massnahmen zur Erzielung einer optimalen Ofenatmosphäre und günstigen Anfangsbrennbedingungen seien erwähnt, sind aber je nach Betrieb anwendbar oder nicht: Aufgabe von Kalk, Koks, Kohle, Graphit; teilweise flüssiger Einsatz («Duplex»-Verfahren) [22; 1].

Die erwähnten Massnahmen dienen gleichermassen der besseren wirtschaftlichen Ausnützung des Ofens und dem störungsfreieren Netzbetrieb [1].

Bei Betrieb mit mehreren Öfen ist womöglich das Einschmelzen nicht gleichzeitig vorzunehmen. Einerseits werden die Netzrückwirkungen kleiner, anderseits ist die vom Ofenwerk benötigte Maximalleistung kleiner, da die Frisch- und Feinungsperioden wesentlich kleinere Leistungen benötigen. Die Anwendung dieser Verschachtelung hängt von der Tarifregelung und von der Betriebsorganisation ab [1; 11].

7. Messungen

Wegen störender Netzrückwirkungen durch Lichtbogenöfen wurden in der Schweiz in verschiedenen Anlagen Messungen durchgeführt.

Das Sichten der Messergebnisse zeigte, dass diese nicht gut vergleichbar sind, weil die Messungen nicht nach einheitlichen Gesichtspunkten ausgeführt wurden. Daraus erhebt sich die

Notwendigkeit von *Mess-Richtlinien*. Diese sollten die Messmethoden und die zu messenden Grössen empfehlen, um zu vergleichbaren Messresultaten zu gelangen.

Mangels genügender bisheriger Erfahrungen, und weil genaue Anweisungen umfangreich ausfallen würden, war es im Rahmen dieses Berichtes nicht möglich, solche Mess-Richtlinien aufzustellen; auch wäre es zu begrüssen, wenn die UIE sich damit befassen könnte. (UIE: Union Internationale d'Electrothermie)

Im übrigen sei auf die zahlreichen Veröffentlichungen über Messungen verwiesen [3; 12; 13; 23; 24; 25].

8. Empfehlungen ausländischer Organisationen

In den *USA* hat sich besonders das American Institute of Electrical Engineers (AIEE) des Problems der Netzrückwirkungen angenommen.

In einer Veröffentlichung von *A. A. Kroneberg:* «Voltage dips and flicker» wird allgemein für alle Verbraucher mit schwankender Belastung die Frage der Spannungsschwankungen, ihrer Auswirkungen und vorsorglicher Gegenmassnahmen behandelt [26].

Ein Bericht einer Arbeitsgruppe des AIEE: «Guide for application of arc furnaces on power systems» gibt Aufschluss über die Resultate einer Umfrage über 246 Öfen mit Leistungen von 1000...25000 kVA. Aus der statistischen Auswertung resultieren eine Sichtbarkeit- und eine Störgrenze für das Leistungsverhältnis (wie 2.3) in Funktion der Ofenleistung (Fig. 4) [4].

In *England* erschien eine Veröffentlichung der «The Electricity Council Chief Engineers' Conference» über «Supply to arc furnaces», die eigentliche Richtlinien enthält. Es werden max. zulässige Spannungsschwankungen, veränderlich mit der Netzspannung des Verknüpfungspunktes angegeben, ferner werden die vor dem Anschluss neuer Öfen einzufordernden Angaben, eine Formel zur Abschätzung der auftretenden Spannungsschwankungen, Massnahmen zur Verminderung von Störungen und einige Mess-Ratschläge genannt [27].

In *Deutschland* sind in der Arbeit «Erfahrungen der deutschen Energieversorgungsunternehmen (EVU) über die Netzbeeinflussung durch Lichtbogenöfen» [1] die Ergebnisse und Erfahrungen aus einer Umfrage der VDEW mitgeteilt worden. Hierin wird unter andern Empfehlungen auch eine ähnliche Norm für das Leistungsverhältnis wie die bei uns in 2.3 behandelte gegeben.

Weitere und allgemein verbindliche Richtlinien wurden bisher nicht veröffentlicht, wogegen besonders das Elektrowärme-Institut in Essen mit zahlreichen Messungen und Untersuchungen betraut wurde. Wissenschaftliche Erkenntnisse und praktische Erfahrungen sind in einem umfangreichen Schrifttum zugänglich.

9. Literaturverzeichnis

[1] *Schulz, K.:* Erfahrungen der deutschen EVU über die Netzbeeinflussung durch Lichtbogenöfen. (Auswertung einer Rundfrage des VDEW.) Elektrizitätswirtschaft (1956) 9.

[2] *Schwabe, W. E.:* Rückwirkungen von Lichtbogenöfen auf Stromversorgungsnetze. Elektrizitätswirtschaft (1955) 21.

[3] *Krabiell, H.:* Über die Entstehung der Spannungsschwankungen in Stromversorgungsnetzen beim Betrieb von Drehstrom-Lichtbogenöfen. Dissertation T. H. Aachen 1961. Auszug in: Elektrowärme (1962) 1, S. 12.

[4] Working Group AIEE. Guide for application of arc furnaces on power systems. Preliminary report. AIEE CP 55–802, 5. Oktober 1955.

[5] *Haddock, A.:* Electricity supply to large electric arc furnaces. IV. internationaler Elektrowärme-Kongress Stresa Nr. 904.

[6] *Ramsauer, O.* und *J. E. Treeweek:* System capacity required for 3 phase arc furnaces. AIEE Transactions, Bd. 73, 1954, Teil 3 B, S. 1373.

[7] *Schweiger, F.:* Vorausbestimmung der Netzrückwirkungen von Lichtbogenöfen durch Rechnung und Messung. Elektrizitätswirtschaft (1956) 9.

[8] *Rojahn, W.:* Spannungsabfallkoordinaten zur Untersuchung von Netzstörungen durch Lichtbogenöfen. ETZ 1940, S. 985.

[9] *Paschkis, V.* und *John Persson:* Industrial electric furnaces and applicances (Buch). Interscience Publishers Inc., New York, London 1960, S. 118.

[10] *Schwabe, W. E.:* Untersuchungen über die Störanfälligkeit von Glühlampen durch den Betrieb von Lichtbogenöfen. Elektrowärme 1939, S. 127.

[11] *Marincek, B.:* IV. internationaler Elektrowärme-Kongress in Stresa 1959, Fortschritte in der Elektrometallurgie. NZZ, 23. 9. 1959, Nr. 2851/2852.

[12] *Krabiell, H.:* Erfahrungen bei der Messung von Spannungsschwankungen an Lichtbogenöfen. Elektrowärme (1962) 11, S. 564.

[13] *Müller, H.*, als Herausgeber. — Jahrbuch der Elektrowärme 1958/59. Vulkan-Verlag Dr. W. Classen, Essen.

[14] siehe [145] bei Nachtrag!

[15] *Keller, R.:* Das Flimmern des elektrischen Lichtes. Ursachen und Abhilfsmöglichkeiten. Bull. SEV 1941, S. 717.

[16] *Tittel, J.:* Blindleistungsmaschinen zur Symmetrierung unsymmetrischer Netzbelastungen. ETZ-A 1961, S. 365.

[17] *Henkes, H.:* Reihenkompensation von Lichtbogenöfen. Elektrizitätswirtschaft (1956) 9.

[18] *Arnold, R.:* Dämpfung der durch Lichtbogenöfen verursachten Spannungsschwankungen. Elektrowärme 1939, S. 53.

[19] *Büttikofer, U. V.:* Erfahrungen beim Anschluss von Lichtbogenöfen in der Schweiz. Elektrowärme (1958) 7, S. 247.

[20] *Roncoroni, J.:* Caractéristiques particulières des fournitures d'énergie pour les fours électriques à arc. IV. internationaler Elektrowärme-Kongress Stresa 1959, Nr. 907.

[21] *Forst, H. J.:* Arbeitsbedingungen und Wirkungsgrad grosser Lichtbogen-Stahlschmelzöfen. Elektrowärme (1960) 6.

[22] *Forst, H. J.:* Aussprache zum Thema «Netzbeeinflussung durch Lichtbogenöfen». Elektrizitätswirtschaft (1956) 9.

[23] *Müller, H.:* Messungen am Lichtbogenofen (ATM 242 3/1956), V. 8254–1.

[24] *Schwabe, E.*, und *Fischer, W.:* Messtechnische Fragen bei der Untersuchung von Lichtbogenöfen. Elektrowärme 1939, S. 147.

[25] *Schwabe, E.*, und *Fischer, W.:* Ein Gerät zur gleichzeitigen Aufzeichnung von Strom-, Spannungs- und Lichtschwankungen. Elektrowärme 1939, S. 143.

[26] *Kroneberg, A. A.:* Voltage dips and flicker. AIEE Transactions Paper 56–637, 11–7–1956.

[27] The Electricity Council, Chief Engineers Conference. — Supply to arc furnaces. Engineering Recommandation P 7/1. 10th Chief Engineers Conference. D 1/106/EJRK 25–4–1960.

(Schluss folgt)