

# etz

Elektrotechnik + Automation

## Power Quality in Netzen mit Schweißanlagen der Automobilindustrie

Dietrich Stade • Helge Schäfer • Peter Ulrich

**Ein typischer Produktionsprozess in vielen Industriezweigen ist das elektrische Widerstandsschweißen. Beim Schweißen treten infolge des Schweißpulses in kurzen Zeitabständen große Scheinleistungsänderungen  $\Delta S_A$  auf. Rasch aufeinander folgende  $\Delta S_A$  führen im Stromversorgungsnetz zu Spannungsabweichungen, -änderungen und Flicker, die ein unzulässiges oder störendes Ausmaß annehmen können. Oft bleibt auch unbeachtet, dass die Scheinleistungsänderung (Laständerung) durch die Schweißmaschine das Mehrfache (drei- bis fünffache) ihrer Nennleistung (Bemessungsleistung) bei 50 % Einschaltdauer ist oder bis zu 80 % ihrer Kurzschlussleistung betragen kann. Es sind daher Abhilfemaßnahmen erforderlich.**

Die Dauer eines Schweißpulses  $T$  beträgt 60 ms bis 600 ms und die Wiederholraten  $r$  liegen bei 10/min bis 150/min. Die Folgen daraus resultierender unzulässiger Spannungsänderungen und -schwankungen (Flicker) können sein:

- Betriebsverbot für die Anlage (Verstoß gegen Konformitätsforderungen),
- Einschränkungen in der Produktivität der Anlage,
- Qualitätsminderungen am Produkt (z. B. ungenügende Festigkeit der Schweißverbindung),
- kostenaufwändige Nachbesserungen bei den Stromversorgungsanlagen,
- nachträglich zu errichtende Kompensa-

tionsanlagen, deren Investitionskosten nicht geplant waren,

- störende Wirkungen von Abnehmeranlagen in vor-, neben- und unterlagerten Netzen,
- störende Beeinflussung von Informations- und Automatisierungsanlagen,
- Leuchtdichteschwankungen in Beleuchtungsanlagen (Flicker).

Öffentliche Netze und Industrienetze sind dabei unterschiedlich zu beurteilen. Die zulässige Störemission durch Spannungsänderungen im öffentlichen Netz wird durch die Referenzkurve (Bild 1) begrenzt. Hierbei gilt: Mittelspannung (MS):  $d_{\text{Grenz}} = 2 \%$ ; Niederspannung (NS):

$d_{\text{Grenz}} = 3 \%$  (bei  $r < 0,01 \text{ min}^{-1}$ : MS:  $d_{\text{max}} = 3 \%$ ; NS:  $d_{\text{max}} = 6 \%$ ).

Um im öffentlichen Niederspannungsnetz einen Gesamtflickerpegel  $P_{\text{st}} = 1$  nicht zu überschreiten, sind vom einzelnen Netzbenutzer folgende Werte einzuhalten: Kurzzeitflickerwert (10-min-Wert)  $P_{\text{st}} = 0,8$  und Langzeitflickerwert (120-min-Wert)  $P_{\text{lt}} = 0,5$ .

Im industriellen Stromversorgungssystem ist es zweckmäßig, sich für Verknüpfungspunkte (IPC – in-plant point of coupling) an o. g. Grenzwerten zu orientieren, jedoch unbedingt betriebliche Gegebenheiten und Erfordernisse bei planerischen Entscheidungen zu beachten.

### Die Berechnungsgrundlagen

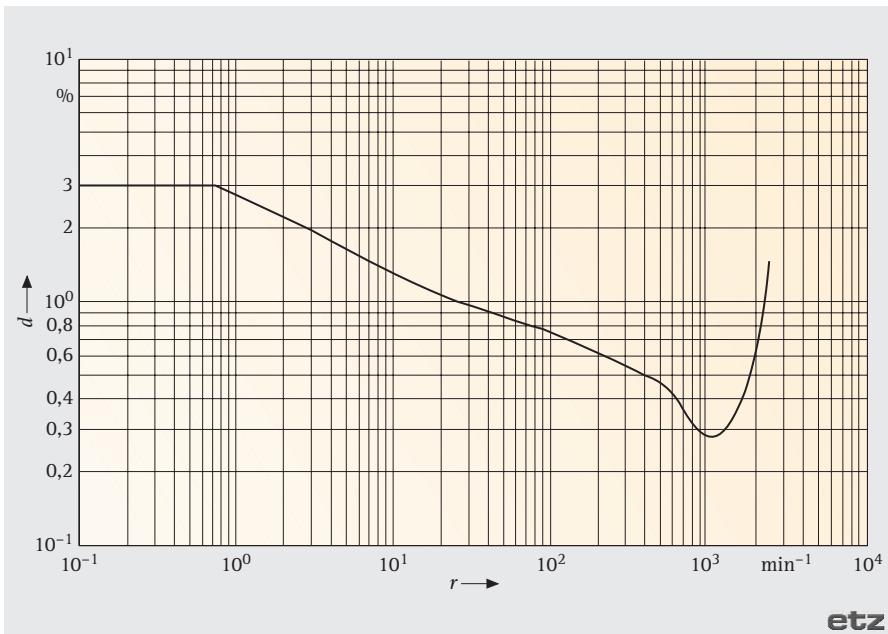
Der Betrag der Spannungsänderung  $\Delta U$ , der sich durch eine Scheinleistungsänderung  $\Delta S_A$  ergibt, wird in guter Näherung durch die Längsspannungsänderung beschrieben. Mit

$$\Delta S_A = \sqrt{\Delta P_A^2 + \Delta Q_A^2} \text{ und } \varphi_A = \arctan \frac{\Delta Q_A}{\Delta P_A}$$

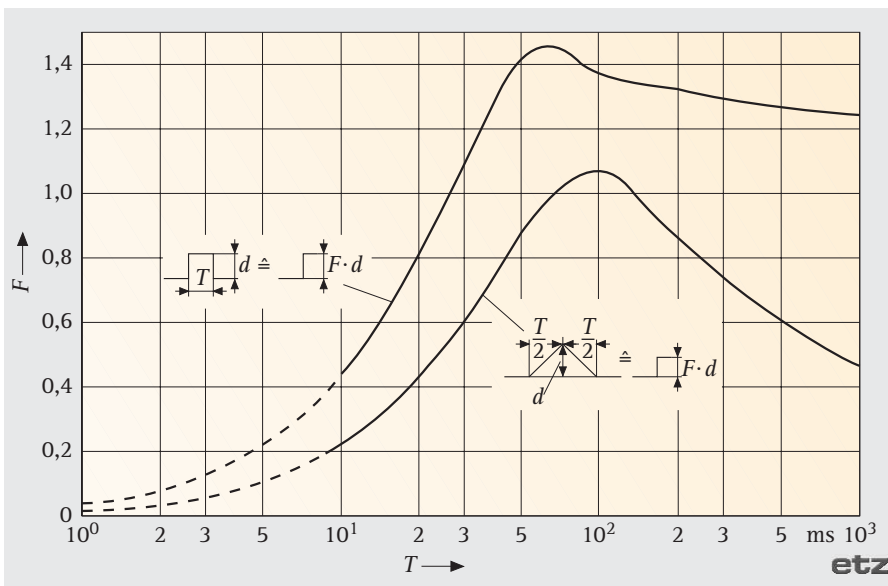
ergibt sich für die relative Spannungsänderung bei symmetrischer dreiphasiger Last:

$$d = \frac{\Delta U}{U} \cdot 100\% = \frac{\Delta S_A}{S_{\text{kv}}} \cos(\Psi_k - \varphi_A) \cdot 100\%,$$

mit  $S_{\text{kv}}$  minimale Kurzschlussleistung am



**Bild 1.** Referenzkurve  $d_{ref}(r)$  für  $P_{ref} = 1$  und regelmäßige rechteckförmige Spannungsänderungen [1]



**Bild 2.** Formfaktoren für Rechteckpulse [2]

Ort der Laständerung und  $\psi_k$  Impedanzwinkel der Kurzschlussstrombahn. Bei Einphasenlasten mit Anschluss an L1 und L2 für die Außenleiter-Neutralleiter-Spannungen gilt:

$$d_{L1-N} \approx \frac{\Delta S_A}{S_{kv}} \cdot \sqrt{3} \cdot \cos(\psi_k - \varphi_A + 30^\circ) \cdot 100\%$$

$$d_{L2-N} \approx \frac{\Delta S_A}{S_{kv}} \cdot \sqrt{3} \cdot \cos(\psi_k - \varphi_A - 30^\circ) \cdot 100\%$$

$$d_{L3-N} \approx 0.$$

Für rechteckförmige (äquidistante) Spannungsänderungen kann für den einzelnen Netzbenutzer bei bekannter Wiederholrate  $r$  die zulässige Span-

nungsänderung  $d_{zul}$  bestimmt werden.

$$\text{Mit } P = \frac{d_{Grenz}(r)}{d_{ref}(r)} \cdot 1 \text{ in p. u. erhält man}$$

$d_{zul}(r) \leq d_{Grenz}(r) = 0,8 \cdot d_{ref}(r)$  zur Einhaltung des Kurzzeitflickerwerts ( $P_{st} = 0,8$ ) und für den Langzeitflickerwert ( $P_{lt} = 0,5$ ) ergibt sich  $d_{zul}(r) \leq d_{Grenz}(r) = 0,5 \cdot d_{ref}(r)$ .

Wird die Referenzkurve nach Bild 1 ( $P_{ref} = 1$ ) im Bereich von  $r = 1 \text{ min}^{-1}$  bis  $r = 1000 \text{ min}^{-1}$  für rechteckförmige äquidistante Spannungsänderungen ( $F = 1$ ) näherungsweise approximiert (analytisches Verfahren), dann gilt:

$$P_{ref}^{3,2} = (d_{ref} \cdot F)^{3,2} \cdot \frac{r}{27} = 1. \text{ Daraus folgt}$$

$$P^{3,2} = (d \cdot F)^{3,2} \cdot \frac{r}{27} \text{ und somit}$$

$$P = 0,36 \cdot d \cdot F \cdot \sqrt[3,2]{r}, \text{ mit}$$

rel. Spannungsänderung  $d$  in % und Wiederholrate  $r$  in  $\text{min}^{-1}$ .

Der Formfaktor  $F$  kann für Rechteckpulse, wie sie z. B. durch Schweißmaschinen hervorgerufen werden, in Abhängigkeit von der Pulsdauer  $T$  aus Bild 2 entnommen werden. Wenn die Spannungsänderungen einzelner Flickerquellen  $i$  eine geringe Koinzidenzwahrscheinlichkeit aufweisen, gilt für die summarische Flickerwirkung:  $P_\Sigma = \sqrt[3,2]{\sum P_i^{3,2}}$ .

## Flickerstörungen im öffentlichen 20-kV-Netz durch eine ungeregelte Schweißanlage

Eine ungeregelte Pressschweißanlage (Drehstromanschluss) in einem firmeneigenen Niederspannungsnetz verursacht nach Inbetriebsetzung im öffentlichen Stromversorgungsnetz (20-kV-Netz) einen unzulässigen Langzeitflickerwert. Störende Leuchtdichteschwankungen (Flackern des Lichts) bei  $P_{st} > 1$  sind die Folge. Bild 3 zeigt das stark vereinfachte Netzschema mit den wesentlichen Netzdaten (20-kV-Netz) und Angaben zur Pressschweißmaschine (PSM). Die Flickerberechnung (analytisches Verfahren) führt zu folgendem Rechengang: Relative Spannungsänderung:

$$d = \frac{2,22}{143} \cos 24,5^\circ \cdot 100\% = 1,4\%.$$

Formfaktor (Bild 2):  $T = 240 \text{ ms} \rightarrow F = 1,3$ . Langzeitflicker:

$$P_{lt} = 0,36 \cdot 1,4 \cdot 1,3 \cdot \sqrt[3,2]{16} = 1,56.$$

Das Ergebnis  $d = 1,4\% < d_{Grenz} = 2\%$  ist zufrieden stellend, wohingegen die Bemerkbarkeitsgrenze für den Flicker mit  $P_{lt} = 1,56 > P_{lt, Grenz} = 0,5$  deutlich überschritten wird. Eine Herabsetzung des Flickerpegels durch eine Kompensationsanlage wird kostenaufwändigen Netzmaßnahmen (z. B. Erhöhung der Kurzschlussleistung  $S_k$ ) vorgezogen.

## Die Flickerkompensation

Durch zeitgleiches Einschalten eines Kompensationskondensators mit dem Beginn des Schweißpulses wird es im Idealfall möglich, die relative Spannungsänderung zu beseitigen. Der Kompensationsbedarf für  $d = 0$  beträgt:  $Q_c = \Delta P (\cos \psi_k + \tan \varphi_A) = 2,06 \text{ Mvar}$ . Allerdings ist zu

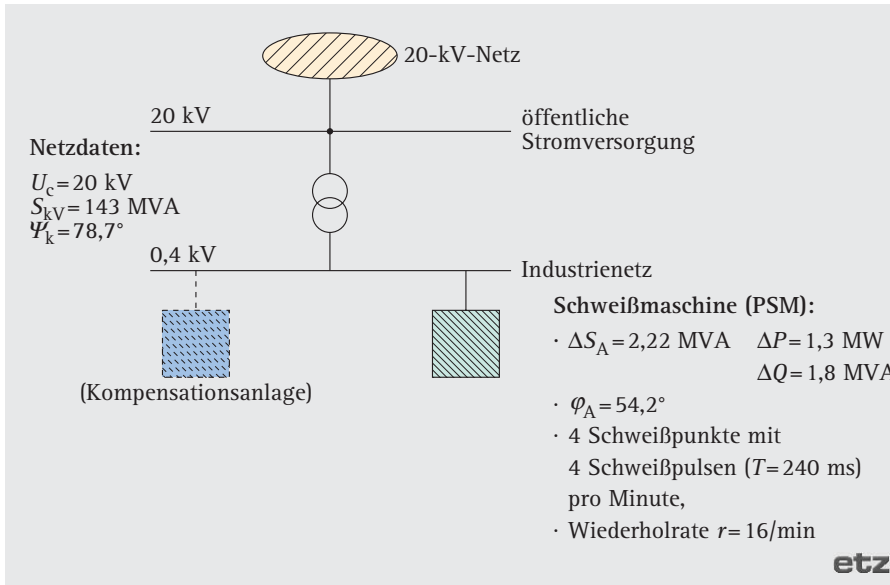


Bild 3. Vereinfachtes Netzschema

beachten, dass durch zeitversetztes Ein- und Ausschalten der Kompensationsanlage (Verzögerungszeit  $T_V$ ) zwei Störpulse entstehen. Die Wiederholrate  $r$  verdoppelt sich, die zulässige Störpulsbreite wird durch die Verzögerungszeit bestimmt. Mit Verkleinerung von  $T_V$  kann der Flicker auf das zulässige Maß verringert werden.

$P_{It} \leq P_{Grenz} = 0,5$  erfordert einen Formfaktor von

$$F \leq \frac{0,5}{0,36 \cdot 1,4 \cdot \sqrt[3]{32}} = 0,34,$$

der bei  $T_V = 7 \text{ ms}$  erreicht wird (vgl. Bild 2). Das wird mit einer thyristorgeschalteten Kompensationsanlage erreicht, die schnelles Schalten und hohe Schaltfrequenz realisiert. Die Erfassung der

Schaltzeitpunkte erfolgt über Strommessung oder eine direkte Ansteuerung mit einem externen Triggersignal (z. B. von der Schweißmaschine).

### Sicherung der Spannungsqualität bei einer Vielzahl un geregelter Schweißmaschinen

Die Produktionsverlagerung einer Schweißerei eines Automobilherstellers mit einer Vielzahl von Pressschweißmaschinen mit unterschiedlicher Leistung war mit einer Reduzierung der Kurzschlussleistung im 20-kV-Speisenetz auf ca. 60 % verbunden. Die Stromversorgung der Schweißerei geschieht über ein unternehmenseigenes 20-kV-Netz, das drei gleiche 525-V-Niederspannungsnetze mit einer Bemessungsleistung von

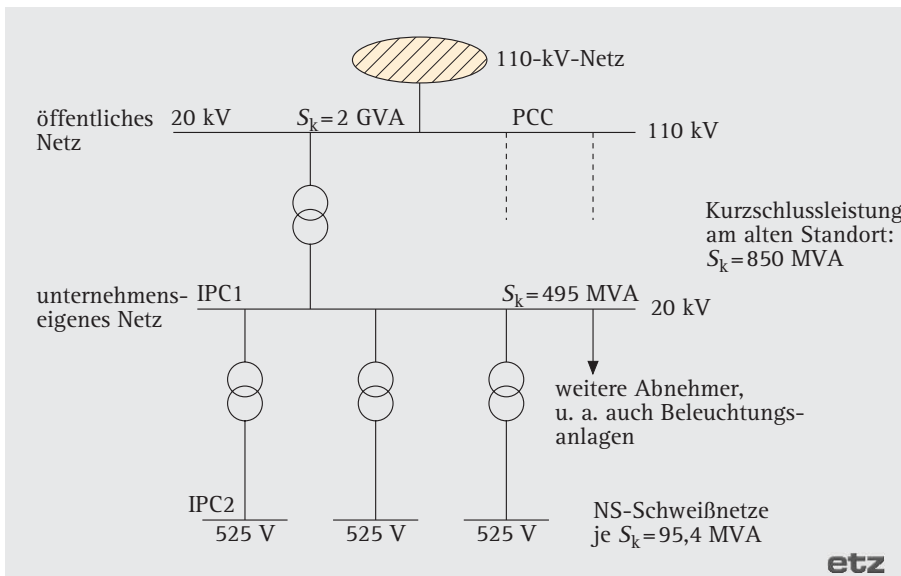


Bild 4. Vereinfachtes Netzschema zur Stromversorgung der Schweißnetze

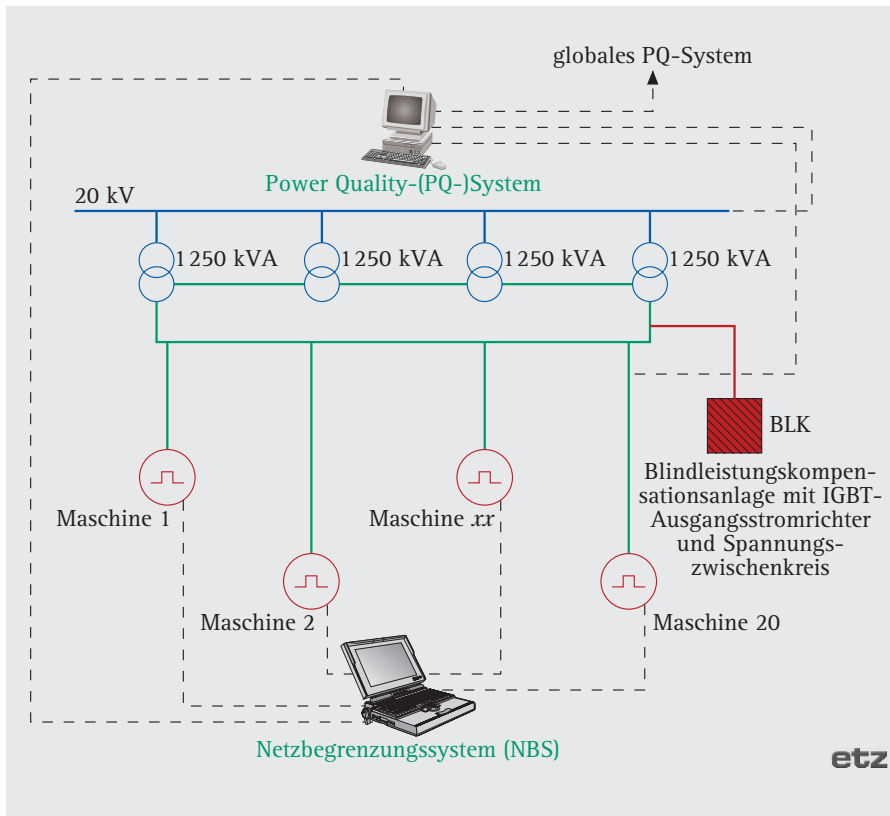
7,5 MVA speist, in denen ausschließlich unregulierte Schweißmaschinen (Drehstromanschluss) betrieben werden (Bild 4). Ein geeignetes Kompensationskonzept war auszuwählen und die erforderliche Anlage zu planen.

In jedem der drei Schweißnetze in Bild 4 werden zwei große Pressschweißmaschinen versorgt, die Spannungsänderungen bei hoher Schweißleistung bis 8 % verursachen können. Außerdem sind in allen Teilnetzen ca. 20 mittlere und kleinere Pressschweißanlagen vorhanden. Über das 20-kV-Netz werden auch noch weitere Abteilungen des Unternehmens eingespeist. Unter anderem sind an dieses Netz eine Vielzahl von Beleuchtungsanlagen angeschlossen.

Aus der Sicht der Sicherstellung der Spannungsqualität ergibt sich abweichend vom ersten Fallbeispiel folgendes Bild:

- Die Kopplung der unternehmenseigenen Stromversorgung mit dem öffentlichen Netz erfolgt 110-kV-seitig (PCC – point of common coupling). Hier sind die bereits genannten Forderungen ( $d \leq 2 \%$ ;  $P_{It} \leq 0,5$ ) zu garantieren, was ohne weiteres im vorliegenden Fall durch die hohe Kurzschlussleistung des 110-kV-Netzes gegeben ist.
- Für das unternehmenseigene 20-kV-Netz (IPC1) ist es ausreichend, die Spannungsänderungen auf 2 % zu begrenzen, um Störungen an Produktionsanlagen zu vermeiden. Hinsichtlich des Flickerpegels kann ein  $P_{It}$ -Wert von 1,5 p. u. toleriert werden, da die Bemerkbarkeitsgrenze bei Betrieb der vorhandenen Beleuchtungsanlagen (ausschließlich Leuchtstoffleuchten) in den unterlagerten NS-Netzen nicht überschritten wird.
- In den 525-V-Schweißnetzen selbst (IPC2) spielt die Einhaltung des Flickerpegels keine Rolle. Bedeutsam ist die Größe des zulässigen Spannungseinbruchs, damit bei unregulierten Schweißmaschinen eine damit verbundene Herabsetzung der Schweißleistung einzelner Schweißvorgänge nicht zu Qualitätseinbußen bei der Schweißverbindung führt.

Aus dieser Sicht wurde im vorliegenden Fall eine max. zulässige Spannungsabweichung von  $d = 6 \%$  ermittelt (d. h. 94 % der vereinbarten Versorgungsspannung werden eingehalten). Auf eine Einzelkompensation von Schweißmaschinen, selbst der größten, wurde verzichtet, da hiermit, wie das erste Fallbeispiel zeigt, keine Begrenzung der Spannungsänderung möglich ist.



**Bild 5.** Vereinfachte Systemstruktur mit Integration eines NBS in ein übergeordnetes Power-Quality-System

## Intelligentes Netzbegrenzungssystem

Ein intelligentes Netzbegrenzungssystem, das die Freigabe einer Schweißmaschine oder -kaskade vornimmt, stellt im Zusammenwirken mit einer hochdynamischen Blindleistungskompen-sationsanlage (IGBT-Ausgangsstromrichter mit Spannungs-zwischenkreis) zur teilweisen Reduzierung der Versorgungsspannungsän-

derung in jedem Niederspannungsnetz sicher, dass für jeden Schweißvorgang die Versorgungsspannung 94 % des vereinbarten Werts nicht unterschreitet. Die Größe der Kompensationsleistung wurde so gewählt, dass unter Ausnutzung des vorgegebenen Grenzwerts von  $d = -6\%$  max. Produktivität des Schweißkomplexes gegeben ist und somit keine unver-tretbaren produktioneinschränkenden Maßnahmen vom Netzbegrenzungssystem vorgenommen werden müssen (Bild 5).

Auf diese Weise wird im Vergleich zur Einzelkompensation von Schweißma-schinen eine Reduzierung der benötigten Kompensationsleistung auf ca. 25 % er-reicht und eine deutliche Investitionskosten-einsparung bei ausreichender Siche-rung der Produktivitätsforderungen erzielt.

Im Weiteren war die Flickersituation im 20-kV-Netz zu überprüfen. Hierzu wurde als Worst-case-Fall angenommen, dass durch den Betrieb der jeweils zwei größ-ten Schweißmaschinen in jedem NS-Teil-netz, die zeitversetzt arbeiten, im Zu-sammenwirken mit der Kompensations-anlage jedes Teilnetzes eine Spannungs-änderung von max. 6 % entsteht. Für die-sen Fall wurden den Berechnungen von  $P_{It}$  folgende Werte zugrunde gelegt:

- $T = 500$  ms ( $F = 1,3$  für rechteckförmige Pulse nach Bild 2),
- $d_{NS} = 6\%$ ,
- $r = 8$ .

Im Mittelspannungsnetz (IPC1) berechnet sich der Flickerwert resultierend aus der Überlagerung des Flickers der drei Teil-netze damit zu:

$$P_{It,IPC1} = 0,36 \cdot 1,36 \cdot 6 \cdot \frac{95,4}{495} \cdot \sqrt[3]{8} \cdot \sqrt[3]{3} = 1,5.$$

Mit einem Langzeitflickerpegel von  $P_{It} = 1,5$  geht von den vorhandenen Be-leuchtungsanlagen (Leuchtstoffleuchten) im Unternehmen keine störende Wirkung aus.

## Literatur

- [1] DIN EN 60868-0 (VDE 0846-0):1994-08 Flicker-meter – Teil 0: Beurteilung der Flickerstärke. Berlin · Offenbach: VDE VERLAG
- [2] Grundsätze für die Beurteilung von Netzrück-wirkungen. Verband der Elektrizitätswirtschaft – VDEW – e. V. (Hrsg.). Frankfurt: VDEW, 1997 (ISBN 3-8022-0311-9)

## Formelzeichen

$d$	relative Spannungsänderung $\Delta U/U$
$F$	Formfaktor
$P_{It}$	Langzeit-Flickerstärke
$P_{st}$	Kurzzeit-Flickerstärke
$\psi_k$	Impedanzwinkel der Kurzschluss-strombahn
$r$	Wiederholrate
$\Delta S_A$	Scheinleistungsänderung
$S_{kv}$	minimale Kurzschlussleistung am Ort der Laständerung
$T$	Schweißpulsdauer

## Firmenanschrift + Logo

Prof. Dr.-Ing. habil.  
**Dietrich Stade** (66), VDE,  
ist Consulting Engineer der  
H. Kleinknecht GmbH & Co. KG  
in Ilmenau.  
E-Mail: dietrich.stade@  
kleinknecht.de



Dr.-Ing. **Helge Schäfer** (42),  
VDE, ist Business Unit Manager  
der H. Kleinknecht  
GmbH & Co. KG in Ilmenau.  
E-Mail:  
helge.schaefer@kleinknecht.de



Dipl.-Ing. **Peter Ulrich** (40)  
ist Project Manager der  
H. Kleinknecht GmbH & Co. KG in  
Ilmenau.  
E-Mail: peter.ulrich@  
kleinknecht.de

