

# Konzeption eines präventiven Störlichtbogenschutzes

D. Brechtken, Trier

Eine zentrale Aufgabe innerhalb der Energieversorgung ist die Verteilung der elektrischen Energie. Schaltanlagen übernehmen diese Aufgabe und stellen somit innerhalb der Energieverteilung bedeutsame Knotenpunkte dar. Von allen auftretenden Störungen führt der Störlichtbogen wohl zu den schwerwiegendsten Betriebsstörungen. Dabei sind stromschwache Lichtbögen oft Auslöser stromstarker Störlichtbögen. Es wird ein Ansatz vorgestellt, der die Erkennung stromschwacher Lichtbögen innerhalb einer Phase erlaubt.

## 1 Warum Schutzkonzepte?

Entsprechend den hohen Anforderungen an die Funktionssicherheit von Schaltanlagen existieren umfangreiche Prüfvorschriften [1], die Gegenstand umfassender Erläuterungen [2] und regelmäßiger Fachbeiträge [z. B.: 3] sind.

Die grundsätzliche Funktions- und Betriebssicherheit fabrikneuer Anlagen wird durch Typprüfungen nachgewiesen. Während der Betriebsdauer von bis zu mehreren Jahrzehnten können Betriebszustände auftreten, die von denen der fabrikneuen Anlage deutlich abweichen. Beispiele dafür sind gelockerte Verbindungen oder Korrosionsvorgänge, die schlimmstenfalls zur Entstehung eines Störlichtbogens führen können.

Der Störlichtbogen gefährdet durch weggeschleuderte Umhüllungsteile bzw. durch heiße Gase Personen, die sich in der Nähe der Anlage befinden. Darüber hinaus sind benachbarte, vom ursächlichen Fehler nicht unmittelbar betroffene Anlagenteile gefährdet, wobei die Zerstörungen auch angrenzende Anlagen und Gebäudeteile mit erfassen können.

Je nach Komplexität des von der Anlage versorgten Prozesses können auch die Stillstandskosten einen erheblichen Anteil am Schadensumfang ausmachen.

Entsprechend der hohen Bedeutung dieser Fragestellung existieren herstellerseitige Schutzkonzepte, um Gefährdungspotentiale weitestgehend zu reduzieren. Die Wirksamkeit der angewendeten Schutzkonzepte kann im Rahmen von Störlichtbogenprüfungen nachgewiesen werden.

### Autor

Prof. Dr. Dirk Brechtken lehrt am Institut für Energieeffiziente Systeme des Fachbereichs Elektrotechnik der Fachhochschule Trier

## 2 Störlichtbogenschutzkonzepte

Die Auswirkungen eines Störlichtbogens werden von folgenden Kriterien bestimmt:

- Stromstärke,
- Brenndauer,
- Anlagenkonfiguration,
- verwendete Werkstoffe.

Plasmatemperaturen von über 10000 K sowie Druckbelastungen von bis zu mehreren MPa führen zu extremer Belastung der großflächigen Umhüllungsteile.

Dem Gefährdungspotential lässt sich auf zwei grundsätzliche Arten begegnen: Beim aktiven Störlichtbogenschutz wird versucht, die Möglichkeiten für das Auftreten eines Störlichtbogens weitestgehend zu vermeiden. Beim passiven Störlichtbogenschutz wird versucht, die Auswirkungen des Störlichtbogens zu begrenzen. Bild 1 stellt die Aktionsparameter des aktiven und passiven Störlichtbogenschutzes dar.

### 2.1 Aktivschutz

**Berührungsschutz.** Stellt im Sinne der Störlichtbogenvermeidung auch gleichzeitig eine aktive Maßnahme dar, da durch den Berührungsschutz das unbeabsichtigte Auslösen eines Störlichtbogens verhindert wird.

**Sequentielle Einschubverriegelungen.** Ermöglichen Einschalten des Leistungsschalters erst nach Verriegelung des Einschubs.

**In Isolierstoff eingebettete Kontakte.** Vermeiden ebenso wie isolierte Sammelschienen die Bildung einer leitfähigen Verbindung zwischen zwei Phasen.

**Führungsschienen.** Vermeiden die folgenschwere Deformation von Kontakten während des Einfahrorgangs.

**Schutzmaßnahmen gegen Kondensationsvorgänge.** Reduzieren ebenso wie vergrößerte Luft- und Kriechstrecken die Gefahr der Störlichtbogenentstehung.

**Temperaturüberwachung einzelner Kontaktstellen.** Ermöglicht die Früherkennung einer Überlastung der überwachten Kontaktstellen.

Zusammenfassend lässt sich mit Hilfe dieser Maßnahmen das Gefährdungspotential

### Aktivschutz

#### Vermeidung der Störlichtbogenentstehung

- Maßnahmen zum Berührungsschutz
- sequentielle Einschubverriegelungen
- in Isolierstoff eingebettete Kontakte
- Führungsschienen für Einschübe
- isolierte Sammelschienen
- Schutz vor Kondensation
- Vergrößerte Luft- und Kriechstrecken
- Überwachung einzelner Kontakttemperaturen
- ...

### Passivschutz

#### Begrenzung der Störlichtbogenauswirkungen

Begrenzung des Lichtbogens auf Entstehungsort

- direkte Abschaltung des Einspeiseleistungsschalters; mögliche Kriterien:
  - Strahlung
  - Druck
  - Geräusch
  - magnetisches Feld
  - Stromstärke/-anstieg
- Kurzschließer
- ...

### 1 Störlichtbogenschutzkonzepte im Vergleich

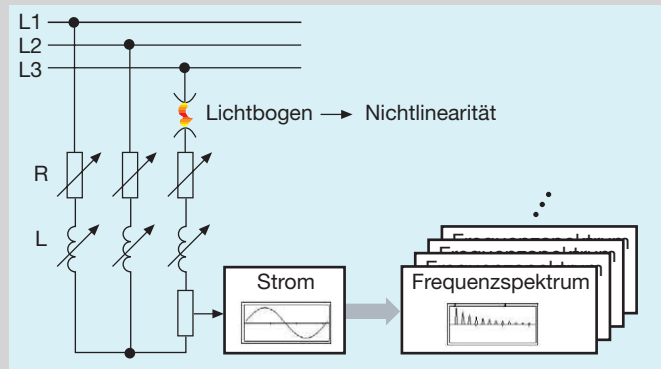
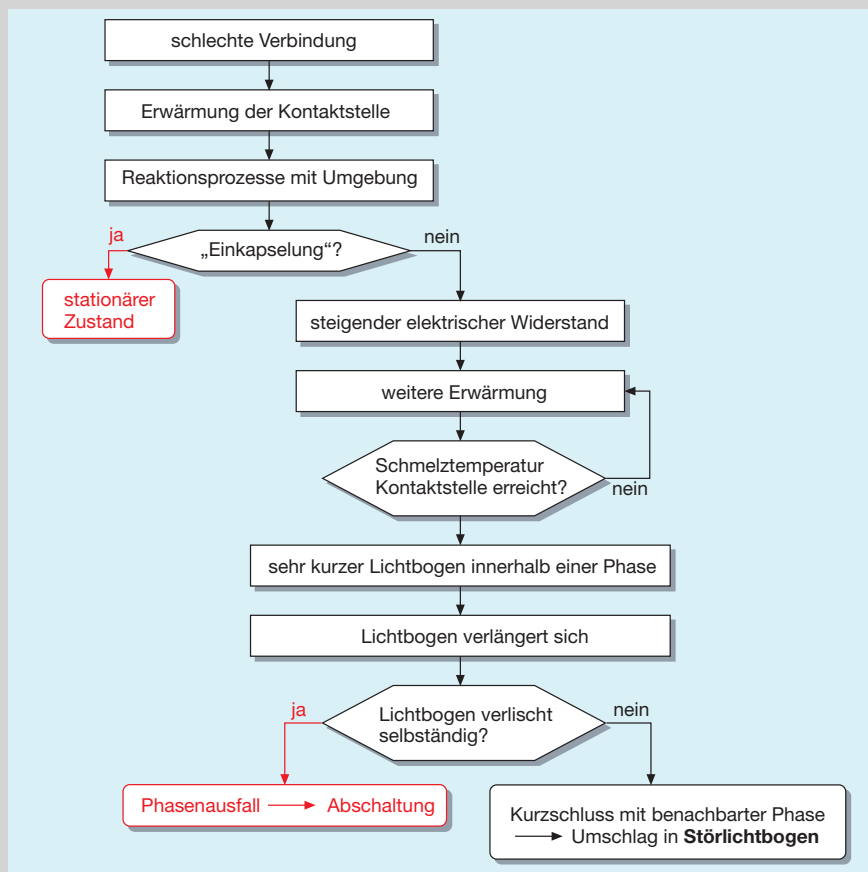
ausgewählter Fehlerquellen gezielt reduzieren. Nachteilig ist, dass die Maßnahmen nur punktuell auf einzelne mögliche Fehlerursachen wirken. Vollständige Sicherheit gegen das Entstehen eines Störlichtbogens ist damit nicht erreichbar.

### 2.2 Passivschutz

**Begrenzung des Störlichtbogens auf den Entstehungsort.** Sie wird durch gezielte Verwendung von Isolierstoffen innerhalb der Anlage möglich. Dadurch lässt sich die Anzahl eventueller Fußpunkte für einen Störlichtbogen begrenzen, was die Gefahr des Durchschweißens und damit des Übergreifens auf benachbarte Einschübe reduziert. Durch geeignete konstruktive Gestaltung der Anlage können in der Nähe befindliche Personen gegen austretende heiße Gase geschützt werden. Vorteilhaft ist, dass keinerlei Aktoren mit der Gefahr möglicher Fehlauflösungen verwendet werden. Nachteilig ist, dass die intensive Verwendung von Kunststoffen in der Regel zu einer Erhöhung der Brandlast führt.

**Direkte Abschaltung des Leistungsschalters.** Sie wird durch die Verwendung des beim Störlichtbogen entstehenden Strahlungsspektrums als Auslösekriterium realisiert. Dabei werden in die zu schützenden Anlagenteile optische Sensoren eingebracht, in die beim Störlichtbogen entstehendes Licht einkoppelt. Über Lichtwellenleiter sind diese Sensoren mit einer Auswerteeinheit verbunden, die nachfolgend dem Einspeiseschalter unverzögert den Ausschaltbefehl gibt. Vorteilhaft ist die Begrenzung der Störlichtbogenbrenndauer





2 Auswirkungen einer schlechten Kontaktverbindung

3 Wirkungsprinzip der Diagnostik

auf etwa die Eigenzeit des Leistungsschalters. Nachteilig ist, dass dieser Lösungsansatz umfangreiche Schädigungen zwar reduzieren, nicht aber unterbinden kann. Außerdem ist eine vollständige Überwachung aller Anlagenteile konstruktiv bedingt nur beschränkt möglich.

**Kurzschließer.** Er reduziert die Störlichtbogenbrenndauer auf wenige ms. Dabei wird bei einem auftretenden Störlichtbogen ein unmittelbar hinter dem Einspeiseschalter angeordneter Kurzschließer ausgelöst. Bis zum Ausschalten des Einspeiseschalters erfolgt der Energiefluss über diesen Kurzschließer. Die Energiezufuhr in die Fehlerstelle ist unterbunden. Vorteilhaft ist neben der schnellen Reaktionszeit die Erkennung auch stromschwacher Störlichtbögen. Nachteilig ist der mit dieser Lösung verbundene hohe Kostenaufwand. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass mit diesen Lösungen Personen- und

Anlagenschutz grundsätzlich realisierbar ist. Es handelt sich jedoch um einen reaktiven Schutz, der erst mit Ereignisbeginn ausgelöst wird. Zwangsläufig wird der Schadensumfang lediglich reduziert, nicht jedoch der Schaden grundsätzlich verhindert.

2.3 Erwartungen an weiterentwickelte Schutzkonzepte

Ausgeführte Anlagen weisen oftmals Elemente sowohl des Aktivschutzes als auch des Passivschutzes auf. Im direkten Vergleich der Schutzkonzepte erscheint die Vermeidung der Störlichtbogenentstehung als die zunächst verlockendste Variante. Die betriebliche Praxis zeigt jedoch, dass ein vollständiger Schutz kaum zu erreichen ist und einen hohen Aufwand erfordert. Kommt es im Laufe der Schaltanlagenlebensdauer zum Austausch einzelner Komponenten bzw. zu Erweiterungen, so ist das Schutzpotential einer fabrikneuen Anlage

kaum aufrecht zu halten. Demgegenüber ist die Begrenzung der Störlichtbogenauswirkungen stets reaktiv. Es können zwar auftretende Zerstörungen begrenzt werden, nachfolgende kostenintensive Wartungs- bzw. Reparaturaufwendungen werden jedoch lediglich im Umfang verringert [4]. Aus sicherheitstechnischen und ökonomischen Gründen ist ein Schutzkonzept wünschenswert, das die realistische Möglichkeit einer Lichtbogenentstehung akzeptiert, allerdings nicht erst dann reagiert, wenn ein stromstarker und zerstörungsintensiver Störlichtbogen entstanden ist. Ein derartiges Schutzkonzept, ein „präventiver Störlichtbogenschutz“, würde bereits frühzeitig, d. h. vor der Entstehung eines Störlichtbogens, auftretende Anzeichen für einen bevorstehenden Störlichtbogen diagnostizieren und daraufhin selektiv den vom Fehler betroffenen Anlagenteil abschalten.

3 Wirkungsprinzip des präventiven Störlichtbogenschutzes

Trotz der Vielfalt möglicher Fehlerursachen sind Störlichtbögen danach unterscheidbar, ob sie unmittelbar nach einem die Störung auslösenden Ereignis auftreten oder eine elektrische Vorgeschichte haben. Tritt bei Arbeiten an der geöffneten Tür eines Moduls ein Kurzschluss mit der Folge eines Störlichtbogens auf, so entsteht dieser unmittelbar nach dem Berühren des spannungsführenden Leiters. Maßnahmen gegen derartige Störfälle werden unter dem Aktivschutz zusammengefasst, mit dem das Gefährdungspotential identifizierter möglicher Fehlerquellen gezielt reduziert werden kann.

Ist dagegen eine Schraubverbindung mit einem unzureichenden Drehmoment angezogen oder haben andere Ursachen wie Vibrationen oder aggressive Gase eine ehemals gute elektrische Verbindung geschädigt, so wird ein physikalischer Prozess eingeleitet, der in einen Störlichtbogen münden kann. Fehlerhafte Verbindungen stellen für die Störlichtbogenentstehung eine wesentliche Fehlerursache dar [5]. Wie in Bild 2 dargestellt führt die schlechte Verbindung zu einer Reduzierung der wirksamen Kontaktfläche und damit zu einem Anstieg des ohmschen Widerstands. Infolgedessen erhöht sich die Verlustleistung, wodurch die Temperatur der Kontaktstelle ansteigt. Reaktionsprozesse mit den umgebenden Gasen können zu einer Einkapselung des Fehlers führen, was im günstigsten Fall zu einem stationären Zustand führen kann, in der Regel jedoch zu einer weiteren Erhöhung des ohmschen Widerstands. Dieser Prozess schreitet fort, bis es schließlich zum Aufschmelzen der Kontaktstelle kommt. Damit entsteht als Überbrückung des vormals geschlossenen

Kontakts ein kurzer Lichtbogen innerhalb einer Phase. Dieser Lichtbogen brennt zunächst unbemerkt weiter. Durch den Elektrodenabbrand kommt es zu einer Lichtbogenverlängerung, die

- entweder zu einer Lichtbogenlöschung führen kann mit der Folge, dass der schadhafte Abgang über den Phasenausfallschutz abgeschaltet wird,
- oder die nach einiger Zeit zu einem Kurzschluss mit einer benachbarten Phase führt und umschlägt in den stromstarken Störlichtbogen.

Spätestens das Aufschmelzen der Kontaktstelle stellt einen irreversiblen Vorgang dar, der mit vergleichsweise hoher Wahrscheinlichkeit zu einem Störlichtbogen führt.

Das Detektieren eines stromschwachen Lichtbogens stellt die Grundlage einer präventiven Störlichtbogendiagnostik dar. Wird der stromschwache Lichtbogen erkannt, verbleibt eine ausreichende Zeitdauer, um sogar noch selektiv den betroffenen Anlagenteil abzuschalten.

Der Ansatz eines präventiven Störlichtbogenschutzes basiert auf der nicht-linearen Strom-Spannungs-Charakteristik des einphasigen Lichtbogens. Infolge dieser Nichtlinearität entstehen Oberschwingungen, die mit einer entsprechenden Diagnostik erfasst und ausgewertet werden können.

Bild 3 zeigt den experimentellen Aufbau zum Nachweis dieses Zusammenhangs. Am dreiphasigen Netz ist ein ohmsch-induktiver Verbraucher angeschlossen. In die Zuleitung vom Verbraucher zur Phase L3 ist eine Elektrodenanordnung integriert, deren Elektroden sich axial verschieben lassen. Zunächst sind diese Elektroden zusammengefahren, so dass eine geschlossene Verbindung besteht. Während des Stromflusses wird – noch ohne Lichtbogen – das Frequenzspektrum analysiert.

Durch Auseinanderfahren der Elektroden unter Stromfluss entsteht ein kurzer Lichtbogen, dessen Länge weniger als 1 mm betragen kann. Im Stromnulldurchgang kommt es zu Wiederzündungen. Ein Spektrumanalyser zeichnet während der Lichtbogenbrenndauer die Frequenzspektren und ihre zeitliche Entwicklung auf.

Die verwendete Diagnostik ermöglicht es, auch Veränderungen einzelner Spektralanteile während der Brenndauer zu analysieren.

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen zeigte sich stets ein deutlicher Abstand zu

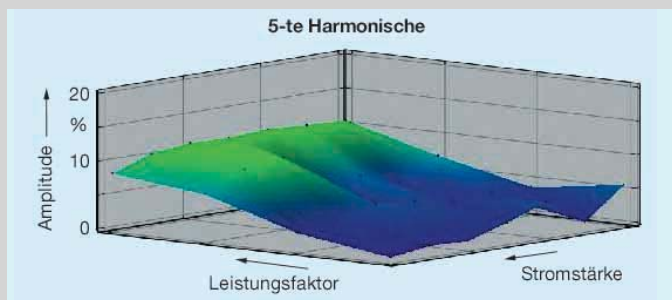
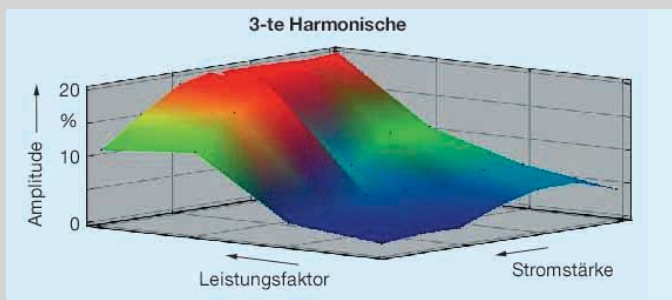
betriebsmäßig auftretenden Störungen (siehe auch [6]).

Voraussetzung für die Nutzbarkeit im Sinne der präventiven Diagnostik ist jedoch, dass das Oberschwingungsspektrum charakteristische Merkmale aufweist, die sich in Form eines „Fingerprints“ beschreiben lassen.

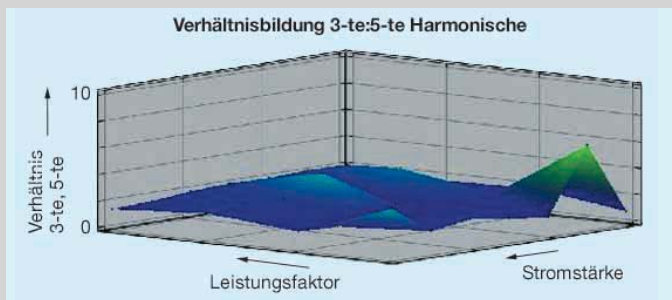
Intensive Parameterstudien wurden durchgeführt um zu zeigen, ob eine grundsätzliche Cha-

rakteristik im Sinne des „Fingerprints“ nachweisbar ist. Dabei wurden auch unterschiedliche Kontaktgeometrien und -werkstoffe einbezogen.

Die Variation von Stromstärke und Leistungsfaktor führt zu einem zweidimensionalen Parameterfeld. Wird die 3. Dimension zur Darstellung der Amplituden der Harmonischen verwendet, so ergibt sich für die 3.

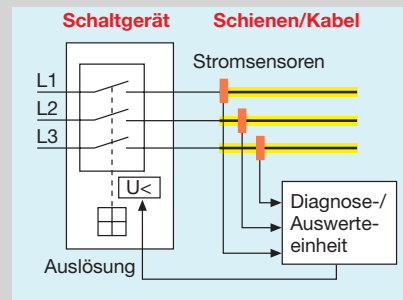


4 Auswirkungen der Variation von Stromstärke und Leistungsfaktor auf die Amplituden der 3. und 5. Harmonischen



5 Quotient aus 3. und 5. Harmonischer

6 Funktionsweise eines „präventiven Störlichtbogenschutzes“ ▶



bzw. 5. Harmonische die Abhängigkeit entsprechend Bild 4.

Es zeigen sich sowohl bei der 3. als auch der 5. Harmonischen abnehmende Amplituden mit zunehmender Stromstärke. Zurückführbar ist dies auf verbesserte Wiederzündbedingungen aufgrund thermischer Effekte. Der Effekt abnehmender Amplituden in den Harmonischen mit abnehmendem Leistungsfaktor ist durch die Wiederzündvorgänge nach dem Stromnulldurchgang maßgeblich beeinflusst.

Das grundsätzlich ähnliche Verhalten der 3. und 5. Harmonischen deutet auf eine Beziehung zwischen diesen beiden Größen hin. Zur Überprüfung, ob und inwieweit ein derartiger Zusammenhang besteht, wurden aus mehr als 500 Einzelmessungen die Quotienten aus 3. und 5. Harmonischer gebildet. Bild 5 bestätigt den erwarteten Zusammenhang. Es besteht offenbar unabhängig von Stromstärke und Leistungsfaktor innerhalb des untersuchten Parameterbereichs eine näherungsweise konstante Beziehung zwischen diesen beiden Werten. Dieser Quotient gem. Bild 5 ist als ein Baustein eines charakteristischen Fingerprints zu betrachten, anhand dessen ein beispielsweise infolge eines schadhaften Kontakts entstandener Lichtbogen in einer Phase erkannt werden kann, lange bevor er in einen Störlichtbogen umschlägt. In Verbindung mit einer Überwachung der Absolutwerte der Harmonischen ist damit die Nachweisbarkeit des einphasigen Lichtbogens als Vorbote eines bevorstehenden Störlichtbogens gegeben.

Wenngleich diese Untersuchungen überwiegend auf der Spannungsebene 400 V durchgeführt wurden, konnte im Rahmen der orientierenden Untersuchungen auf der Spannungsebene 20 kV gezeigt werden, dass auch bei höheren Spannungen diese Gesetzmäßigkeiten grundsätzlich gelten.

#### 4 Funktionsweise eines präventiven Störlichtbogenschutzsystems

Ein praktisch ausgeführtes Gerät würde die auftretenden Oberschwingungsspektren unter Berücksichtigung der betriebsmäßig vorhandenen Spektren daraufhin analysieren, inwieweit sie dem beschriebenen „Fingerprint“ entsprechen. Wird eine Übereinstimmung diagnostiziert, so brennt offenbar innerhalb einer Phase ein Lichtbogen, der – sofern er nicht abgeschaltet wird – in einen Störlichtbogen umschlagen kann. Diese Gefährdung würde durch eine Meldung an die übergeordnete Leittechnik oder durch eine direkte Ausschaltung des von der Störung betroffenen Abgangs unterbunden.

Bild 6 verdeutlicht die grundsätzliche Funktionsweise eines derartigen Schutzes. In diesem Ausführungsbeispiel wird in den drei Phasen das Stromsignal daraufhin überwacht, ob Oberschwingungsspektren auftreten, die typisch für einen schadhafte Kontakt bzw. den daraus resultierenden Lichtbogen innerhalb einer Phase sind.

Falls die Auswerteeinheit diese Übereinstimmung feststellt, so wird über den Unterspannungsauslöser das Schaltgerät ausgelöst. Wird dieses Gerät in allen Abgängen eingesetzt, so kann gezielt nur der schadhafte Abgang abgeschaltet werden.

Ein „präventiver Störlichtbogenschutz“ auf dieser Basis würde eine bedeutende Weiterentwicklung der gängigen Schutzkonzepte darstellen. Vorteilhaft dürfte außerdem sein, dass dieser Schutz auf die herstellerseitig bereits vorhandenen Schutzkonzepte zur Erhöhung des Schutzniveaus aufgesetzt werden könnte. Gelingt es, die im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen herausgear-

beiteten Identifizierungskriterien für den einphasigen Lichtbogen (unter klarer Abgrenzung von betriebsmäßig auftretenden Störungen) in ein industriell einsetzbares Schutzsystem zu integrieren, so wäre dies ein Innovationsprung bezüglich der Sicherheit der Mittel- und Niederspannungsschaltanlagen.

Die Entwicklung eines Schutzsystems erfordert jedoch auch die Beantwortung einiger noch offener Fragestellungen. Beispielsweise ist zu klären, inwieweit das Schutzsystem durch betriebsmäßig auftretende, über einen längeren Zeitraum brennende Lichtbögen (Induktionsöfen, Schweißgeräte), gestört wird.

Dennoch erscheint das Potential dieser Entwicklung vielversprechend. Der damit verbundene Innovationsprung wäre vergleichsweise einfach in am Markt etablierte Systeme integrierbar. Eine Aufgabe bis dahin verwendeter Schutzkonzepte wäre nicht erforderlich.

#### Literatur

- [1] DIN VDE 0660 Teil 500: Niederspannungsschaltgerätekombinationen – Teil 1: Typgeprüfte und partiell typgeprüfte Kombinationen (EN 60439-1: 1999), August 2000.
- [2] Zentgraf, L.: Niederspannungsschaltgerätekombinationen. Erläuterungen zu DIN EN 60439-1 (DIN VDE 0660 Teil 500): 1994-04. 2. Auflage. Berlin, Offenbach: VDE-Verlag 1997.
- [3] Just, K.: Sicherheit durch Typprüfung. Elektropraktiker Berlin. 55(2001)8, S. 642-643.
- [4] Brechtken, D.: Präventivschutz als Weiterentwicklung des aktiven und passiven Störlichtbogenschutzes. VDE-Fachtagung für Niederspannungsschaltanlagen und -gerätekombinationen, Leipzig, 2001.
- [5] Schau, H.: Störlichtbogenschutz/-festigkeit und deren Nachrüstung bei NS-Schaltanlagen. VDE-Fachtagung für Niederspannungsschaltanlagen und -Gerätekombinationen, Mannheim, 1999.
- [6] Technischer Bericht 1-280: Harmonische in Nieder- und Mittelspannungsnetzen. Forschungsgemeinschaft für Hochspannungs- und Hochstromtechnik, Mannheim, 1994. ■