

Schau, Holger :

Schutz vor Störlichtbögen – neue Entwicklungen

Zuerst erschienen in:

10 Jahre NH/HH-Recycling e.V. : 2. Sicherheitstag, 8. Juni 2005, in Ilmenau ; [II. Workshop Elektrische Sicherungen]. - Ilmenau. - 2005, S. 68-75

SCHUTZ VOR STÖRLICHTBÖGEN – NEUE ENTWICKLUNGEN

Holger Schau

Technische Universität Ilmenau

1 Einführung

Bei Kurzschlüssen treten im allgemeinen Störlichtbögen auf; es handelt sich um Lichtbogenkurzschlüsse. Die fehlerhafte Verbindung zwischen den Anlageteilen unterschiedlichen Potentials wird durch Lichtbögen gebildet. Diese Störlichtbögen besitzen eine ganze Reihe von Besonderheiten und stellen spezielle Anforderungen an ihre technische Beherrschung.

Der elektrische Lichtbogen ist eine enorme Energiequelle, die insbesondere Wärme- und Strahlungsenergie sehr hoher Intensität an die Umgebung abgibt. Im Zusammenhang mit seinem Auftreten als Störlichtbogen bei Kurzschlüssen in elektrischen Anlagen gehen deshalb sehr große Zerstörungswirkungen und Personengefährdungen von ihm aus [1]. Dabei ist zwischen direkter und indirekter Exposition zu unterscheiden.

Der Störlichtbogen ist deshalb ein sehr großer Risikofaktor für Anlagen und Personen. Im Niederspannungsbereich besteht darüber hinaus ein Einfluss auf die Funktion der Schutzeinrichtungen, der daraus resultiert, dass die Fehlerstellenimpedanzen, die durch die Lichtbögen am Fehlerort gebildet werden, eine begrenzende Wirkung auf die Kurzschlussströme besitzen [2][3][4].

Der Schutz vor Störlichtbögen stellt heute einen zentralen Aspekt in der Gestaltung, Planung und im Betrieb elektrischer Anlagen dar; die Notwendigkeit des Lichtbogenschutzes ist unbestritten. Anlagenkonzeption und -entwicklung erfolgen unter der Zielsetzung eines Schutzes vor Störlichtbögen. Es gibt Prüfvorschriften zum Nachweis der Lichtbogenfestigkeit und -sicherheit von Schaltanlagen; seit 1997 ist die Vorschrift zur Prüfung von Niederspannungs-Schaltanlagen gültig. Es hat sich ein hoher Sicherheitsstandard herausgebildet. Mit zusätzlichen Schutzeinrichtungen zur Lichtbogenüberwachung und -löschung sind deutliche Fortschritte erreichbar geworden [5]. Dennoch ist das Problem nicht generell gelöst. Es gibt eine Vielzahl von Ansatzpunkten und Teillösungen. Ein moderner Lichtbogenschutz basiert allerdings auf mehreren Säulen. Ein Schutzkonzept sollte aufeinander abgestimmte Maßnahmen nach Erfordernis und speziellem Schutzziel des jeweiligen Anwendungsfalles umfassen.

Besondere Bedeutung besitzt der Lichtbogenschutz im Niederspannungsbereich. Die Aufstellung von Niederspannungsanlagen erfolgt nicht nur in separaten Räumen oder abgeschlossenen Bereichen sondern oftmals auch an allgemein zugänglichen Orten. Im Kurzschlussfall können in den Niederspannungsanlagen bei hohen Kurzschlussströmen und -leistungen extrem große Energiemengen umgesetzt werden [6]. Außerdem werden gerade im Niederspannungsbereich häufig Arbeiten in der Nähe spannungsführender Teile oder Arbeiten unter Spannung ausgeführt, wodurch besondere Bedingungen hinsichtlich der Lichtbogenexposition und der Möglichkeiten der Fehlereinleitung bestehen. Die Frage des

Lichtbogenschutzes im Niederspannungsbereich wird deshalb nachfolgend vorrangig betrachtet.

Der Kurzschlusschutz ist ein wichtiger Bestandteil des Lichtbogenschutzes. Die Kurzschlusschutzeinrichtungen müssen nach den Erfordernissen des Lichtbogenschutzes ausgewählt, eingestellt und bemessen werden. Das trifft insbesondere auch auf die Sicherungen in Niederspannungsanlagen zu [7].

Nachfolgend stehen die prinzipiellen Möglichkeiten des Lichtbogenschutzes und ihre Verankerungen in neuen Schutzkonzepten im Fokus. In den Schutzkonzepten wird die Verbindung des Netz- und Kurzschlusschutzes mit speziellen Anlagenschutzaspekten angestrebt. Maßnahmen des konstruktiven Lichtbogenschutzes werden mit dem primären Netzschutz und gegebenenfalls mit Sekundärschutzmaßnahmen kombiniert. Bewertungskriterien sowie Lösungen und Ansatzpunkte für technische Weiterentwicklungen werden aufgezeigt.

2 Grundsätze, Prinzipien und Maßnahmen des Lichtbogenschutzes

Die oberste Zielstellung für den Lichtbogenschutz in elektrischen Anlagen besteht in der Verhinderung der Entstehung von Störlichtbögen.

Reduzierung der Entstehungswahrscheinlichkeit. Ein aktiver Lichtbogenschutz ist generell darauf zu fokussieren, die Wahrscheinlichkeit dafür zu reduzieren bzw. zu minimieren, dass Störlichtbögen anlagen- oder personenbedingt entstehen können. Wirkungsvolle Beiträge lassen sich prinzipiell erreichen, indem

- bei geeigneter konstruktiver Gestaltung (Fehlhandlungssicherheit, ausreichende, sichere Abstände, Isolierungen)
- auf den Einsatz von Komponenten und Gerätetechnik mit hoher Fertigungsqualität und die Verwendung von beanspruchungsgerechten Materialien geachtet wird und
- während des Betriebes regelmäßige Inspektionen und eine zyklische, vorbeugende und zustandsbezogene Wartung und Instandhaltung der Betriebsmittel und Anlagen vorgenommen werden.

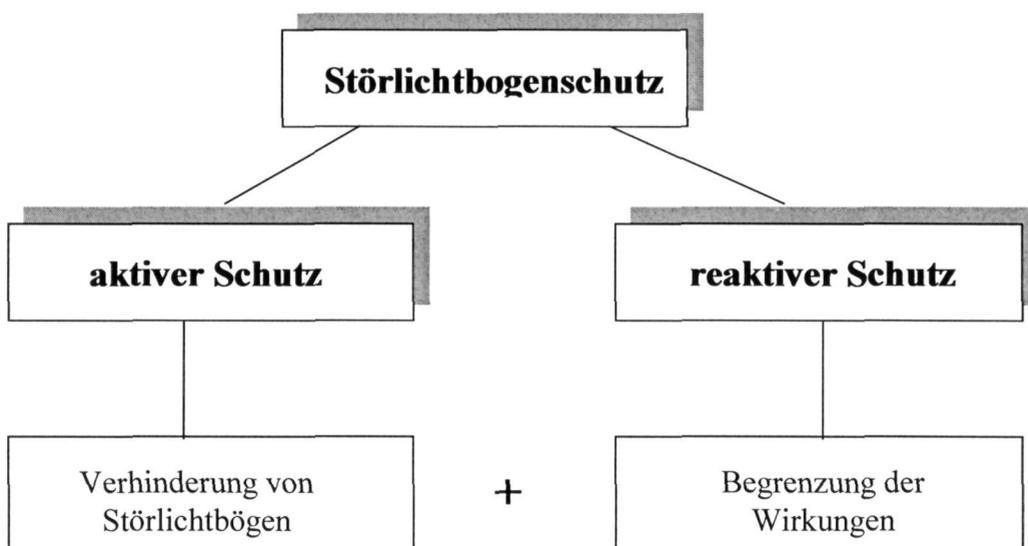


Bild 1: Prinzipielle Lichtbogenschutzmaßnahmen

Grundsätzlich ist auch ein präventiver Lichtbogenschutz denkbar, der auf eine Erkennung sich anbahnender Fehler im Vorfeld der Störlichtbogenentstehung orientiert ist. In Mittelspannungsanlagen oder Hochspannungsanlagen (110 kV) liegen oftmals Erdschlüsse als

stromschwache Vorphasen für Lichtbogenkurzschlüsse vor, die zur „Vorfeldererkennung“ genutzt werden können. In Niederspannungsnetzen ist infolge der fast immer angewendeten unmittelbaren Sternpunktterdung allerdings auch der einpolige Fehler schon ein Lichtbogenkurzschluss. Andere Kriterien oder Merkmale von Vorphasen sind bisher nicht zu verwertbaren Anregekriterien spezieller Schutzeinrichtungen gefunden worden. Auch eigene Untersuchungen, z.B. zur Nutzung elektrischer Kenngrößen des Netzes bzw. Stromkreises und des Körperschalls konnten hier noch keine anwendbaren Lösungen erbringen.

Generell sind allerdings Möglichkeiten durch ein entsprechendes Anlagenmonitoring im Zuge des Anlagenbetriebes gegeben, wie beispielsweise durch die Thermovision bzw. Thermografie von Anlageteilen und Verbindungs- bzw. Kontaktstellen. Die Nutzung von permanentem oder gezieltem, regelmäßigem Anlagenmonitoring zum präventiven Schutz stellt somit eine Maßnahme des aktiven Lichtbogenschutzes dar.

Komplett eingebaute Schutzgeräte oder spezifische Sensorik, die der prophylaktischen Anlagenüberwachung bzw. Diagnostik dienen, sind im NS-Bereich noch nicht im Angebot; hier liegt allerdings ein Ansatzpunkt für künftige Entwicklungen. Denkbar in diesem Zusammenhang ist eine Anlagen-Ausrüstung mit unterschiedlicher Sensorik (zur Erfassung von TE-Impulsen, zur Isolationswiderstands-, Kontaktwiderstands- bzw. Temperaturmessung, zur Messung der Anlageninnentemperatur etc.) und deren Einbeziehung in die Schutz- und Leittechnik, die auch im NS-Bereich Einzug halten wird [8].

Begrenzung von Störlichtbogenwirkungen. Da sich Lichtbogenkurzschlüsse praktisch nicht vollständig verhindern lassen, sind weitere Maßnahmen des Lichtbogenschutzes erforderlich. Als Gegenstück zu dem aktiven Schutz der Verhinderung ist dies ein passiver Schutz oder besser: ein reaktiver Schutz, da er auf den entstandenen Störlichtbogen reagiert (Bild 1). Ziel dieses zusätzlich erforderlichen Schutzes ist es, die Störlichtbogenwirkungen auf ein ungefährliches Maß zu begrenzen.

Zur Reduzierung der Lichtbogenwirkungen bestehen Möglichkeiten einer räumlichen sowie einer zeitlichen Begrenzung (Bild 2).

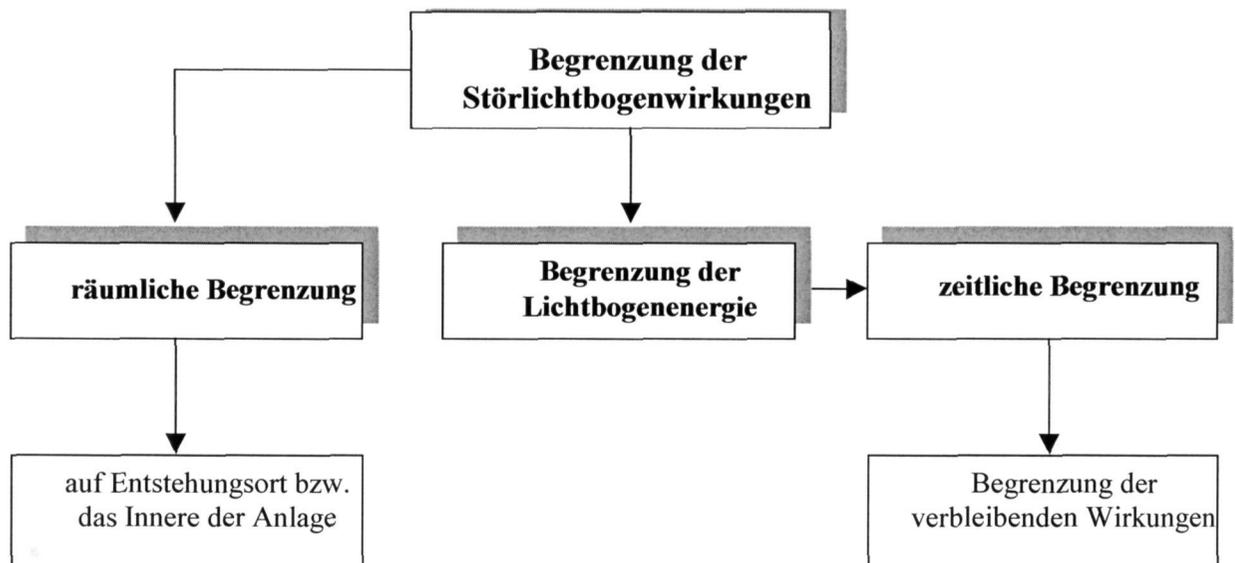


Bild 2: Maßnahmen der Lichtbogenbegrenzung

Das Prinzip der räumlichen Begrenzung bedeutet, dass die Lichtbogenauswirkungen auf den Entstehungsort bzw. –bereich oder das Innere der Schaltanlage begrenzt bleiben; Wirkungen außerhalb der Anlage sind verhindert bzw. auf ein ungefährliches Maß begrenzt. Der Nachweis dafür wird in Form von Prüfungen erbracht. Durch Lichtbogenprüfungen wird bedingter Personenschutz nachgewiesen, da eine geschlossene Anlage vorausgesetzt wird.

Eine generelle Reduzierung der Lichtbogenwirkungen lässt sich nur durch Begrenzung der Lichtbogenarbeit bzw. –energie erreichen [5][6], die während eines Lichtbogenkurzschlusses umgesetzt wird:

$$W_{LB} = \int_0^{t_k} p dt = \int_0^{t_k} \sum_{i=1}^n u_{B_i} i_{B_i} dt = P_{LB} \cdot t_k$$

Es sind folglich die Gesamtlichtbogenwirkleistung P_{LB} und die Fehlerdauer t_k zu limitieren. Während die Lichtbogenleistung von den Lichtbogenspannungen u_B und –strömen i_B und damit stark von der Anlagenkonstruktion und den elektrischen Stromkreis- bzw. Netzparametern abhängt und nur durch konstruktive Maßnahmen beeinflussbar ist, kommt der Begrenzung der Fehlerdauer hier die dominierende Bedeutung zu. Die zeitliche Begrenzung der Lichtbogenwirkungen wird durch den Kurzschlusschutz (schnelles, selektives Ausschalten; gesteuerte Selektivität [9]) oder einen Sekundärschutz (spezielle Störlichtbogensensoren und –detektoren, Lichtbogenwächter sowie schnelle Störlichtbogenlöschung, Schnellkurzschließer [10]) realisiert.

Anlagenschutz und Anlagenfunktionsschutz. Im Hinblick auf die Schutzziele für die Anlage wird heute in zwei Stufen unterschieden: in den Anlagenschutz und den Anlagenfunktionsschutz.. Anlagenschutz wird in unterschiedlichen Graden durch Maßnahmen der Entstehungsverhinderung, der räumlichen Begrenzung und der Ausschaltung der Störlichtbögen durch den konventionellen Kurzschlusschutz realisiert. Anlagenfunktionsschutz ist die höchste Stufe und reflektiert auf die vollständige Erhaltung der Funktion aller Anlagenteile und Betriebsmittel. Ein Austauschen von Anlagenteilen, -komponenten und Betriebsmitteln nach einem Fehler ist im allgemeinen nicht erforderlich. Nach Ausschaltung des Fehlers und Beseitigung der Störungsursache kann die Anlage sofort wieder betriebsbereit gemacht werden. Es sind nur Säuberungsarbeiten und die Kontrolle der wiederhergestellten Isolationsfähigkeit vor dem Wiedereinschalten erforderlich [5][11]. Die Realisierung dieses Schutzanspruches erfordert im allgemeinen kürzeste Zeiten für die Löschung der Störlichtbögen.

Lichtbogenenergie als Maß des Grades des Lichtbogenschutzes. Für die Einschätzung und Beurteilung des Gefährdungspotentials sind eindeutige Kriterien, Kenn- und Grenzwerte erforderlich. Die Lichtbogenenergie bzw. –arbeit ist die physikalische Größe, die das Maß der Lichtbogenwirkungen insgesamt charakterisiert [6].

In gezielten Versuchsreihen wurde an einer typgeprüften Kombination aus zwei Schaltfeldern üblicher Ausstattung (mit Funktionsraumtrennung und Feldteilung) der Zusammenhang zwischen der Lichtbogenenergie und dem Zerstörungsgrad der Anlage statistisch gesichert und reproduzierbar nachgewiesen [5][6]. Im Ergebnis lassen sich die Lichtbogenschutzziele wie folgt quantifizieren:

- Personenschutz besteht für $W_{LB} \leq 250 \text{ kJ}$
- Anlagenschutz als Anlagenfunktionsschutz besteht für $W_{LB} \leq 100 \text{ kJ}$.

Es handelt sich dabei um bedingten Personenschutz, da die Anlage als geschlossen vorausgesetzt ist. Auf Grundlage dieser Grenzwerte kann das an den betreffenden Anwendungsfall angepasste Schutzkonzept entwickelt werden.

3 Kurzschlussselektivschutz

Primärschutz. Die Dauer eines Kurzschlusses (und damit die Lichtbogenzeit) wird im allgemeinen durch den Selektivschutz des Netzes bestimmt [9]. Der konventionelle Kurzschlusschutz ist deshalb - neben den konstruktiven Maßnahmen - als Primärschutz anzusehen.

Bei der Auswahl und Einstellung der Schutzeinrichtungen bzw. bei der Ermittlung der Ausschaltzeit muss allerdings beachtet werden, dass Störlichtbögen als Fehlerstellenimpedanzen Z_F durch ihre nichtlineare Resistanz $Z_F = r_B$ eine signifikante Begrenzungswirkung auf den „metallischen“ bzw. prospektiven Kurzschlussstrom I''_{k3P} ausüben. Der üblicherweise ermittelte Rechenwert für I''_{k3P} (unter der Annahme $Z_F = 0$) kann deutlich unterschritten werden, so dass die realen Fehlerströme erheblich kleinere Werte annehmen. Verringerungen auf 40 ... 70 % sind keine Ausnahme wie Tabelle 1 zeigt [2][3][7].

Tafel 1: Strombegrenzungsfaktoren für Niederspannungsnetze

Fehlerort	Strombegrenzungsfaktor (Bereich)
Hauptschaltanlage	0,39 ... 0,72
Hauptverteilungen	0,44 ... 0,62
Unterverteilungen	0,45 ... 0,80
Hausanschlusskästen	0,65 ... 0,90
Kabel	0,60
Mittelspannungsanlage	0,95 ... 0,99

Erfolgt die Schutzeinstellung auf der Basis des „metallischen“ Kurzschlussstromes I''_{k3P} , dann muss im Falle des Lichtbogenkurzschlusses mit einer verlängerten Existenzzeit des Fehlers, einem nichtselektiven Ausschalten oder – im Extremfall – einem „Unterlaufen“ des Kurzschlussschutzes gerechnet werden, so dass große Anlagenschädigungen zu befürchten sind.

Jedoch auch bei Berücksichtigung möglicher starker Strombegrenzungen sind der Realisierung kleiner Lichtbogenzeiten praktisch Grenzen gesetzt, insbesondere im Zusammenhang mit den Selektivitätserfordernissen und/oder den Betriebsstromverhältnissen. Im Bereich der industriellen Versorgung können Betriebsströme, die durch Anlauf- oder Wiederhochlaufströme großer Antriebe oder Motorgruppen hervorgerufen werden, durchaus im bzw. in der Nähe des Fehlerstrombereichs liegen. Im Bereich der Schwerpunktstationen und Hauptschaltanlagen leistungsstarker NS-Netze mit hohen Kurzschlussleistungen (und damit auch Lichtbogenleistungen) sind bei normaler Strom-Zeit-Selektivität Ausschaltzeiten von 300 ms und mehr notwendig. Dies gilt grundsätzlich auch für andere Netzknotenpunkte [2]. Lediglich mit der gesteuerten Selektivität sind kleinere Fehlerzeiten realisierbar; diese liegen bei ca. 70 ... 100 ms [9].

Kurzschlusschutz durch Sicherungen. Beim Kurzschlusschutz durch Sicherungen besteht ebenfalls grundsätzlich das Problem der Strombegrenzungswirkung, die bei der Wahl der Bemessungsstromstärke berücksichtigt werden muss. Anderenfalls kann sich die Ausschaltzeit erheblich bzw. undefiniert verlängern [2][7]. Es ist u. U. eine Verzigfachung der Ausschaltzeit zu befürchten. Doch selbst unter Beachtung dieser Problematik kann die tatsächliche Ausschaltzeit der Sicherung unter Umständen nur ungenau vorausbestimmt werden. Der Schaltlichtbogen ist mit den Störlichtbögen in Reihe geschaltet und unterliegt gegebenenfalls nicht bekannten Wechselwirkungen. Dadurch kann insbesondere im Bereich des strombegrenzenden Ausschaltens die Ausschaltzeit in nicht bestimmbarer Weise verändert werden; das strombegrenzende Ausschalten kann generell in Frage gestellt sein. Problemfälle ergeben sich insbesondere auch bei kleinen Verhältnissen des Fehlerstromes zum Sicherungsnennstrom.

Zulässige Kurzschlusszeiten. Mit den Grenzwerten für die Lichtbogenenergie sind die zulässigen Ausschaltzeiten des Schutzes ermittelbar. Für die Lichtbogenenergie gilt

$$W_{LB} = k_P \cdot S_k'' \cdot t_k \quad .$$

Dabei ist S_k die Kurzschlussleistung des Netzes am Fehlerort. Mit den Grenzwerten für die Lichtbogenenergie W_{LB} leitet sich daraus die zulässige Dauer für den Kurzschluss ab

$$t_{k\text{ zul}} = \frac{W_{LB}}{k_p \cdot S_k}$$

Mit dem theoretischen Maximalwert $k_{p\text{ max}}$ für die bezogene Lichtbogenleistung

$$k_{p\text{ max}} = \frac{0,29}{(R/X)^{0,17}}$$

ergibt sich als „worst case“-Betrachtung für die zulässige Kurzschlussdauer

$$t_{k\text{ zul}} = \frac{W_{LB\text{ zul}} (R/X)^{0,17}}{0,29 \cdot S_k}$$

Das Verhältnis R/X des Kurzschlussstromkreises wird hauptsächlich durch den Einspeisetransformator und die Länge der Leitungen bis zum Fehlerort bestimmt [5].

Bild 16 gibt einen Überblick über die Kurzschlussstrombereiche, in denen sich mit unterschiedlichen Primärschutzeinrichtungen der Anlagenfunktionsschutz für NS-Anlagen erreichen lässt.

4 Sekundärschutz – Spezielle Lichtbogenschutzeinrichtungen

Lassen sich die zulässigen Kurzschlusszeiten durch den Primärschutz nicht realisieren, sind Sekundärschutzmaßnahmen notwendig.

Zu diesem Sekundärschutz sind zunächst die so genannten „Lichtbogenwächter“ zu zählen, die eine separate Erfassung von Störlichtbögen, zum Teil auch auf der Basis nichtelektrischer Erkennungskriterien, vornehmen und für eine schnelle, meist unverzögerte Ausschaltung sorgen. Bei kleinen Eigenzeiten der Sensorik und der Signalverarbeitung lassen sich hierbei die Fehlerzeiten auf Werte begrenzen, die nur unwesentlich über den Schaltgeräteeigenzeiten bzw. Schnellauslösezeiten liegen [12][13].

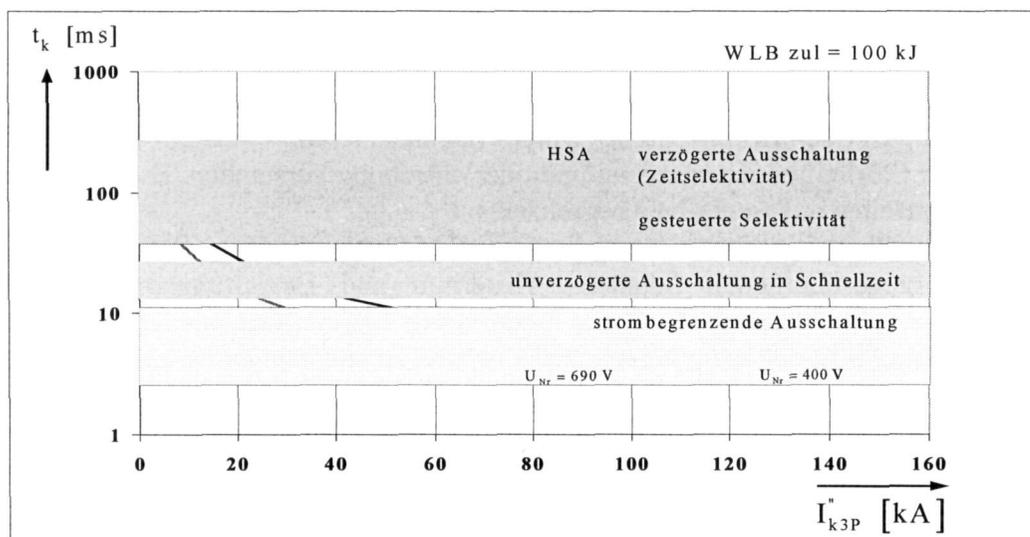


Bild 16: Erreichbarkeit des Anlagenfunktionsschutzes durch den Primärschutz

Die Problematik solcher Systeme besteht einmal in der Fehlauflösesicherheit, zum anderen in den Zeitforderungen und Kostenaufwendungen. Forderungen nach hoher Empfindlichkeit und schneller Funktionszeit sowie nach Selektionssicherheit gegenüber Störgrößen sind gegenläufig. Fehlauflösungen werden in vielen Fällen berechtigterweise eben so wenig

toleriert wie unzulässig lange verzögerte Fehlerrückmeldungen. Sie sind allerdings im Hinblick auf die u. U. bestehenden Zeitforderungen die einzige tatsächliche Alternative auch bei Anlagennachrüstungen, insbesondere in sensiblen Versorgungsbereichen. Als Kriterien zur separaten Störlichtbogenerfassung sind elektrische Parameter, die optischen Wirkungen, elektromagnetische Strahlung, Magnetfeld, Schall, Druck denkbar und z. T. auch getestet [12]-[14].

Bei Nutzung der Leistungsschalter sind auch bei den Sekundärschutzmaßnahmen die erreichbaren Gesamtausschaltzeiten durch diese Schaltgeräte bestimmt, so dass die kürzesten Zeiten nicht unter 15...25 ms liegen können. Eine weitere Verkürzung ist an die Nutzung anderer, schnell wirkender Einrichtungen zur Lichtbogenlöschung gebunden. Möglichkeiten diesbezüglich bestehen insbesondere im Einsatz von so genannten „Kurzschließen“, mit denen u. U. in Eigenzeiten unterhalb 1 ms ein „Shunten“ und damit Löschen der Störlichtbögen vorgenommen wird [10][13]. Unter Nutzung solcher Komponenten lassen sich Gesamtkurzschlussdauern für Lichtbogenfehler auf $t_k < 5\text{ms}$ begrenzen, so dass auch die Druckbeanspruchung der Anlage eingeschränkt wird, weil der Anlageninnendruck in dieser Zeit seine Maximalwerte noch nicht erreicht hat.

Mit einem äußerst schnell wirkenden Störlichtbogendetektions- und -Löschsystem lässt sich ein umfassendes Schutzkonzept verwirklichen [1][11], das nach Bedarf eine Schaltgeräte- oder Löscheräteansteuerung vornimmt und – kombiniert mit konstruktiven Vorkehrungen und dem Primärschutz – einen Störlichtbogenschutz bis hin zum Anlagenfunktionsschutz sicherstellt. Das Schutzsystem ARCON stellt ein ultraschnelles Detektions- und Löschsystem dar, das die Lichtbogenkurzschlusszeiten auf Zeiten von 2 ... 3 ms begrenzt [10][11][13].

5 Zusammenfassung

Störlichtbögen, die bei fast jedem Kurzschluss auftreten, haben zerstörende Wirkungen auf die elektrischen Anlagen und gefährden Personen. Durch Anlagenausfall können Versorgungsunterbrechungen und gravierende Folgeschäden entstehen. Ein wirksamer Lichtbogenschutz ist deshalb unbedingt erforderlich. Dies gilt insbesondere für den Niederspannungsbereich.

Ein moderner Lichtbogenschutz umfasst heute mehrere Säulen und verbindet verschiedene Maßnahmen der konstruktiven Anlagengestaltung, des Kurzschlusschutzes und des Sekundärschutzes zu Schutzkonzepten. Unter Sekundärschutz werden dabei separate Einrichtungen zur Störlichtbogenerfassung und/oder -löschung verstanden. Es gibt Lösungen, die die Lichtbogenzeiten auf wenige ms begrenzen.

Schutzkonzepte beinhalten aufeinander abgestimmte Maßnahmen eines auf den jeweiligen Anwendungsfall zugeschnittenen Schutzes. Kriterium und Bewertungsmaßstab ist die Lichtbogenenergie, für die unterschiedliche Grenzwerte für die verschiedenen Schutzziele gelten. Auf der Grundlage der Lichtbogenenergie ist eine Abstufung der Schutzansprüche und Schutzziele möglich.

Durch das Zusammenwirken von konstruktiven Gestaltungsmaßnahmen mit dem Primärschutz des Netzes und einem wirkungsvollen Sekundärschutz lässt sich ein vollständiger Personen- und Anlagenschutz erreichen, der auch allen Anforderungen nach maximaler Anlagenverfügbarkeit und Versorgungszuverlässigkeit gerecht wird.

Hinsichtlich des Personenschutzes ist dabei jeweils vorausgesetzt, dass die Anlage nicht geöffnet ist. Gesonderte Verhältnisse ergeben sich bei geöffneter Anlage, insbesondere im Zusammenhang mit Arbeiten unter Spannung. Hierbei kommt den persönlichen Schutzausrüstungen und der Arbeitsbekleidung eine wichtige Bedeutung zu.

6 Literatur

- [1] Schau, H.: New ways in solving internal arcing problems. 36th International Universities Power Engineering Conference (UPEC) 2001, 11.-14. Sept. 2001, Swansea/U.K., Tagungsband S. 332-338.
- [2] Schau, H.; Stade, D.; Kloeppe, F.W.: Beherrschung von Störlichtbögen in Drehstrom-Niederspannungsanlagen. Leipzig: Energietechnik 39 (1989) 4, S. 127...131.
- [3] Schau, H.: Kurzschlußstromverhältnisse in Niederspannungsnetzen. VDE-Fachtagung „Sicherungen in elektrischen Netzen“ 24.11.2000, Ilmenau Tagungsband 12 S.
- [4] Schau, H.: Affects of arcing faults in low-voltage cables. 31st Universities Conference on Power Engineering 1996 (UPEC '96), 18.-20. Sept. 1996, Heraklion/Kreta/Griechenland, Tagungsband S. 985...988.
- [5] Schau, H.: Schutz vor Störlichtbögen im Niederspannungsbereich. VDE-Fachseminar: Entstehung, Erfassung, Auswirkungen und Vermeidung von Störlichtbögen in MS- und NS-Anlagen, 10./11. Oktober 2000, Mannheim, Tagungsband 30 S.
- [6] Schau, H.; Schäfer, H.: Lichtbogenenergie - Ein Maß für die Personengefährdung und Zerstörung von Schaltanlagen. 40. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium der TU Ilmenau 1995, 18.-21. Sept. 1995, Ilmenau/Deutschland, Tagungsband 1, S. 283...288.
- [7] Schau, H.; Stade, D.: Requirements to be met by protection and switching devices from the arcing protection point of view. 5th International Conference on Electric Fuses and their Application 1995 (ICEFA), 25.-27. Sept. 1995, Ilmenau/Deutschland, Tagungsband S. 15...22.
- [8] Voß, G.: Störlichtbogenbegrenzung durch Konstruktion und Material. Mannheim: VDE-Seminar „Entstehung, Erfassung, Auswirkungen und Vermeidung von Störlichtbögen im MS- und NS-Bereich“, 13./14. Mai 1999, Handbuch 16 S.
- [9] Pfeilfer, G.; Pfeifer, K.: Grundlegende Zusammenhänge zwischen Selektivschutztechnik, Anlagengestaltung, Störlichtbogenfestigkeit, Versorgungsstruktur und Abnehmerleistungen. Mannheim: VDE-Fachtagung für NS-Schaltanlagen-und-Gerätetechnik, 13./14. Mai 1998, Tagungsband.
- [10] Berger, F.; Schäfer, H.; Krätzschmar, A.; Kremers, W.: Neues Schutzkonzept und ein innovativer Kurzschließer für einen modernen Störlichtbogenschutz. Elektrizitätswirtschaft 98 (1998) 14, S. 36...40
- [11] Schau, H.; Stade, D.; Wey, P.: A new concept against arcing faults in low-voltage switchgear. 6. Int. Symposium "Short-circuit currents in power systems", 6.-8. Sept. 1994, Liege/Belgien, Tagungsband S. 4.11.1.-4.11.8.
- [12] Stade, D.; Hülle, K.-H.; Schau, H.: Kurzschluß vermeiden - Schnelles Erfassen und Ausschalten als Störlichtbogenschutz im Niederspannungsbereich. Würzburg: Maschinenmarkt, 97 (1991) 28, S. 53...58.
- [13] Schau, H.: Schutzsystem ARCON zur schnellen Erkennung und Löschung von Störlichtbögen. 10. Klöckner-Moeller Automobil-Symposium 1994, 20.-21. Okt. 1994, Nürburgring/Eifel, Tagungsmaterial (10 S., 26 Beil.).
- [14] Stade, D.; Schau, H.; Klaus, A.: Fast detection of MV internal arcing by means of optical fibres sensors. 8th International Symposium on Short-circuit Currents 1998 (SCC '98), 8.-10. Okt. 1998, Brüssel/Belgien, Tagungsband, S. 123...130.

Autor: Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. Holger Schau
Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Elektrotechnik und Informations-
technik, Fachgebiet Elektrische Energieversorgung
Postfach 10 05 65, D -98684 Ilmenau
e-mail: holger.schau@tu-ilmenau.de