

Berücksichtigung der Eigenschaften stromstarker Störlichtbögen bei der Schutzsystemauslegung von Niederspannungsanlagen

Michael Bruhns, Johann Urbank, Carlo Liebermann, Peter Schegner

Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik (IEEH), Technische Universität Dresden, 01062 Dresden, www.tu-dresden.de/etieeh, +49 351 463-35088, michael.bruhns@tu-dresden.de, carlo.liebermann@tu-dresden.de, peter.schegner@tu-dresden.de

Kurzfassung: Stromstarke Störlichtbögen in der Niederspannung besitzen ein extremes Gefährdungspotential. Zur Verminderung von Personen- und Anlagenschäden kommen in der Niederspannung typischerweise Schutzsysteme mit Überstromcharakteristik zum Einsatz. Bei der Auslegung derartiger Schutzsysteme muss die Reduktion des Fehlerstroms durch den Lichtbogen berücksichtigt werden. Die Auslegung dieser Schutzsysteme setzt die Kenntnis des Zusammenhangs zwischen den Systemparametern des elektrischen Versorgungssystems und relevanten Lichtbogenkenngrößen voraus. Dies gilt umso mehr, wenn die Kurzschlussleistung aufgrund der wachsenden Anzahl dargebotsabhängiger Erzeugungsanlagen im Niederspannungsnetz ansteigt, da die Beeinflussung des Fehlerstroms durch den Lichtbogen mit steigender Kurzschlussleistung zunimmt. Die Veröffentlichung stellt die Ergebnisse der experimentellen Untersuchung der Abhängigkeiten der Lichtbogenkenngrößen sowohl von den Netzparametern (Netzspannung, Kurzschlussstrom und Reaktanz-Resistanz-Verhältnis) als auch von den konstruktiven Eigenschaften von Niederspannungsanlagen an der Fehlerstelle dar und leistet somit einen Beitrag zur Erhöhung der Sicherheit bei Störlichtbögen in der Niederspannung.

Keywords: Selektivschutz, Anlagenschutz, Störlichtbögen, Lichtbogenkenngrößen, Niederspannung

1 Einführung

1.1 Stromstarke Störlichtbögen in der Niederspannung

Der Störlichtbogen (SLB) ist eine stabile Gasentladung, die ungewollt in elektrischen Anlagen zwischen potentialführenden Teilen bzw. zwischen einem potentialführenden Teil und Erdpotential auftreten kann, insofern die Potentialdifferenz ausreichend ist. Bei Lichtbogenströmen über 1000 A spricht man von stromstarken SLB. Aufgrund ihrer hohen Energiedichte sind stromstarke SLB extrem gefährlich und können Personenschäden sowie Anlagenschäden verursachen und die Versorgungssicherheit beeinträchtigen. Um die Gefährdung von SLB zu reduzieren, können elektrische Anlagen mit entsprechenden Schutzsystemen ausgestattet werden. Diese erkennen SLB ausreichend schnell und sorgen für deren Verlöschen. Nachfolgend soll das Vorgehen zur Auslegung derartiger

Schutzsysteme vorgestellt werden. Daraus ergeben sich die für die weitere Betrachtung relevanten LB-Kenngrößen (LB: Lichtbogen). Im Anschluss daran werden die Ergebnisse der experimentellen Untersuchung zu den Abhängigkeiten dieser LB-Kenngrößen von bestimmten Systemparameter elektrischer Niederspannungsanlagen präsentiert. [1]

1.2 Schutzsysteme zur Verminderung der Auswirkungen von SLB

Das Vorgehen bei der Auslegung von Schutzsystemen zur Verminderung der Auswirkungen bei SLB ist in Bild 1 dargestellt. Es zeigt, dass zunächst aus den Systemparametern die für die Auslegung relevanten LB-Kenngrößen benötigt werden. Um welche LB-Kenngrößen es sich dabei handelt, ist davon abhängig, welche Schutzfunktion zum Schutz der Anlage eingesetzt wird. In der Niederspannung sind dies aufgrund ihrer geringen Komplexität überwiegend Funktionen mit einer Überstrom-Zeit-Charakteristik. Bei Überstrom-Zeit-Schutzfunktionen ist die Auslösezeit zwischen Erkennen des Fehlerzustands bis zum Senden eines Ausschaltsignals an das jeweilige Schaltgerät abhängig von der Höhe des gemessenen Fehlerstromes. Da der LB aufgrund des zusätzlichen Spannungsfalls im Fehlerstromkreis gegenüber einem metallischen Kurzschluss zu einer Reduktion des Fehlerstromes führt, ist der bei einem Lichtbogenfehler fließende LB-Strom eine wichtige Größe für die Auslegung von Schutzsystemen bei SLB. Die zweite Größe, auf die das zutreffend ist, ergibt sich aus dem Schutzziel. Das Ziel eines aktiven Schutzsystems nach [4, 5] ist die Verminderung der Auswirkungen von SLB, sobald diese aufgetreten sind. Da die Lichtbogenenergie W_{LB} nach [3] als relevantes Maß für die zerstörerische Wirkung von SLB angesehen werden kann, ergibt sich somit die Aufgabe des Schutzsystems die Lichtbogenenergie unter ein zulässiges Maß zu begrenzen. Da die Lichtbogenenergie über die Lichtbogenleistung und die Brenndauer t_{kLB} des LBs, die sich wiederum aus dem bereits dargestellten Zusammenhang von dem LB-Strom und der eingesetzten Schutzfunktion ergibt, abgeschätzt werden kann, sind LB-Strom und LB-Leistung die wesentlichen LB-Kenngrößen, die bei der Auslegung von Schutzsystemen bei SLB benötigt werden. Deren Bestimmung wird somit eine wesentliche Aufgabe zu teil. Die nachfolgend beschriebene experimentelle Untersuchung liefert einen Beitrag zu sicheren Bestimmung besagter Kenngrößen zur einfacheren und verbesserten Auslegung von Schutzsystemen bei SLB. [1, 2]

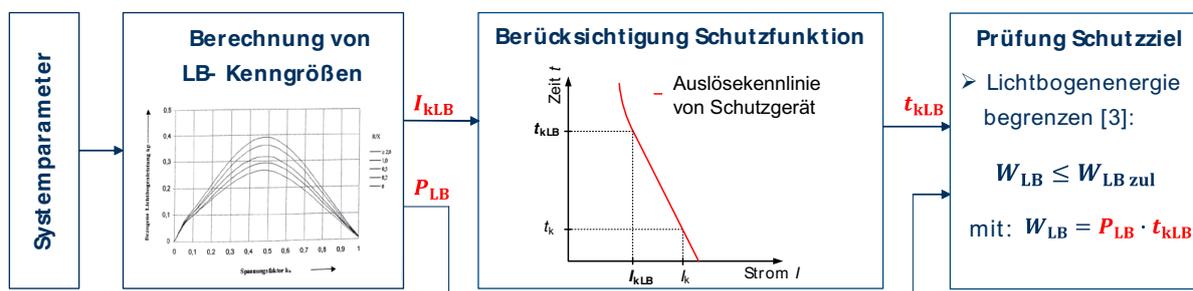


Bild 1: Schematische Darstellung des Vorgehens zur Auslegung von Schutzsystemen bei SLB nach [2, 3]

1.3 Verfahren zur Bestimmung der Kenngrößen von Lichtbögen

Zur Einordnung der Messergebnisse werden diese mit den Ergebnissen eines Bestimmungsverfahrens verglichen. Das Bestimmungsverfahren liegt der empirischen Auswertung von Störlichtbogenexperimenten an einer parallelen, offenen Anordnung von

Stromschienen mit Rechteck oder Rechteck ähnlichem Profil zugrunde. Das Bestimmungsverfahren definiert indirekte LB-Kenngrößen, die sich auf die Netzparameter Nennspannung U_n und subtransiente Kurzschlussleistung S_k'' bzw. subtransienter Kurzschlussstrom I_k'' (s. Gl. (1) bis (3)) beziehen. Durch die Verwendung der indirekten LB-Kenngrößen, können die LB-Kenngrößen für elektrische Anlagen mit anderen elektrischen Anschlussbedingungen oder Anlageneigenschaften bestimmt werden. Die LB-Spannung U_{LB} stellt eine empirische Größe dar und wird in Abhängigkeit einer Summenhäufigkeit $H(U_{LB})$ bestimmt. Laut [1] entspricht $H(U_{LB}) = 80\%$ der Stabilitätsgrenze und kann als Orientierung für den kleinstmöglichen Fehlerstrom angewendet werden. Die mit dem Verfahren nach [1] für $H(U_{LB}) = 80\%$ bestimmten Ergebnisse werden nachfolgend mit den Messergebnissen verglichen und werden dazu als Berechnung bezeichneten. [1]

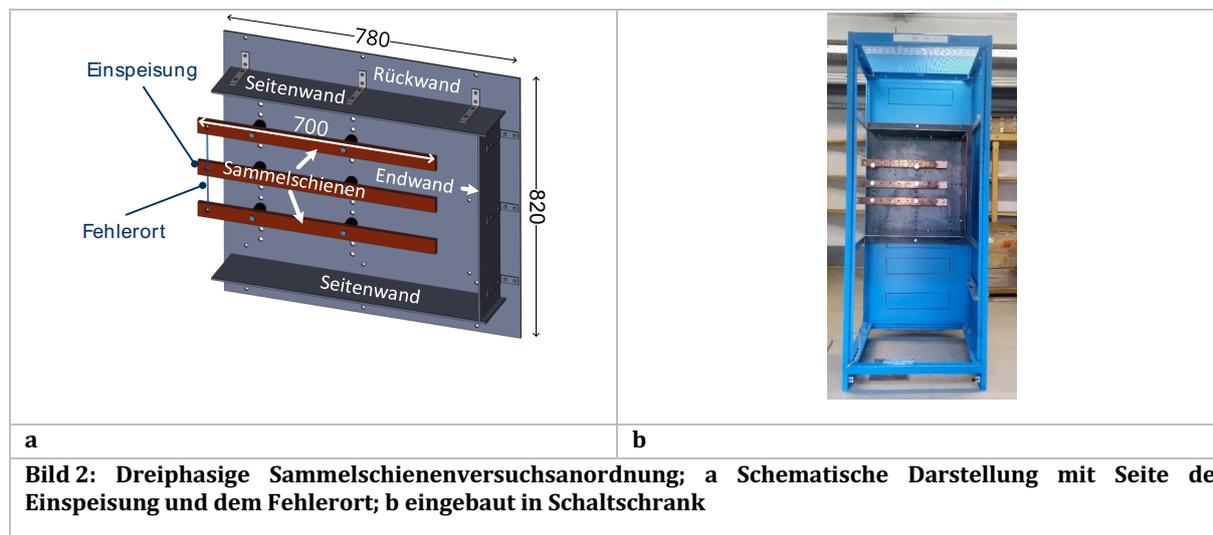
$$k_U = k \cdot U_{LB} / U_n = f(H(U_{LB}), a_{SS}, k) \quad (1)$$

$$k_B = I_{kLB} / I_k'' = f(U_n, R/X, a_{SS}) \quad (2)$$

$$k_P = P_{LB} / S_k'' = f(k_U, R/X) \quad (3)$$

2 Experimentelle Untersuchung

Die experimentellen Untersuchungen wurden mit einer dreiphasigen Sammelschienenversuchsordnung in einem Schaltschrank durchgeführt. Auf diese Weise werden die Eigenschaften in einer realen Niederspannungs-Schaltgerätekombination nachgebildet. Dazu zählen insbesondere Abstände zu metallisch und geerdeten oder aus Kunststoff bestehenden Gehäuseteilen. Die Versuchsanordnung ist in Bild 2 dargestellt.



Alle Störlichtbogenexperimente wurden nach dem gleichen Ablauf durchgeführt. Für die Zündung des LBs sorgt ein Zünddraht, der an der Fehlerstelle auf der Einspeiseseite die Sammelschienen kurzschließt. Sobald der LB gezündet wurde, sorgen die Stromkräfte für die Wanderung des LBs an das Ende der Sammelschienen. Um die Auswirkungen des LBs auf die Sammelschienen gering zu halten, wird der Versuch nach 150 ms abgeschaltet. Die

Bestimmung der LB-Kenngrößen für den jeweiligen Versuch erfolgt mit einem festen Auswertefenster im quasistationären Bereich der Zeitverläufe.

Die Störlichtbogenexperimente wurden in zwei verschiedenen Hochleistungsversuchsfeldern durchgeführt. Im National Arc fault Research Center der TU Dresden wurden bei konstanten Netzparametern $U_n = 690 \text{ V}$, $I_k = 6 \text{ kA}$ und $X/R = 7$ die Parameter der Anlage insbesondere die konstruktiven Merkmale an der Fehlerstelle untersucht. Die Untersuchung des Einflusses der Netzparameter wurde aufgrund der zur Verfügung stehenden höheren Kurzschlussleistung am IPH Berlin durchgeführt. Die an den jeweiligen Versuchsfeldern eingestellten Netzparameter zeigt Tabelle 1. In Bild 3 sind die Netzparameter der Versuchsfelder über dem Reaktanz-Resistanz-Verhältnis darstellt und die untersuchten Systemparameter blau markiert.

Tabelle 1: Übersicht der Versuchsfelder, deren Netzparameter und der Kategorie der untersuchten Systemparameter

Versuchsfeld	Netzspannung U_N / V	Kurzschlussstrom I_k / kA	Reaktanz-Resistanz-Verhältnis X/R	Kategorie der untersuchten Systemparameter
NARC, TU Dresden	400, 690	6, 11	7	Anlage
IPH, Berlin	420, 735	11, 20, 30, 40, 60	2 ... 7	Netz

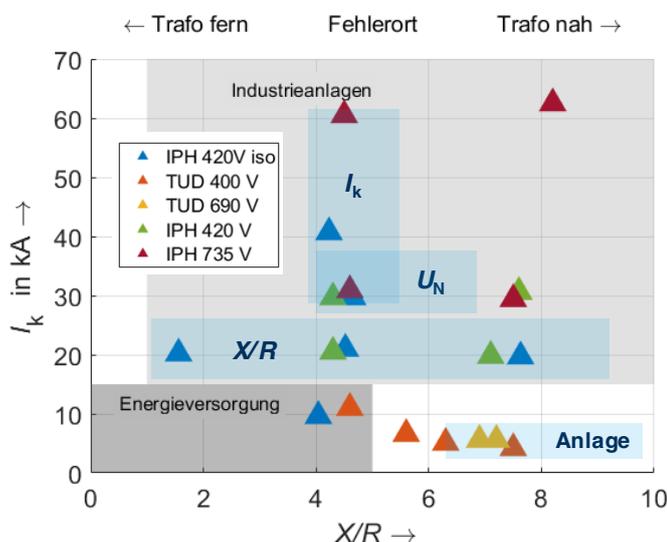


Bild 3: Einstellung der Netzparameter der Versuchsfelder mit Netzspannung und den untersuchten Systemparametern (blaue Markierung)

Eine Übersicht der untersuchten Anlagenparameter zeigt Tabelle 2. Zum besseren Verständnis der Bedeutung der geometrischen Abstände zeigt Bild 4 eine schematische Darstellung der Versuchsanordnung. Die nachfolgende Bewertung des Einflusses der Systemparameter bezieht sich auf die Netzparameter und die geometrischen Abstände.

Tabelle 2: Übersicht der untersuchten Anlagenparameter und deren Wertebereiche

Anlagenparameter		Wertebereich
Abstand zwischen Sammelschienen	a_{SS} / mm	10 ... 100
Abstand zur Rückwand	a_{RW} / mm	40, 50, 75
Abstand zur Endwand	a_{SE} / mm	10 ... 185
Abstand zu den Seitenwänden	a_{SW} in mm	210 ... 330
Sammelschienenmaterial		Kupfer (Cu), Aluminium (Al)
Schaltschranköffnung		Geöffnet, verschlossen
Erdung		Starr geerdet, isoliert
Wandmaterial		Stahl, Kunststoff
Beschichtung von Sammelschienen		Unbeschichtet, beschichtet

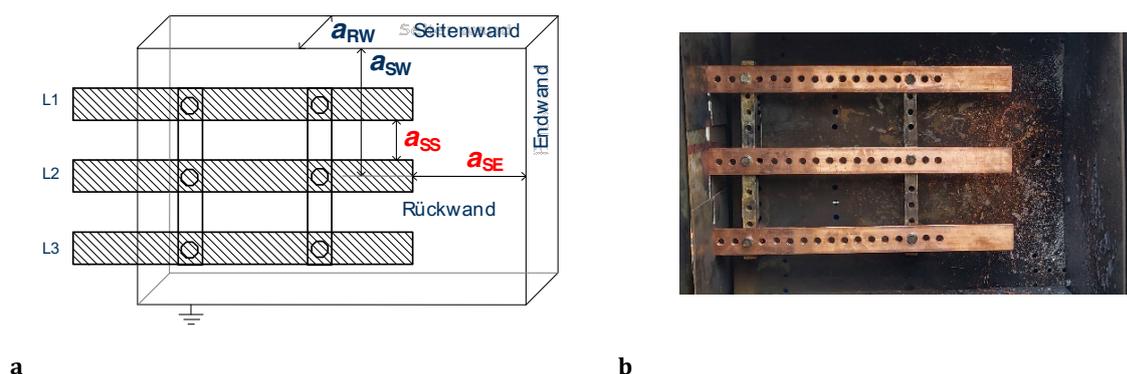


Bild 4: Sammelschienenanordnung; a in schematischer Darstellung; b als Foto

3 Ergebnisse der Untersuchung der Abhängigkeiten der von LB-Kenngrößen von den Systemparametern von Niederspannungsanlagen

In diesem Kapitel sollen die Abhängigkeiten zwischen den relevanten LB-Kenngrößen und ausgewählten Systemparametern bewertet werden. Betrachtet wurden dabei die Netzparameter und die geometrischen Abstände an der Fehlerstelle. Zunächst werden die grafischen Darstellungen der Zusammenhänge ausgewertet. Anschließend wird zur genaueren Betrachtung eine Kennzahl definiert, die dem maximalen, normierten Gradienten entspricht, mit deren Hilfe die Bewertung unabhängig von der physikalischen Domäne der Systemparameter erfolgen kann.

In Bild 5 sind die betrachteten LB-Kenngrößen über den untersuchten Systemparametern dargestellt. Aus der Darstellung geht hervor, dass der Einfluss der Netzparameter auf die

gemessenen, indirekten LB-Kenngrößen unterschiedlich hoch ist. Außerdem ist der Einfluss teilweise nicht linear. Im Vergleich zur Berechnung ergeben sich z. T. entgegengesetzte Abhängigkeiten. Die Abweichungen zwischen den berechneten und gemessenen LB-Kenngrößen sind unterschiedlich groß. Das Gleiche gilt ebenfalls für die Abhängigkeit der indirekten LB-Kenngrößen von den Abständen in Bild 6. Außerdem ist ersichtlich, dass der Einfluss der Abstände in Messung und Berechnung stark unterschiedliche Auswirkungen hat bzw. wird der Abstand von Schienenende zur Endwand in der Berechnung nicht berücksichtigt und hat demzufolge keinen Einfluss. Hingegen geht aus der Messung hervor, dass der Einfluss des Sammelschienenabstands geringer ist als der des Abstands zur Endwand.

Um den Einfluss der Systemparameter auf die LB-Kenngrößen besser bewerten zu können, wurde in Gl. (4) eine normierte Kennzahl definiert, nach der für jeden Systemparameter der betragsmäßig größte Anstieg der LB-Kenngröße auf den Maximalwert des jeweiligen Systemparameters normiert wird.

$$\Delta K'_{inLB\ ij} = sign(|X|_{max}) \cdot |X|_{max}$$

$$\text{mit } X = \frac{\Delta K_{inLB\ i}}{\Delta SP_j} \cdot SP_{j\ ref} \quad \text{und } i = 1 \dots 3, \quad j = 1 \dots 7 \quad (4)$$

Anhand dieser Kennzahl erfolgt nachfolgend eine quantitative Bewertung der Abhängigkeiten. Dabei beschreibt

$$SP = \{ U_N, I_k, X/R, a_{SS}, a_{RW}, a_{SE}, a_{SW} \} \quad (5)$$

die Menge der Systemparameter,

$$K_{LB} = \left\{ U_{LB}, I_{kLB}, P_{LB}, \frac{U_{LB}}{U_N}, \frac{I_{kLB}}{I_k}, \frac{P_{LB}}{S_k} \right\} \quad (6)$$

die Menge der LB-Kenngrößen und

$$SP_{ref} = \{ U_{N\ max}, I_{k\ max}, X/R_{max}, a_{SS\ max}, a_{RW\ max}, a_{SE\ max}, a_{SW\ max} \} \quad (7)$$

die Menge der Referenzwerte für die Normierung der Systemparameter. Demzufolge ergeben sich als Kennzahl für die indirekten LB-Kenngrößen

$$\Delta K'_{inLB\ ij} = \left\{ \frac{\Delta U'_{LB}}{U_N}, \frac{\Delta I'_{kLB}}{I_k}, \frac{\Delta P'_{LB}}{S_k} \right\}. \quad (8)$$

Das Bild 7 zeigt, dass die Messung einen hohen Einfluss der Netzparameter auf die indirekten LB-Kenngrößen von I_{kLB} und P_{kLB} ergibt. Außerdem zeigt sich, dass der Sammelschienenabstand a_{SS} in der Messung einen geringeren Einfluss hat, als bei der Berechnung. Entgegen gesetzt verhält es sich mit dem gemessenen und berechneten Einfluss der weiteren geometrischen Abstände. Die Messung zeigt, dass sich die Netz- und Anlagenparameter entgegengesetzt auf die indirekten LB-Kenngrößen auswirken.

Weiterhin wurde die Abweichung zwischen den gemessenen und berechneten LB-Kenngrößen in Prozentpunkten betrachtet. Bei der folgenden Auswertung wurden nur die Systemparameter betrachtet, die bei der Berechnung berücksichtigt werden. Das Bild 8 zeigt, dass sich vor allem bei I_{kLB} (-55%) aber auch bei P_{LB} (+30%) hohen Abweichungen ergeben. Demzufolge lässt sich festhalten, dass bei einem hohen Sammelschienenabstand a_{SS} und

einem geringen X/R -Verhältnis der LB-Strom I_{kLB} gering und die LB-Leistung P_{LB} erhöht ist. Dies stellt einen besonders kritischen Zustand dar. Dies liegt zum einen daran, dass der geringe LB-Strom I_{kLB} zu einer erhöhten Auslösezeit führt. Zusätzlich sorgt die erhöhte LB-Leistung P_{LB} in Kombination mit der erhöhten Auslösezeit für eine besonders hohe LB-Energie W_{LB} .

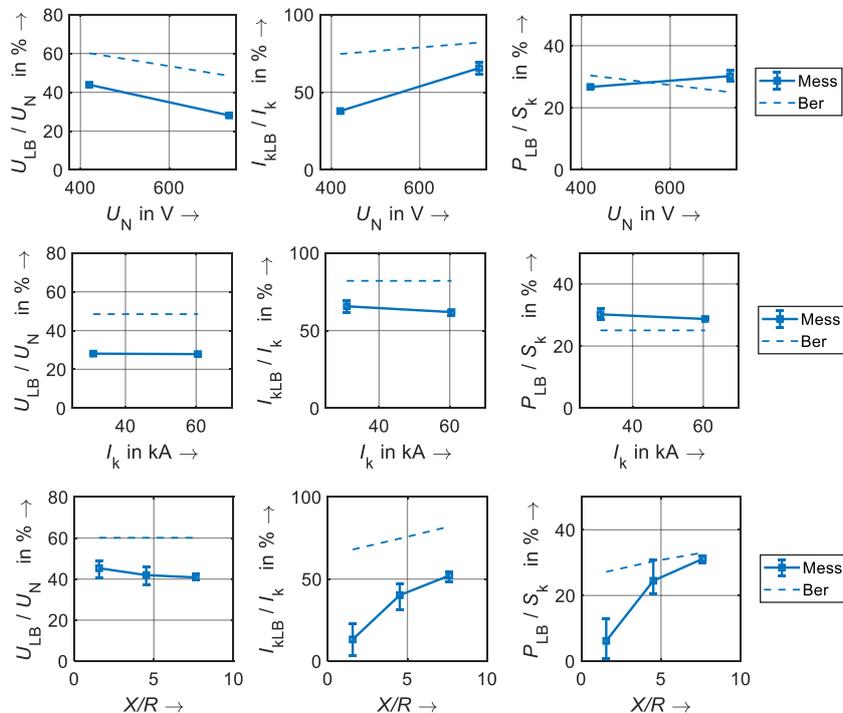


Bild 5: Darstellung der gemessenen (Mess) und berechneten (Ber) indirekten LB-Kenngrößen in Abhängigkeit der untersuchten Netzparameter Netzspannung U_N , Kurzschlussstrom I_k und Kurzschlussleistung S_k , Berechnung nach [1]

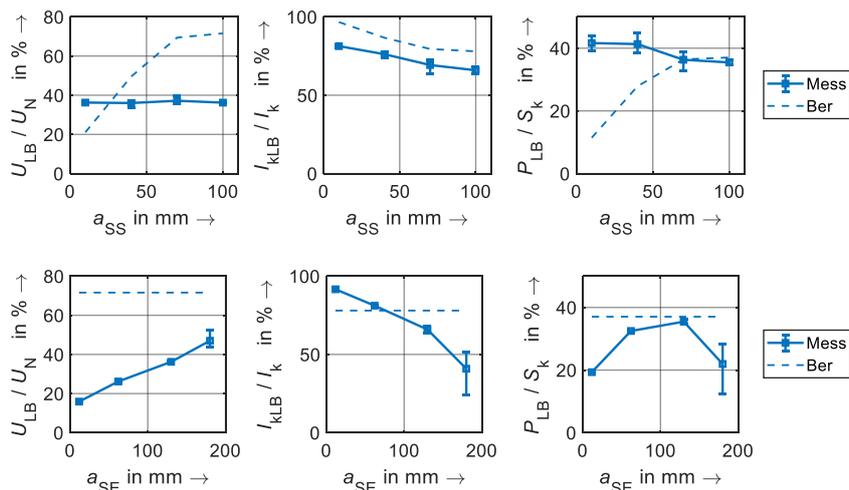


Bild 6: Darstellung der gemessenen (Mess) und berechneten (Ber) indirekten LB-Kenngrößen in Abhängigkeit der untersuchten Anlagenparameter a_{SS} und a_{SE} , Berechnung nach [1]

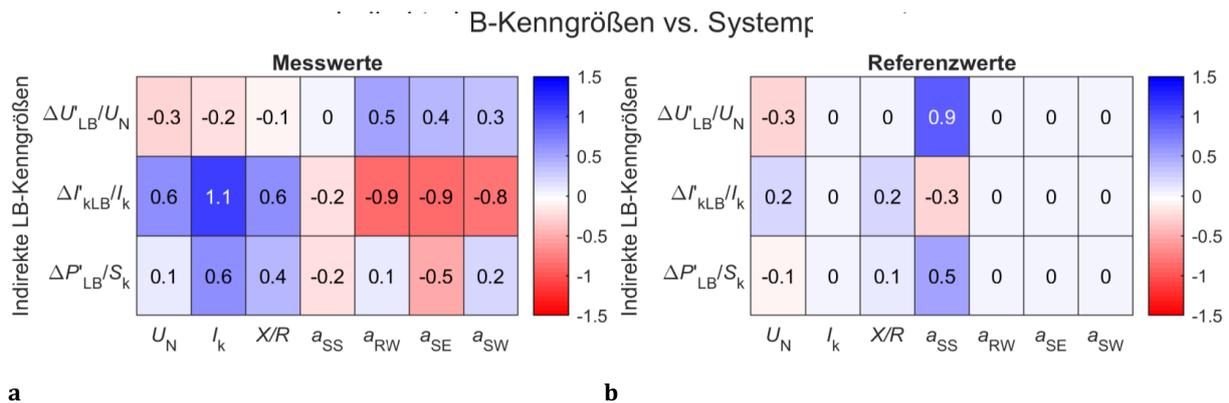


Bild 7: Kennzahlen zur Bewertung der Abhängigkeit der indirekten LB-Kenngrößen von den Systemparametern; a experimentell ermittelt, b aus Berechnung nach [1]

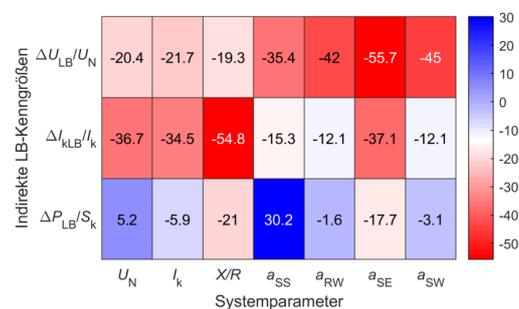


Bild 8: Abweichung der gemessenen von den nach [1] berechneten indirekten LB-Kenngrößen (in Prozentpunkten)

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Veröffentlichung beschreibt das Gefährdungspotential von SLB und die Funktionsweise typischer Schutzsysteme, die zur Verminderung der Auswirkungen von SLB auf Anlagen und Personen eingesetzt werden. Dabei wird auf den hohen Energiegehalt stromstarker SLB ebenso eingegangen wie auf deren strombegrenzende Wirkung und abgeleitet, welche Anforderungen sich daraus ergeben. Basierend auf der Beschreibung eines mehrstufigen Verfahrens zur Auslegung von Schutzsystem zur Reduktion der Auswirkungen von SLB in Niederspannungsanlagen ergeben sich die für den Schutz die LB-Leistung P_{LB} und der LB-Strom I_{kLB} als relevante LB-Kenngrößen. Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchung der Abhängigkeiten dieser LB-Kenngrößen von bestimmten Netz- und Anlagenparametern hat gezeigt, dass die LB-Kenngrößen wesentlich von den Netzparametern beeinflusst werden, wobei der Netzkurzschlussstrom I_k den größten Einfluss hat. Weiterhin ergibt die durchgeführte experimentelle Untersuchung, dass auch die konstruktiven Eigenschaften der elektrischen Anlage an der Fehlerstelle einen hohen Einfluss besitzen. Hierbei ist hervorzuheben, dass der Sammelschienenabstand a_{SS} im Vergleich zu anderen geometrischen Abständen einen geringeren Einfluss hat. Der Vergleich der experimentell ermittelten LB-Kenngrößen mit den Ergebnissen eines Bestimmungsverfahrens zeigt z. T. große Abweichungen von -55% für den LB-Strom I_{kLB} bis zu +30% für die LB-Leistung P_{LB} .

Für eine modellbasierte Entwicklung und Auslegung von Schutzsystemen zur Reduktion der Auswirkungen bei SLB sind die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung in ein Modell für

stromstarke SLB in der Niederspannung zu überführen. Dazu ist es weiterhin erforderlich das gesamte Schutzsystem samt Schutzfunktion in der Simulation nachzubilden.

5 Danksagung

Die Ergebnisse sind im Rahmen eines Forschungsprojektes der Industriellen Gesellschaftsforschung und des AiF Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. in Zusammenarbeit mit der Forschungsgemeinschaft für elektrische Anlagen und Stromwirtschaft e.V. (FGH) und dem IAEW der RWTH Aachen entstanden. Das Forschungsvorhaben wurde gefördert von dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz.



6 Literaturverzeichnis

- [1] Schau, H.; Halinka, A.; Winkler, W.: *Elektrische Schutzeinrichtungen in Industrienetzen und -anlagen: Grundlagen und Anwendungen*, Heidelberg, 2008.
- [2] Ballweber, T.; Bruhns, M. et. al.: *Sicherheit bei Störlichtbögen in der Niederspannung*, Schlussberichts zu IGF-Vorhaben 20914BG, Mannheim, 2023.
- [3] 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.
- [4] DIN e.V. (Hrsg.) (DIN EN IEC 60947-9-1, 2019): *DIN EN IEC 60947-9-1:2019-11, Niederspannungsschaltgeräte – Aktive Systeme zur Verringerung von Lichtbogenfehlern. Teil 9-1: Lichtbogenlöschgeräte*, Beuth-Verlag, Berlin, 2019.
- [5] DIN e.V. (Hrsg.) (DIN EN IEC 60947-9-2, 2021): *DIN EN IEC 60947-9-2:2021-03, Niederspannungsschaltgeräte – Aktive Systeme zur Abschwächung von Störlichtbögen, Teil 9-2: Optische Geräte zur Erfassung und Abschwächung innerer Lichtbögen*, Beuth-Verlag, Berlin, 2021.