

Hinweise zum Thema „Werte der Lichtbogenenergie“

In der Normung werden zurzeit Störlichtbogen-Schutzgeräte integriert. Unterschiedliche Systeme existieren schon mehr als 20 Jahre und haben sich praktisch sehr gut bewährt. Aber wie bei allen technischen Neuerungen stehen vielschichtig Argumente der breiten Einführung im Wege. Da sich aber unser soziologisches, ökonomisches und technologisches Sicherheitsbedürfnis gesellschaftlich sehr stark erweitert hat, stehen viele vorgetragene Argumente dieser Entwicklung kontraproduktiv entgegen. Ein leichter Seitenblick ins Privatleben, wo wir nicht mehr mit einem Auto ohne Sicherheitstechnik fahren und auch nicht zugelassen bekommen, oder mit der Pudelmütze und einfachen Holzschiefern den Hang runterfahren, zeigt wie viele Argumente irrational sind. Wir wollen alles mit hoher Zuverlässigkeit, hoher Verfügbarkeit und handeln oft bei der Technik mit der Devise „geiz ist geil“, obwohl uns eine zuverlässige und moderne Technik zur Verfügung steht. Es muss uns mehr bewusstwerden, dass das System der Elektroenergieversorgung, von der Erzeugung über die Verteilung hin bis zur Steckdose, eine der wichtigsten technischen Einrichtung ist, die unsere Lebensqualität entscheidend beeinflusst. Daher gilt Technik und Sachlichkeit immer in den Vordergrund zu stellen. Dazu zählt auch die modernen technischen Möglichkeiten zu nutzen um veraltete Erkenntnisse zu überwinden.

Störlichtbögen sind seltene Erscheinungen, treten aber auf und sind mit Sicherheit nicht vermeidbar, da es keine absolut sichere Technik gibt. Grundsätzlich muss man zwischen Hoch- und Niederspannungs-Störlichtbögen unterscheiden. Hochspannungs-Störlichtbögen sind stabile Lichtbögen, das heißt, die treibende Spannung ist wesentlich größer als die Lichtbogenspannung. Sie liegt in der Regel im Bereich von 3 bis 15% der Betriebsspannung. Der Lichtbogenwiderstand im Hochspannungskreis hat keinen wesentlichen Einfluss auf die Höhe des Lichtbogenkurzschlussstromes. Die Stromabsenkung liegt im Bereich von 3 bis 10%.

Der Niederspannungs-Störlichtbogen muss dagegen als sehr instabiler Störlichtbogen betrachtet werden. Eine Vielzahl von Parameter beeinflussen die Existenz, die Erscheinung und die Auswirkungen sowie die charakteristischen Größen Lichtbogenspannung und Lichtbogenkurzschlussstrom. Grundsätzliche Untersuchungen zu der Existenz des Niederspannungs-Störlichtbogen erfolgte in den siebziger Jahren an der TU Ilmenau und zeitgleich in dem IPH Berlin. Die Untersuchungen in Ilmenau konzentrierten sich auf ein offenes Schienensystem im Strombereich bis 10 kA bei einer Bemessungsspannung von 400 V. Der Untersuchungsbereich im IPH Berlin lag zwischen 3 und 60 kA bei den Bemessungsspannungen von 400 und 660 V. Neben unterschiedlichen offenen Schienenanordnungen wurden im IPH Berlin reale Schaltfelder, Kabelanordnungen sowie Druckuntersuchungen in Modellkästen durchgeführt.

Das Kernproblem bei den Untersuchungen in der damaligen Zeit war die vorhandene analoge Messtechnik mit einer sehr begrenzten Amplituden- und Frequenzauflösung. Die direkte messtechnische Darstellung der Lichtbogenleistung war nicht möglich. Die grafische Ermittlung der Lichtbogenleistung aus den aufgezeichneten Spannungs- und Stromvorgängen war extrem fehlerbehaftet. Im Rahmen einer außerplanmäßigen wissenschaftlichen Arbeit an der TU Dresden unter Betreuung von Professor Koettnitz ergaben sich erhebliche Differenzen bei der Auswertung der in den Zeitlupenfilmen erkennbaren dynamischen Lichtbogenexistenz und der Lichtbogenbewegung mit den gleichzeitig aufgezeichneten analogen Oszillogrammen der Spannungs- und Stromverläufe. Als Voraussetzung für eine wissenschaftlich begründbare Klärung der Lichtbogenproblematik wurde eine digitale Aufzeichnung der Spannungs- und Stromverläufe mit einer zeitlichen Auflösung von > 500 kHz festgesetzt um aus diesen digitalen Aufzeichnungen die einzelnen Lichtbogenleistungen zu errechnen und dann daraus die Gesamtlichtbogenleistung zu bestimmen. Einzelaufzeichnung einpoliger Spannungsverläufe mit Kathodenstrahloszillografen sowie einpolige Aufzeichnungen der Spannungs- und Stromverläufe mit dem ersten

vorhandenen zweikanaligen Transienten-Recorder zeigten sehr deutlich, dass Stromabriss und Stromkommutierungen außerhalb des Stromnulldurchganges in Verbindung mit den daraus resultierenden Überspannungen eine entscheidende Rolle für Lichtbogenexistenz sowie Lichtbogenparameter im Niederspannungsbereich spielen. Der damalige zweikanalige Transiente Recorder hatte aber nur eine Amplitudenauflösung von 8Bit und einen Speichertiefe von 4kByte, was eine Darstellung der Lichtbogenleistung über mehrere Halbwellen nicht ermöglichte. Der trotz Embargo beschaffte 8-kanalige Transienten-Recorder mit einer höheren Auflösung konnte trotz intensiver Bemühung durch Professor Koettnitz aus politischen Gründen für diese Untersuchungen nicht eingesetzt werden. Mit dem plötzlichen Tod von Professor Koettnitz im Jahr 1987 fehlte jede Förderung, so das erst nach der Wende und Stabilisierung des IPH Berlin im Rahmen der Seminarreihe „Lichtbogen live“ hochauflösende Daten zur Lichtbogenproblematik gesammelt werden konnten.



Bild 1: Prüfaufbau

An Hand von Oszillogrammen und Videos sollen die tatsächlichen elektrischen Verläufe bei Niederspannungs-Störlichtbögen erläutert werden. Das Bild 1 zeigt den prinzipiellen Versuchsaufbau. Die dazugehörigen Videos sind unter folgender Adresse einzusehen. ([Videos 1](#))

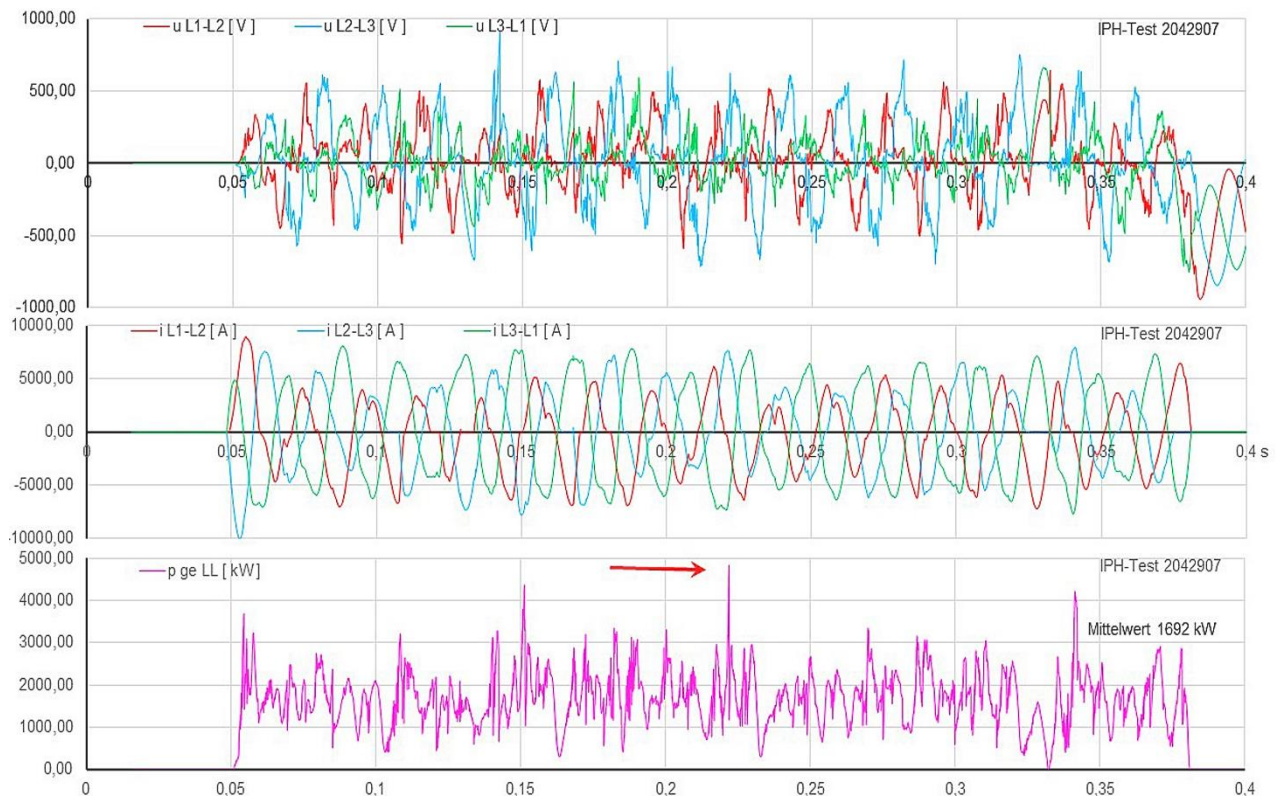


Bild 2: Oszillogramm eines Tests mit 400 V, 7 kA, 300 ms

Aus dem Oszillogramm ist sehr deutlich die Instabilität des dreipoligen Niederspannungs-Lichtbogens erkennbar. Weder Spannung noch Strom bleiben in den Polen annähernd sinusförmig und haben von Halbwelle zu Halbwelle keine vergleichbaren Größen. Ursache dieser Vorgänge ist der sich stark stochastisch verändernde Lichtbogenwiderstand in den einzelnen Polen in Verbindung mit Stromabrissen und Strom-Kommutierungen der Lichtbogensäulen zwischen den Polen außerhalb der natürlichen Stromnulldurchgänge. In den Videos 5 und 8 ist besonders deutlich erkennbar, dass sich die Lichtbogensäulen unabhängig von dem Schienenabstand aufweiten. Die Ursache liegt einmal in den eigenmagnetischen Kraftkomponenten der Plasmastrahlen und auch in der stark ionisierten und erhitzten Luft vor den Elektroden. Übersteigt aber die Lichtbogenlänge als Abbild der Lichtbogenspannung den Wert der treibenden Netzspannung, so wird der Stromkreis unabhängig von der Stromamplitude unterbrochen, oder es erfolgt innerhalb der ionisierten Gaswolke eine Zündung oder auch Kommutierung des Lichtbogens zu einem anderen Pol. Mit den Stromabrissen ergeben sich eine Vielzahl von möglichen Veränderungen in dem Drehstromkreis. Wird zum Beispiel in einem Pol der Strom vollständig unterbrochen, verlagert sich das Drehstromsystem zu einem zweipoligen Wechselstromsystem, verbunden mit der 1,5fachen Erhöhung der Spannung am verloschen Pol. Identischer Vorgang wie beim erstlöschenden Pol im Drehstrom-Schaltvorgang. Da aber der Strom in diesem Pol unter Umständen außerhalb des Stromnulldurchganges unterbrochen wurde, bildet sich durch die in den Netz-Induktivitäten gespeicherten Energie in Verbindung mit den vorhandenen Leiter-Leiter und auch Leiter-Erde Kapazitäten eine Einschwingspannung aus. Welche Spannungsamplitude erreicht wird ist nicht vorher bestimmbar, da alle einwirkende Parameter stochastischen Charakter haben. Wie die Oszillogramme zeigen, bildet sich die mögliche Überspannung auch nicht voll aus, da durch die starke Ionisierung des Lichtbogenbrennraumes Wieder- und auch Neuzündungen des Lichtbogens entstehen, also typische Erscheinungen wie im Drehstromschaltvorgang bei der Schaltung von Induktivitäten. Auch muss berücksichtigt werden, dass der Energieinhalt der Überspannungsamplituden wesentlich kleiner ist als die eigentliche Stromquelle. Im Bild 3 ist eine zeitliche Dehnung des Oszillogramms aus Bild 2 im Bereich des roten Pfeiles wiedergegeben. In diesem Ausschnitt sind die multiplen Wieder- und Neuzündungen der einzelnen Teillichtbögen in dem Spannungsverlauf gut sichtbar. Die Stromkommutierung in Verbindung mit der Amplitudenänderung und Phasenverschiebung sind sehr markant. Deutlich ist auch im Stromverlauf L2-L3 das zeitweilige verlöschen des Stromes und die Herausbildung eines zweipoligen Stromkreises erkennbar. Synchronisiert man Zeitlupenvideos und Oszillogramm, was sehr zeitaufwendig ist, sieht man, dass die weit austretenden Lichtbogenflammen, verbunden mit Druckimpulsen, klar in zeitlicher Übereinstimmung mit den Lichtbogenleistungsspitzen stehen (Bilder 4 und 5). Für die Ermittlung der Gesamt-Lichtbogenleistung werden die Einzelleistungen der Pole aus den digitalen Spannungs- und Stromwerten der jeweiligen Pole berechnet. In dem Verlauf der Einzel-Lichtbogenleistungen sind Blindstromanteile sichtbar, die bei der Addition zur Gesamtleistung nicht mehr vorhanden sind. Ursache dafür sind zeitweilige parallele Lichtbögen von den Polen über das Gehäuse zu einem anderen Pol. Diese zeitweiligen Teillichtbögen zum Gehäuse und zurück zu einem anderen Pol sind in dem hochauflösendem Video 8 besonders gut erkennbar. Die Erscheinung als „Blindleistung“ hat ihre Ursache in der kombinierten Speisung der Teillichtbögen zum Gehäuse von zwei Spannungspotentiale, die durch die Berechnung der Einzelleistung aus der Einzelspannung und dem Einzelstrom zu der formalen Erscheinung der „Blindleistung“ führt. In der Addition zur Gesamtleistung hebt sich dieses Phänomen auf.

Sichtbar wird auch aus dem Oszillogramm, dass eine einfache Berechnung der Lichtbogenspannung und der Lichtbogenleistung, wie sie von Schau [1] vorgenommen wird nicht realistisch ist und zu falschen Beurteilungen der Gefährdungen führen. Die von ihm verwendeten Grunddaten beruhen auf ca. 40 Jahre alten, extrem fehlerhaften analogen Aufzeichnungen und sind nicht reproduzierbar. Allein der Vergleich der Messdaten bei den bisher 95 durchgeführten Seminaren „Lichtbogen live“ mit jeweils 5 gleichen Versuchen mit denselben Netz- und Aufbaubedingen zeigen Abweichungen im Bereich von 50%, wobei auch keine Bildung eines sinnvollen Mittelwertes möglich ist. Besonders gilt diese Aussage für die ermittelten Lichtbogenleistungen. Aus allen Videos ist sehr deutlich zu erkennen, dass die wesentliche Beanspruchung und Zerstörung des Materials durch die herausschießenden Lichtbogenspitzen entstehen. Diese Lichtbogenspitzen sind wiederum eindeutig den Leistungsspitzen in den Lichtbogenleistungsverlauf zuzuordnen. Daher ist die Bildung eines Mittelwertes der Lichtbogenleistung nicht zielführend und negiert die tatsächlichen Beanspruchungen.

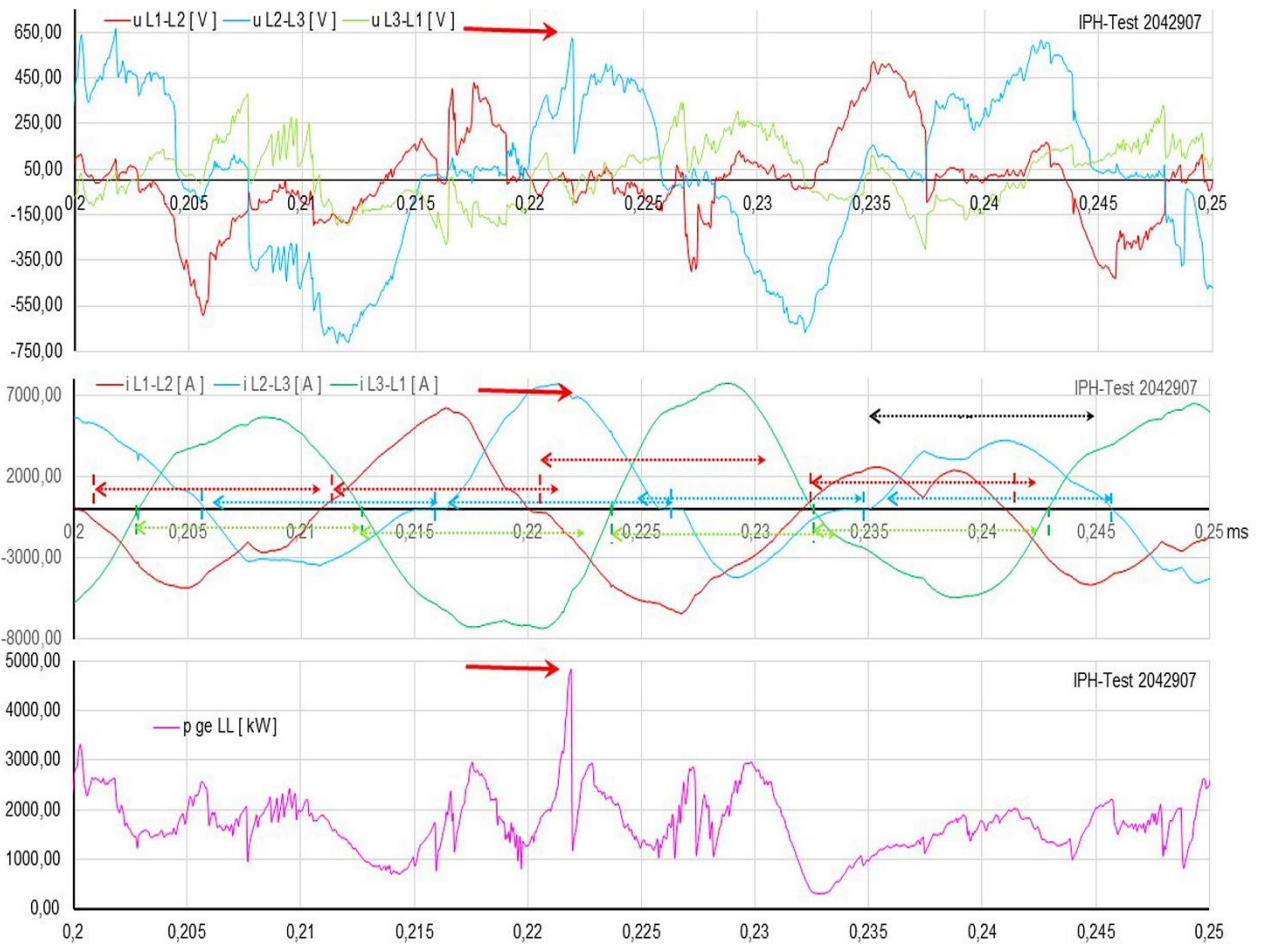


Bild 3: zeitliche Dehnung des Oszillogramms eines Tests mit 400 V, 7 kA, 300 ms

Die häufig gehörte Argumentation, die Versuche in dem Seminar entsprechen nicht der Realität soll durch das folgende, praktische Beispiel eines Tests einer realen NS-Anlage widerlegt werden. Aus rechtliche Gründen kann das dazugehörige Video nicht veröffentlicht werden. Im Bild 6 ist das Oszillogramm einer Prüfung einer NS-Anlage, bestehend aus drei Feldern wiedergegeben. Der Lichtbogen ist in dem lichtbogenfesten Leistungsschalter-Abteil oberhalb des Leistungsschalter gezündet worden. Die Einspeisung mit 400V, 55kA erfolgte von unten auf den Leistungsschalter. Die Auslösezeit des Leistungsschalters war auf 250 ms eingestellt. Aus dem Video und dem Oszillogramm ist auswertbar, das durch die erste Leistungsspitze die Rückwand des Leistungsschalterabteils aufgerissen wurde und der Lichtbogen in den Sammelschienenraum eindrang und bis zum Ende der Sammelschienen Feld drei stand und dort die Seitenwand durchbrannte. Erkennbar ist auch, dass in den ersten ca. 80 ms der Lichtbogen im Bereich der Ableitschienen des Leistungsschalters im Feld 1 befand, dort die Zelle-Zelle-Abdichtung durchbrannte und dann in den Hauptsammelschienenraum Feld 2 und Feld 3 eindrang. Nach ca. 200 ms war dann das Seitenblech der



Bild 4 und 5: Ausschnitte aus dem Video 3 zum Zeitpunkt von Leistungsspitzen

der Zell 3 durchgebrannt und der Lichtbogen konnte sich nach außen aufweiten. An den Spannungs-, Strom- und Leistungsverlauf ist dieser Hergang sehr klar zu rekonstruieren. Sehr wichtig an diesem Oszillogramm ist aber die

genaue Betrachtung der Spannungsverläufe. Bewegt sich der Lichtbogen im Feld 1, Bereich bis ca. 80 ms, kann er sich dort nicht besonders aufweiten. Die Stromeinsenkung ist gering, die Amplituden der Lichtbogenspannung aber im Bereich von ca. 75 % der Nennspannung. Die nominalen Luftstrecken im Bereich der Verteilschiene beträgt 28mm und im Bereich der Hauptsammelschiene 80 mm. Läuft der Lichtbogen im Bereich der Hauptsammelschiene Feld 2 und 3 wird die Stromeinsenkung größer die Amplituden der Lichtbogenspannungen übersteigen die Werte der Bemessungsspannung. Nach dem Durchbrennen der Seitenwand Feld 3 kann sich der Lichtbogen noch weiter ausdehnen, was eine weitere Stromabsenkung zu Folge hat. Die Lichtbogenspannung erhöht sich aber sehr unwesentlich. Günstig an dem vorliegenden Oszillogramm ist auch der Fakt, dass der Lichtbogen durch den im Schaltfeld eingesetzten Leistungsschalter abgeschaltet wurde. Man kann dadurch die anliegende Leerlaufspannung des Speisetransformators gut mit der Lichtbogenspannung bewerten.

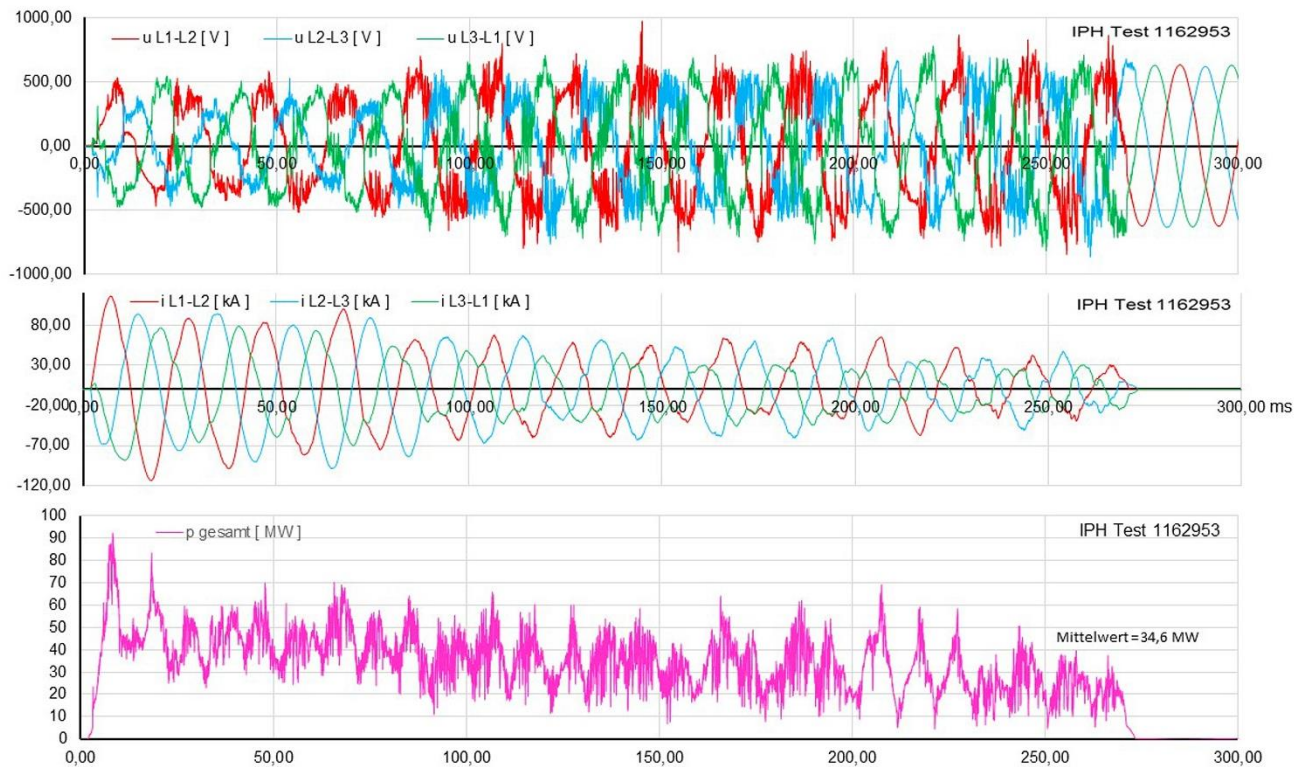


Bild 1: Oszillogramm des Tests einer realen NS-Anlage 400 V, 55 kA

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass eine Vorausberechnung der Lichtbogenparameter in einem Niederspannungsnetz mit einer hinreichenden Genauigkeit nicht möglich ist, da die Einflussparameter von einer Vielzahl von sehr unterschiedlichen stochastischen Größen abhängig sind. Die von Schau [1] publizierten empirischen Bestimmungsgleichungen sind irrelevant und nicht reproduzierbar. Schon das einfache Überprüfen der in [1] Punkt 11.3 veröffentlichten Formeln und Parameter führen zu Ergebnissen, die mit einer praktischen Realität nicht in Einklang zu bringen sind. Die Verwendung dieser Daten in einen neuen Normentwurf sollte in jedem Fall verhindert werden, um nicht den Vorwurf der Trivialität zu erhalten. Auch die Verwendung der immer wieder in der Literatur auftauchenden Energiewerte von 100 kWs und 250 kWs für die Gefährdung einer NS-Anlage und der Gefährdung von Personen an einer NS-Anlage haben keine allgemeine Gültigkeit. Sie sind für ein geschlossenes NS-Schaltfeld mit den Abmessungen von 80x80x200 cm und einem Kurzschlussstrom von 40 kA bei 400 V ermittelt worden. Die genauen konstruktiven Daten des Schaltfeldes hinsichtlich der Festigkeit der Verschlüsse und auch der Schienenführung, einschließlich des Füllfaktors sind unbekannt, aber entscheidende Größen für eine vergleichende Beurteilung. Aus eigenen Untersuchungen zu Druckproblemen in NS-Schaltfeldern konnte schon 1984 nachgewiesen werden, dass für die Gefährdung von Anlagen nicht unbedingt ein Lichtbogenenergiewert entscheidend ist, sondern die Anstiegszeit der Lichtbogenleistung bezogen auf das Volumen und damit die Möglichkeiten des Lichtbogens sich in sehr kurzer Zeit auszuweiten. Im Bild 6 ist zu erkennen, dass die Lichtbogenleistung innerhalb von 8 ms einen Spitzenwert von > 90 MW erreicht, mit der Folge der Zerstörung des Abteils und Austritt des Lichtbogens. Die Bilder 7 und 8 zeigen einen Versuch mit einem Strom von 10 kA bei einer Spannung von 726 V. Im Diagramm erreicht die Lichtbogenleistung innerhalb von 10 ms einen Wert von $> 3,5$ MW,

entspricht einen Wert von 35 kW, was zur Zerstörung des Gehäuses führte. Das Ergebnis der Druckmessung ist nicht optimal, da die zulässige Mess-Frequenz des Drucksensors unterhalb von 10 kHz lag und die Druckmessdose ungünstig aufgebaut war. Ein gleicher Versuch, aber mit verlängerten Schienen innerhalb der Box bis auf 15 cm zur Front gebracht nur eine Lichtbogenleistung im Anstieg von 1MW und keine Zerstörung. Ein Hinweis, das für die Entwicklung der Lichtbogenleistung die Ausweitungsmöglichkeit des Lichtbogens entscheidend ist.

Im Internet ist ein Video (*Video 2*) zu sehen bei dem die Lichtbogenenergie bis zum Zeitpunkt der Personengefährdung weit unter 250 kW liegt. Aus den dargelegten Fakten sollten die Energiewerte 100 kW und 250 kW in einer Norm nicht verwendet werden.

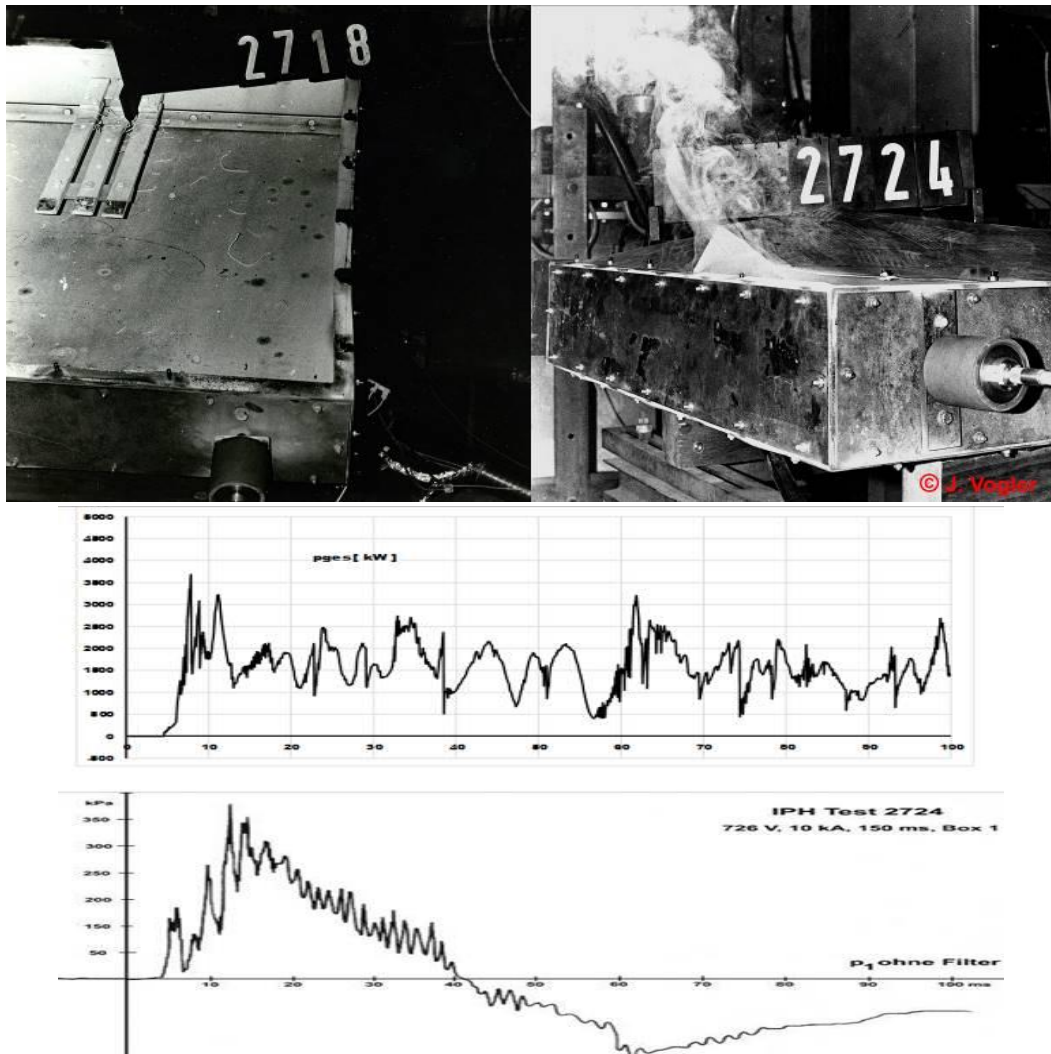


Bild 7 und 8: Oszillogramm des Tests in einer realen Prüfbox bei einem Kurzschlussstrom von 10 kA

Auch muss grundsätzlich auf eine sehr oberflächliche und teilweise mit trivialen Fehlern durchgeführten Berechnungen der Lichtbogenenergie für die Beurteilung der Personengefährdung in den Normen VDE 0682 Teil 306-1-1 und VDE 0682 Teil 306-1-2 sowie der DGUV Information 203-077 (BGI/GUV-I 5188) – Thermische Gefährdung durch Störlichtbögen hingewiesen werden. Die Berechnungsansätze beruhen ebenfalls auf die völlig veralteten analogen Messwerte aus den Untersuchungen an der TU Ilmenau und sind mit den aktuellen Untersuchungen und Messwerten an realen Niederspannungsanlagen sowie Störungsuntersuchungen nicht in Einklang zu bringen. Dazu folgt in Kürze ein Beitrag „Einwirkenergie - was ist das?“

Jürgen Vogler

23.04.2017

[1] Schau-Halinka-Winkler; Elektrische Schutzeinrichtungen in Industrienetzen und -anlagen
Hüthig und Pflaum Verlag 2008