

Unter Druck

Simulation des Druckanstiegs in Aufstellungsräumen für Schaltanlagen

EDGAR DULLNI, PAWEL WOJCIK, TOMASZ BLESZYNSKI – Ein Störlichtbogen ist eine unbeabsichtigte Entladung von elektrischer Energie in einer Schaltanlage. Während dieser Störung fließen Kurzschlussströme zwischen den Leitern und gegen Erde. Der Lichtbogen erwärmt das Füllgas (SF₆ oder Luft) im Schaltanlagegehäuse, was zu einem Druckanstieg führt. Solche Störungen sind selten, doch wenn sie auftreten, kann es zu schweren Beschädigungen der elektrischen Ausrüstung und des Gebäudes und sogar zur Gefährdung von Personen kommen. Der Druckanstieg in einem Gebäude lässt sich nur durch Berechnung ermitteln. Dennoch sollten die Berechnungen durch spezielle Tests untermauert werden, die eine Messung des externen Druckanstiegs ermöglichen. ABB hat ein Berechnungsprogramm entwickelt, das von Schaltanlagenentwicklern und Bauingenieuren leicht bedient werden kann.



Bei einem Druckanstieg werden Schaltanlagegehäuse mechanisch beansprucht. Um ein Bersten zu verhindern, öffnet sich eine Entlastungsvorrichtung, sobald ein bestimmter Druck erreicht ist. Ein Störlichtbogen erzeugt heißes Gas, das auf kontrollierte Weise in die Umgebung abgeführt werden muss. Meist geschieht dies durch oben auf der Schaltanlage angeordnete Auspuffkanäle. Häufig verfügen diese Kanäle am Ende über eine Klappe oder einen Energieabsorber, wo das heiße Gas vor dem Verlassen des Kanals abgekühlt wird.

Normen wie die IEC 62271-200 [1] verlangen, dass Schaltanlagen auch bei einem internen Lichtbogen für das Personal sicher sein müssen → 1. Durch Typprüfungen wird nicht nur nachgewiesen, dass das Schaltanlagegehäuse dem Druck standhält, sondern auch dass die heißen Gase vom Personal weggeleitet werden. Laut IEC 61936-1 [2] muss der von den Auspuffgasen verursachte Druckanstieg auch bei der Konstruktion des Gebäudes

berücksichtigt werden. Störlichtbogenprüfungen an Schaltanlagen decken diesen Aspekt nicht ab, da der Aufstellungsraum durch zwei senkrechte Wände und eine Decke simuliert wird, die keinen gasdichten Raum darstellen, in dem Raumdruckmessungen möglich sind. Daher lässt sich der Druckanstieg in einem Gebäude nur durch Berechnung ermitteln. Eine weitere Anwendung für das Berechnungsprogramm ist die Simulation des Druckanstiegs für verschiedene Füllgase, d. h. SF₆ und Luft. Zur Validierung wurden entsprechende Tests zusammen mit der RWTH Aachen und der TÜV Nord Systems GmbH durchgeführt.

Gleichungen im Berechnungsprogramm

Der Gasdruck in einem Gehäuse ist gemäß dem Gesetz idealer Gase abhängig von der Gastemperatur. Massenbilanzgleichungen berücksichtigen den Massenstrom aus dem Gehäuse. Schotträume werden durch ihr effektives Volumen (Komponenten abgezogen) und eine Druckentlastungsfläche dazwischen repräsentiert. Gaseigenschaften wie die spezifischen Wärmekapazitäten sind temperaturunabhängig und über das gesamte Volumen einheitlich [3].

Ein Teil – der sogenannte thermische Transferkoeffizient k_p – der Störlichtbogenleistung erwärmt das Gas im Lichtbogenraum:

$$Q_1 = k_p \cdot W_{el}$$

Die elektrische Lichtbogenleistung wird durch Messungen der Ströme und der Leiter-Erde-Spannungen bestimmt:

$$W_{el} = (u_R \cdot i_R + u_S \cdot i_S + u_T \cdot i_T)$$

Die gemessenen Spannungen sind nicht notwendigerweise identisch mit der Lichtbogen-Spannung, da ein dreiphasiger Lichtbogen zwischen zwei Leitern, aber auch zum geerdeten Gehäuse brennen kann. Das Druckberechnungsprogramm importiert entweder gemessene Leiter-Erde-Spannungen aus einer formatierten Datei oder verwendet eine empirische mittlere Leiter-Erde-Spannung.

Alle zeitabhängigen Größen im Druckberechnungsprogramm (Internal Arc Tool, IAT) werden vor und nach einem Zeitschritt Δt betrachtet. Die folgende Gleichung zeigt den Massenstrom aus dem Lichtbogenraum in den Auspuffraum:

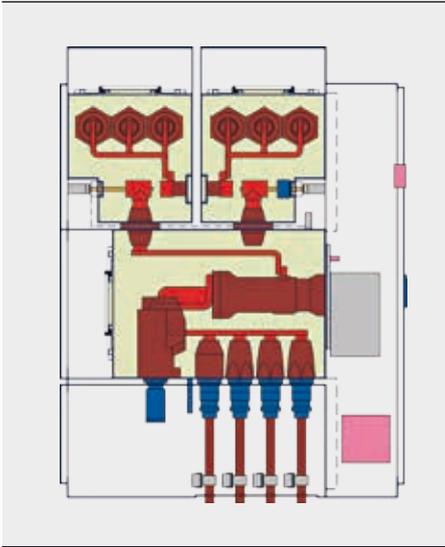
$$\Delta m_{12} = \alpha_{12} \cdot p_{12} \cdot w_{12} \cdot A_{12} \cdot \Delta t$$

α_{12} ist der Wirkungsgrad einer Entlastungsvorrichtung mit der Fläche A_{12} und berücksichtigt die Kontraktion des Gasstroms durch eine Öffnung mit scharfen Kanten (0,7 bis 1,0), aber auch die Strömungsreduktion durch ein Gitter oder

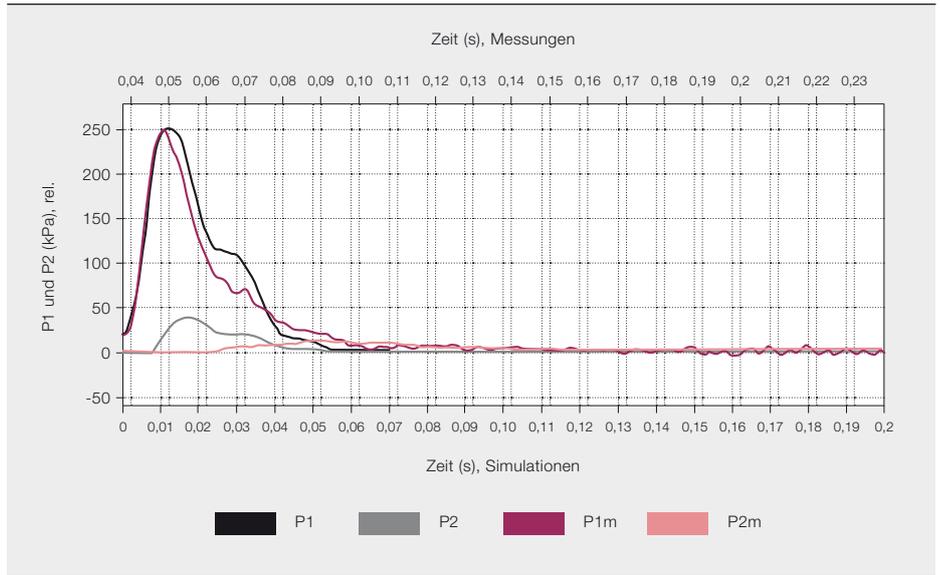
Titelbild

Die Hochgeschwindigkeitsaufnahme zeigt das kontrollierte Ausströmen von heißen Gasen aus einer Mittelspannungs-Schaltanlage bei einer Lichtbogenprüfung. Software von ABB berechnet die beobachtete Druckentwicklung innerhalb der Schaltanlage und im Aufstellungsraum.

2 Querschnitt durch eine ABB-Schaltanlage vom Typ ZX2 mit Druckentlastung in den oben liegenden Kanal.

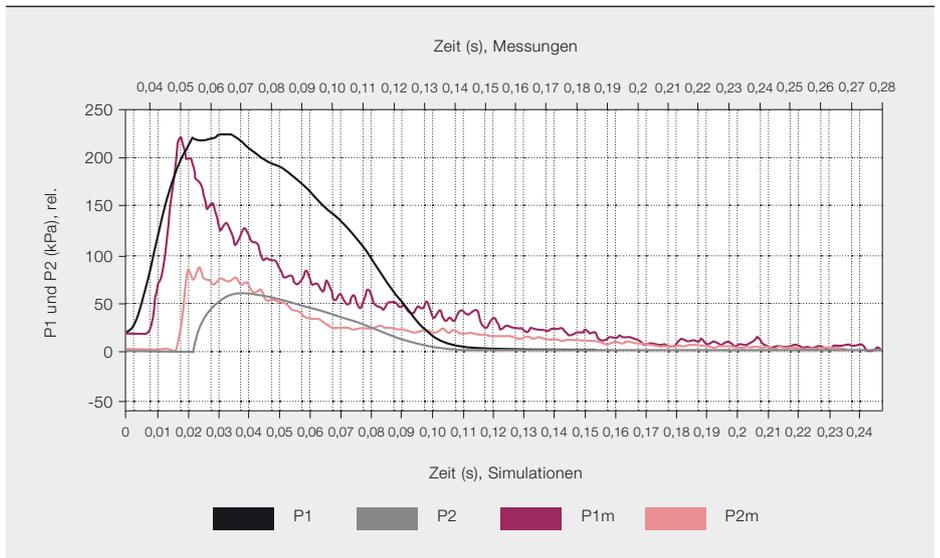


3 Vergleich der errechneten und gemessenen Druckentwicklung bei einem Störlichtbogen in einer ZX2 mit Luft als Füllgas (38 kA)



Durch Typprüfungen wird nicht nur nachgewiesen, dass das Schaltanlagegehäuse dem Druck standhält, sondern auch dass die heißen Gase vom Personal weggeleitet werden.

4 Vergleich der errechneten und gemessenen Druckentwicklung bei einem Störlichtbogen in einer ZX2 mit SF₆ als Füllgas (35 kA)



einen Absorber. Öffnet sich die Entlastungsvorrichtung, entweicht pro Zeitschritt die Masse Δm_{12} aus dem Volumen. ρ_{12} und W_{12} stehen für die Gasdichte und die Gasgeschwindigkeit innerhalb der Öffnung nach dem Gesetz von Bernoulli [3]. Dieser mathematische Ansatz ermöglicht die Berechnung des Druckanstiegs in allen beteiligten Volumen.

Die Genauigkeit der Berechnung ist durch die eingebrachten Vereinfachungen beschränkt. Da von konstanten spezifischen Wärmekapazitäten ausgegangen wird, ist die Dissoziation von Gasmolekülen in Fragmente nicht berücksichtigt. Diese beginnt bei 6.000 K in Luft und bei 2.000 K in SF₆. Eine Übereinstimmung mit Test-

ergebnissen liegt jedoch auch für höhere Gastemperaturen vor.

Entweicht eine beträchtliche Menge an Gas aus einem Schottraum der Schaltanlage, verbleiben immer weniger Moleküle darin. Blicke der Erwärmungsanteil k_p der Lichtbogenenergie zeitlich konstant, wäre die Folge eine stetig steigende Gastemperatur, die die bekannten Lichtbogentemperaturen von 20.000 K weit übersteigen würde. Dies ist nicht realistisch und führt zudem zu numerischen Instabilitäten. Um dies zu verhindern, wird k_p als dichteabhängig [4] angenommen. Diese Modifikation ermöglicht die Erweiterung der Berechnung auf längere Störungsdauern und die Berechnung des Druckanstiegs im Aufstellungsraum.

Beschreibung des Programms

Die beschriebene Methodik wurde am ABB Simulation Tools Center (STC)¹ erfolgreich in die IAT-Simulationssoftware implementiert.

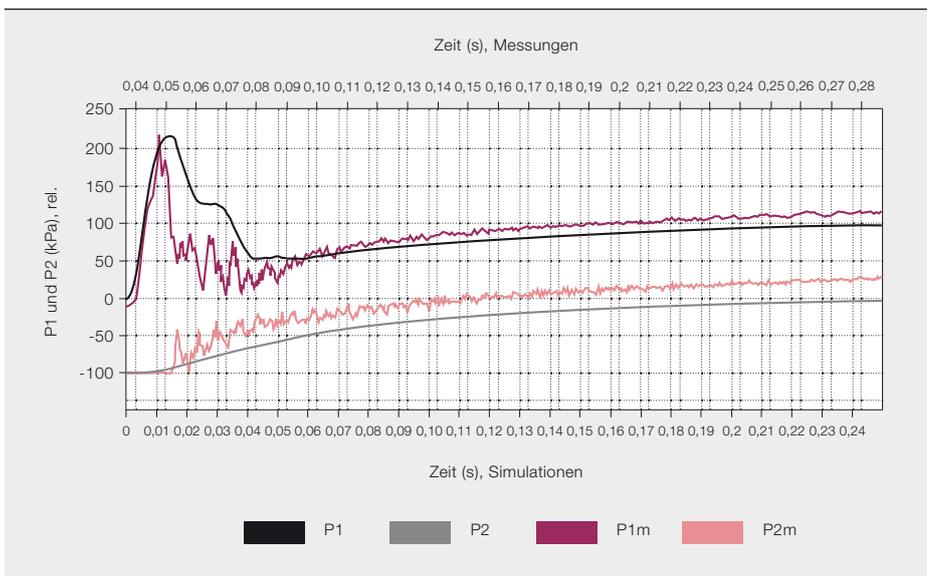
Das Programm besteht aus zwei Teilen – einer grafischen Benutzeroberfläche (GUI) und einem Gleichungslöser. Der Löser wurde in Python und die Benutzeroberfläche in Java entwickelt. Die Hauptfunktionen, die von der IAT-GUI bereitgestellt werden, sind:

- 1) Einrichten der Modellparameter
- 2) Ausführen des Gleichungslösers

Fußnote

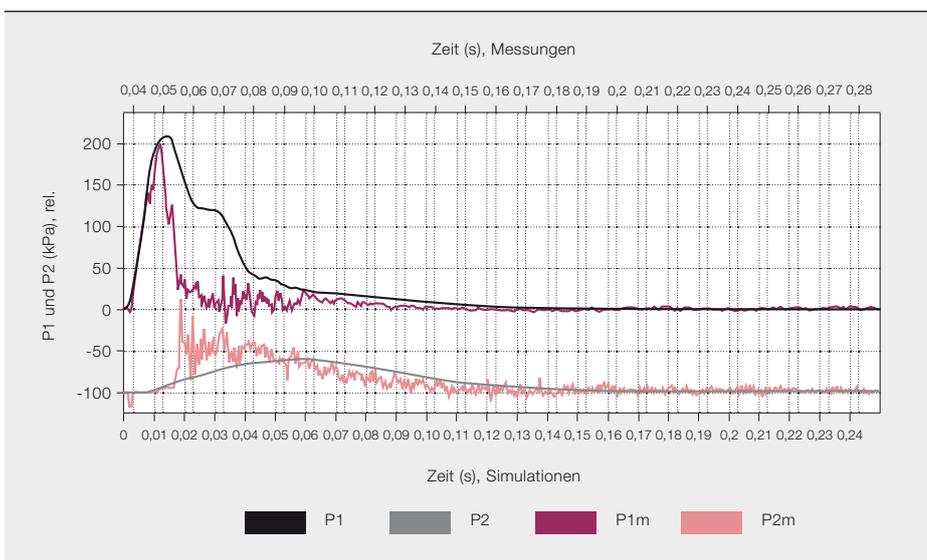
¹ Siehe auch → 7 auf Seite 71.

5 Vergleich der errechneten und gemessenen Druckentwicklung bei einem Störlichtbogen in einer Prüfanordnung mit einem 8 m³ großen, geschlossenen Behälter (20 kA)



Auf einem Laptop beträgt die Simulationszeit für eine maximale Lichtbogen-Brenndauer von 1 s weniger als 10 s.

6 Druckentwicklung wie in → 5 mit einer Entlastungsöffnung von 0,3 m² (20 kA)



3) Visualisierung der Ergebnisse

4) Erstellung eines Berichts

Die Modellparameter können direkt eingegeben oder aus einer Dropdown-Liste gewählt werden, wobei jeder Parameter überprüft wird. Ist das Modell fertig, kann der Benutzer die Simulation starten. Ein einfacher Assistent führt den Benutzer durch die Simulationsschritte. Auf einem Laptop beträgt die Simulationszeit für eine maximale Lichtbogen-Brenndauer von 1 s weniger als 10 s. Die Berechnungen werden mit einem konstanten Simulationszeitschritt von 0,05 ms durchgeführt. Zum Vergleich mit Tests können Messdaten in einem vorgegebenen Format importiert werden.

Die folgenden Kennlinien werden gezeichnet:

- 1) Druck vs. Zeit
- 2) Leiterströme vs. Zeit
- 3) Leiter-Erde-Spannungen vs. Zeit
- 4) Integrierte Lichtbogenleistung vs. Zeit

Die Diagramme können dynamisch modifiziert werden, und es ist kein zusätzlicher Editor für die Visualisierung erforderlich. Beispiele entsprechender Diagramme sind in → 3 – 9 dargestellt.

Außerdem werden Textdateien mit Simulationsparametern (gewählte Eingangs- und Ausgangswerte) und Ergebnisdaten generiert.

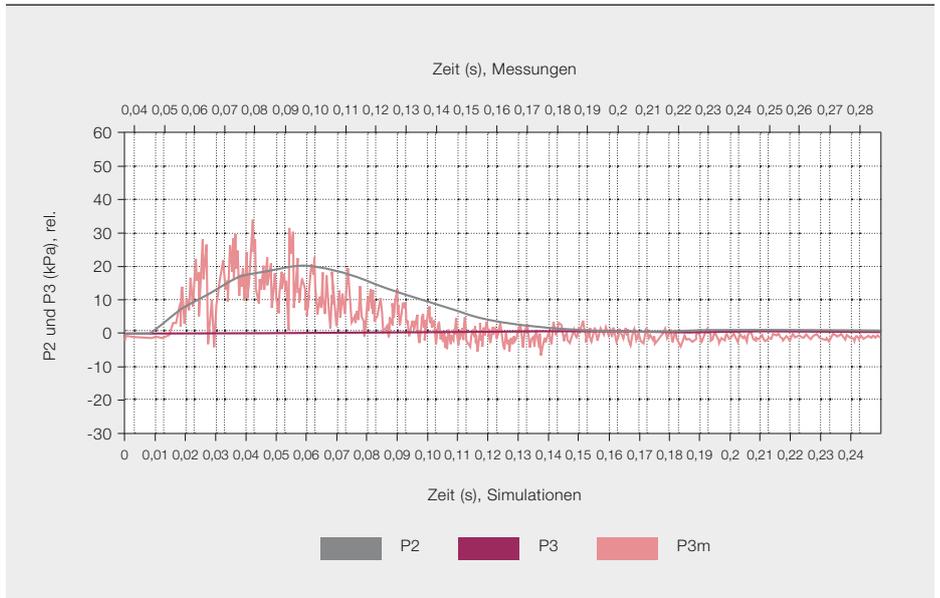
Vergleich der Ergebnisse

Die IAT-Ergebnisse wurden mit Messungen aus Tests mit ABB-Schaltanlagen und speziell konzipierten Experimenten verglichen.

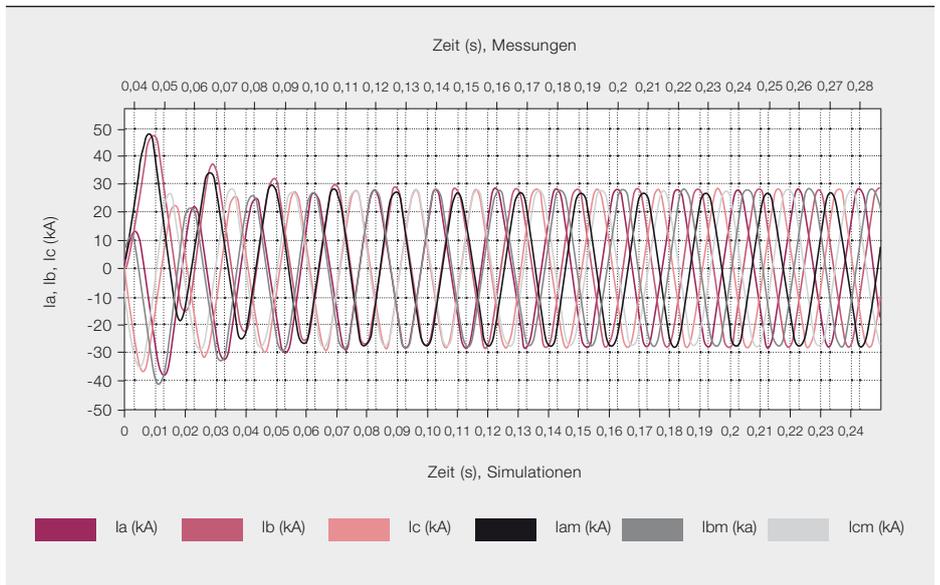
Der erste Vergleich bezieht sich auf gasisolierte Schaltanlagen (GIS), bei denen das Isoliergas SF₆ durch Luft ersetzt werden konnte. Ein Querschnitt durch die ABB-Schaltanlage vom Typ ZX2, bei der der Lichtbogen im Sammelschienenraum gezündet wurde, ist in → 2 dargestellt. Als Druckentlastungsvorrichtung diente eine dünne Berstscheibe mit einer Fläche von 0,049 m², die bei einem Überdruck von 220 kPa in einen Kanal oberhalb der Anlage öffnet. Der Fehlerstrom betrug 39 kA

Das Ausströmen von heißem Gas und der anschließende Druckanstieg in einem geschlossenen Aufstellungsraum wurden in einem speziellen Experiment untersucht.

7 Druck im Behälter, gemessen an einer anderen Stelle als in → 6



8 Gemessene und angelegte Phasenströme zeigen die anfängliche Asymmetrie



und wurde 1 s lang angelegt. Die Oszillogramme zeigen die zeitliche Entwicklung des errechneten Drucks im Lichtbogenraum (schwarz in den Oszillogrammen) und dem Auspuffkanal (grau in den Oszillogrammen) sowie die entsprechenden gemessenen Daten (violett im Lichtbogenraum und rosa im Auspuffkanal) bis 250 ms nach Zündung des Lichtbogens.

In → 3 stimmen Druckanstieg, -spitze und -abfall im luftgefüllten Lichtbogenraum in Messung und Berechnung gut überein. Für k_p wurde gemäß veröffentlichten Daten ein Wert von 0,5 angenommen, und die Lichtbogenspannung (Leiter-Erde) von 300 V wurde aus dem Test ermittelt. Die Berechnung des Drucks im Auspuffkanal

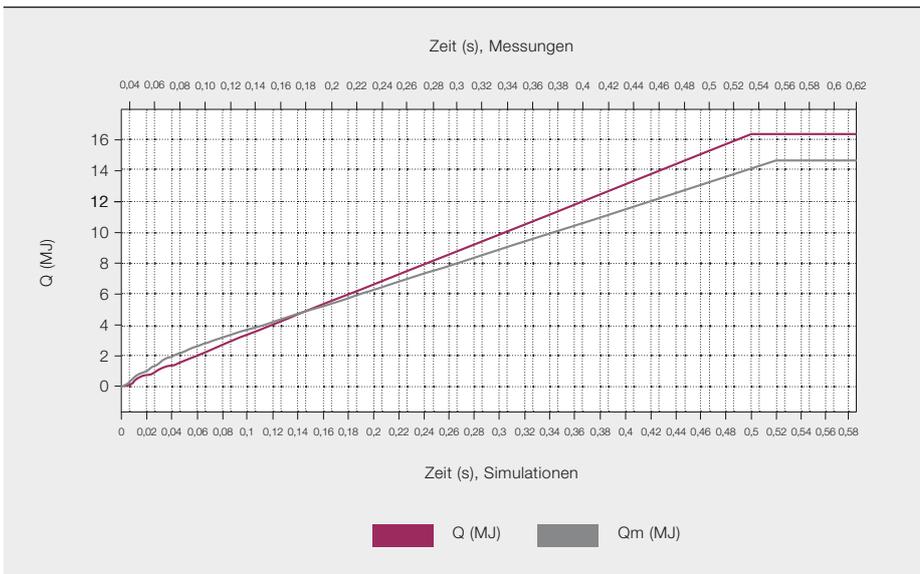
weist eine weniger zufriedenstellende Übereinstimmung mit den Testergebnissen auf. Dies ist auf Fließzeiteffekte des ausströmenden Gases zurückzuführen, die im IAT nicht implementiert werden können.

Für das Füllgas SF_6 → 4 ist die Wiedergabe der Druckspitze ebenfalls gut, aber der Druckabfall nach dem Öffnen der Berstscheibe ist weniger zufriedenstellend. Die Berechnung liefert eine längere Verweilzeit des Gases als im Test beobachtet. Für k_p wurde in Übereinstimmung mit Veröffentlichungen ein Wert von 0,75 angenommen, und die Lichtbogenspannung betrug gemäß Tests 400 V.

Viele Tests wurden nachgerechnet. Die Ungenauigkeit beim Spitzendruck im Lichtbogenraum liegt bei $\pm 20\%$ und wird hauptsächlich durch die Unsicherheit des Ansprechdrucks der Entlastungsvorrichtung bestimmt. Der Druckabfall nach der Entlastung wird mit einem Fehlerfaktor von zwei simuliert. Dies ist für die Beurteilung der Druckfestigkeit der Schaltanlage nicht von Bedeutung, da der Spitzendruck entscheidend ist.

Der Spitzendruck in Auspuffkanälen kann ebenfalls berechnet werden – allerdings ist eine Ungenauigkeit von bis zu $\pm 40\%$ möglich, was auf die Effekte von Druckwellen in länglichen Kanälen zurückzuführen ist.

9 Lichtbogenenergie, bestimmt durch Multiplikation der Leiter-Erde-Spannungen und -Ströme (violett: IAT; grau: Messung)



Das Ausströmen von heißem Gas und der anschließende Druckanstieg in einem geschlossenen Aufstellungsraum wurden in einem speziellen Experiment untersucht [4]. Der Aufstellungsraum wurde dabei durch einen 8 m³ großen, gasdichten Behälter simuliert. Die durch Tests und Berechnungen ermittelten Drücke sind in → 5 dargestellt. Der Druckabfall im Lichtbogenraum nach Ansprechen der Entlastungsvorrichtung weicht von den Messungen ab, aber die Sättigung des Druckanstiegs im Behälter wird zufriedenstellend wiedergegeben. Dies liegt an der im IAT implementierten Verringerung von k_p in Abhängigkeit von der abnehmenden Gasdichte im Schottraum. Würde die Lichtbogenenergie das gesamte Volumen des Behälters zeitlich gleichmäßig erwärmen wie bei einem frei brennenden Lichtbogen, würde der Druck linear auf 345 kPa und nicht auf die gemessenen 154 kPa und die berechneten 114 kPa ansteigen.

Das Berechnungsprogramm implementiert die Dichteabhängigkeit von k_p gemäß folgender Formel für $\rho(t) < \rho_c$:

$$k_p(t) = k_p \cdot c_0 \cdot (\rho(t)/\rho_0)^{0.5}$$

C_0 wird für einen kontinuierlichen Übergang vom anfänglichen k_p -Wert angepasst. ρ_c entspricht 1% der normalen Gasdichte ρ_0 bei 100 kPa für Luft und 20% für SF₆. Entsprechende Ergebnisse wurden durch Tests mit SF₆ und Luft in einer ähnlichen Anordnung ermittelt [4].

Das Programm ist auch in der Lage, den Druckanstieg in Aufstellungsräumen mit Entlastungsöffnungen, z. B. in Form von Fenstern oder Klappen, zu berechnen. → 6 zeigt ein Testergebnis unter Verwendung des gleichen 8 m³ großen Behälters mit einer Entlastungsfläche von 0,3 m². Die tatsächliche Geometrie des Aufstellungsraums und die Lage der Entlastungsöffnung und der Sensoren können im IAT nicht berücksichtigt werden, was zu Abweichungen gegenüber der Realität führt. Ein Beispiel ist der höhere Anfangsdruck in → 6 aufgrund des direkten Gastroms auf den Sensor. Ein weiterer, daneben platzierter Sensor zeigt eine bessere Übereinstimmung mit der Berechnung → 7. Bessere Ergebnisse könnten nur durch numerische Strömungsberechnungen (CFD) erzielt werden.

Geschätzter Druck

Die Test- und Simulationsergebnisse für die Spitzendrücke stimmen sowohl in den Schotträumen als auch den Entlastungsvolumen innerhalb akzeptabler Grenzen überein. Ungenauigkeiten sind auf die im Programm implementierten Vereinfachungen (z. B. Annahme eines idealen Gases und generische Ausströmfunktion) zurückzuführen. Das IAT kann zur Simulation der Druckauswirkung von Lichtbogenstörungen in Schaltanlagen verwendet werden. Die Unsicherheit bei der Vorhersage des Spitzendrucks liegt für den Lichtbogenraum im Bereich von ±20%. Eine zuverlässige Angabe der Lichtbogenenergie, bestimmt durch Tests mit ähnlichen Schaltanlagen, ist erforderlich. Das Programm

Das IAT ist ein nützliches Werkzeug zur Verbesserung der Designeffizienz und der Sicherheit – insbesondere, wenn die Durchführung realer Tests unpraktisch oder unmöglich ist.

kann außerdem zur Schätzung des Druckanstiegs in einem Entlastungsvolumen oder Aufstellungsraum mit oder ohne Entlastungsöffnungen verwendet werden, wobei geeignete Sicherheitsmargen zu berücksichtigen sind. Das IAT ist ein nützliches Werkzeug zur Verbesserung der Designeffizienz und der Sicherheit – insbesondere, wenn die Durchführung realer Tests unpraktisch oder unmöglich ist.

Edgar Dullni

ABB Power Products
Ratingen, Deutschland
edgar.dullni@de.abb.com

Pawel Wojcik

Tomasz Bleszynski
ABB Corporate Research
ABB Corporate Research
Krakau, Polen
pawel.wojcik@pl.abb.com
tomasz.bleszynski@pl.abb.com

Literaturhinweise

- [1] „High-voltage switchgear and control gear – Part 200: AC metal-enclosed switchgear and control gear for rated voltages above 1 kV and up to and including 52 kV“. IEC 62271-200, 2011
- [2] „Power installations exceeding 1 kV a.c. – Part 1: Common rules“. IEC 61936-1, 2010.
- [3] WG A3.24: „Tools for the Simulation of Effects Due to Internal Arc in MV and HV Switchgear“. CIGRE Technical Brochure. Geplante Publikation 2013
- [4] Dullni, E. et al (1994): „Pressure rise in a switchroom due to internal arc in a switchboard“. Proceedings of the 6th International Symposium on Short-Circuit Currents in Power Systems: 451–457
- [5] SOLVAY GmbH: „Schwefelhexafluorid“. Unternehmensbroschüre