

Schlussbericht

der Forschungsstelle(n)

Nr. 1: Forschungsinstitut der Forschungsgemeinschaft für Elektrische Anlagen
und Stromwirtschaft e.V.

zu dem über die



im Rahmen des Programms zur
Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF)

vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

geförderten Vorhaben **IGF 15657N**

Reduzierung der Druckbeanspruchung elektrischer Anlagen

im Störlichtbogenfall

(Bewilligungszeitraum: 01.11.2008 - 30.04.2011)

der AiF-Forschungsvereinigung

Elektrische Anlagen

Mannheim, 15.08.2011

Ort, Datum

Jan Christoph Kahlen

Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)
an der/den Forschungsstelle(n)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Schlussbericht

der Forschungsstelle(n)

Nr. 2: RWTH Aachen, Institut für Hochspannungstechnik

zu dem über die



im Rahmen des Programms zur
Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF)

vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

geförderten Vorhaben **IGF 15657N**

Reduzierung der Druckbeanspruchung elektrischer Anlagen

im Störlichtbogenfall

(Bewilligungszeitraum: 01.11.2008 - 30.04.2011)

der AiF-Forschungsvereinigung

Elektrische Anlagen

Aachen, 15.08.2011

Ort, Datum

Gerhard Pietsch

Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)
an der/den Forschungsstelle(n)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Kurzfassung

Aufgabenstellung

Störlichtbögen in elektrischen Anlagen treten zwar selten auf, sie stellen jedoch ein erhebliches Gefährdungspotenzial für das Bedienpersonal, die Schaltanlagen und das Schaltanlagegebäude dar. Die Störlichtbogensicherheit kann über Störlichtbogenprüfungen und auch über Druckberechnungen nachgewiesen werden. Diese sind nicht nur kostengünstiger, sondern in einigen Fällen, z. B. während der Planungsphase und bei der Bewertung von Bestandsanlagen, die einzige Möglichkeit. Die experimentelle Prüfung der Druckauswirkungen auf Schaltanlagenräume und –gebäude ist in der Regel nicht oder nur eingeschränkt möglich, so dass auch hier auf die Druckberechnung zurückgegriffen werden muss. Daher werden flexibel einsetzbare und zuverlässige Berechnungsverfahren für die Bewertung der Störlichtbogensicherheit von elektrischen Anlagen benötigt.

Zur Reduzierung der Druckbelastung elektrischer Anlagen werden konstruktive Maßnahmen, z. B. in Form von Druckentlastungsöffnungen oder Energieabsorbern durchgeführt, deren Wirkung von Druckberechnungsverfahren erfasst werden müssen. Neben dem Isoliergas Luft wird in der Mittelspannungstechnik vermehrt Schwefelhexafluorid (SF_6) eingesetzt. Die physikalischen und chemischen Eigenschaften dieses Isoliergases beeinflussen den Druckaufbau im Störlichtbogenfall maßgeblich, sodass gasartspezifische Materialdaten für die Druckberechnung unerlässlich sind. Außerdem tritt beim Ausströmen des SF_6 aus einer störlichtbogenbehafteten Anlage ein Mischungsprozess mit der Umgebungsluft mit Wechselwirkungen der beteiligten Gaskomponenten auf, der ebenfalls zu berücksichtigen ist.

Vorgehensweise und Ergebnisse

Mit dem im Rahmen des Projekts entwickelten Referenzverfahren, einem raummittelnden Verfahren, steht ein zuverlässiges Werkzeug für die Druckberechnung in elektrischen Anlagen zur Verfügung, das sowohl Energieabsorber als auch Gasgemische aus SF_6 und Luft durch entsprechende Modelle nachbilden kann und dadurch den Anwendungsbereich und die Qualität von Druckberechnungen deutlich erweitert und verbessert. Durch Integration der Modelle für Energieabsorber und SF_6 /Luft-Gasgemische in ein ortsauflösendes *Computational Fluid Dynamics* (CFD)-Verfahren, ist dessen Funktionalität ergänzt worden. Anhand verschiedener Testanordnungen sind beide Verfahren evaluiert und die Gültigkeitsgrenzen des raummittelnden Referenzverfahrens bestimmt worden.

Weiterhin ist eine Datenbasis zum sogenannten k_p -Faktor und zur Lichtbogenstromspannung aufgebaut worden, die durch die Sammlung von Messdaten aus einer Vielzahl von Störlichtbogenprüfungen besteht. Damit sind qualitative Abhängigkeiten zwischen den Anlageneigenschaften bzw. den Versuchsparametern und den für die Druckberechnung benötigten Eingangsdaten bestimmbar. Auch wenn sich der Umfang der Datenbasis wegen der Vielzahl an möglichen Parametervariationen zur Ableitung von Gesetzmäßigkeiten als nicht ausreichend erwiesen hat, liefert die Auswertung der gesammelten Daten dennoch wichtige neue Erkenntnisse zur Abhängigkeit der Eingangsdaten von Randbedingungen, die für Druckberechnungen von großer Bedeutung sind.

Die genannten Druckberechnungsverfahren mit ihrem erweiterten Anwendungspotenzial stehen jetzt als wichtiges Werkzeug für die Anlagenoptimierung als Voraussetzung für eine Reduzierung der Druckbeanspruchung elektrischer Anlagen im Störlichtbogenfall zur Verfügung.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Ziel des Forschungsvorhabens.....	1
1.1. Einführung in die Thematik	1
1.2. Ausgangssituation	1
1.3. Problemstellung	2
1.3.1. Druckentlastungsmaßnahmen.....	2
1.3.2. Problemfelder bei Druckberechnungsverfahren.....	2
1.4. Ziele des Projektes und Aufbau des Berichtes.....	3
2. Grundlagen zur Druckberechnung im Störlichtbogenfall	6
2.1. Allgemeine Zusammenhänge	6
2.2. Bekannte Druckberechnungsverfahren.....	7
2.3. Standardverfahren	9
2.4. CFD-Druckberechnungsverfahren	9
3. Eingangsdaten und Sub-Modelle der Druckberechnung	11
3.1. Modellierung von Energieabsorbern	11
3.1.1. Phänomenologische Beschreibung der Energieabsorber	11
3.1.2. Modellierung der Energieabsorption	12
3.1.3. Modellierung des Strömungswiderstands	14
3.2. Modellierung von SF ₆ /Luft-Gasgemischen	16
3.2.1. Herleitung und Bestimmung der Gasdaten	17
3.2.2. Bereitstellung der Gasdaten	18
3.2.3. Einfluss von Verunreinigungen durch Metaldampf	19
3.3. Aufbau der Datenbasis	20
3.4. Untersuchungen zum k_p -Faktor	21
3.4.1. Dichteabhängigkeit des k_p -Faktors	21
3.4.2. Einfluss der Energiedichte im Lichtbogenraum	22
3.4.3. Abhängigkeit des k_p -Faktors vom Isoliergas	23
3.4.4. Abhängigkeit des k_p -Faktors vom Elektrodenmaterial.....	24
3.5. Untersuchungen zur Lichtbogenspannung.....	25
3.5.1. Abhängigkeit der Lichtbogenspannung vom Isoliergas	28
3.5.2. Abhängigkeit von der Stromstärke des Lichtbogens	29
3.5.3. Einfluss des Elektrodenwerkstoffsauf die Lichtbogenspannung.....	30
3.5.4. Einfluss des Volumen des Lichtbogenraums	31
3.6. Fazit Datenbasis	31

4. Entwicklung der Druckberechnungsverfahren.....	32
4.1. Einbindung der Sub-Modelle im CFD-Verfahren	32
4.2. Aufbau und Funktionalität des Referenzverfahrens.....	33
4.3. Evaluation des Referenzverfahrens	36
4.3.1. Evaluation Gasgemische (Beispiel 1)	36
4.3.2. Evaluation Gasgemische (Beispiel 2)	37
4.3.3. Evaluation Energieabsorber-Modell CFD	38
4.3.4. Evaluation Energieabsorber-Modell Referenzverfahren.....	39
4.4. Bestimmung von Gültigkeitsgrenzen des Referenzverfahrens	40
4.4.1. Testfall 1: Langgestreckte Räume	40
4.4.2. Testfall 2: Druckentlastungskanal auf MV-Schaltanlage	42
5. Ergebnistransfer in die Wirtschaft.....	47
6. Zusammenfassung	49
Literaturverzeichnis	52

1. Einleitung und Ziel des Forschungsvorhabens

1.1. Einführung in die Thematik

Störlichtbögen in elektrischen Anlagen heizen das umgebende Isoliergas auf und bewirken dadurch einen Druckanstieg in (gekapselten) Anlagen und darüber hinaus über in der Schaltzelle vorhandene Druckentlastungseinrichtungen auch im Anlagenraum bzw. –gebäude.

Obgleich Fehlerlichtbögen äußerst seltene Ereignisse sind, muss mit ihrem Auftreten im Hinblick auf Personensicherheit, Gefährdung von Schaltanlagen und -gebäuden sowie der Versorgungssicherheit gerechnet werden.

Störlichtbogensicherheit kann prinzipiell auf zwei Wegen nachgewiesen werden, durch Störlichtbogenprüfungen und Druckberechnungen. Prüfungen für fabrikfertige Anlagen werden nach VDE 0671 Teil 200 bzw. IEC 62271 und PEHLA-Richtlinien Nr. 4 durchgeführt [1],[2]. Sie sind aufwändig und daher kostspielig. Die Auswirkung auf Gebäude wird mit diesen Störlichtbogenprüfungen jedoch nicht erfasst. In vielen Fällen sind Prüfungen zudem nicht möglich, z. B. wenn bei höheren Kurzschlussleistungen in bereits bestehenden Gebäuden die vorhandenen Schaltanlagen durch kompaktere ersetzt werden sollen oder wenn bereits in der Planungsphase einer Anlage mögliche Gefährdungen erkannt werden sollen. Daher spielen zuverlässige Druckberechnungsverfahren eine herausragende Rolle, mit denen u. a. auch der Einfluss von konstruktiven Maßnahmen auf die Druckbelastung von Anlagen und Gebäuden untersucht werden kann.

1.2. Ausgangssituation

Zur Reduzierung der Druckbeanspruchung im Störlichtbogenfall existieren mehrere Möglichkeiten, aktive und passive Maßnahmen. Aktive Maßnahmen sind z. B. Lichtbogenwächter in Zusammenhang mit schnellen Kurzschließen („arc killer“) oder konstruktive Maßnahmen über die eine verminderte Lichtbogenspannung auftritt („Lichtbogenwanne“). Zu den passiven Maßnahmen gehören vor allem konstruktive Anordnungen zur Druckreduzierung wie

- Druckentlastungsöffnungen in Schaltanlagen und -gebäuden
- Zwischenräume zwischen fehlerbehaftetem Schottraum und dem Anlagenraum bzw. Kanäle, die z. B. ins Freie führen
- Strömungshindernisse im Heißgasstrom und
- Lichtbogenenergieabsorber.

Die Wirkung dieser Maßnahmen ist grundsätzlich qualitativ bekannt. Dieses gilt jedoch nicht im Allgemeinen für Optimierung von einzelnen dieser Maßnahmen und vor allem nicht für die Optimierung von Kombinationen dieser Maßnahmen. Hierfür werden entsprechende zuverlässige und allgemein akzeptierte Berechnungsverfahren benötigt, die die Möglichkeit bieten, die Wirkung dieser Maßnahmen zu analysieren und somit z. B. bereits im Entwicklungs- bzw. Planungsstadium unzulässig hohe Druckbelastungen in Anlagen und Gebäuden durch konstruktive Änderungen kostengünstig und schnell ermitteln zu können.

1.3. Problemstellung

1.3.1. Druckentlastungsmaßnahmen

Von den oben angesprochenen Maßnahmen spielen im Allgemeinen Lichtbogenwächter (abgesehen von Niederspannungsanlagen) und Schnellerder eine untergeordnete Rolle. Stand der Technik sind Druckentlastungsöffnungen in der Anlage bzw. im Anlagengebäude wie

- Druckentlastungsklappen bzw. Berstscheiben (in Schaltanlagen)
- Druckentlastungsöffnungen z. B. freie Öffnungen, Jalousien (in Räumen).

Zwischenvolumina zwischen Lichtbogen- und Entlastungsraum (z. B. Kamine im Schaltfeld, Kabelkeller, Druckentlastungskanäle auf Schaltanlagen) und Strömungshindernisse im Heißgasstrom (z. B. Blenden, Lochbleche) führen in der Regel zu einer erhöhten Druckbelastung im fehlerbehafteten Schaltfeld, können jedoch die Belastung im Schaltanlagenraum erheblich reduzieren. Im Einzelnen liegen hierzu sporadische Erkenntnisse bei Schaltanlagenherstellern vor. Sie sind jedoch bislang nicht ausreichend systematisch analysiert und dokumentiert. In diesem Zusammenhang spielen Lichtbogenenergieabsorber eine zunehmend wichtigere Rolle. Ihre Funktion ist dem Prinzip nach bekannt, es existieren jedoch keine systematischen und quantitativen Untersuchungen über das Ausmaß der Effekte. Eine Überprüfung dieser Druckentlastungsmaßnahmen für Gebäude ist besonders problematisch, weil Prüfungen in bestehenden und geplanten Gebäuden nicht durchgeführt werden können und daher Druckberechnungen zur Bewertung der Maßnahmen verlangt werden.

1.3.2. Problemfelder bei Druckberechnungsverfahren

Um den Einsatz von Druckberechnungsverfahren einem erweiterten Anwendungsbereich zuzuführen, sind Erweiterungen der bislang vorhandenen Verfahren notwendig. Um ihre Genauigkeit und Zuverlässigkeit zu erhöhen, ist die für die Berechnungen notwendige Datenbasis zu verbessern. Dieses bedeutet insbesondere:

1. Die Einbindung von Lichtbogenenergieabsorbern in Berechnungsverfahren, Modellierung des Wärmeübergangs von Heißgasen auf den Absorber und dessen Strömungswiderstand, Bestimmung des Wirkungsgrads von Absorbern in Abhängigkeit von der Lichtbogenenergie - hierfür gibt es bislang keine Vorbilder (z. B. ist eine direkte Einbeziehung von mehrlagigen Streckmetallgittern in CFD-Programmen durch eine entsprechend kleinmaschige Diskretisierung der Strömungsdomäne aus Rechenzeitgründen nicht praktikabel).
2. Die Einbeziehung von Gasgemischen in die Berechnung (bei SF₆-isolierten Schotträumen in Luftumgebung), Modellierung des Mischungsvorgangs, Datenbasis für Gemische [3] - dieses beherrscht derzeit noch kein bekanntes (publiziertes) Druckberechnungsverfahren.
3. Die Verbesserung der Kenntnisse zum Anteil der Lichtbogenenergie, der in den Druckaufbau geht, zum so genannten k_p -Faktor[4-10] -dieser ist entscheidend für die Güte aller Berechnungsverfahren und abhängig insbesondere:
 - vom Gasmodell (Datenbasis)
 - von der Gasdichte (nur unzureichend bekannt)
 - von Aufschmelzungen, Metaldampf (chemische Reaktionsenergien, Teilchenvermehrung, Strahlungsabsorption), die nicht einfach zu berücksichtigen sind [11], [12]
 - sowie vom Volumen, in dem der Lichtbogen brennt [7].

4. Die Bestimmung von Gültigkeitsgrenzen von vereinfachten Druckberechnungsverfahren (in Abhängigkeit von der Größe und Form des Entlastungsvolumens, Auswirkung von Druckwellenphänomenen, bei Vorliegen von Gasgemischen).
5. Die Bestimmung der Lichtbogenspannung (Aufbau einer Datenbasis, Abhängigkeit vom Fehlerstrom, Lichtbogenwanderungen, Art des Isoliergases) sowie die Kenntnis der anzunehmenden Lichtbogenspannung ist erforderlich, wenn keine Leistungsverläufe aus Messungen vorliegen.

Um zuverlässige Ergebnisse mit Druckberechnungen zu erzielen, sind Daten erforderlich, die aus Experimenten abgeleitet worden sind. Störlichtbogenversuche im Hochleistungsprüffeld sind kostspielig und zeitaufwendig und führen zu hohen Kosten. Im Rahmen des Projekts sind daher Messdaten von den im Projektbegleitenden Ausschuss vertretenen Unternehmen, aus der Industrie und von anderen Forschungsstellen gesammelt worden, die insbesondere die Lichtbogenspannung, den k_p -Faktor und Druckmessungen zur Evaluierung der Rechenverfahren betreffen. Die Herleitung von allgemeingültigen Zusammenhängen auf Grundlage dieser Datenbasis zwecks Bestimmung von Eingangsdaten für die Druckberechnung von Anlagen, zu denen keine Experimente vorliegen, ist von besonderer Bedeutung.

1.4. Ziele des Projektes und Aufbau des Berichtes

Das übergeordnete Ziel ist die Beherrschung der Druckbeanspruchung in elektrischen Anlagen im Störlichtbogenfall und dessen Nachweis. Dieses ist mit mehreren Maßnahmen möglich. Der Einsatz von Lichtbogenenergieabsorbern ist dabei eine von den bislang am wenigsten untersuchten Möglichkeiten, so dass deren Wirkung auf den Überdruck ein Schwerpunkt der Untersuchungen ist. Eine Analyse von mehreren Druckentlastungsmaßnahmen ist allerdings nur sinnvoll möglich, wenn die Druckentlastung auch mit Berechnungsverfahren nachgebildet werden kann.

Bei der Entwicklung von Anlagen und der Überprüfung der Störlichtbogenfestigkeit hat sich herausgestellt, dass in der Praxis ein Bedarf an zwei Druckberechnungsverfahren gegeben ist: ein umfassendes, einfach handhabbares, schnelles und möglichst allgemein akzeptiertes Berechnungsverfahren zur Ermittlung der mittleren Druckbeanspruchung in elektrischen Anlagen im Fehlerfall (ein Referenzverfahren für ortsmittelnde Verfahren) sowie ein ortsauflösendes, komplexeres Verfahren, mit dem insbesondere Spezialfälle untersucht werden können (CFD-Verfahren; CFD steht für Computational Fluid Dynamics).

In diesem Zusammenhang ist auch die zunehmende Verwendung von gasisolierten Schaltanlagen zu sehen, bei denen im Fehlerfall heißes SF_6 in die Umgebungsluft strömt und im Anlagenraum eine Druckerhöhung bewirkt. Die Berücksichtigung von SF_6 /Luft-Gemischen ist bislang mit bekannten Druckberechnungsverfahren nicht zuverlässig möglich.

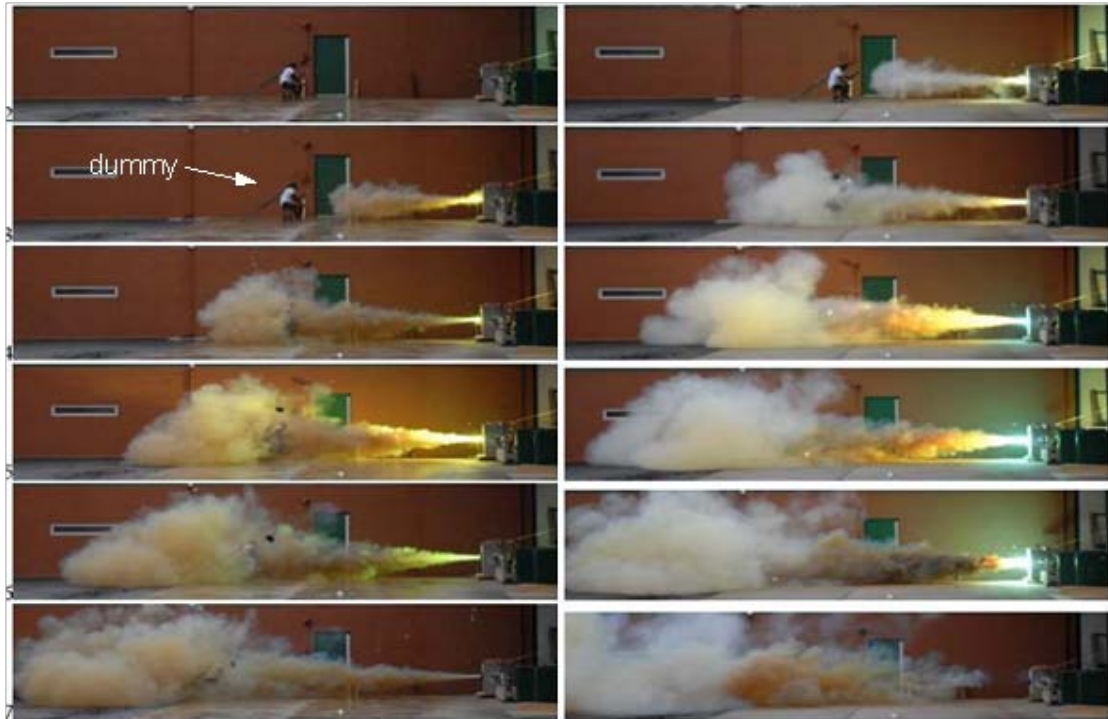


Abb. 1.1 Vergleich des Ausströmvorgangs aus einem gasisolierten Schottraum im Störlichtbogenfall für Luftisolation (links) und bei der Verwendung von SF_6 (rechts) zu verschiedenen Zeitpunkten [13]

Das Ausströmverhalten der beiden Isoliergase aus einem fehlerbehafteten Schottraum in die Umgebung ist in Abb. 1.1 visualisiert. Es zeigen sich dabei signifikante Unterschiede, die bei einer Druckberechnung zu berücksichtigen sind. Eine Einbindung des Ausströmvorgangs von SF_6 in Luft und die resultierende Vermischung sowie der Wirkung von Energieabsorbern in die beiden Druckberechnungsverfahren war daher ein weiteres wichtiges Forschungsziel.

Schließlich war die Verbesserung der Datenbasis für die Druckberechnungsverfahren im Hinblick insbesondere auf ein einfach handhabbares Referenzverfahren Forschungsziel. Hierzu gehören Untersuchungen zum k_p -Faktor und zur Lichtbogenspannung. Das entwickelte Referenzverfahren ermöglicht u. a., die Wirkung von Energieabsorbern sowie Gemische von SF_6 und Luft zu berücksichtigen. Darüber hinaus wurde angestrebt, Verbesserungen in der Handhabung und eine erweiterte Anwendbarkeit zu erreichen. Erreicht werden sollte die Einsparung von kostenintensiven Versuchen im Hochleistungsprüffeld, die Verkürzung von Entwicklungszeiten sowie zuverlässige Aussagen zu notwendigen Druckentlastungsflächen für Anlagengebäude.

Im Einzelnen war vorgesehen:

- Arbeitspaket 1: Untersuchung und Modellierung von Energieabsorbern einschließlich Einbindung in das CFD-Verfahren und Verifikation
- Arbeitspaket 2: Modellierung von SF_6 /Luft-Gasgemischen einschließlich Einbindung in das CFD-Verfahren und Verifikation
- Arbeitspaket 3: Entwicklung und Implementierung eines Referenzverfahrens zur Druckberechnung mit einem breiten Anwendungsspektrum unter Einbeziehung von SF_6 /Luft-Gasgemischen und Energieabsorbern einschließlich einer Verifikation

- Arbeitspaket 4: Sammlung von Messdaten aus Störlichtbogenversuchen zwecks Analyse und Bestimmung von Abhängigkeiten des k_p -Faktors und der Lichtbogenspannung von diversen Versuchsparametern und Anlagenspezifikationen zwecks Herleitung allgemeingültiger Zusammenhänge

Im folgenden Kapitel werden zunächst allgemeine Zusammenhänge zur Druckberechnung im Störlichtbogenfall erörtert sowie ein Überblick über bekannte Druckberechnungsverfahren gegeben. Anschließend werden das Standardverfahren und das CFD-Verfahren genauer vorgestellt, da sie für die Beschreibung des erreichten Standes der Druckberechnungsverfahren von Bedeutung sind. Die Eingangsdaten sowie die in die Verfahren integrierten Sub-Modelle werden in Kapitel 3 beschrieben. Hierzu gehören die Modelle zur Wirkung von Energieabsorbern (Arbeitspaket 1) und die Modellierung von Gasgemischen aus SF_6 und Luft, die zur Herleitung der Gasdaten im Rahmen des Arbeitspaketes 2 benötigt werden. Komplettiert wird das Kapitel 3 durch die Beschreibung und Analyseergebnisse zu Datenbasis (Arbeitspaket 4).

Danach wird im Kapitel 4 die Entwicklung der Druckberechnungsverfahren, insbesondere des Referenzverfahrens (Arbeitspaket 3) vorgestellt. Nach der Beschreibung der Einbindung der Energieabsorber- und Gasgemisch-Modelle in das CFD-Verfahren erfolgt eine detaillierte Beschreibung des Referenzverfahrens sowie seines Funktionsumfangs. Abgeschlossen wird das Kapitel 4 mit der Evaluierung der entwickelten Druckberechnungsverfahren anhand von ausgewählten Beispielen und mit der Bestimmung qualitativer Gültigkeitsgrenzen des neuen Referenzverfahrens. Der Bericht schließt mit Kapitel 5 und Kapitel 6, in denen der Ergebnistransfer in die Wirtschaft thematisiert wird, bzw. eine Zusammenfassung samt Ausblick vorgestellt werden.

2. Grundlagen zur Druckberechnung im Störlichtbogenfall

2.1. Allgemeine Zusammenhänge

Der Druckaufbau im Störlichtbogenfall in einer elektrischen Anlage beruht auf der Aufheizung des Isoliergases in der Anlage durch den elektrischen Lichtbogen. Dieser überträgt dabei seine Energie mit unterschiedlichen Mechanismen an seine Umgebung. Abb. 2.1 stellt diese Mechanismen schematisch dar.

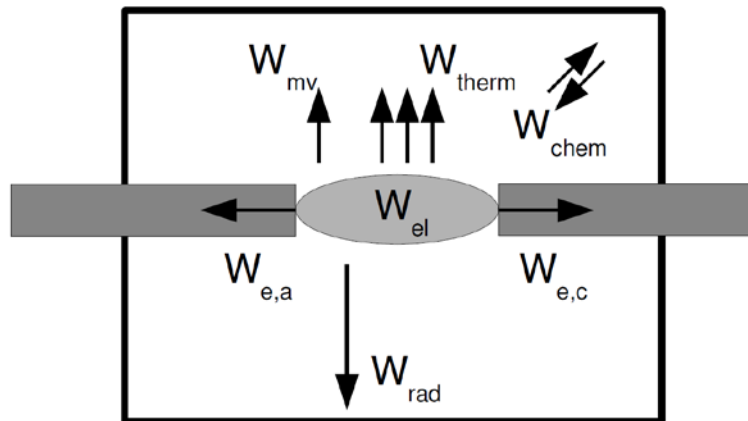


Abb. 2.1 Vereinfachte Darstellung zur Energiebilanz eines Störlichtbogens in einem geschlossenen Behälter

Ein Teil der elektrischen Energie des Lichtbogens W_{el} wird per Wärmeleitung an die Elektroden übertragen ($W_{e,a}, W_{e,c}$). Metallaufschmelzung und –verdampfung an den Elektrodenoberflächen sind weitere Energieanteile (W_{mv}), die zu berücksichtigen sind. Ein Teil der Strahlungsenergie des Lichtbogens wird von den Wänden der Anlage absorbiert (W_{rad}). Darüber hinaus kann es zwischen dem Metaldampf und den Bestandteilen des Isoliergases zu chemischen Reaktionen kommen, die sowohl exotherm als auch endotherm verlaufen können, wodurch das Vorzeichen der chemischen Energie W_{chem} bestimmt wird. Der letzte Term in der Energieerhaltungsgleichung (2.1) beschreibt den Teil der Energie, die vom Lichtbogen über Wärmeleitung, Konvektion und Strahlungsabsorption an das Isoliergas übertragen wird (W_{therm}) und somit letztendlich den Druckaufbau in der Anlage bestimmt.

$$W_{el} \pm W_{chem} = W_{e,a} + W_{e,c} + W_{mv} + W_{rad} + W_{therm} \quad (2.1)$$

Zur formelmäßigen Beschreibung dieses Energieanteils wird der *thermische Transferkoeffizienten* oder k_p -Faktor eingeführt, der gemäß Formel (2.2) über die Energie bzw. den Leistungsanteil definiert wird.

$$W_{therm} = k_p \cdot W_{el} \text{ bzw. } P_{therm} = k_p \cdot P_{el} \quad (2.2)$$

Der mittlere Druckaufbau dp in einem Volumen V während eines Zeitschritts dt kann damit, abhängig von den Gasdaten in Form des Adiabatenkoeffizienten κ , bestimmt werden zu [4]:

$$dp = \frac{(\kappa - 1) \cdot k_p \cdot P_{el} \cdot dt}{V} \quad (2.3)$$

Der k_p -Faktor ist ein für jede beliebige Anlagenkonfiguration charakteristischer Wert und kann durch Anpassung berechneter an gemessene Druckkurven bestimmt werden. Durch den in Formel (2.3) gegebenen Zusammenhang hängt der k_p -Faktor jedoch unmittelbar vom verwendeten Adiabatenkoeffizienten κ ab, d. h. vom Gasmodell, das dem verwendeten Berechnungsverfahren zugrunde liegt. Daher ist es nicht möglich, k_p -Faktoren, die mit einem bestimmten Verfahren ermittelt worden sind, direkt auf ein anderes Verfahren und andere Anlagen zu übertragen. Durch Sammlung und Auswertung einer viele Anlagen umfassenden Datenbasis wird angestrebt, dennoch derartige Zusammenhänge zwischen dem k_p -Faktor und den charakteristischen Eigenschaften der Anlagen herzustellen.

Als Gasmodelle zur Ermittlung der Gasdaten stehen mit dem *Idealen-Gas-Modell* und dem *Real-Gas-Modell* grundsätzlich zwei unterschiedliche Ansätze zur Verfügung. Das Ideale-Gas-Modell beruht dabei auf dem *Idealen Gas-Gesetz* mit R als der universellen Gaskonstanten und bestimmt die Innere Energie eines Gases in Abhängigkeit der Temperatur T und der Anzahl n der Mole im Gasvolumen V .

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (2.4)$$

Im Bereich, in dem sich das Isoliergas wie ein ideales Gas verhält (insbesondere unterhalb der Dissoziationstemperatur des Gases) erzielt man mit diesem Ansatz eine hinreichende Genauigkeit. Wenn jedoch Dissoziation und Ionisation im Isoliergas auftreten und Wechselwirkungen zwischen den Komponenten bei Gasmischungen zu erwarten sind, ist das klassische Modell des idealen Gases nicht verwendbar und daher nach Möglichkeit Real-Gasdaten zu verwenden (Kapitel 3.2).

2.2. Bekannte Druckberechnungsverfahren

Zur Bestimmung der Druckbelastung von Schaltanlagen und Schaltanlagengebäude haben Hersteller eigene Verfahren entwickelt, die auf Grund von zum Teil erheblichen Einschränkungen im Anwendungsbereich und wegen unterschiedlicher Güte zu nicht vergleichbaren Resultaten führen. Um Druckentlastungsmaßnahmen des Gesamtsystems „Anlage und Gebäude“ optimieren zu können, z. B. die Größe von Druckentlastungsöffnungen, von Zwischenräumen und Kanälen, sind Berechnungsverfahren erforderlich, die die bekannten Einschränkungen überwinden und allgemein akzeptiert sind.

Bei den bekannten Druckberechnungsverfahren können mehrere Gruppen je nach Einsatzbereich unterschieden werden (hier werden die Verfahren nur mit Stichwörtern charakterisiert, für Details wird auf die angegebenen Quellen verwiesen):

Verfahren für geschlossene Volumina (z. B. zur Bestimmung des Überdrucks in einem Schaltfeld) auf Basis des allgemeinen Gasgesetzes im Zusammenhang mit einer Energiegleichung:

- Einfache Gleichung in DIN EN 62271-203 (Nov. 2004) - nicht ausreichend (keine Allgemeingültigkeit, nur stark eingeschränkt anwendbar) [14]
- Druckerhöhung durch eine quasistationäre isochore und adiabate Wärmezufuhr mit konstantem Adiabatenkoeffizienten [4]
- Druckerhöhung durch eine quasistationäre isochore und adiabate Wärmezufuhr mit realen (temperatur- und druckabhängigen) Gaseigenschaften [7]

Verfahren unter Berücksichtigung von Öffnungen ohne Entlastungsräume:

- Beschreibung der Wirkung der Entlastungsöffnung auf die Schaltzelle durch Ausdehnung und Volumenvergrößerung des Isoliergases [15]
- Beschreibung der Wirkung der Entlastungsöffnung auf die Schaltzelle mit der Ausflussfunktion [16], Temperatur- und Druckerhöhung in vier Phasen (Kompressions-, Expansions-, Emissions- und Thermophase [17])
- Verfahren zur Bestimmung der orts aufgelösten Druckentwicklung in einem Raum unter besonderer Berücksichtigung von Druckwellen (Schallteilchenverfahren, Ray-Tracing-Technique) [18]
- Ein- bzw. zweidimensional aufgelöste Druckberechnung in der Schaltzelle mit einem Charakteristiken- bzw. Bicharakteristikenverfahren zur Lösung der Grundgleichungen der Hydrodynamik [19], [20]

Verfahren unter Berücksichtigung von Öffnungen und Entlastungsräumen:

- Beschreibung der Wirkung der Entlastungsöffnung auf die Schaltzelle und einen Entlastungsraum mit der Ausflussfunktion auf der Basis des allgemeinen Gasgesetzes (und der Energiegleichung) mit konstanten Gaseigenschaften, räumlich gemittelte Druckentwicklung [21]
- Lösung der Wellengleichungen (als Vereinfachung der Grundgleichungen der Gasdynamik) mit örtlich begrenzter Leistungseinspeisung führt zur eindimensionalen, orts aufgelösten Druckentwicklung auch in mehreren zusammenhängenden Räumen [22]
- Beschreibung der Wirkung der Entlastungsöffnung durch einen Strömungswiderstand, Energieaustausch mit mehreren, durch freie Öffnungen oder Klappen miteinander verbundenen Räumen; die räumlich gemittelten Druckverläufe in den Entlastungsräumen werden in Analogie zur Wärmestromberechnung wie in einem elektrischen Netzwerk bestimmt [23]
- Beschreibung der Wirkung der Entlastungsöffnung auf die Schaltzelle mit der Ausflussfunktion, Energieaustausch mit benachbarten, durch Druckentlastungsöffnungen verbundenen Räumen durch Strömungsprozesse, sorgfältige Berücksichtigung der temperatur- und druckabhängigen Gaseigenschaften, räumlich mittelndes Verfahren [7, 9, 10, 24]
- Lösung der Grundgleichungen der Hydrodynamik mit einem CFD-Gleichungslöser [9, 25, 26] unter Berücksichtigung temperatur- und druckabhängiger Gaseigenschaften [7, 24, 27], Mitberücksichtigung von Metallverdampfung und chemischen Reaktionen (berechneter Anteil der Lichtbogenenergie, der in den Druckaufbau geht - k_p -Faktor) [11, 12]

Für die überwiegende Anzahl von Anwendungen hat sich nur die letzte Gruppe der Berechnungsverfahren als relevant erwiesen. Hier haben sich für unterschiedliche Schwerpunktsetzungen grundsätzlich zwei Verfahrenstypen etabliert, die sogenannten „Standardverfahren“, mit denen raummittelnde Ergebnisse erzielt werden und „CFD-Verfahren“ mit orts aufgelösten Resultaten.

2.3. Standardverfahren

Die verwendeten Standardverfahren sind von äußerst unterschiedlicher Qualität, zeichnen sich jedoch im Allgemeinen durch einfache Handhabung und schnell zu erzielenden Ergebnisse aus. Sie sind besonders für einfache geometrische Anordnungen geeignet und zur Ermittlung der Größe von notwendigen Entlastungsöffnungen in Schaltzellen und Räumen. Obere Abschätzungen der Belastungen sind zuverlässig möglich bei Verwendung einer hochwertigen Datenbasis für die Gaseigenschaften und zutreffender k_p -Faktoren.

Die Standardverfahren bestimmen den Druckaufbau in den einzelnen Anlagenvolumina auf Basis des Masseaustauschs und des damit einhergehenden Austauschs an Innerer Energie, der durch die Öffnungen zwischen miteinander verbundenen Volumina auf Grund einer vorliegenden Druckdifferenz stattfindet. Über die Zustandsgleichung wird dann auf den Druck- und Temperaturanstieg in den Volumina zurückgeschlossen. Hierzu werden die vorherrschenden Gleichungen unter der Verwendung numerischer Verfahren iterativ für jeden Zeitschritt des Betrachtungszeitraums gelöst.

2.4. CFD-Druckberechnungsverfahren

Computational Fluid Dynamics-Verfahren sind universeller einsetzbar, erfassen alle Druckphänomene und sind daher wiederum bei Verwendung einer hochwertigen Datenbasis im Ergebnis genauer. Sie sind allerdings erheblich aufwändiger sowohl in der Handhabung als auch in der Modellerstellung, weshalb sie die Bedienung durch Spezialisten erfordern. Sie eignen sich für spezielle Probleme und zur Evaluierung von Ergebnissen, die mit Standardverfahren gewonnen werden. CFD-Verfahren besitzen wegen ihrer breiten physikalischen Grundlage ein universelles Anwendungsgebiet und werden in vielen technischen Bereichen zur Lösung fluidmechanischer Probleme eingesetzt. Sie basieren auf der Lösung

- des Masseerhaltungssatzes,
- des Energieerhaltungssatzes
- und der Navier-Stokes-Gleichungen,

also aus einem Satz partieller nichtlinearer Differentialgleichungen die unter der Berücksichtigung der entsprechenden physikalischen Eigenschaften die vollständige Beschreibung eines Fluides ermöglichen. Dieses Gleichungssystem wird für jedes Kontrollvolumen des diskretisierten Lösungsraums und für jeden Zeitschritt iterativ gelöst. Zur Berücksichtigung turbulenter Effekte im mikroskopischen Bereich werden entsprechende Turbulenz-Modelle, wie das k - ϵ -Modell verwendet.

Um den berechnungstechnischen Aufwand zu reduzieren, erfolgt die Einspeisung der elektrischen Energie des Lichtbogens bei der Druckberechnung verursacht durch Störlichtbögen nicht wie z. B. bei der Simulation von Schaltlichtbögen in Hochspannungs-Leistungsschaltern über ein mikroskopisches Modell, sondern integral und homogen in einen Teil des fehlerbehafteten Raums, in dem der Störlichtbogen brennt. Die im Falle eines mikroskopischen Modells erforderliche feine Diskretisierung des Lösungsraums ist für den Anwendungsfall der Störlichtbögen wegen der deutlich größeren Abmessungen der elektrischen Anlage nicht praktikabel. Außerdem kann die chaotische Bewegung eines freibrennenden Lichtbogens, zu denen die Störlichtbögen zu zählen sind, mit den derzeit verfügbaren Rechnerleistungen nicht in eine Druckberechnung integriert werden. Ein weiterer Vorteil ist darin zu sehen, dass die Energieeinspeisung in ein Volumen, das größer ist als die des tatsächlichen Lichtbogens zu abgesenkten Temperaturen führt, für die genauere Gasdaten vorliegen. Somit stellt der

gewählte Ansatz einer homogenen Einspeisung in ein begrenztes Volumen zwar keine exakte Modellierung des Störlichtbogens selbst dar; er ist jedoch in der Lage, die Energieeinspeisung in das Isoliergas (die Druckerhöhung) unter der Voraussetzung genauer Werte für den k_p -Faktor hinreichend genau nachzubilden.

3. Eingangsdaten und Sub-Modelle der Druckberechnung

Für die Einbindung von Energieabsorbern und Gasgemischen in die vorgestellten Druckberechnungsverfahren werden entsprechende Modelle benötigt, deren Aufbau in diesem Kapitel beschrieben wird. Außerdem wird in Abschnitt 3.3 der Aufbau der Datenbasis aus Arbeitspaket 4 erörtert und es werden die Ergebnisse der Datenanalyse zum k_p -Faktor und zur Lichtbogenspannung in den Unterkapiteln 3.4 bzw. 3.5 vorgestellt.

3.1. Modellierung von Energieabsorbern

Eine Reduzierung der Druckbeanspruchung elektrischer Anlagen im Störlichtbogenfall ist u.a. durch Verwendung von Lichtbogen-Energieabsorbern möglich. Diese Einrichtungen werden vermehrt eingesetzt. Ihre Wirkungsweise ist empirisch belegt, jedoch theoretisch nur unzureichend verstanden. Für einen optimalen Einsatz ist eine theoretische Beschreibung hilfreich.

3.1.1. Phänomenologische Beschreibung der Energieabsorber

Das im Störlichtbogenfall aus der gekapselten Anlage ausströmende Isoliergas besitzt eine hohe thermische Energie, die zu einem Temperatur- und Druckanstieg im Schottraum, in dem der Lichtbogen brennt, in dahinter liegenden Zwischenräumen der Schaltanlage und im Schaltanlagenraum führen können. Um diese Auswirkungen zu verringern, werden Lichtbogenenergieabsorber eingesetzt, die u.a. dem ausströmenden Gas Energie entziehen und somit dessen Temperatur vermindern. Dadurch lässt sich eine Verringerung der Belastungen für die anderen, dahinterliegenden Anlagenteile erzielen.

Diese Energieabsorber, deren schematischer Aufbau beispielhaft in Abb. 3.1 gegeben ist, bestehen zumeist aus mehreren Lagen Streckmetall. Jedoch existieren daneben auch weitere Konzepte, bei denen z. B. keramische Materialien zum Einsatz kommen [28].

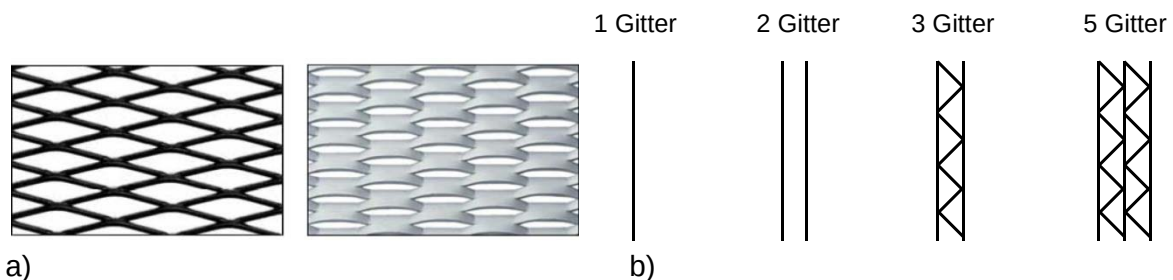


Abb. 3.1 a) Beispiele für Streckmetallvarianten (rauten- und ellipsenförmige Öffnungen);
b) Anordnungen mehrerer Streckmetalllagen (nach [29])

In der Praxis werden – abhängig vom Hersteller - eine große Vielfalt von Ausführungsformen eingesetzt. Zum Einsatz kommen dabei Streckmetall-Lagen, die sich z. B. hinsichtlich des verwendeten Werkstoffs, der Maschenweite, der Lagenzahl sowie deren Anordnung (mit Abstandshaltern oder mit gefalteten Zwischenlagen) unterscheiden.

Wegen der kleinen Abmessungen der Öffnungen in den Absorbergittern im Bereich weniger Millimeter im Vergleich zu den Dimensionen der Schaltanlage und der Schaltanlagenräume, erweist sich eine direkte, d.h. geometrisch exakte Nachbildung der Gittermaschen aus Rechenzeitgründen als nicht praktikabel. Stattdessen werden integrale Modelle verwendet, die die Absorberwirkung nachbilden können. Hierzu ist zunächst eine Analyse der Wirkungsweise, die Lichtbogenenergieabsorber auf die Druckentwicklung im Störlichtbogenfall haben, notwendig.

Der Absorber nimmt auf Grund des Temperaturunterschiedes zum durchströmenden Heißgas einen Teil der im Gas enthaltenen Energie auf und reduziert somit direkt den Energieinhalt des Heißgases, das in das Anlagenvolumen hinter dem Absorber strömt. Mit einem verringerten Energieeintrag wird dort der auftretende Überdruck reduziert.

Neben der Energieaufnahme bewirken Absorber darüber hinaus eine Erhöhung des Strömungswiderstandes und beeinflussen somit auch den zeitlichen Druckverlauf in der Anlage. Der Absorber als Strömungswiderstand bewirkt zwar im Lichtbogenraum, d. h. im fehlerbehafteten Schottraum vor dem Absorber, einen erhöhten Druck, doch wird die Druckbelastung der Anlagenteile hinter dem Absorber im Allgemeinen reduziert. Absorber vermindern zudem den Austritt von Flammen und heißen, glühenden Feststoffpartikeln aus der Anlage. Die aus mehreren Lagen Streckmetall bestehenden Absorber werden in der Regel entweder direkt an den Entlastungsöffnungen, aus denen das heiße Gas ausströmt, oder im Verlauf von Druckentlastungskanälen eingebaut, wobei ein Zusammenhang zwischen der Einbauposition und der Effizienz des Absorbers zu beobachten ist.

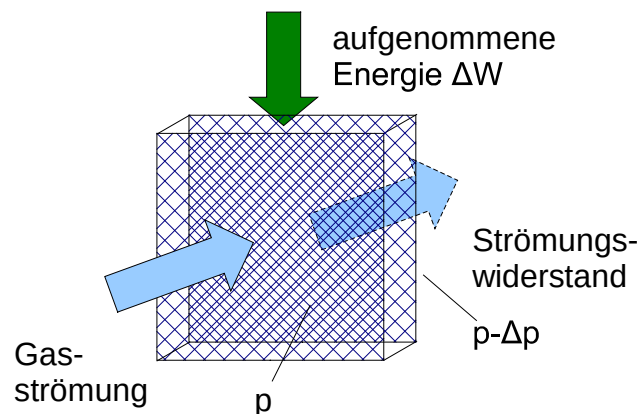


Abb. 3.2 Effekte von Energieabsorbern

Als physikalische Effekte der Absorber werden somit identifiziert[30]:

- Energieaufnahme
- Strömungswiderstand
- Verhindern des Austritts von Flammen und heißen, glühenden Feststoffpartikeln.

Da das Zurückhalten von Feststoffpartikeln und Flammen für die Druckberechnung praktisch keine Rolle spielt, werden im Folgenden die beiden ersten Effekte betrachtet. Ihre Auswirkungen auf die Gasströmung, die Absorption einer Energiemenge ΔW und der Strömungsbehinderung in Form eines Druckabfalls Δp , sind in Abb. 3.2 schematisch dargestellt und werden getrennt voneinander in separaten Teilmodellen nachgebildet.

Diese Teilmodelle werden in den Kapiteln 3.1.2 und 3.1.3 vorgestellt und abschließend in geeigneter Kombination in die Druckberechnungsverfahren integriert, um deren Funktionsumfang zu erweitern.

3.1.2. Modellierung der Energieabsorption

Zur Entwicklung von Modellen zur Nachbildung der Energieaufnahme durch die Absorber werden zum einen Ansätze aus vorangegangenen Forschungsarbeiten an der Forschungsstelle [30, 31] aufgegriffen. Des Weiteren werden Zusammenhänge aus anderen technischen Anwendungsgebieten zum Wärmeübergang in Fluidströmungen (Wärmetauscher) verwendet, bei denen das Streckmetall als Anordnung von Rohrbündeln bzw. gekreuzten

Rohrbündeln nachgebildet wird. Daraus abgeleitet ergeben sich drei verschiedene Modelle, die im Rahmen des Arbeitspaketes 1 implementiert und analysiert wurden:

- Modell des Gitterwirkungsgrades
- Modell des thermischen Wirkungsgrades
- Modell des Wärmeübergangs

Die aufgenommene Wärmeenergie, die mit Hilfe dieser Modelle berechnet werden kann, wird als Wärmesenke in die Energieerhaltungsgleichung der Druckberechnungsverfahren eingebunden.

Modell des Gitterwirkungsgrades

Bei diesem Modell wird die aufgenommene Wärmeenergie mit dem sogenannten Gitterwirkungsgrad η_G bestimmt [31], der als das Verhältnis von der vom Absorber aufgenommenen Energie Q zur elektrischen Lichtbogenenergie W_{el} definiert wird.

$$\eta_G = \frac{Q}{W_{el}} \quad (3.1)$$

Die Energiemenge Q , die vom Absorber aufgenommen wird, wird mit Hilfe der Masse des Absorbers m_G , dessen spezifischer Wärmekapazität c_G und dem experimentell bestimmten Temperaturanstieg ΔT des Absorbers bestimmt.

$$Q = m_G \cdot c_G \cdot \Delta T \quad (3.2)$$

Der Gitterwirkungsgrad kann daher nur mit Hilfe von Versuchen für einen spezifischen Absorbertyp und dessen Einbaulage ermittelt werden.

Modell des thermischen Wirkungsgrades

Das Modell des thermischen Wirkungsgrades basiert auf einem ähnlichen Prinzip, wobei die aufgenommene Energie über den Temperaturunterschied des Gases vor und hinter dem Absorber bestimmbar ist [30].

$$\eta_T = \frac{\Delta T_{vor} - \Delta T_{hinter}}{\Delta T_{vor}} \quad (3.3)$$

Der thermische Wirkungsgrad η_T wird durch Messung der maximalen Gastemperatur in Strömungsrichtung vor und hinter dem Absorber bestimmt (ΔT : zeitliche Temperaturdifferenz vor und nach dem Auftreten des Störlichtbogens).

Modell des Wärmeüberganges

Das Modell basiert auf der Bestimmung der absorbierten Wärmeenergie von Absorbern in Analogie zum Wärmeübergang zwischen einer Fluidströmung und einem Rohrbündel, der als Anwendungsgebiet der Wärmetechnik bekannt ist [32].

Die theoretische Beschreibung dieses Wärmestroms $\dot{Q}$ beinhaltet den Wärmeübergangskoeffizienten α^* , die Oberfläche des umströmten Absorbers A und das logarithmische Mittel der Temperaturdifferenz zwischen Fluid und Absorberoberfläche [33]:

$$\dot{Q} = \alpha^* \cdot A \cdot \Delta T_{log} \quad (3.4)$$

Der Einfluss der veränderlichen Absorbertemperatur auf die absorbierte Energie wird in diesem Zusammenhang mitberücksichtigt. Der Wärmeübergangskoeffizient α^* hängt von den Strömungsbedingungen, der Strömungsgeschwindigkeit, der thermischen Leitfähigkeit des Fluides und der geometrischen Gestaltung des Absorbers ab. In **Abb. 3.3** sind exemplarisch fluchtend und versetzt angeordnete Rohrbündel, sowie die daraus abgeleiteten charakteristischen Maße, wie z. B. die Rohrdurchmesser d oder die mittleren Längs- und Querabstände dargestellt.

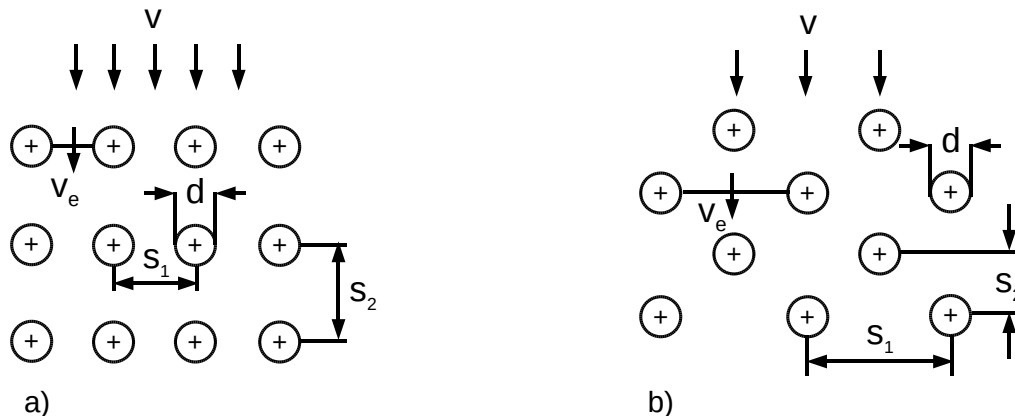


Abb. 3.3 Querschnitt durch fluchtend (a) und versetzt (b) angeordnete, parallele Rohrbündel zur Bestimmung charakteristischer Größen

Die geometrischen Zusammenhänge und charakteristischen Größen werden vom Rohrbündel auf eine Anordnung von Streckmetallgittern übertragen, um daraus den Wärmeübergangskoeffizienten für den Absorber zu bestimmen.

Dieses Modell erfordert somit zwar keine experimentellen Voruntersuchungen, jedoch die Kenntnis über den genau Aufbau des Absorbers und insbesondere die Struktur der Streckmetallmaschen.

3.1.3. Modellierung des Strömungswiderstands

Die Modellierung des Strömungswiderstandes durch den Energieabsorber kann grundsätzlich auf zwei unterschiedlichen Wegen erfolgen. Der erste Ansatz baut ähnlich wie das Modell zum Wärmeübergang auf Analogien aus der Wärmetechnik auf und liefert den Druckverlust beim Durchströmen eines Rohrbündels. Beim zweiten Ansatz werden die vielen kleinen, verteilten Maschen des Absorbers auf eine konzentrierte, effektive Öffnung reduziert.

Die untersuchten Ansätze für den Effekt des Strömungswiderstandes sind somit:

- Modell des Druckverlustes
- Modell der effektiven Öffnung

Für den Strömungswiderstand muss der Druckverlust zunächst auf die Reibungskraft umgerechnet werden. Danach erfolgt die Einbindung als Impulssenkung in der Impulserhaltungsgleichung.

Modell des Druckverlustes

Bei diesem Modell werden die bei Wärmetauschern bekannten Zusammenhänge genutzt, um in Analogie zum Druckverlust in einer Fluidströmung beim Druckströmen eines Rohrbündels den Strömungswiderstand des Energieabsorbers bestimmen zu können. Der Druckverlust Δp hängt dabei vom Druckverlustbeiwert ξ , der Dichte des Fluides ρ , der Lagenzahl N und der Strömungsgeschwindigkeit im kleinsten Querschnitt v_e ab.

$$\Delta p = \xi \cdot N \cdot \frac{\rho \cdot v_e^2}{2} \quad (3.5)$$

Der Druckverlustbeiwert wird nach [32] in Abhängigkeit von den geometrischen Abmessungen des Rohrbündels bzw. des Absorbers bestimmt. Dabei werden neben den parallelen Anordnungen (**Abb. 3.3**) auch gekreuzte Rohrbündel als Modellgrundlage herangezogen.

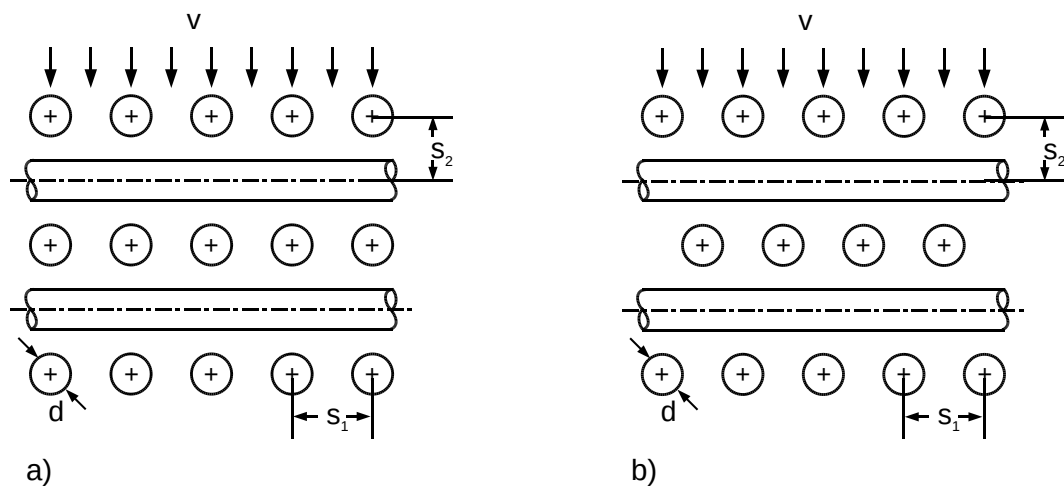


Abb. 3.4 Querschnitt durch fluchtend (a) und versetzt (b) angeordnete, gekreuzte Rohrbündel zur Bestimmung charakteristischer Größen

Die Bestimmung des Druckverlustbeiwertes kann ohne experimentelle Untersuchungen erfolgen, jedoch muss die geometrische Struktur des Absorbers bekannt sein.

Eine Variante des Druckverlust-Modells stellt der Ansatz der sog. Turbulenzgitter dar, der das Strömungsverhalten in einem Maschengitter aus Flachstäben beschreibt. Da diese Anordnung der geometrischen Struktur der Streckmetalllagen ähnlich ist, kann dieses Modell prinzipiell für die Berechnung des Strömungswiderstandes in Energieabsorbern benutzt werden. Es unterscheidet sich vom oben beschriebenen Modell durch eine veränderte Bestimmung des Druckverlustbeiwertes, die neben theoretischen Betrachtungen zusätzliche Experimente erfordert.

Modell der effektiven Öffnung

Bei diesem Modell werden die vielen kleinen Öffnungen eines realen Absorbers zu einer konzentrierten effektive Öffnung zusammen gefasst. Mit dieser effektiven Öffnung wird der Druckverlust des Absorbers nachgebildet. Auf eine weitergehende Berücksichtigung der Absorberstruktur wird in diesem Modell verzichtet.

Die sich ausbildenden Grenzschichten bei Druckentlastungsöffnungen, die durch erhöhte Turbulenz den Massestrom behindern, werden mit Hilfe der Ausflussziffer α beschrieben [34].

$$\alpha = \mu \cdot \varphi \quad (3.6)$$

Diese hängt ab von der Kontraktionszahl μ sowie vom Geschwindigkeitsbeiwert φ und kann für eine definierte Öffnungsgeometrie durch Anpassung von berechneten und gemessenen Druckverläufen bestimmt werden.

Um zuverlässige Ergebnisse zu erhalten, werden reale Gasdaten bei allen Modellansätzen sowie geeignete Mittelungsverfahren zur Bestimmung von Gaseigenschaften, die räumlich verteilt auftreten, verwendet.

Um die Gültigkeit und die Zuverlässigkeit dieser Modelle bzw. ihrer Kombinationen zu bewerten, wurden anhand ausgewählter Versuchsanordnungen die Ergebnisse von Berechnungen mit gemessenen Daten aus realen Störlichtbogenversuchen verglichen [29].

Auf Basis dieser Untersuchungen und der praktischen Anwendung haben sich zwei Modellkombinationen als geeignet und praktikabel erwiesen. Der erste Ansatz benutzt das Modell des Gitterwirkungsgrades für die Wärmeaufnahme und das Modell der effektiven Öffnung für den Strömungswiderstand. Dieser Ansatz eignet sich sowohl für die Druckberechnung mit den Referenzverfahren als auch mit dem CFD-Verfahren. Der zweite Ansatz, der die Modelle für den Wärmeübergang und Druckverlust miteinander kombiniert, hat sich zwar als anwendbar gezeigt, ist jedoch aufwendiger zu implementieren und daher nur für das CFD-Verfahren geeignet.

3.2. Modellierung von SF₆/Luft-Gasgemischen

Bei der Verwendung von SF₆ als Isoliergas wird die elektrische Anlage in separate abgeschlossene Schotträume unterteilt. Um ein Bersten des SF₆-Behälters durch einen unzulässig hohen Innendruck, z. B. in Folge eines Störlichtbogens zu verhindern, ist dieser Schottraum z. B. mit einer Berstscheibe versehen, durch die im Fehlerfall eine Druckentlastung erfolgt. Der prinzipielle Vorgang beim Ausströmen des heißen SF₆ und dessen Vermischung mit der Luft in Zwischenvolumen oder im Schaltanlagenraum ist in Abb. 3.5 dargestellt.

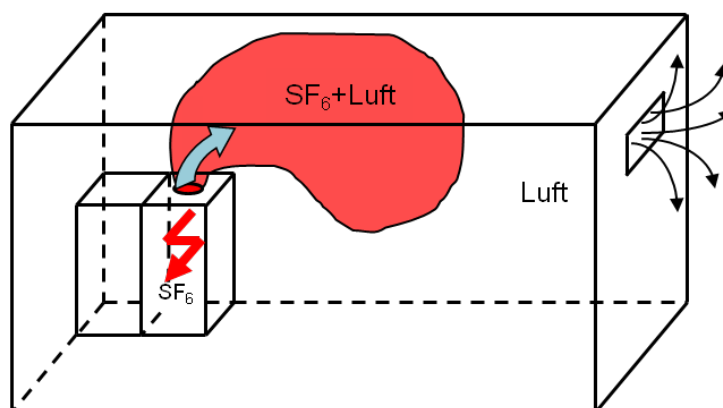


Abb. 3.5 Schematische Darstellung zur Entstehung von SF₆/Luft-Gemischen beim Ausströmen des Isoliergases im Störlichtbogenfall

Bei dieser Vermischung des SF_6 mit der Umgebungsluft muss die Veränderung der Gaseigenschaften in Abhängigkeit von der Gaszusammensetzung berücksichtigt werden, da eine verlässliche Druckberechnung nur auf Basis hinreichend genauer Gasdaten möglich ist. Diese Gasdaten betreffen sowohl die thermodynamischen Größen Gasdichte, Schallgeschwindigkeit, Enthalpie und Wärmekapazität als auch die Transportgrößen Viskosität und die Wärmeleitfähigkeit. Da die Gasdaten nicht nur mit der Gaszusammensetzung ändern, sondern auch von Druck und Temperatur abhängen, müssen diese beiden physikalischen Größen ebenfalls bei der Bestimmung der Gasdaten berücksichtigt werden. Dies ist vor dem Hintergrund hoher Druck- und Temperaturunterschiede im Störlichtbogenfall von besonderer Bedeutung. Die Annahme konstanter Gasdaten, wie sie in manchen Druckberechnungsprogrammen getroffen wird, ist somit als kritisch anzusehen. Vielmehr ist es erforderlich durch entsprechende Modelle, die Veränderung der Gasdaten als Funktion der Gaszusammensetzung, des Drucks und der Temperatur bei der Druckberechnung realistisch nachbilden zu können.

3.2.1. Herleitung und Bestimmung der Gasdaten

Eine Möglichkeit Gasdaten von SF_6 /Luft-Gemischen zu bestimmen besteht in der Anwendung einfacher Mischungsgesetze, mit deren Hilfe die Eigenschaften der Gemische durch eine mit dem Massenanteil gewichteten Mittelung zwischen den Eigenschaften der beiden Bestandteile bestimmt wird. Die zugrundeliegenden Gasdaten für Luft und für SF_6 liegen dabei als Funktion des Drucks und der Temperatur vor. Exemplarisch zeigen Formel (3.7) und (3.8) die Bestimmungsgleichungen für die Dichte $\rho_{\text{SF}_6\text{-Luft}}$ bzw. die spezifische Enthalpie $h_{\text{SF}_6\text{-Luft}}$ des Gemischs in Abhängigkeit von den Masseanteilen ξ_{SF_6} und ξ_{Luft}

$$\rho_{\text{SF}_6\text{-Luft}}(p, T) = \left(\frac{\xi_{\text{SF}_6}}{\rho_{\text{SF}_6}(p, T)} + \frac{\xi_{\text{Luft}}}{\rho_{\text{Luft}}(p, T)} \right)^{-1} \quad (3.7)$$

$$h_{\text{SF}_6\text{-Luft}}(p, T) = \xi_{\text{SF}_6} \cdot h_{\text{SF}_6}(p, T) + \xi_{\text{Luft}} \cdot h_{\text{Luft}}(p, T) \quad (3.8)$$

mit

$$\xi_{\text{SF}_6} + \xi_{\text{Luft}} = 1 \quad (3.9)$$

Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Gaskomponenten sowie chemische Reaktionen werden dabei nicht erfasst, können aber die Gaseigenschaften in bestimmten Temperaturbereichen maßgeblich beeinflussen und sollten daher mit berücksichtigt werden.

Da der Ansatz einfacher Mischungsgesetze diesen Anspruch nicht erfüllt, wird ein zweiter Modellansatz verfolgt, der die Gaseigenschaften für Gemische direkt auf Grundlage der chemischen Potentiale der Komponenten bestimmt und somit Wechselwirkungen und chemische Reaktionen berücksichtigt. Die Eigenschaften der Gasgemische werden dabei durch Minimierung der Gibbs'schen Freien Energie und durch Lösung der Boltzmann-Gleichung auf Basis fundamentaler physikalischer Gaseigenschaften berechnet.

Die Abweichungen die durch die unterschiedlichen Gasdaten-Modelle entstehen, sind beispielhaft für die spezifische Wärmekapazität c_v eines Gasgemisches aus 40 % SF_6 und 40 % Luft bei einem Druck von 1 bar über der Temperatur in Abb. 3.6 dargestellt.

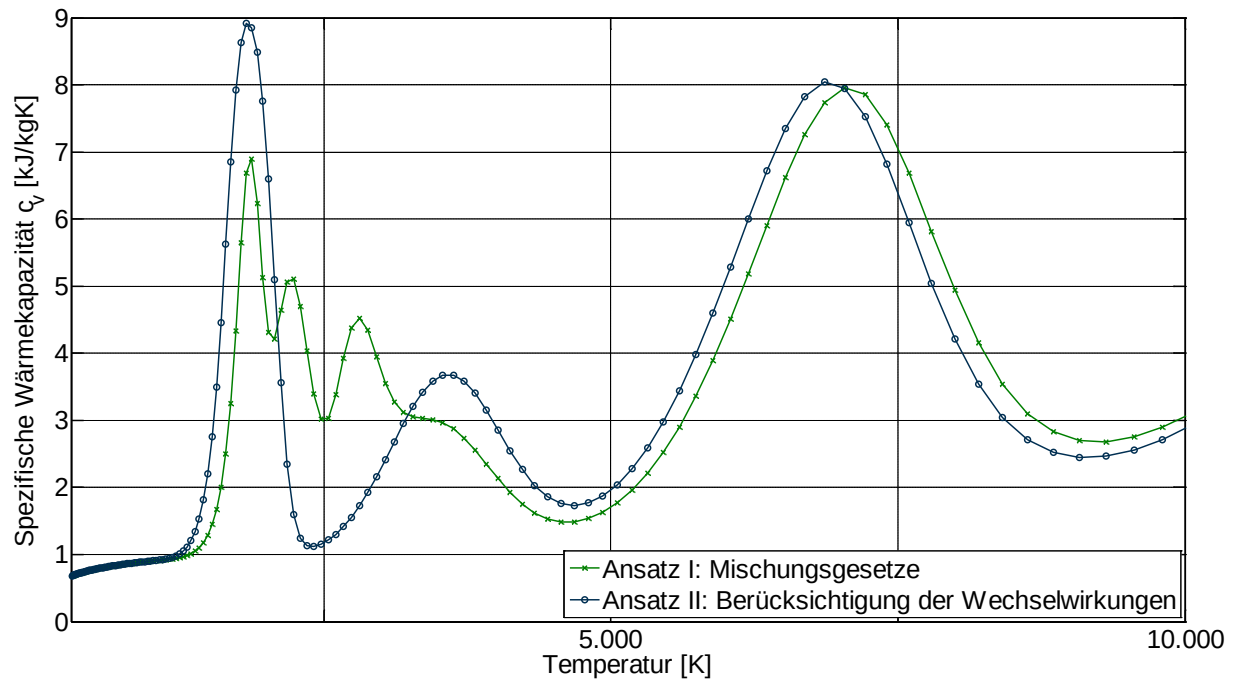


Abb. 3.6 Einfluss der Gasdaten-Modelle auf die spezifische Wärmekapazität c_v für ein Gasgemisch aus 40 % SF_6 und 40 % Luft bei 1 bar

Insbesondere im Temperaturbereich ab 1200 K, bei dem die Dissoziation des SF_6 einsetzt, sind deutliche Abweichungen zwischen den beiden Ansätzen zu verzeichnen, wobei der Zweite als realitätsgetreuer und daher als exakter anzusehen ist. Daher wird es für die Druckberechnung verwendet.

3.2.2. Bereitstellung der Gasdaten

Die temperatur- und druckabhängigen Gasdaten von SF_6 -Luft-Gemischen werden mit Hilfe des Programms PLASMA generiert, das an der Forschungsstelle entwickelt worden ist [3].

Da eine iterative Berechnung der Gasdaten während der Druckberechnung mit einem hohen Rechen- und Zeitaufwand verbunden ist, werden die Gasdaten als Funktion des SF_6 -Masseanteils, des Drucks und der Temperatur stattdessen in Form von mehrdimensionalen Wertetabellen bereitgestellt. Zwischenwerte werden durch Interpolation mit geeigneten Verfahren generiert.

Durch diese Tabellen werden für die Druckberechnung folgende Gaseigenschaften vorgegeben:

- spezifische Dichte
- spezifische Enthalpie h
- spezifische Wärmekapazität
- molare Masse
- Schallgeschwindigkeit
- Wärmeleitfähigkeit
- Viskosität

Dabei erfolgt die Bestimmung in Abhängigkeit vom Druck und der Temperatur für elf festvorgegebene Referenzgaszusammensetzungen (Masseanteile für SF₆ und Luft) nach Tab. 3.1.

Tab. 3.1 Referenzgaszusammensetzungen für SF₆-Luft-Gemische

Masseanteil SF ₆ ξ_{SF_6}	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Masseanteil Luft ξ_{luft}	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,0

Frei brennende Hochstromlichtbögen weisen Temperaturen in der Größenordnung von bis zu 10000 bis 15000 K auf. Die im Störlichtbogenfall auftretenden Drücke erreichen zum Beispiel bei gasisolierten Hochspannungsschaltanlagen Maximalwerte von einigen 10 bar. Um diese Wertebereiche mit den Gasdaten sicher abdecken zu können, werden die Daten zwischen 250 K und 40000 K bzw. 0.1 bar und 100 bar bereit gestellt. Bei der Gaszusammensetzung wird eine lineare Teilung des Bereichs gewählt, während beim Druck und der Temperatur eine logarithmische Einteilung Verwendung findet, um im wesentlichen Wertebereich bis zu einigen tausend Kelvin und einigen bar eine hinreichende Genauigkeit in Form einer ausreichenden Anzahl von Stützstellen zu erzielen.

Exemplarisch sind in Abb. 3.7 die dreidimensionalen Interpolationstabellen für die Dichte dargestellt.

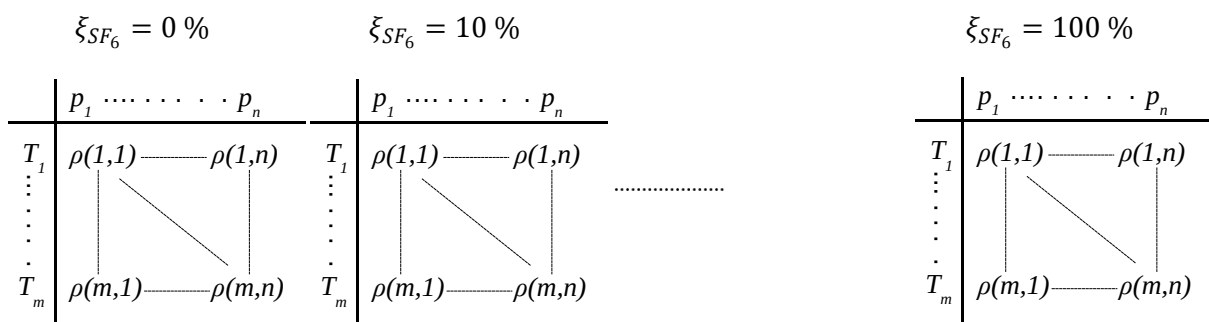


Abb. 3.7 Darstellung des Tabellenformats der SF₆-Luft-Gasdaten (ξ_{SF_6} : SF₆-Massenanteil, p: Druckwerte, T: Temperaturwerte), hier für die Dichte ρ

Durch eine einmalige Vor-Berechnung dieser Gasdaten und die Bereitstellung in Form der Tabellen wird die zeitaufwendige Neu-Berechnung in jeder Iteration überflüssig, was zu einer deutlichen Beschleunigung der gesamten Druckberechnung führt [35].

3.2.3. Einfluss von Verunreinigungen durch Metaldampf

Auf Grund der hohen thermischen Belastung durch den Störlichtbogen werden metallische Teile der fehlerbehafteten Schaltanlage, insbesondere die Elektroden bzw. Sammelschienen aufgeschmolzen und teilweise verdampft. Durch den Eintrag von Metaldampf wird das Isoliergas in der Anlage kontaminiert und die Gaszusammensetzung ändert sich. In Analogie zu der Vermischung von SF₆ und Luft kann daraus ebenfalls eine Veränderung der Gasdaten resultieren. Um diesen Einfluss zu bewerten, sind Gasdaten für ein Gasgemisch aus 90 % SF₆ und 10 % Massenanteil Kupfer zur Nachbildung des Elektrodenabbrands betrachtet worden.

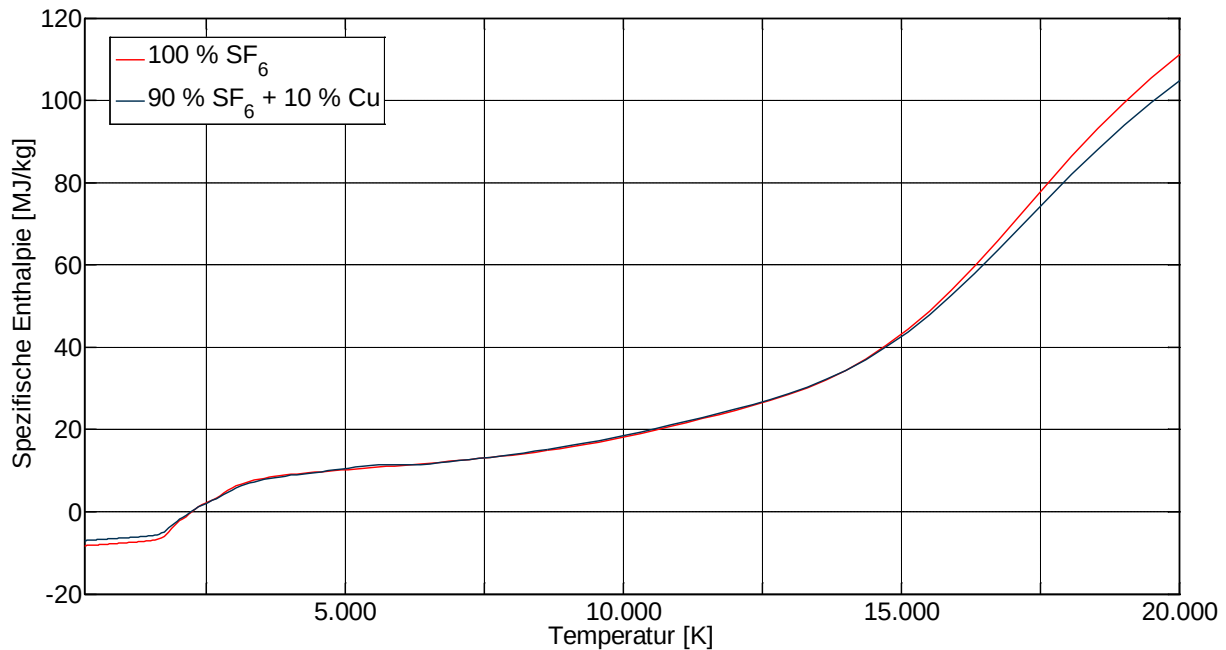


Abb. 3.8 Spezifische Enthalpie in Abhängigkeit der Temperatur bei 1 bar für reines SF₆ und ein Gemisch aus 90 % Massenanteil SF₆ und 10 % Kupferdampf

Ein Vergleich dieser Daten, in Abb. 3.8 beispielhaft für die spezifische Enthalpie dargestellt, verdeutlicht, dass nur geringe Abweichungen zwischen den Gasdatensätzen bestehen. Hierbei ist allerdings angenommen worden, dass die Gaszusammensetzung über den gesamten Temperaturbereich konstant ist.

3.3. Aufbau der Datenbasis

Neben den physikalischen Gasdaten werden mit der Lichtbogenspannung und dem k_p -Faktor, dem sogenannten Energietransferkoeffizienten, zwei weitere Eingangsgrößen für die Druckberechnung benötigt, die im Fall nicht vorhandener Messdaten auf Grundlage von Erfahrungswerten hinreichend genau bestimmt werden müssen, um verlässliche Ergebnisse zu erzielen.

Damit eine wissenschaftlich belastbare und objektive Wahl der anzunehmenden Werte für die Lichtbogenspannung und den k_p -Faktor möglich ist, sind statistische Auswertungen von Versuchsdaten durchgeführt worden, um ggfs. Erkenntnisse über eventuelle Abhängigkeiten von Anlagenparametern, z. B. Elektrodenmaterial, Isoliergas, Elektrodenanordnung zu erlangen. In der Datenbasis sind auch Versuchsdaten eingeflossen, die zum einen durch die Mitglieder des Projektbegleitenden Ausschusses dieses Forschungsvorhabens, zum anderen durch Mitglieder der CIGRE Working Group A3.24, in der der Projektleiter mitarbeitet, bereitgestellt worden. Die Datenbasis umfasst insgesamt Datensätze von 141 Störlichtbogenversuchen (ein- und dreipolige Kurzschlüsse) an unterschiedlichsten Modellanordnungen und Schaltanlagen. Zur Katalogisierung der bereitgestellten Daten wurden 35 Anlageneigenschaften und Parameter wie. z. B. die elektrischen Kenngrößen, Abmessungen von Öffnungen, Größe der Anlagenvolumina oder die verbauten Werkstoffe genutzt. Zusätzlich wurden die gemessenen, elektrischen Größen und insbesondere die gemessenen Druckverläufe ausgewertet und die Ergebnisse ebenfalls in die Datenbank aufgenommen.

Die Größe der Datenbasis erlaubte eine erste Auswertung hinsichtlich möglicher Zusammenhänge zwischen einzelnen Parametern und den Größen der Lichtbogenspannung sowie des

k_p -Faktors. Auf Grund der Vielzahl an möglichen Parametervariationen ist jedoch eine Herleitung allgemein gültiger Gesetzmäßigkeiten, die über tendenzielle, qualitative Aussagen hinausgehen, mit den derzeit verfügbaren Messdatensätzen nicht möglich. Dennoch konnten trotz des bisher begrenzten Umfangs der Datenbasis wertvolle Erkenntnisse über das Verhalten unterschiedlicher Schaltanlagen im Störlichtbogenfall gewonnen werden.

3.4. Untersuchungen zum k_p -Faktor

Als mögliche Einflussparameter kommen sowohl charakteristische Anlageneigenschaften, wie auch physikalische Größen, die unter Umständen auch während des Störlichtbogenversuchs variieren können, in Betracht. Auf der Grundlage des Stands der Technik, vorangegangener Untersuchungen und den Erkenntnissen der aktuellen Forschung, wurden aus der Vielzahl der in der Datenbasis katalogisierten Parameter folgenden Größen bzw. Eigenschaften identifiziert, die im Rahmen des Arbeitspaketes 4 hinsichtlich ihres Einflusses auf den Wert des k_p -Faktors analysiert wurden:

- Dichte des Isoliergases
- Art des Isoliergases
- Energiedichte des Lichtbogenraums
- Elektrodenmaterial

Zur Bestimmung der Abhängigkeiten des k_p -Faktors von diesen Größen wurden für die Versuchsdatensätze Druckberechnungen durchgeführt und die berechneten Druckverläufe mit den Messungen verglichen. Dabei wurden zunächst Erfahrungswerte für den k_p -Faktor benutzt und diese sukzessive unter Minimierung der Abweichung zwischen simuliertem und gemessenem Druckverlauf verändert. Auf diese Weise wurden die k_p -Faktoren für sämtliche Datensätze bestimmt und nach einer Kategorisierung gemäß den potentiellen Einflussparametern analysiert.

3.4.1. Dichteabhängigkeit des k_p -Faktors

Beim Versuch, berechnete Druckkurven sowohl für Luft als auch für SF₆-isolierte Anlagen an charakteristische, gemessene Druckverläufe durch die geeignete Wahl des k_p -Faktors anzupassen, zeigte sich, dass mit einem konstanten k_p -Faktor keine gute Übereinstimmung erzielt werden kann. In **Abb. 3.9** wird dies anhand der Druckverläufe im Lichtbogenraum für eine exemplarisch ausgewählte, luftisolierte Anordnung mit einer Druckentlastungsöffnung verdeutlicht. Die Druckberechnung mit konstantem k_p -Faktor liefert hier sowohl in der Amplitude als auch in der Form der Druckkurve deutliche Abweichungen von der Messung, während die Berechnung mit dichteabhängigem k_p -Faktor bei identischem Anfangswert eine angemessene Übereinstimmung aufweist.

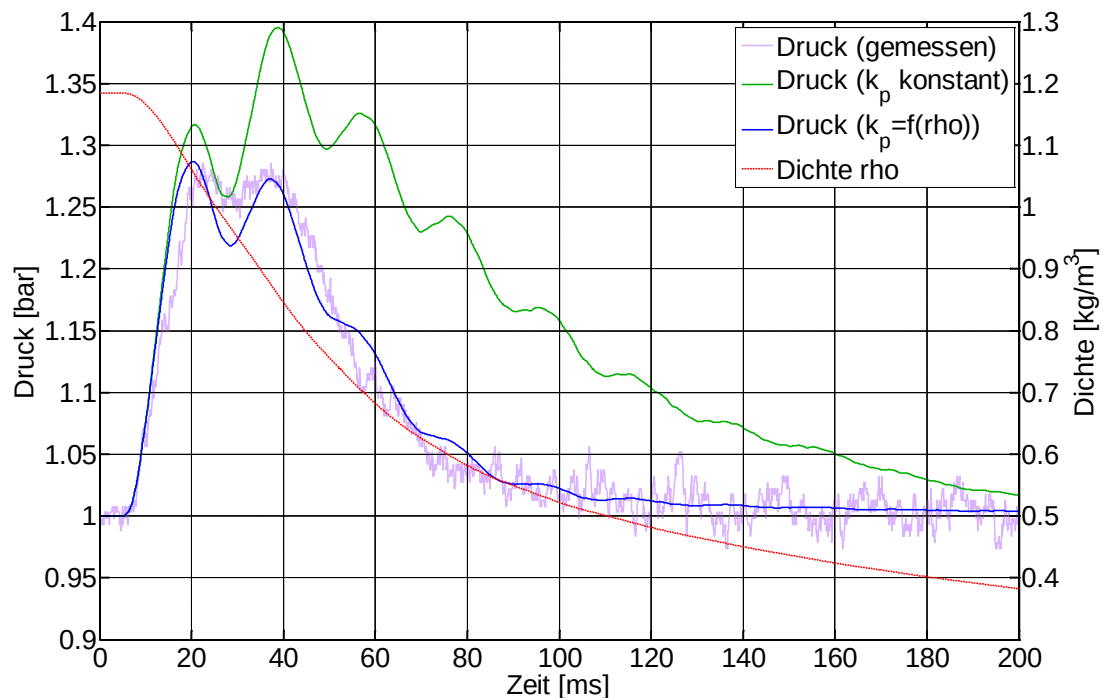


Abb. 3.9 Vergleich einer Druckmessung mit der Druckberechnung mit bzw. ohne dichteabhängigen k_p -Faktor sowie Verlauf der Dichte

Wegen des permanenten Ausströmens des Isoliergases durch die Entlastungsöffnung aus dem fehlerbehafteten Volumen verringert sich die Masse des verbleibenden Gases kontinuierlich. Der daraus resultierende Verlauf der Dichte, der einen stetigen Abfall nach der Zündung des Lichtbogens zeigt, ist ebenfalls in **Abb. 3.9** wiedergegeben. Durch die abnehmende Dichte steht dem Lichtbogen eine geringere Gasmasse zur Energieaufnahme zur Verfügung, weshalb der Anteil der thermischen Energie d.h. der k_p -Faktor mit sinkender Dichte abnehmen muss.

Der an der Forschungsstelle anhand einer Modellanordnung exemplarisch ermittelte Zusammenhang zwischen der Gasdichte und der Höhe des k_p -Faktors ist durch die Analyse der Datenbasis und die umfangreiche Auswertung der Datensätze weiter untersucht und sowohl für Luft als auch SF_6 bestätigt worden.

Im entwickelten Referenzverfahren ist daher der dichteabhängige Verlauf des k_p -Faktors als Funktionalität hinterlegt. Durch die Berücksichtigung dieses Effektes wird somit die Zuverlässigkeit der Druckberechnungsergebnisse erhöht.

3.4.2. Einfluss der Energiedichte im Lichtbogenraum

Die in den vorherigen Unterkapiteln ermittelten Zusammenhänge zwischen dem k_p -Faktor und der Isoliergasart bzw. der Gasdichte wurden bei der weiteren Analyse berücksichtigt. Hierzu werden die Ergebnisse der Auswertungen getrennt für Luft und SF_6 angegeben. Da außerdem wegen der Dichteabhängigkeit des k_p -Faktors kein konstanter Wert angegeben werden kann, wird stattdessen der Anfangswert von dem der Verlauf über den gesamten Zeitbereich abhängt, als charakteristische Größe verwendet.

Für eine Analyse der Abhängigkeit des k_p -Faktors von der Größe des fehlerbehafteten Volumens in dem der Lichtbogen brennen kann, stehen in der Datenbasis zu wenig Versuche zur Verfügung, die annähernd gleiche Randbedingungen aufweisen. Um dennoch den Einfluss des Lichtbogenraums untersuchen zu können, wird als Ersatzgröße dessen

Energiedichte w_{el} betrachtet, die sich als Quotient der insgesamt eingespeisten elektrischen Energie W_{el} und des Lichtbogenraumvolumens V ergibt.

$$w_{el} = \frac{W_{el}}{V} \quad (3.10)$$

In die Auswertung, deren Ergebnis in Abb. 3.10 für luftisolierte Anlagen dargestellt ist, sind insgesamt 18 Versuche eingeflossen, die annähernd vergleichbare Randbedingungen aufweisen.

Die hierbei berücksichtigten Datensätze haben alle Kupfer als Elektrodenmaterial und beinhalten Fülldrucke zwischen 1 und 1,5 bar, Lichtbogenraumvolumina von 0,2 bis 1,85 m³ sowie dreipolige Kurzschlussströme zwischen 14 und 36 kA, die über eine Dauer von 530 bis 1200 ms anstehen.

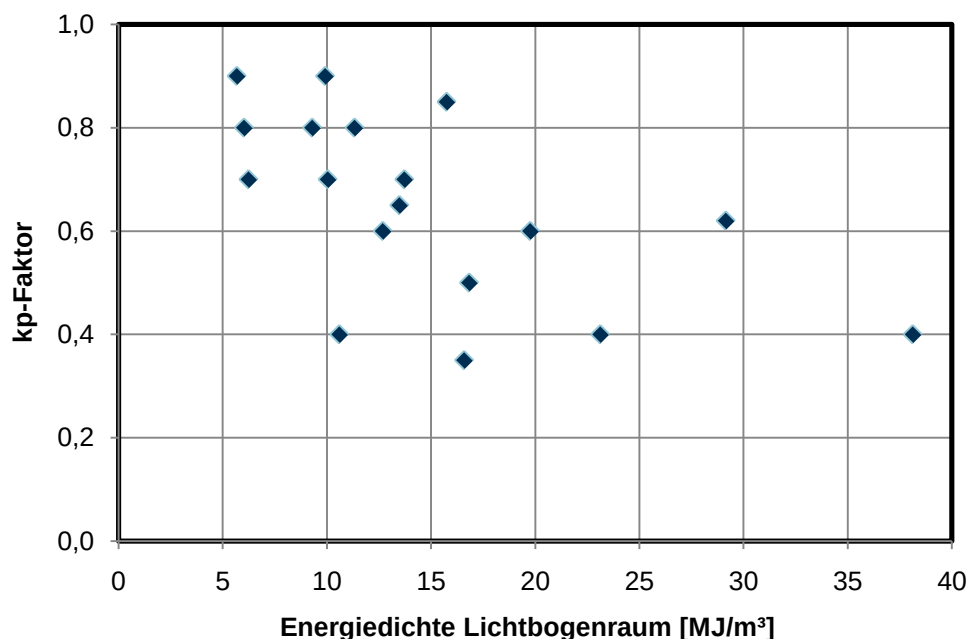


Abb. 3.10 Einfluss der Energiedichte im Lichtbogenraum auf den Anfangswert des k_p -Faktors für luftisolierte Anlagen mit Kupferelektroden

Trotz der Ähnlichkeit der 18 betrachteten Versuche erweist sich wegen der breiten Streuung der Anfangswerte des k_p -Faktors die Angabe eines Mittelwertes für diese Anlagenklasse als nicht sinnvoll. Es zeigt sich jedoch, dass bei einer geringen Energiedichte tendenziell höhere Werte auftreten. Die Datensätze mit verhältnismäßig großem Raumvolumen weisen tendenziell ebenfalls höhere Anfangswerte für den k_p -Faktor auf. Es ist daher statistisch davon auszugehen, dass kompaktere Anlagen dieser Klasse einen geringeren Anfangs- k_p -Faktor besitzen.

3.4.3. Abhängigkeit des k_p -Faktors vom Isoliergas

Die vergleichbare Analyse für SF₆-isolierte Anlagen liefert das in Abb. 3.11 gezeigte Resultat. Der Auswertung liegen insgesamt 17 Datensätze mit Kupferelektroden und einem Lichtbogenraumvolumen zwischen 0,23 und 1,22 m³ bei einem Fülldruck zwischen 1,2 und 1,7 bar zu Grunde. Die dreipoligen Kurzschlussströme reichen dabei von 12 bis 36 kA über Fehlerdauern zwischen 250 und 1180 ms.

Die SF₆-isolierten Anlagen zeigen dabei ein gegenüber den luftisolierten abweichendes Verhalten. Die Anfangswerte des k_p -Faktors besitzen eine deutlich geringere Streuung und zeigen kaum eine Abhängigkeit von der Energiedichte und vom Volumen des Lichtbogenraums. Der für diese Anlagenklasse bestimmte Mittelwert liegt bei 0,71 bei einer Standardabweichung von 0,10. Die bei Luft auftretenden deutlichen Ausreißer treten hier nicht auf. Die Art des in der Mittelspannungsschaltanlage verwendeten Isoliergases beeinflusst somit den k_p -Faktor maßgeblich.

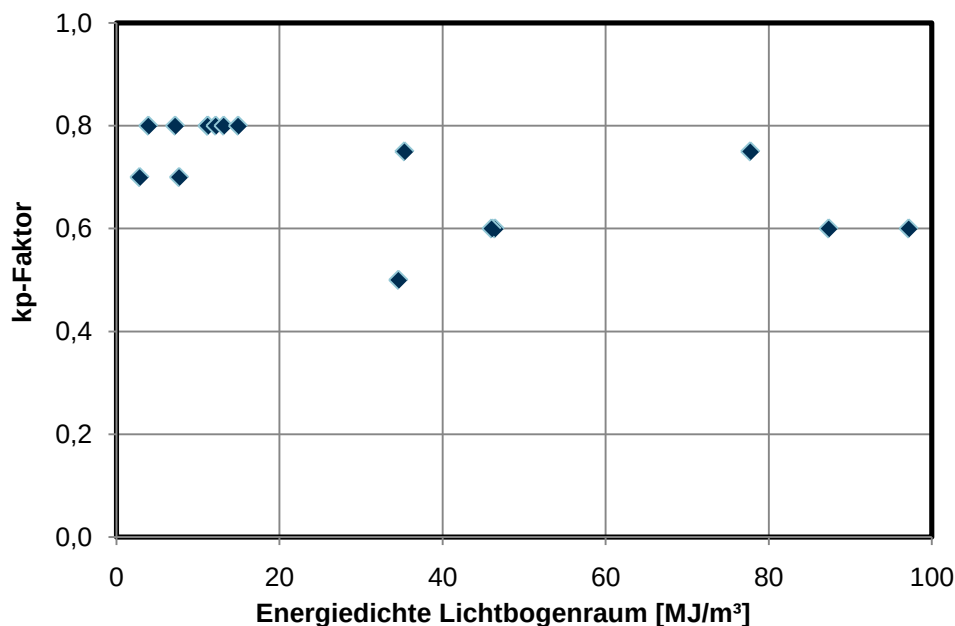


Abb. 3.11 Einfluss der Energiedichte im Lichtbogenraum auf den Anfangswert des k_p -Faktors für SF₆-isolierte Anlagen mit Kupferelektroden

3.4.4. Abhängigkeit des k_p -Faktors vom Elektrodenmaterial

In der Mittelspannungstechnik wird neben Kupfer auch Aluminium als Elektroden-, und Sammelschienenmaterial eingesetzt, das einen deutlich geringeren Schmelzpunkt (933 K gegenüber 1350 K) ausweist. Auf Grund der unterschiedlichen chemischen und thermischen Eigenschaften ist davon auszugehen, dass sich die einzelnen Energieanteile in der Energiegleichung (2.1) und somit auch der Teil, der zur Aufheizung des Isoliergases führt, unterscheiden. Deshalb wurde der Einfluss des Elektrodenmaterials auf den Anfangswert des dichteabhängigen k_p -Faktors untersucht.

Die Datenbasis stellt für diese Anlagen-Variante sowohl für luft- als auch für SF₆-isolierte Anlagen nur eine geringe Anzahl an Datensätzen zur Verfügung, sodass anhand der vier in Abb. 3.12 eingezeichneten Versuchsdaten keine zuverlässige Analyse möglich ist.

Die vier Datensätze stammen aus SF₆-isolierten Anlagen mit einem Fülldruck zwischen 1,4 und 7,3 bar bei einem Lichtbogenraumvolumen von 0,13 bis 1,2 m³. Der dreipolige Kurzschlussstrom wird für eine Fehlerdauer zwischen 280 und 550 ms eingespeist. Eine Korrelation des Anfangswert für den k_p -Faktor und der Energiedichte kann zwar nicht festgestellt werden, kann jedoch wegen der geringen Datenbasis auch nicht ausgeschlossen werden. Im Vergleich zu den SF₆-Versuchen mit Kupferelektroden tritt jedoch ein deutlich höherer Anfangs- k_p -Wert auf, der für alle Fälle größer als eins ist. Dies bedeutet, dass zeitweise mehr Energie in den Druckaufbau des Isoliergases einfließt, als über den

Störlichtbogen in das System eingespeist wird. Zurückzuführen ist dieses Phänomen auf chemische Reaktion zwischen den Bestandteilen des Isoliergases und dem verdampften Elektrodenmaterial, die sich im Fall von Aluminium exotherm, d. h. unter freierwerden chemisch gebundener Energie vollziehen und somit für einen zusätzlichen Energieeintrag in das Isoliergas sorgen.

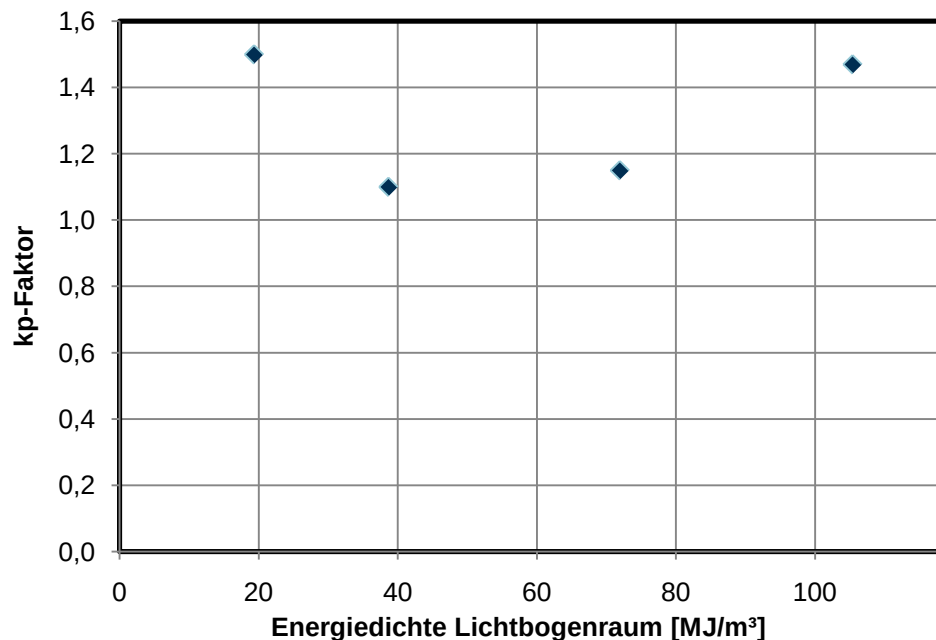


Abb. 3.12 Anfangs- k_p -Faktoren für SF₆-isolierte Anlagen mit Aluminiumelektroden in Abhängigkeit von der Energiedichte

3.5. Untersuchungen zur Lichtbogenspannung

Falls Druckberechnungen für Anlagen durchgeführt werden sollen, zu denen keine Messdaten vorliegen, müssen zur rechnerischen Bestimmung der elektrischen Eingangsleistung sinnvolle Annahmen für die Kurzschlussströme und Lichtbogenspannungen getroffen werden. Der zeitliche Verlauf des Kurzschlussstroms kann im Allgemeinen anhand der Netzparameter hinreichend genau vorhergesagt werden. Die Schaltanlage hat im Störlichtbogenfall nahezu keinen Einfluss auf den Stromverlauf, da dieser vom Netz eingeprägt wird und durch dessen Kenngrößen (z. B. Kurzschlussleistung, Netzimpedanz) festgelegt ist. Im Gegensatz weist die Lichtbogenspannung eine deutliche Abhängigkeit von den Eigenschaften der Schaltanlage auf, sodass im Rahmen des Arbeitspaketes 4 diese Zusammenhänge untersucht wurden, um die zu erwartende Lichtbogenspannung in einer vorgegebenen Anlage anhand ihrer Parameter prognostizieren zu können.

Bestimmung der Lichtbogenspannung

Da die im Prüffeld gemessenen Außenleiterspannungen (siehe Abb. 3.13) einen unstetigen Verlauf zeigen, der mathematisch nur ungenau beschrieben werden kann, wird mit der *Lichtbogenspannung* eine gemittelte, zeitinvariante Ersatzgröße definiert, die aus den gemessenen Verläufen abgeleitet wird. Das Vorgehen zur Bestimmung dieser Größe wird im Folgenden erläutert.

Die gemessenen Spannungsverläufe stellen nicht die originären Lichtbogenspannungen dar, sondern werden durch die treibenden Netzspannung verändert. In Abhängigkeit von der

Lichtbogenbrennposition, die durch die Vorzeichen der drei Außenleiterströme festgelegt ist, ergeben sich insgesamt sechs sich zyklisch wiederholende Lichtbogenphasen pro Periode. Die sechs möglichen Brennpositionen zwischen den drei Außenleitern sowie die aus den Außenleiterspannungen u_{ij} abgeleiteten Lichtbogenteilspannungen $u_{LB\ ij}$ sind in Abb. 3.14 schematisch dargestellt.

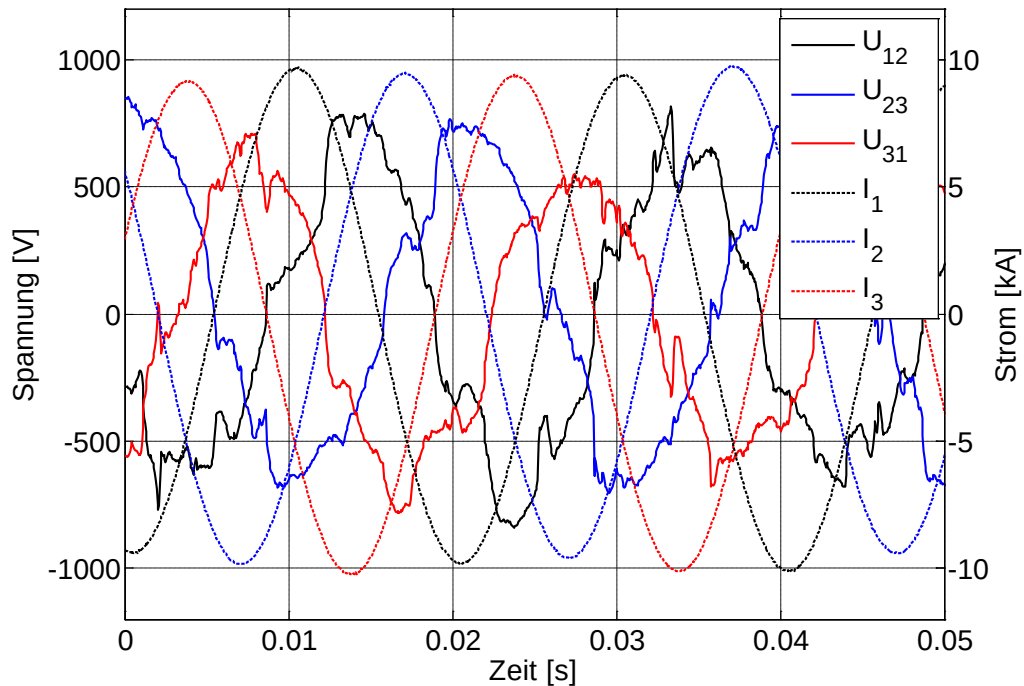


Abb. 3.13 Exemplarischer Verlauf von Kurzschlussstrom und Außenleiterspannung beim dreipoligen Kurzschluss

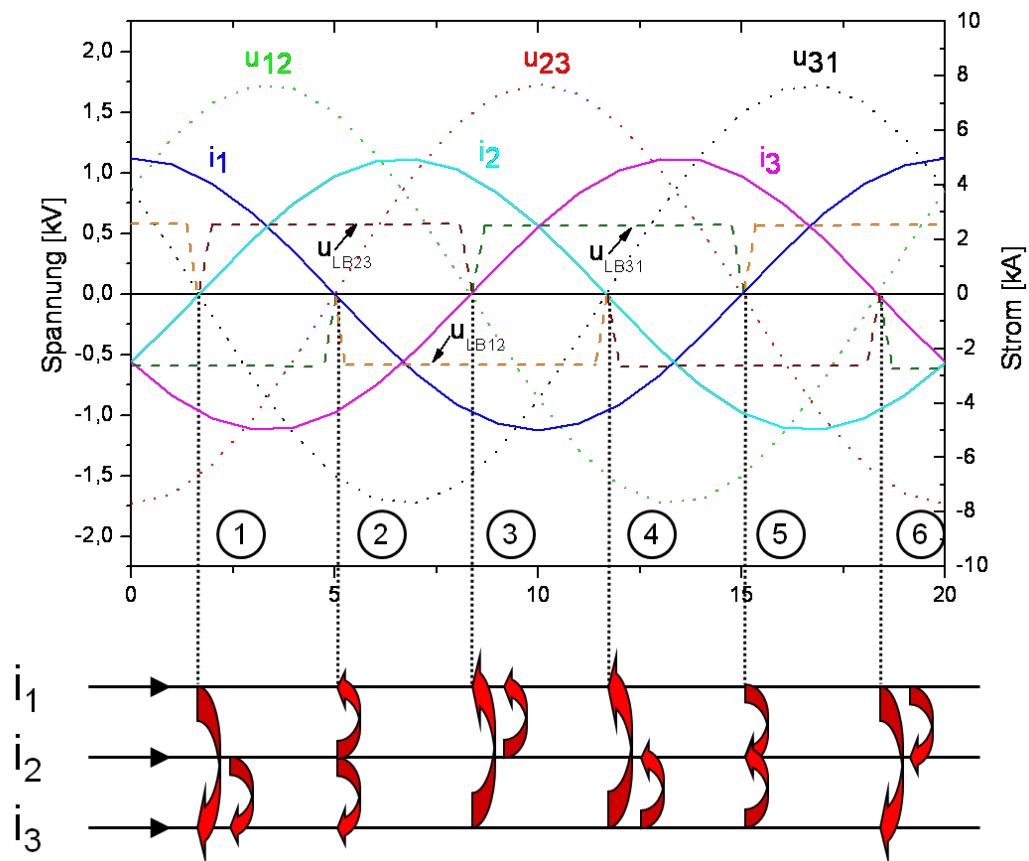


Abb. 3.14 Schematische Einteilung eines Störlichtbogens für einen dreipoligen Kurzschluss in sechs Lichtbogenphasen (nach [36])

Diese Lichtbogenteilspannungen entsprechen je nach Lichtbogenphase entweder dem Wert null oder dem Betrag der jeweiligen Außenleiterspannungen (siehe Tab. 3.2).

Lichtbogenphase	Vorzeichen der Ströme			Spannungen		
	i_1	i_2	i_3	u_{LB12}	u_{LB23}	u_{LB31}
1	+	+	-	0	$+u_{23}$	$-u_{31}$
2	-	+	-	$-u_{12}$	$+u_{23}$	0
3	-	+	+	$-u_{12}$	0	$+u_{31}$
4	-	-	+	0	$-u_{23}$	$+u_{31}$
5	+	-	+	$+u_{12}$	$-u_{23}$	0
6	+	-	-	$+u_{12}$	0	$-u_{31}$

Tab. 3.2 Zusammenhang zwischen der Lichtbogenteilspannung und der Außenleiterspannung für die sechs Lichtbogenphasen

Aus den zeitvarianten Verläufen der Lichtbogenteilspannung $u_{LB\ ij}$ wird nach Formel (3.11) eine gemittelte Lichtbogenteilspannung $U_{LB\ ij}$ bestimmt, wobei t_{LB} der gesamten Fehlerdauer und $t_{LB\ ij}$ der Brenndauer des jeweiligen Teillichtbogens in den sechs Phasen entsprechen.

$$U_{LB\ ij} = \frac{1}{t_{LB,ij}} \int_0^{t_{LB}} u_{LB\ ij} dt \quad (3.11)$$

Daraus abgeleitet ergibt sich der zeitlich konstante gemittelte Wert der Lichtbogenspannung U_{LB} zu:

$$U_{LB} = \frac{U_{LB\ 12} + U_{LB\ 23} + U_{LB\ 31}}{3} \quad (3.12)$$

Mit Hilfe dieser Lichtbogenspannung ist es möglich, die elektrische Leistung des Lichtbogens $P_{el}(t)$ nach der Formel von Welich [36] zu berechnen:

$$P_{el}(t) = \frac{1}{2} \cdot U_{LB} \cdot (|i_1| + |i_2| + |i_3|) \quad (3.13)$$

Nach der Bestimmung der Lichtbogenspannung für alle Datensätze gemäß dem beschriebenen Verfahren erfolgte eine systematische Analyse der Datenbasis auf mögliche Korrelationen zwischen möglichen Einflussparametern und der Höhe der Lichtbogenspannung. Als potentielle Kenngrößen wurden identifiziert:

- Isoliergas und Fülldruck
- Elektrodenwerkstoff
- Stromstärke des Lichtbogens
- Bestückung/Volumen des Lichtbogenraums

3.5.1. Abhängigkeit der Lichtbogenspannung vom Isoliergas

Die Datenbasis beinhaltet Versuchsdatensätze für die in der Mittelspannungstechnik gängigen Isoliergase Luft und Schwefelhexafluorid (SF₆). Die vielen Parameter erlauben jedoch bei einem direkten Vergleich unterschiedlichen Anlagen keine unmittelbaren Aussagen zum Einfluss des Isoliergases auf die Lichtbogenspannung. Stattdessen müssen für eine derartige Analyse aus der Gesamtheit der Datensätze Versuche herangezogen werden, die mit beiden betrachteten Isoliergasen in der identischen Anlage unter sonst konstanten Randparametern durchgeführt worden sind wodurch sich die zu Grunde liegende Zahl an Datensätzen auf 18 reduziert. Diese Datensätze gehören zu zwei Modell-anordnungen, an denen Versuche mit Luft und SF₆ zur statistischen Absicherung mehrmals wiederholt wurden. Die Angabe eines quantitativen Zusammenhangs zwischen Isoliergas und der resultierenden Lichtbogenspannung kann auf Grund der breiten Streuung der Ergebnisse zwar nicht angegeben werden, dennoch zeigen die Versuche, dass bei SF₆-isolierten Anlagen bei gleichen Abmessungen und Rahmenbedingungen höhere Lichtbogenspannungen auftreten als bei luftisolierten Anlagen. Die Untersuchungen zu weiteren Einflussparametern erfolgen daher separat für Luft und SF₆.

3.5.2. Abhängigkeit von der Stromstärke des Lichtbogens

Da die Datenbasis keine Datensätze liefert, die Versuche mit derselben Anlage aber mit variablen Kurzschlussstromstärken beinhalten, ist eine direkte Einflussanalyse des Stroms auf die Lichtbogenspannung nicht möglich. Diese Restriktion kann durch die Einführung einer Ersatzkenngröße in Form der Lichtbogenfeldstärke E nach Formel (3.14) als Quotient der ermittelten Lichtbogenspannung U_{LB} durch den Polmittenabstand d der Anlage umgangen werden.

$$E = \frac{U_{LB}}{d} \quad (3.14)$$

Für dreiphasige, luftisolierte Anlagen mit Kupferelektroden kann so z. B. eine Datengrundlage von 46 Datensätzen herangezogen werden, deren Auswertung in Abb. 3.15 dargestellt ist.

Der Zusammenhang zwischen der Stromstärke I_K und der Lichtbogenfeldstärke E kann mit Hilfe einer empirisch ermittelten Approximation quantitativ beschrieben werden:

$$E = 30 \frac{V}{cm} + \frac{1}{2} \cdot I_K \cdot 1 \frac{V}{cm \cdot kA} \leq 40 \frac{V}{cm} (Luft) \quad (3.15)$$

Die mittlere Abweichung zwischen den betrachteten Datensätzen und der Approximation beträgt zwar weniger als -2,7 V/cm, jedoch treten Ausreißer mit ΔE bis zu 25 V/cm auf.

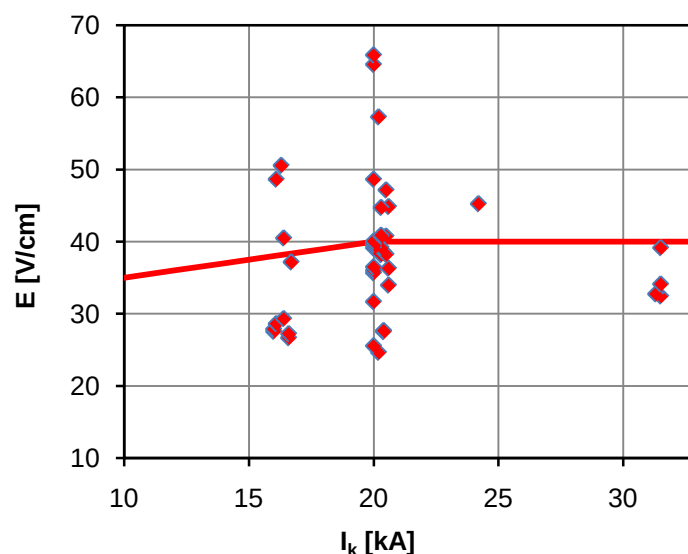


Abb. 3.15 Einfluss der Stromstärke auf die Lichtbogenfeldstärke für luftisolierte Anlagen (Messpunkte; Kurve mit Formel (3.15) berechnet)

Für SF₆-isolierte Anlagen mit Kupferelektroden besteht die Datengrundlage aus 14 Datensätzen aus Versuchen mit dreipoligen Kurzschlüssen, deren Auswertung in Abb. 3.16 dargestellt ist.

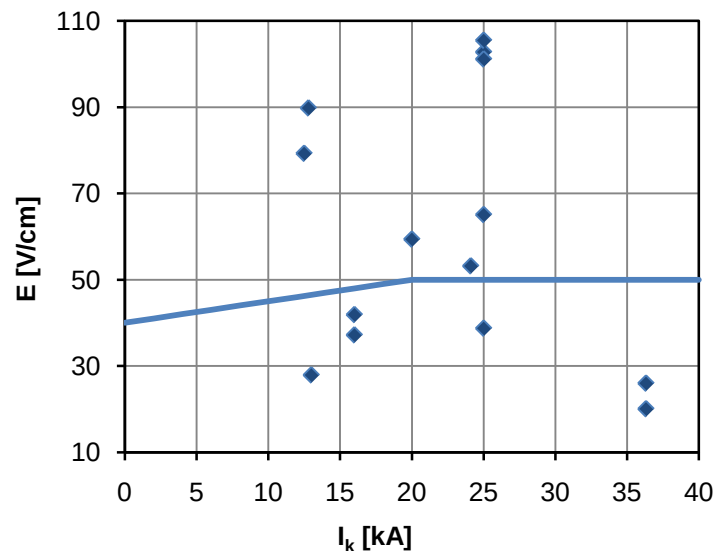


Abb. 3.16 Einfluss der Stromstärke auf die Lichtbogenfeldstärke für SF₆-isolierte Anlagen und Kurvenverlauf der Approximation nach Formel (3.16)

Zusätzlich zu den mittleren Lichtbogenfeldstärken in Abhängigkeit der Stromstärke aus den einzelnen Versuchen ist in Abb. 3.16 eine Approximation in Analogie zu dem Ansatz für luftisolierte Anlagen nach Formel (3.15) angegeben, die durch

$$E = 40 \frac{\text{V}}{\text{cm}} + \frac{1}{2} \cdot I_K \cdot 1 \frac{\text{V}}{\text{cm} \cdot \text{kA}} \leq 50 \frac{\text{V}}{\text{cm}} (\text{SF}_6) \quad (3.16)$$

beschrieben werden kann.

3.5.3. Einfluss des Elektrodenwerkstoffsauf die Lichtbogenspannung

Kupfer und Aluminium sind gängige Werkstoffe für stromführende Teile wie z. B. Sammelschienen in Mittelspannungsschaltanlagen. Wegen der unterschiedlichen chemischen Eigenschaften der beiden Elektrodenmaterialien wird daher die Datenbasis auf mögliche Einflüsse dieser Materialien auf die Lichtbogenspannung untersucht.

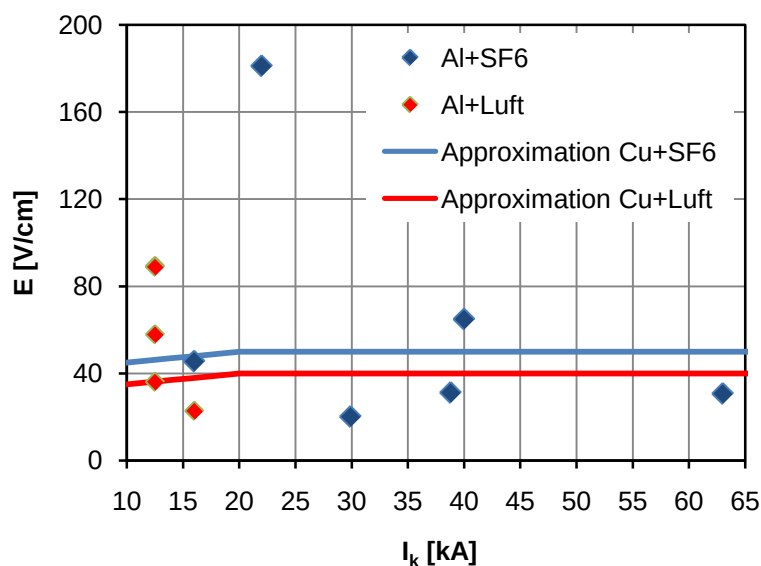


Abb. 3.17 Auswirkungen von Aluminiumelektroden auf die Lichtbogenfeldstärke (Messpunkte; zum Vergleich Kurven für Kupferelektroden nach Gleichung (3.15) bzw. (3.16))

Hierzu stehen neben den im Kapitel 3.5.2 vorgestellten Datensätzen für Kupferelektroden fünf Versuche zu luftisolierten Anlagen und sechs Datensätze zu SF₆ mit Aluminiumelektroden zur Verfügung. Aus dem Vergleich der Kurven für Kupferelektroden nach den Formeln (3.15) und (3.16) mit den Versuchen mit Elektroden aus Aluminium, dargestellt in Abb. 3.17, geht hervor, dass in luftisolierten Anlagen mit Aluminiumelektroden tendenziell eine höhere Lichtbogenfeldstärke aufzutreten scheint. Bei SF₆-isolierten Anlagen kann mit dieser Datenbasis keine eindeutige Aussage zum Vergleich der Lichtbogenfeldstärke zwischen Kupfer- und Aluminiumelektroden getroffen werden.

3.5.4. Einfluss des Volumen des Lichtbogenraums

Der Störlichtbogen verhält sich, soweit die Randbedingungen das zulassen, chaotisch in dem ihm zur Verfügung stehenden Volumen. Dadurch ist eine vollständige mathematische Beschreibung der Bogenbewegung praktisch nicht möglich. In Grenzen ist die Bogenbewegung und -wanderung jedoch zumindest teilweise vorhersagbar, wenn man die äußeren Kräfte kennt, die auf den Lichtbogen wirken. Maßgeblich sind hier z. B. die thermische Auftriebskraft und elektrodynamische Kräfte, die auf Lichtbögen wirken, die zwischen parallelen Sammelschienen- bzw. Elektrodenanordnungen brennen. Diese Kräfte bewirken neben einer Bewegung der Fußpunkte außerdem eine Verlängerung des Lichtbogens, wodurch sich die Lichtbogenspannung erhöhen kann. Eine Begrenzung der Bewegungsfreiheit gegenüber einem freibrennenden Lichtbogen erfahren Störlichtbögen in elektrischen Anlagen durch Einbauten wie z. B. Schaltgeräte, Wandler, Stützisolatoren oder Abdeckschienen sowie die Wände der Anlage bzw. der Schotträume. Hypothetisch ist daher davon auszugehen, dass tendenziell die mittlere Lichtbogenspannung mit dem Raumvolumen, in dem sich der Störlichtbogen bewegen und ausbreiten kann, zunimmt. Ein derartiger Zusammenhang kann durch die Analyse zur Verfügung stehenden Datenbasis weder belegt noch zurückgewiesen werden.

3.6. Fazit Datenbasis

Die Analyse der Versuchsdaten hat Erkenntnisse zum Einfluss des verwendeten Isoliergases, des Elektrodenmaterials und des Lichtbogenraumvolumens auf den k_p -Faktor und die mittlere Lichtbogenspannung geliefert, durch die die Qualität von Druckvorhersagen im Störlichtbogenfall erhöht werden kann.

Wegen der großen Anzahl von Parametern, die bei den Störlichtbogenversuchen relevant sind, und den unterschiedlichen Randbedingungen bei den durchgeführten Versuchen sind die Möglichkeiten zur Ableitung eindeutiger, exakter Zusammenhänge auf Grundlage der verfügbaren Datensätze eingeschränkt. Der Umfang der Datenbasis von 141 Versuchsdatensätzen hat sich teilweise als nicht ausreichend erwiesen, um eine statistische Absicherung zu erzielen, so dass die getroffenen Aussagen nur qualitativer Art sind bzw. empirische Beschreibungen beinhalten.

Dennoch tragen die gewonnenen Erkenntnisse dazu bei, die Zuverlässigkeit von Druckberechnungen, insbesondere für Fälle, in denen Messungen nicht durchgeführt werden können, zu erhöhen. Die Bestimmung von Werten für den k_p -Faktor und die Lichtbogenspannung, die in diesen Fällen auf Basis von realistischen Annahmen erfolgen muss, wird zukünftig durch die Ergebnisse der Datenanalyse gestützt und deren Genauigkeit dadurch verbessert.

Eine systematische Erweiterung der Datenbasis durch die Sammlung zusätzlicher Daten oder die Durchführung von Versuchen zur gezielten Untersuchung eines speziellen Zusammenhangs sollt im Rahmen zukünftiger Forschungsvorhaben angestrebt werden.

4. Entwicklung der Druckberechnungsverfahren

Die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens entwickelten Teilmodelle für Lichtbogenenergieabsorber und Gasgemische sowie die Erkenntnisse aus der Datenanalyse zum k_p -Faktor und zur Lichtbogenspannung wurden in das vorhandene CFD-Verfahrens eingepflegt und in ein neues Standarddruckberechnungsverfahren, das sog. Referenzverfahren integriert. Mit dem erweiterten Funktionsumfang der Druckberechnungsverfahren und insbesondere mit dem entwickelten Referenzverfahren stehen somit verbesserte Werkzeuge für die Druckberechnung in elektrischen Anlagen im Störlichtbogenfall zur Verfügung.

4.1. Einbindung der Sub-Modelle im CFD-Verfahren

Das CFD-Verfahren bietet die Möglichkeit, die räumliche Druckverteilung in einer Anlage zu bestimmen. Dadurch können Effekte, die in den raummittelnden Standardverfahren nicht aufgelöst werden können, wie z. B. Druckwellen oder lokale Druckspitzen zu identifizieren und bei der Bewertung der Anlage mit zu berücksichtigen. Es stellt somit ein eigenständiges Lösungsverfahren für spezielle Anwendungsfälle dar.

Grundsätzlich erweist sich das CFD-Verfahren mit der Implementierung der hydrodynamischen Grundgleichungen als zuverlässig, weshalb es im Rahmen dieses Forschungsvorhabens darüber hinaus dazu benutzt wird, um anhand des Vergleichs der Druckberechnungsergebnisse mit beiden Verfahren, das Referenzverfahren zu validieren und dessen Gültigkeitsgrenzen zu bestimmen. Dieses erfordert die Integration von Sub-Modellen für die Nachbildung der Gasgemische aus Luft und SF_6 sowie für die Effekte der Lichtbogenenergieabsorber.

Die Einbindung der Modelle erfolgt über die Schnittstellen des CFD-Programmpakets sowie implementierte Routinen, die in den Lösungsprozess integriert werden. Zur Einbeziehung der Gasgemische werden zunächst einmalig die Koeffizienten für die Spline-Interpolation der bereitgestellten Gasdaten (siehe Kapitel 3.2.2) bestimmt, die dann in jedem Iterationsschritt während der Berechnung zum Aufruf der Gasdaten genutzt werden. Durch das Verfahren der Spline-Interpolation für die Druck- und Temperaturabhängigkeit kann im Vergleich zu einer linearen Interpolation eine beschleunigte Konvergenz erzielt werden.

Des Weiteren muss der Gleichungssatz (4.1) des CFD-Solvers um eine Erhaltungsgleichung für den SF_6 -Massenanteil ξ_{SF_6} erweitert werden.

$$\frac{\partial(\rho \xi_{\text{SF}_6})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \xi_{\text{SF}_6} \vec{v}) - \nabla \cdot (D \nabla \xi_{\text{SF}_6}) = 0 \quad (4.1)$$

Diese beschreibt den Zusammenhang zwischen der zeitlichen Änderung der Dichte des Gasgemisches, der Divergenz der Strömung durch den Geschwindigkeitsvektor $\vec{v}$ und dem Diffusionsterm, der sich durch einen Konzentrationsgradienten einstellt.

Die beiden Wirkungen von Energieabsorbern, Energieaufnahme und Strömungswiderstand (siehe Kapitel 3.1) werden durch eine Kombination zweier unabhängiger Modellansätze nachgebildet. Aufgrund der praktischen Anwendbarkeit werden zwei mögliche Kombinationen vorgeschlagen:

- Gitterwirkungsgrad + Effektive Öffnung
- Wärmeübergang bzw. Druckverlust in Analogie zu Rohrbündeln.

Die erste Kombination ist verhältnismäßig einfach zu handhaben, setzt aber in der Regel Messdaten voraus. Die zweite Kombination ist zwar auch anwendbar, wenn Messdaten nicht vorhanden sind, jedoch erfordert sie einen erheblich größeren Aufwand, da die genauen geometrische Abmessungen der Absorber bekannt sein müssen, um sie auf die Anordnung von Rohrbündeln übertragen zu können.

Die Einbindung des Strömungswiderstandes erfolgt über die Berechnung einer Reibungskraft F_p als Funktion des Druckabfalls Δp , die über den Strömungsquerschnitt des Absorbers A_A integriert wird.

$$F_p = \int_0^{A_A} \Delta p \, dA \quad (4.2)$$

Die Reibungskraft F_p wird im Gleichungssatz des CFD-Solvers in der Impulserhaltungsgleichung als negative Impulsquelle eingefügt und ist somit der Strömungsrichtung entgegengesetzt.

Die Wärmeabsorption des Absorbers $-\Delta Q(t)$ wird im Volumenbereich des Absorbers als Quellterm in der Energieerhaltungsgleichung berücksichtigt.

4.2. Aufbau und Funktionalität des Referenzverfahrens

Kernaufgabe dieses Forschungsvorhabens ist die Entwicklung eines neuen, verbesserten Berechnungsverfahrens mit dem die prospektiv auftretende Druckbelastung im Störlichtbogenfall in einer elektrischen Anlage schnell und zuverlässig ermittelt werden kann. Dieses sogenannte Referenzverfahren zeichnet sich dabei durch folgende Eigenschaften aus:

- einfache, intuitive Handhabung
- schnelle Modellerstellung und Berechnung
- plattformunabhängige Programmierung
- Flexibilität bei Anzahl und Anordnung der Räume
- Variabilität hinsichtlich der Eingangsparameter
- Überprüfungsmöglichkeit der Ergebnisse auf Plausibilität anhand physikalischer Werte
- Berücksichtigung von SF_6 /Luft-Gemischen und Lichtbogenenergieabsorbern

Das Verfahren stellt damit einen innovativen Funktionsumfang bereit, der für die Druckberechnung in elektrischen Anlagen durch Hersteller und Errichter bzw. Betreiber genutzt werden kann.

Mit dem Referenzverfahren kann die räumlich gemittelte Druckbelastung im fehlerhafteten Volumen, in einer beliebigen Anzahl von Zwischenvolumen und Räumen bestimmt werden. Die Öffnungen zur Verbindung der Volumina lassen sich dabei variabel anordnen. Die benötigten Eingangsparameter sind in Abb. 4.1 aufgeführt, wobei grundsätzlich zwischen zwei Berechnungsvarianten unterschieden werden muss. Zum einen kann bei vorhandenen Messgrößen zu Strom- und Spannungsverläufen aus Referenzversuchen die eingespeiste elektrisch Leistung unmittelbar bestimmt werden. Falls keine Messwerte zur Verfügung stehen, wird die Lichtbogenleistung durch die Parameter des Kurzschlussstromverlaufs und Angaben zur Lichtbogenspannung bestimmt.

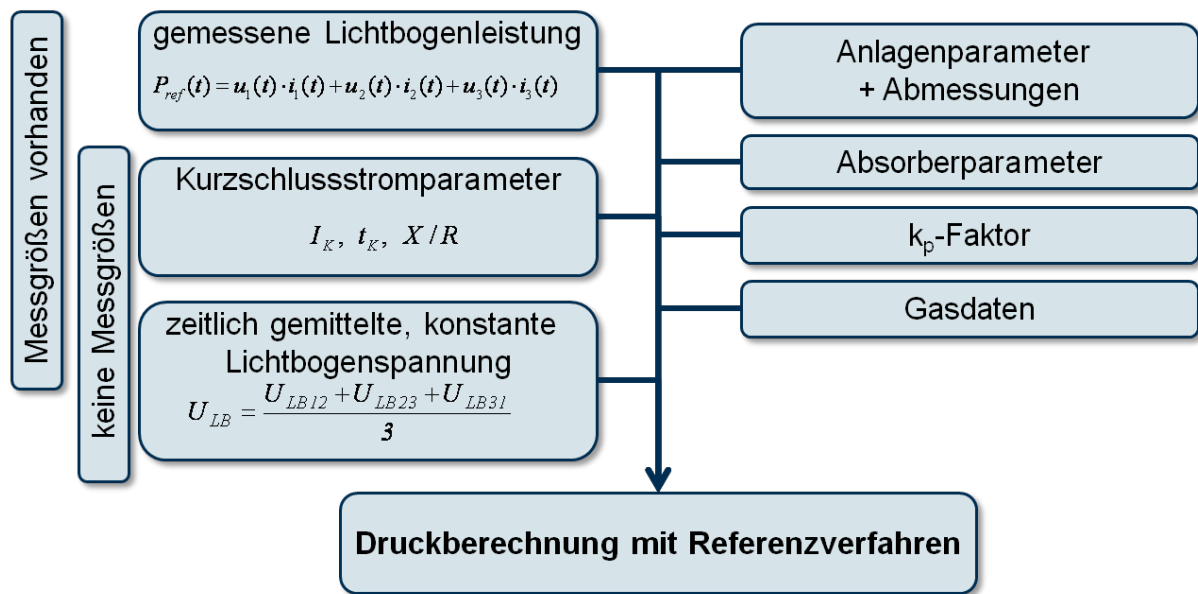


Abb. 4.1 Zusammenstellung der benötigten Eingangsparameter für das Referenzverfahren

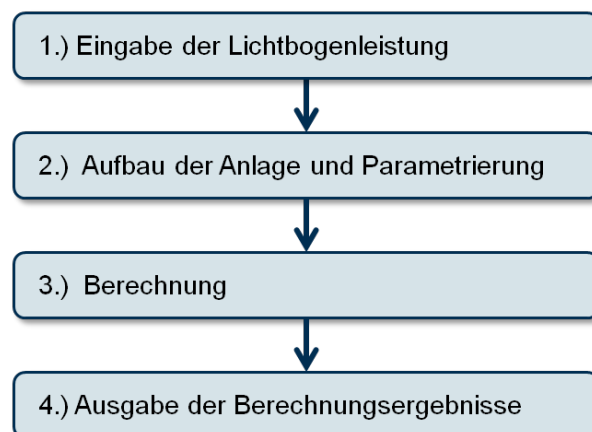


Abb. 4.2 Ablaufstufen der Druckberechnung mit dem Referenzverfahren

Als weitere Eingangsparameter für die Druckberechnung werden die Charakteristika der Anlage, die Gasdaten, Angaben zum k_p -Faktor und ggfs. Kenngrößen eingesetzter Lichtbogenenergieabsorber benötigt. Der prinzipielle Ablauf der Druckberechnung mit dem Referenzverfahren ist in Abb. 4.2 visualisiert.

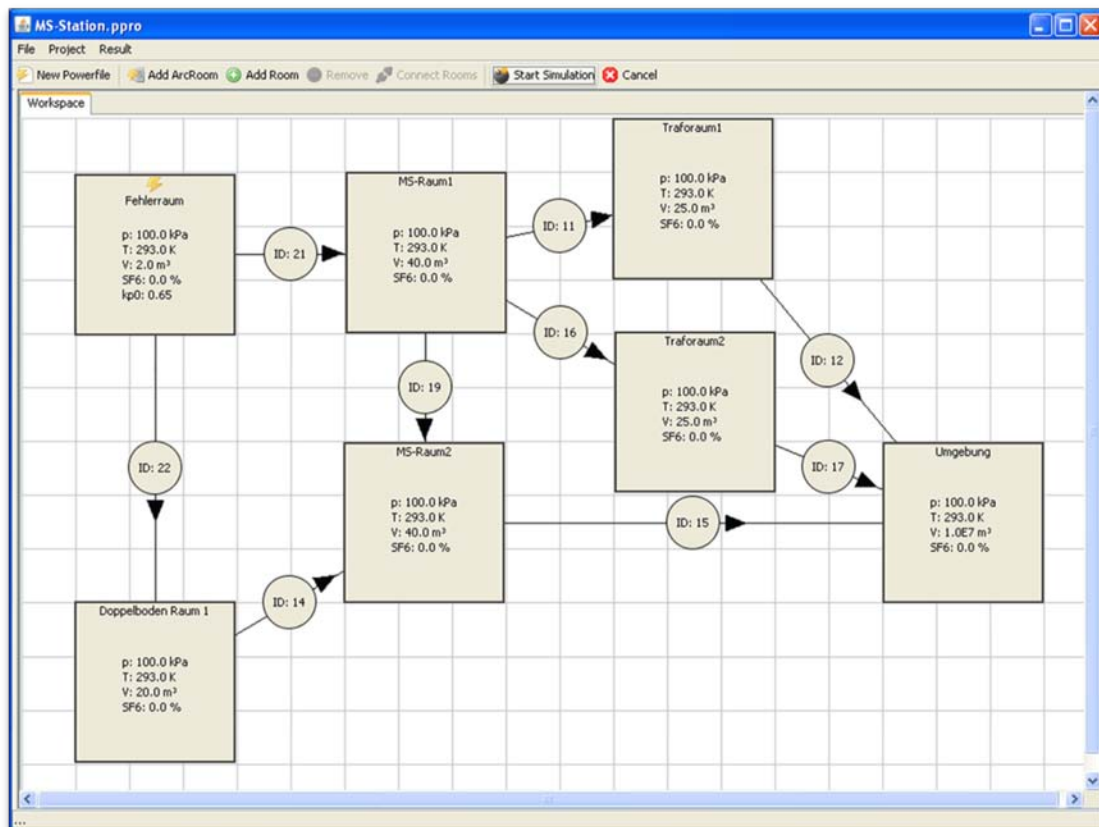


Abb. 4.3 Graphische Benutzeroberfläche des Referenzverfahrens mit beispielhafter Schaltanlage

The screenshot shows the 'ArcRoom: ID 4' dialog box with the following parameters:

- Result filename: ArcRoom 0.dat
- Initial pressure [kPa]: 100
- Temperature [K]: 293
- Volume [m³]: 0
- Mass fraction of SF6 [%]: 0
- Power filename: (empty)
- kp filename: (empty)
- kp0: 0.5
- beta: 0

Buttons: OK, Cancel, Apply

Abb. 4.4 Dialogfenster zur Parametrierung des Fehlerraums (Einspeisevolumen der Lichtbogenenergie)

Anhand der in Abb. 4.3 beispielhaft angegebenen Schaltanlage bestehend aus mehreren Räumen, die über diverse Öffnungen miteinander verbunden sind, werden die vielen Freiheitsgrade beim Aufbau der zu berechnenden Anlage unterstrichen. Die Symbole für die einzelnen Volumina und Öffnungen können beliebig auf der graphischen Benutzeroberfläche angeordnet werden. Eine Parametrierung der Elemente wie z. B. des Fehlerraums (siehe Abb. 4.4) erfolgt direkt über entsprechende Dialogfenster.

Auf Grund der Übersichtlichkeit und der intuitiven Bedienung können Modelle einer Anlage somit einfach und schnell erstellt werden.

Die Ergebnisse stehen nach kurzer Zeit zur Verfügung und können mit Hilfe eines im Programm integrierten Werkzeugs direkt graphisch ausgegeben und analysiert werden. Ausgegeben werden neben den Druckverläufen weitere physikalische Größen wie die Gasdichte oder die Temperatur für alle Volumina der Anlage, anhand derer eine unmittelbare Überprüfung der Berechnungsergebnisse auf Plausibilität erfolgen kann. Inkorrekte Annahmen zu den Eingangsparametern können so beispielsweise durch das Auftreten unrealistisch hoher Werte für die Temperatur im Fehlervolumen erkannt werden.

4.3. Evaluation des Referenzverfahrens

Die Evaluierung des Referenzverfahrens erfolgt auf zwei Ebenen: zum einen durch einen Vergleich mit Messdaten aus Störlichtbogenversuchen zu ausgewählten Anlagen sowie zum anderen durch eine Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse aus dem Referenz- und dem CFD-Verfahren. Aus der Gesamtheit der Berechnungen zur Evaluation werden in den folgenden Unterkapiteln sechs Fälle vorgestellt.

4.3.1. Evaluation Gasgemische (Beispiel 1)

Im ersten Beispiel wird einer SF₆-isolierte Schaltanlage modellhaft nachgebildet (Abb. 4.5). Sie besteht aus zwei Räumen (SF₆-Schottraum und Aufstellungsraum), die über eine Berstscheibe (Ansprechdruck $\Delta p = 0,5$ bar, Fläche 360 cm²) miteinander verbunden sind. Zur Evaluation des Gasgemisch-Modells werden die Druckberechnungsergebnisse des Referenzverfahrens mit den gemessenen Druckverläufen verglichen. Im Raum 1 der mit 1,05 bar SF₆ gefüllt ist, wird für 300 ms ein Störlichtbogen (20 kA) gezündet. Die Druckentlastung erfolgt nach Ansprechen der Berstscheibe in den Raum 2, der mit Luft bei 1 bar Druck gefüllt ist. Die insgesamt in während des Versuchs eingespeiste elektrische Leistung beträgt 3,55 MJ.

Die Gegenüberstellung der Ergebnisse für Raum 1 (Abb. 4.6) bzw. Raum 2 (Abb. 4.7) zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und berechneten Druckverläufen. Die Abweichungen beim Maximaldruck im Lichtbogenraum beträgt weniger als 10 %.

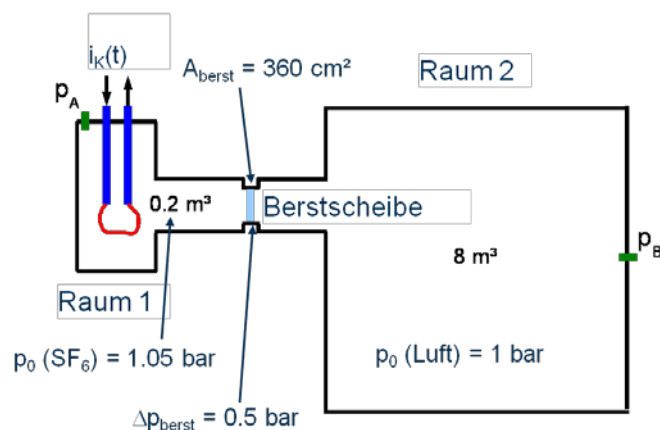


Abb. 4.5 Schematische Darstellung der Testanordnung 1 zur Evaluation der Gasgemisch-Modellierung

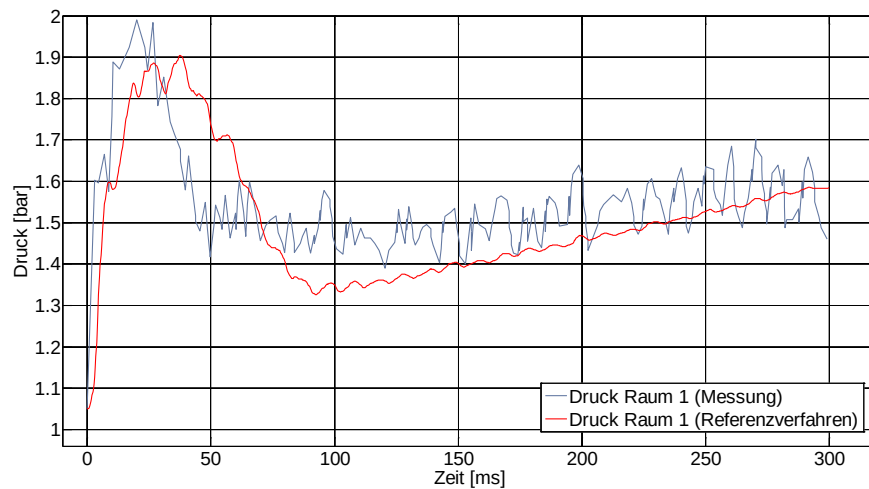


Abb. 4.6 Testanordnung 1: Gemessene und berechnete Druckverläufe in Raum 1 (SF_6)

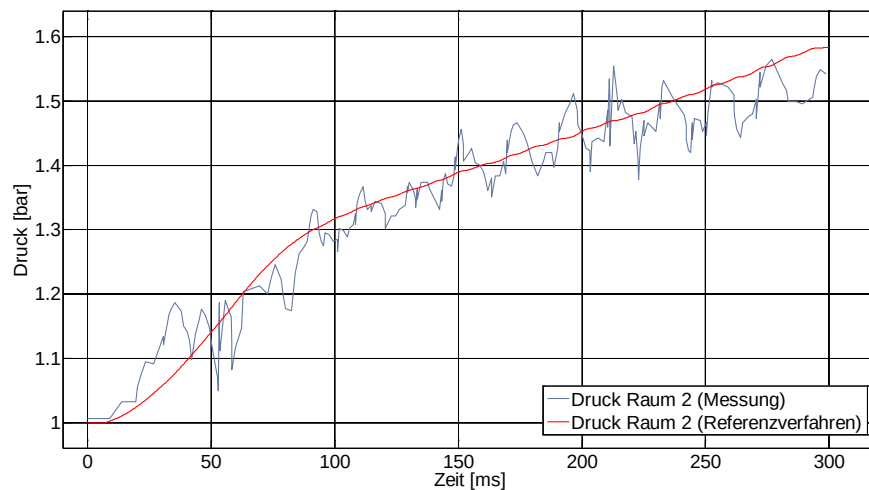


Abb. 4.7 Testanordnung 1: Gemessene und berechnete Druckverläufe in Raum 2 (SF_6 -Luftgemisch)

4.3.2. Evaluation Gasgemische (Beispiel 2)

Die Testanordnung 2, dargestellt in Abb. 4.8, besteht aus einem vergleichbaren Versuchsaufbau mit zwei Volumina und dient der Evaluation der Gasgemisch-Modelle im Referenz- und im CFD-Verfahren.

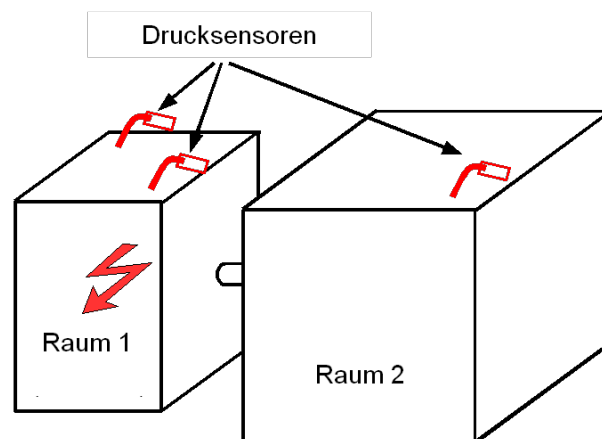


Abb. 4.8 Schematische Darstellung der Testanordnung 2

Aus dem Raum 1 ($V = 0,51 \text{ m}^3$, Fülldruck 1,34 bar) strömt nach dem Öffnen der Berstscheibe (Ansprechdruck $\Delta p = 2,76 \text{ bar}$, Fläche $45,6 \text{ cm}^2$) SF_6 in den Entlastungsraum 2 ($V = 1,275 \text{ m}^3$, Fülldruck 1 bar) und vermischt sich dort mit der darin enthaltenen Luft. Die elektrische Versuchsparameter betragen: Lichtbogendauer 1065 ms, Kurzschlussstromstärke 14,4 kA (einpolig), eingespeiste Energie 6,7 MJ.

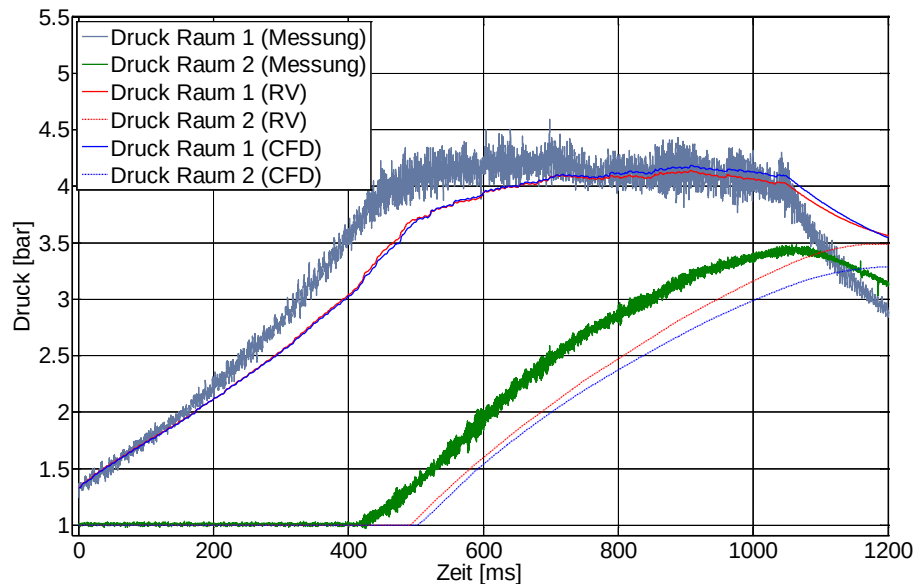


Abb. 4.9 Vergleich der gemessenen und berechneten Druckverläufe in der Testanordnung 2

Aus dem Vergleich in Abb. 4.9 geht hervor, dass die Druckverläufe in beiden Räumen durch beide Berechnungsverfahren nachgebildet werden können. In Folge des gegenüber der Messung langsameren Druckanstiegs im Zeitbereich zwischen 200 und 600 ms wird der Ansprechdruck der Berstscheibe verzögert erreicht, wodurch sich die zeitliche Verschiebung zwischen den gemessenen und berechneten Drücken im Raum 2 erklären lässt. Dieser langsamere Druckanstieg deutet darauf hin, dass im Raum 1 noch Luftanteile vorhanden waren. Beide Verfahren liefern jedoch in beiden Räumen gute Übereinstimmung mit einer Abweichung von max. 0,3 bar die Maximaldrücke von 4,2 in Raum 1 bzw. 3,4 bar in Raum 2.

4.3.3. Evaluation Energieabsorber-Modell CFD

Bei der Testanordnung 3 in Abb. 4.10 wird in einem Vierflansch ein Lichtbogen in Luft mit der Stromstärke von 8 kA für eine Dauer von 100 ms gezündet. Die Druckentlastung erfolgt über einen rechteckförmigen Kanal in ein angeflanshtes Rohr, wobei ein Energieabsorber an zwei unterschiedlichen Einbauorten im Kanal (Positionen A und B) installiert wurde und eine Druckmessung im Bereich vor sowie hinter dem Absorber erfolgte. Anhand dieser Testanordnung sind die Modelle der Energieabsorber im CFD-Verfahren evaluiert worden.

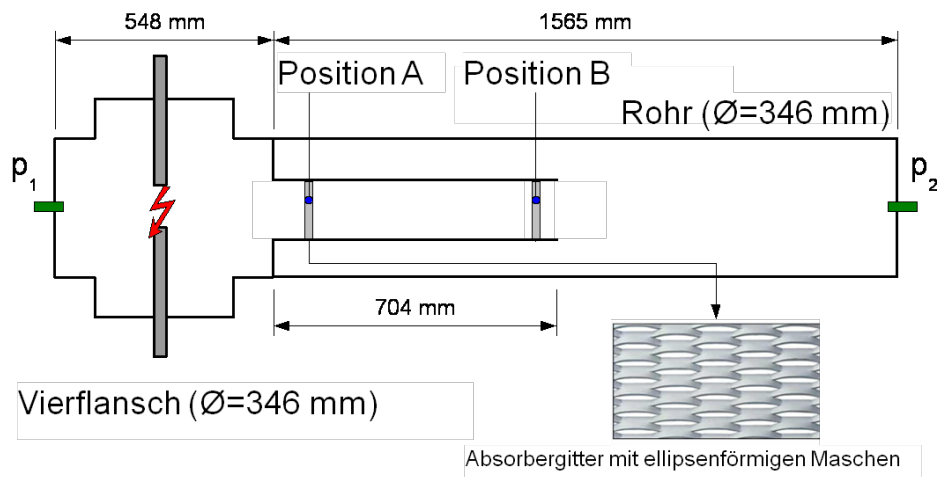


Abb. 4.10 Schematische Darstellung der Testanordnung 3

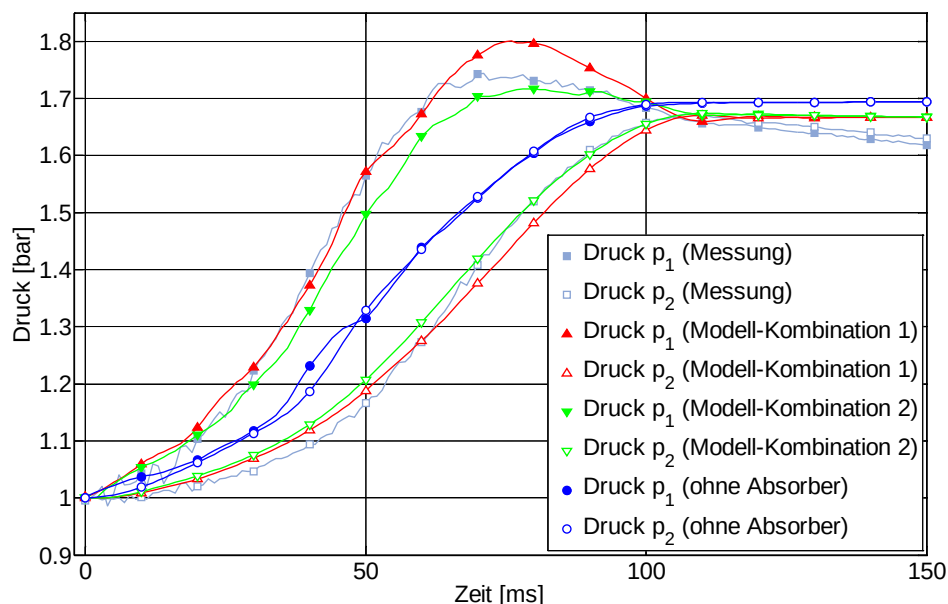


Abb. 4.11 Gemessene und berechnete Druckverläufe für die Testanordnung 3 mit unterschiedlichen Modellansätzen zur Berechnung der Absorber in Einbauposition A

Die Gegenüberstellung der gemessenen Druckverläufe vor (p_1) sowie hinter dem Absorber (p_2) mit den entsprechenden berechneten Verläufen ist für die Einbauposition A in Abb. 4.11 dargestellt.

Die Berechnung ohne Absorber liefert für den Vierflansch und das angeschlossene Rohr nahezu identische Druckverläufe. Wird der Absorber mitberücksichtigt, wird sowohl mit der Modellkombination 1 (Gitterwirkungsgrad + Effektive Öffnung) als auch mit der Kombination 2 (Wärmeübergang + Druckverlust in Analogie zu Rohrbündeln) gute Übereinstimmungen mit der Referenzmessung erzielt. Mit dem Ansatz 1 werden dabei im Vierflansch (p_1) leicht überhöhte Drücke berechnet, während im Entlastungsrohr nur geringe Abweichungen auftreten.

4.3.4. Evaluation Energieabsorber-Modell Referenzverfahren

Mit der in Abb. 4.10 dargestellten Testanordnung 3 wird das Absorbermodell für das Referenzverfahren ebenfalls evaluiert. Die gemessenen Druckverläufe mit dem Absorber in

der Einbauposition B sind in Abb. 4.12 den entsprechenden mit dem Referenzverfahren berechneten gegenübergestellt.

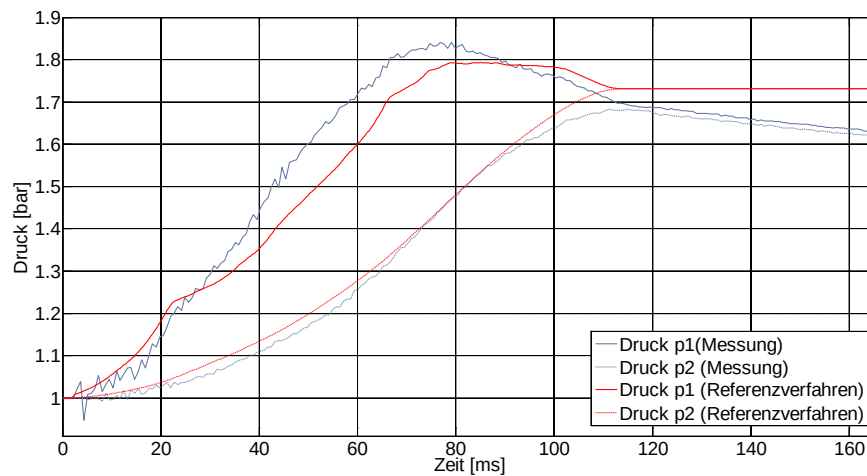


Abb. 4.12 Gemessene und mit dem Referenzverfahren berechnete Druckverläufe für die Testanordnung 3 mit dem Absorber in Einbauposition B.

Die Abweichungen betragen für beide Kurven weniger als 10 %. Die Unterschiede, die nach dem Verlöschen des Lichtbogens nach 110 ms auftreten sind bedingt durch den Wärmeübergang an den metallischen Wänden der Testanordnung, der im Referenzverfahren nicht berücksichtigt wird.

4.4. Bestimmung von Gültigkeitsgrenzen des Referenzverfahrens

Die Druckberechnungen mit dem Referenzverfahren stützen sich auf Annahmen und Vereinfachungen, die die Bestimmung des mittleren Drucks in einem Raum ermöglichen. So wird z. B. angenommen, dass die mittlere Gasgeschwindigkeit im Lichtbogenraum nahezu null, d.h. die Druckentlastungsöffnung verhältnismäßig klein gegenüber dessen Volumen ist. Ferner sind Druckwelleneffekte, wie sie insbesondere in langgestreckten Räumen und Kanälen auftreten, nicht erfasst.

Daher ist erforderlich, die Gültigkeitsgrenzen des Referenzverfahrens zu ermitteln. Hierzu werden in den folgenden Unterkapiteln ein langgestreckter Raum und ein Druckentlastungskanal als Raumvolumen betrachtet und die mit dem Referenzverfahrens ermittelten Überdruckverläufe mit denen mit dem CFD-Verfahrens gewonnenen verglichen, das diesen Einschränkungen nicht unterliegt.

4.4.1. Testfall 1: Langgestreckte Räume

Druckwelleneffekte in langgestreckten Räumen bewirken eine lokal und zeitlich begrenzte Druckerhöhung an einzelnen Stellen des Raumes und eine ungleichmäßige Druckverteilung, die das Referenzverfahren nicht nachbilden kann. Zur Untersuchung dieses Effektes wird ein Störlichtbogen in einem luftgefüllten Container (Abmessungen 12,5 x 1,65 x 2,5 m) betrachtet. Die elektrischen Einbauten des in Abb. 4.13 dargestellten Containers sind bei der Berechnung ausgespart und reduzieren das Nettovolumen auf 47,1 m³. Die Druckentlastung erfolgt über sechs Öffnungen mit einer Fläche von jeweils 0,05 m² im Deckenbereich.

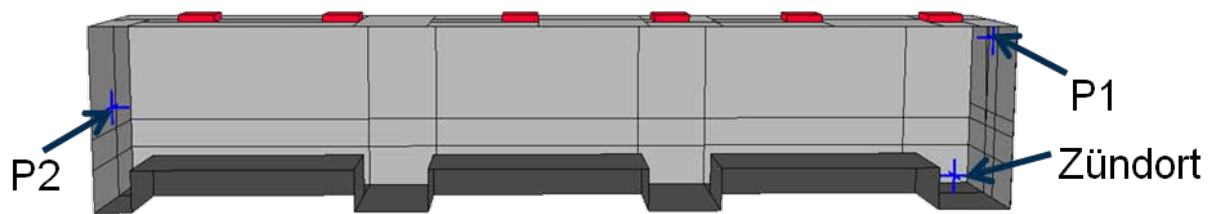


Abb. 4.13 Schematische Darstellung des Testfalls 1 mit einem Container als langgestrecktem Raum zur Untersuchung von Druckwelleneffekten

Die Druckentwicklung im Container 12 ms nach der Zündung des Störlichtbogens mit einem Dauerkurzschlussstrom von 38 kA ist in Abb. 4.14 dargestellt. Das Heißgas kann teilweise durch die Öffnungen entweichen, wird jedoch größtenteils durch die geometrische Form des Raumes zur gegenüberliegenden Stirnwand geleitet und bewirkt dort einen zeitlich verzögerten Druckanstieg (siehe Abb. 4.15).

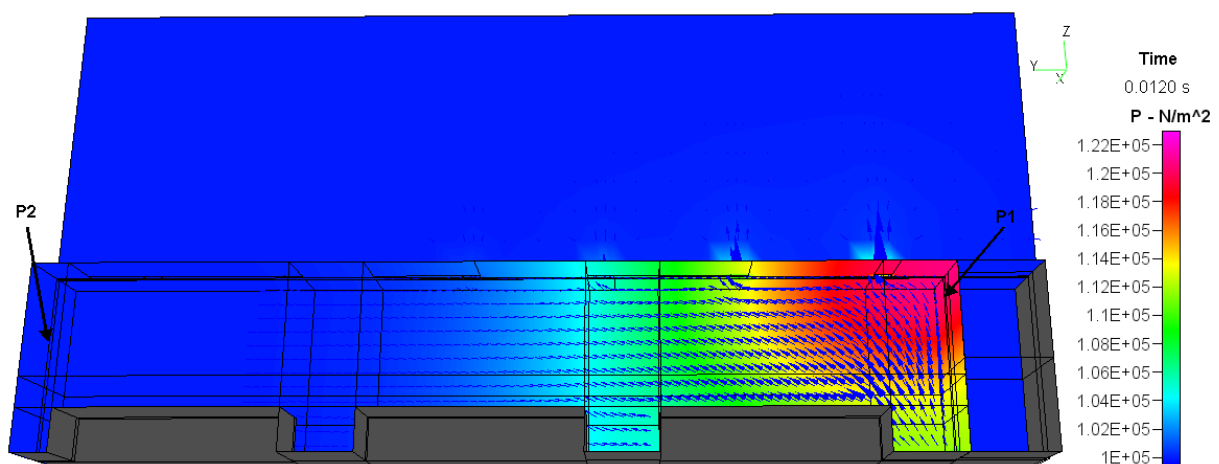


Abb. 4.14 Druck- und Strömungsverteilung im Container (Testfall 1) nach einer Lichtbogendauer von 12 ms

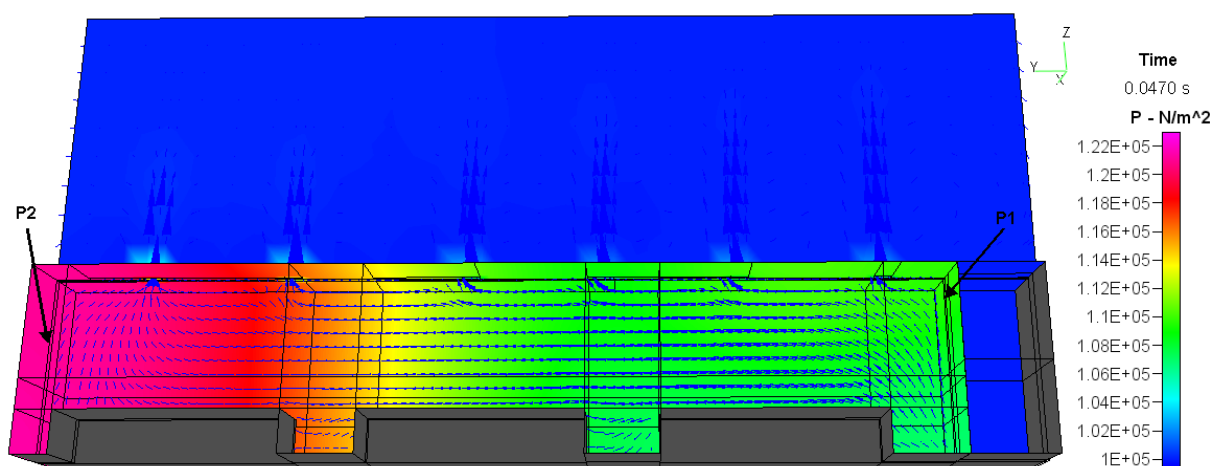


Abb. 4.15 Druck- und Strömungsverteilung im Container (Testfall 1) nach einer Lichtbogendauer von 47 ms

Daraus resultierende Druckwellen führen zu deutlichen unterschiedlichen Druckverläufen an den beiden Stirnwänden. Die zeitliche Entwicklung des Drucks an den beiden Messpunkten P1 und P2 ist in Abb. 4.16 angegeben. Der Druck oszilliert um den steigenden

statischen Druck bis ca. 200 ms nach Zündung des Lichtbogens mit zunehmender Amplitude. Im weiteren Verlauf nimmt die Wirkung der Druckentlastungsöffnungen zu und führt zu einem sinkenden Gesamtdruck sowie einer schwächer werdenden Oszillation.

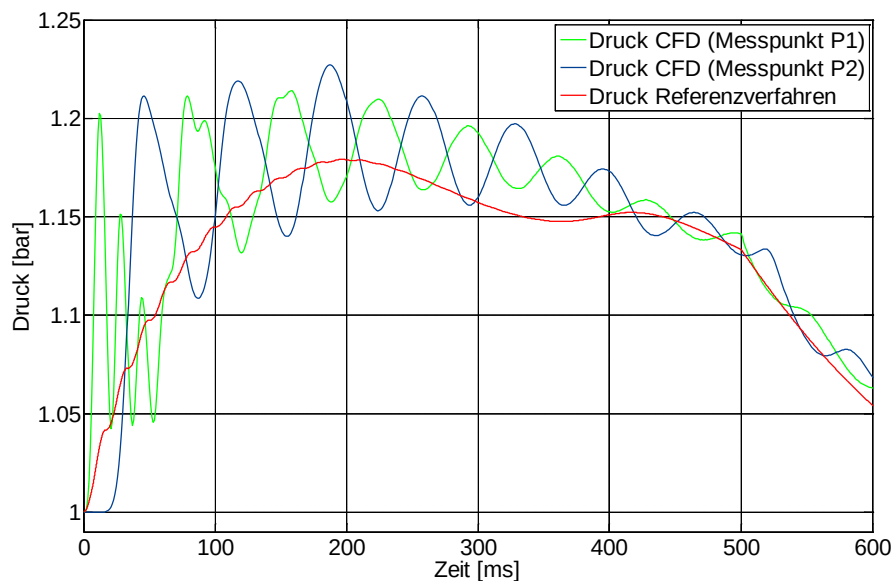


Abb. 4.16 Zeitlicher Verlauf des Drucks an zwei Messpunkten im Container sowie der mit

Der Vergleich zwischen den Ergebnissen des orts aufgelösten CFD-Verfahrens und dem Referenzverfahren zeigt, dass diese Druckwelleneffekte mit dem raummittelnden Verfahren nicht nachgebildet werden können. Die Druckentlastung durch die verteilten Öffnungen sowie der Verlauf des mittleren Raumdrucks werden mit dem Referenzverfahren zufriedenstellend wiedergegeben.

Falls die Form der untersuchten Räume die Ausbreitung von Druckwellen begünstigt, müssen diese bei der Bewertung der Druckbelastung berücksichtigt werden. Als Bewertungskriterium kann dabei das Verhältnis der Laufzeiten der Druckwellen zur Anstiegszeit des Druckimpulses herangezogen werden. Die Laufzeit wird dabei zum einen durch die geometrischen Abstände des Raumes (Ausbreitungslänge) und zum anderen durch die Schallgeschwindigkeit des Gases im Raum bestimmt. Falls die Laufzeit im Vergleich zum Druckimpulsanstieg als kurz anzusehen sind, können die Auswirkungen von Druckwellen im Allgemeinen vernachlässigt werden. SF₆-isolierte Anlagen zeigen sich dabei auf Grund der geringeren Schallgeschwindigkeit des Isoliergases als weniger anfällig und weisen tendenziell eine homogenere Druckbelastung auf.

4.4.2. Testfall 2: Druckentlastungskanal auf MV-Schaltanlage

Im Testfall 2 wird eine in Abb. 4.17 gezeigte Mittelspannungsschaltanlage mit einem aufgesetzten Druckentlastungskanal betrachtet. Der SF₆-isolierten Sammelschienenraum (Nettovolumen 0,27 m³, Fülldruck 1,2 bar), in dem 1,1 s lang ein dreipoliger Kurzschluss mit einer Stromstärke von 36 kA brennt, besitzt eine Druckentlastungsöffnung, die über eine Berstscheibe (Ansprechdruck 1,2 bar) verschlossen ist.

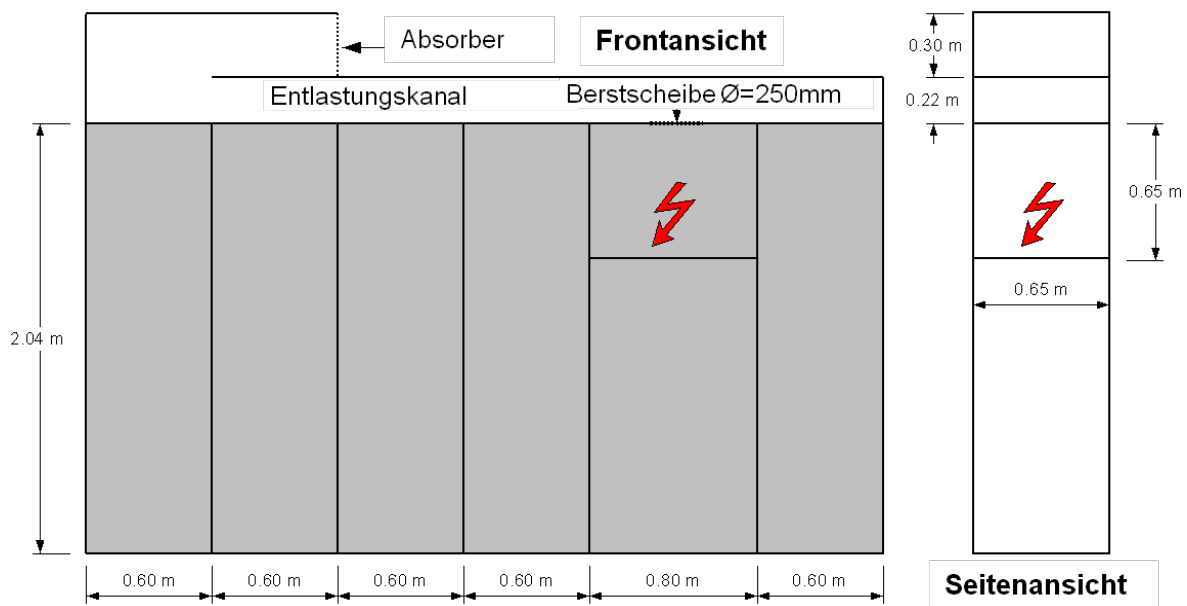


Abb. 4.17 Testfall 2: Schematische Darstellung einer SF₆-isolierten Mittelspannungsschaltanlage mit aufgesetztem Druckentlastungskanal

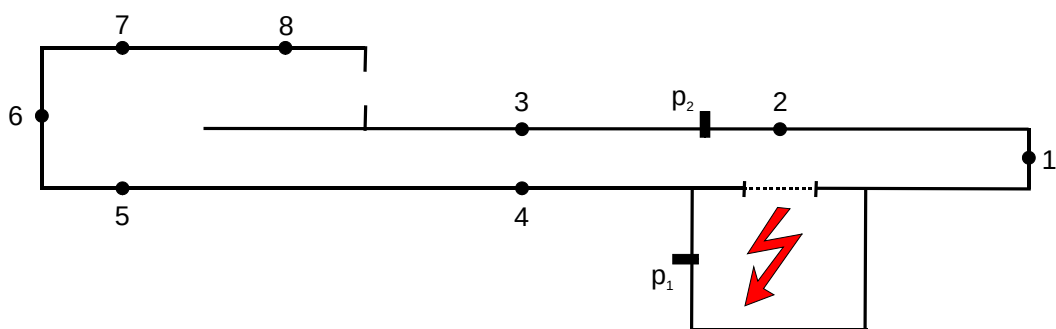


Abb. 4.18 Querschnitt des betrachteten Anlagenteils mit Angabe der Druckmesspunkte p_1 und p_2 sowie weiterer ausgewählter Punkte, an denen der Druckverlauf aufgenommen wird

Der Strömungswiderstand durch das Kühlgitter an der Auslassöffnung des Kanals wird dabei sowohl beim CFD- als auch beim Referenzverfahren als konzentrierte Öffnung nachgebildet. Der für den Störlichtbogenversuch relevante Teil der Anlage, der mit den Verfahren modelliert wird, ist in Abb. 4.18 angegeben.

Die Ergebnisse der Druckberechnung sowie die gemessenen Druckverläufe sind in Abb. 4.19 gegenübergestellt. Im Sammelschienenraum (p_1) weisen die mit beiden Verfahren berechneten Druckverläufe gute Übereinstimmungen mit der Messung auf. Für den Messpunkt p_2 im Druckentlastungskanal stimmt der mit dem CFD-Verfahren berechnete Druckverlauf sowohl im Hinblick auf die qualitative Form als auch auf die Amplitude ebenfalls gut mit der Messung überein. Erwartungsgemäß weicht die mit dem Referenzverfahren ermittelte Druckkurve in ihrer Form von der Messung ab.

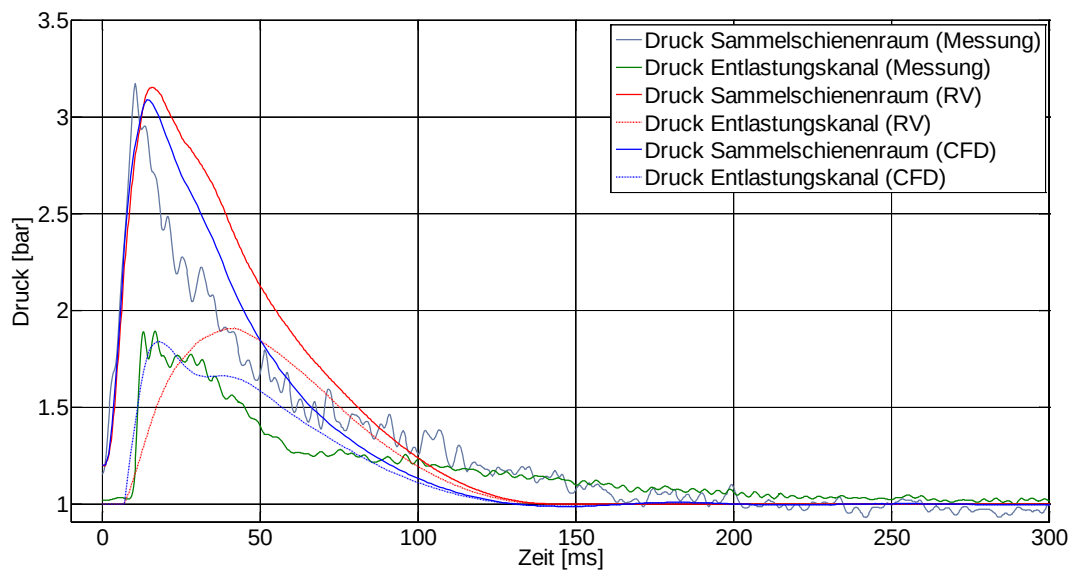


Abb. 4.19 Vergleich von gemessenen mit berechneten Druckverläufen für den Testfall 2

Die Ursache dieser Abweichungen liegt in der inhomogenen Druckverteilung im Entlastungskanal, wie in Abb. 4.20 exemplarisch zu vier verschiedenen Zeitpunkten dargestellt. Das Referenzverfahren kann diese Inhomogenität nicht nachbilden, da die geometrischen Abmessung sowie die Form der Volumina keine Berücksichtigung finden.

Die in Abb. 4.21 dargestellte, zeitliche Entwicklung des Drucks an verschiedenen Punkten im Druckentlastungskanal, deren Positionen in Abb. 4.18 angegeben sind, zeigt signifikante Druckunterschiede, die im Entlastungskanal auftreten. Insbesondere der der Berstscheibe gegenüberliegende Punkt 2 weist auf Grund der unmittelbaren Beströmung einen deutlich höheren Druck im Vergleich zum Messpunkt p_2 und allen anderen Messpunkten auf.

Eine Sensibilisierung der Anlagenhersteller auf die betrachtete Problematik und deren Beachtung z. B. durch Sicherheitsfaktoren kann jedoch dazu führen, diese kritischen Punkte bei der Anlagenplanung zu berücksichtigen und somit die Anlage gegen die Auswirkungen der Überdruckentwicklung im Störlichtbogenfall zur sicheren Seite hin auszulegen.

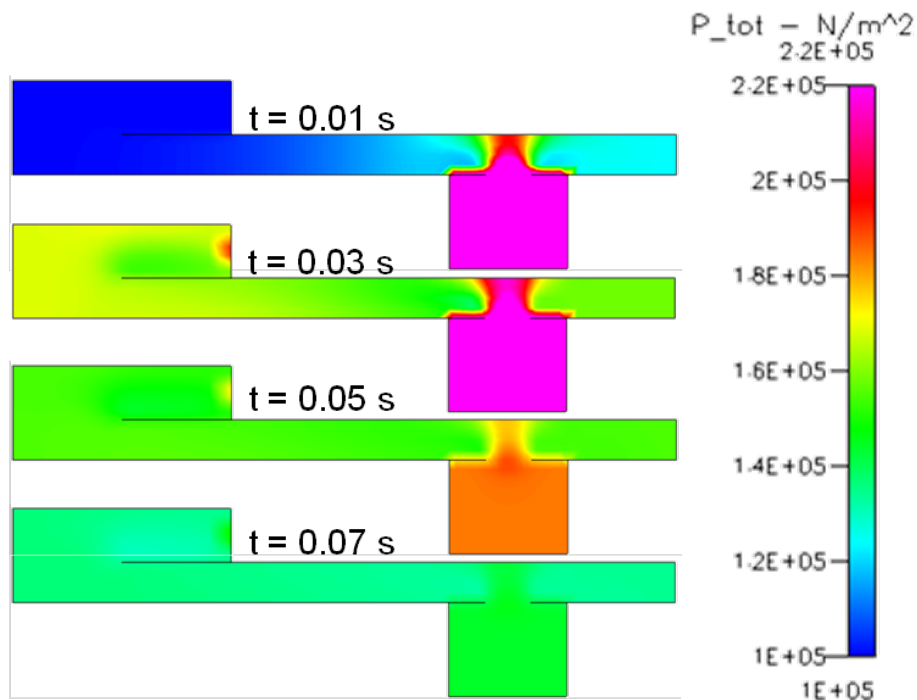


Abb. 4.20 Testfall 2: Druckverteilung im fehlerbehafteten Volumen und dem Druckentlastungskanal zu verschiedenen Zeitpunkten t nach der Zündung des Lichtbogens

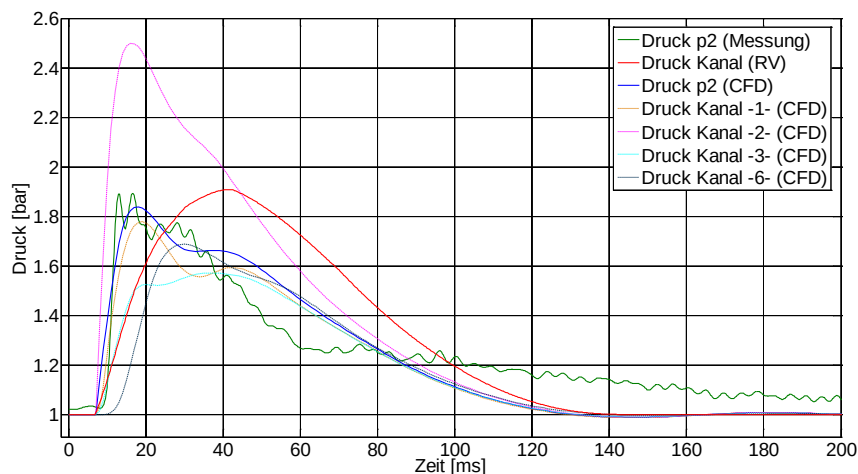


Abb. 4.21 Testfall 2: Zeitlicher Verlauf des mit dem CFD-Verfahren berechneten Drucks an verschiedenen Punkten im Druckentlastungskanal sowie des gemessenen Drucks und der Berechnung mit dem Referenzverfahren

Die Untersuchungen zu den Gültigkeitsgrenzen des Referenzverfahrens zeigen, dass die räumlichen Abmessungen und die Form der betrachteten Räume bei der Bewertung der berechneten Druckverläufe berücksichtigt werden müssen. In langgestreckten Räumen liefert das Referenzverfahren zuverlässige Werte bezüglich des mittleren Drucks, jedoch können sich unter Umständen durch Druckwellenphänomene kurzzeitige Druckspitzen ergeben, die mit dem Referenzverfahren nicht abgebildet werden können.

Bei Druckentlastungskanälen tritt ein Druckgradient entlang der Kanalachse auf, der eine signifikante räumliche Druckverteilung im Kanal zur Folge hat. Außerdem können an geschlossenen Enden von Kanälen durch den entstehenden Staudruck ebenfalls lokale

Druckspitzen auftreten. Beide Effekte sind mit dem Referenzverfahren nicht darstellbar, sodass bei der Bewertung der Druckbelastung von Entlastungskanälen auf andere Verfahren wie z.B. das CFD-Verfahren zurückgegriffen werden sollte, mit dem eine räumliche Druckverteilung bestimmt werden kann.

Für kompakte Schaltanlagen und Räume, zu denen der Großteil der Mittelspanungsanlagen zu zählen ist, gelten die o.g. Einschränkungen nicht. In diesen Kompaktschaltanlagen erweist sich das Referenzverfahren als problemlos anwendbar und es liefert berechnete Druckverläufe mit einer hohen Zuverlässigkeit.

5. Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Der Ergebnistransfer in die Wirtschaft ist insbesondere durch die im Projektbegleitenden Ausschuss vertretenen Unternehmen durch regelmäßig durchgeführte Treffen und die intensive Mitarbeit ihrer Mitglieder erfolgt.

Darüber hinaus sind bereits Zwischenergebnisse durch den Projektleiter auf dem EW-Informationstag „Mittelspannungsschaltanlagen“ am 01.02.2011 in Fulda einem breiten Fachpublikum unter dem Titel „Druckberechnung in Schaltanlagenräumen bei Störlichtbögen“ vorgestellt worden.

Außerdem befindet sich eine FGH-Tagung in Vorbereitung, auf der die Ergebnisse des Vorhabens einem breiten Fachpublikum präsentiert werden (Anfang 2012).

Des weiteren wird die Mitarbeit des Projektleiters in der international besetzten CIGRE-Arbeitsgruppe A3.24 fortgesetzt, in der nicht nur ein reger Austausch mit internationalen Fachleuten aus Industrie und Forschung erfolgt, sondern in der eine technische Broschüre als Grundlage für die zukünftige Normenarbeit zur Druckberechnung im Störlichtbogenfall erstellt wird.

Bereits im Laufe des Forschungsvorhabens sind Forschungsergebnisse in Form von wissenschaftlichen Publikationen und Beiträge auf nationalen sowie internationalen Fachkonferenzen gelungen einem vielschichtigen und breiten Publikum zur Verfügung gestellt worden. Weitere Publikationen sind für das Jahr 2012 in Planung.

Zu den erschienenen bzw. zur Veröffentlichung angenommenen Publikationen gehören bislang:

- K. Anantavanich, G. J. Pietsch, N. Uzelac, P. Milovac, B. Wang: Effect of arc energy absorber in a wind turbine switch unit, IEEE Trans. on Power Del., (paper TPWRD-00307-2009, accepted for publ., 8 p.
- K. Anantavanich: Effekte und Wirkungsgrad von Lichtbogenenergieabsorbern in elektrischen Anlagen, Jahresbericht 2009, RWTH Aachen, Aachener Beiträge zur Hochspannungstechnik, Band 12, ISBN 3861306751
- Anantavanich: Calculation of Pressure Rise in Electrical Installations due to Internal Arcs Considering SF₆-Air Mixtures and Arc Energy Absorbers, Dissertation, RWTH Aachen, Aachener Beiträge zur Hochspannungstechnik, Band 14, ISBN 3861306778, 2010
- K. Anantavanich, G. J. Pietsch, D. Eichhoff: Importance of SF₆-air data for pressure calculation due to fault arcs in electrical installations, Proc. XVIIIth Int. Conf. on Gas Discharges and their Appl., Greifswald, Germany, pp. 122-125 (2010)
- D. Eichhoff: Verbessertes Druckberechnungsverfahren für den Störlichtbogenfall, Jahresbericht 2010, RWTH Aachen, Aachener Beiträge zur Hochspannungstechnik, Band 17, ISBN 3861306808
- N. Chitamara, K. Anantavanich, G. J. Pietsch, T. Suwanasri: Internal Arcs in Electrical Installations – Validity Range of a Pressure Calculation Method, 8th ECTI-Conference, Khon, Kaen, Thailand (2011)

Beiträge zur Störlichtbogenproblematik aufgrund der Mitarbeit in der CIGRE WG A3.24 und der Zusammenarbeit mit dem Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI), Japan, im Umfeld des Projekts:

- R. P. P. Smeets, J. Hooijmans, N. Uzelac, P. Milovac, D. Kennedy, G. J. Pietsch, K. Anantavanich: Internal Arc Testing of Medium Voltage Switchgear, 17th Conf. on the Electric Power Supply Industry, Macau, China, Oct. 27-31 (CEPSI 2008), Paper 10148(2008)
- R. Smeets, J. Hooijmans, H. Bannink, H. Barts, P. Leufkens, N. Uzelac, P. Milovac, D. Kennedy, G. J. Pietsch, K. Anantavanich: Internal Arcing: Issues Related to Testing and Standardization, CIGRE Conference 2008, Paper A3-207, Paris, France, 24.-29.08.2008
- R. P. P. Smeets, P. P. Leufkens, J. A. A. N. Hooijmans, N. Uzelac, P. Milovac, D. Kennedy, G. Pietsch, K. Anantavanich: On the Replacement of SF₆ by Air in Internal Arc Testing of MV SF₆ Insulated Switchgear 20th Int. Conf. on Electricity Distribution, Prag, Czech Republic, 8-11. Juni 2009 (CIRED 2009), Paper 0392
- M. Iwata, S. Tanaka, T. Ohtaka, T. Amakawa, K. Anantavanich, G. J. Pietsch: *CFD Calculation of Pressure Rise and Propagation due to Internal Arcing in a Closed Container* XVIIIth Symposium on Physics of Switching Arc, Nové Město na Moravě, Czech Republic, 7-11. September 2009
- M. Iwata, S. Tanaka, T. Ohtaka, T. Miyagi, T. Tadokoro, T. Amakawa, K. Anantavanich, G. J. Pietsch: Calculation of pressure rise and propagation due to high current fault arc in a closed container 2009 Annual Meeting I.E.E. Japan, Sapporo, Japan, No. 6-236, p. 385
- M. Iwata, S. Tanaka, T. Ohtaka, T. Miyagi, T. Amakawa, K. Anantavanich, G. J. Pietsch: CFD calculation of pressure rise and propagation depending on arc energy in a closed container Proc. XVIIIth Int. Conf. on Gas Discharges and their Appl., Greifswald, Germany, pp. 146-149 (2010)
- M. Iwata, K. Anantavanich, G. Pietsch: Influence of Current and Electrode Material on Fraction k_p of Electric Arc Energy Leading to Pressure Rise in a Closed Container During Internal Arcing, IEEE Trans. on Power Del., Vol. 25, No. 3, Juli 2010
- M. Iwata, K. Anantavanich, G. J. Pietsch: Influence of Current and Electrode Material on Fraction k_p of Electric Arc Energy Leading to Pressure Rise in a Closed Container During Internal Arcing, IEEE Trans. Power Del., Vol. 25, No. 3, p. 2028 - 2029 (2010)
- M. Iwata, S. Tanaka, T. Ohtaka, T. Amakawa, K. Anantavanich, G. J. Pietsch: Influence of electric arc energy on pressure rise and propagation due to high current fault arc in a closed container, Records of the 2010 Annual Meeting I.E.E. Japan, paper 6-206, p. 350 (2010)
- M. Iwata, S. Tanaka, T. Ohtaka, T. Amakawa, K. Anantavanich, G. J. Pietsch: CFD Calculation of pressure rise due to internal AC and DC arcing in a closed container, IEEE Trans. Power Del. Vol. 26, No. 3 p. 1700 – 1709 (2011)
- M. Iwata, S. Tanaka, T. Miyagi, T. Amakawa, G. J. Pietsch: Calculation of pressure rise due to fault arc in a closed container with a metal mesh, The 2011 Annual Meeting Record I.E.E. Japan, paper 6-248, p. 444 (2011)

6. Zusammenfassung

Störlichtbögen in elektrischen Anlagen stellen zwar äußerst seltene Ereignisse dar, jedoch muss bei ihrem Auftreten von einer erheblichen Gefährdung für das Bedienpersonal, einer Gefährdung der Schaltanlagen und der Schaltanlagegebäude sowie von Versorgungsunterbrechungen ausgegangen werden. Aus diesem Grund muss die Störlichtbogensicherheit einer elektrischen Anlage nachgewiesen werden, was prinzipiell auf zwei Wegen erfolgen kann: durch zerstörende Störlichtbogenprüfungen oder durch Druckberechnungen. Druckberechnungen stellen dabei nicht nur die kostengünstigere, sondern in einigen Fällen, z. B. während der Planungsphase und bei der Bewertung von Bestandsanlagen, sogar die einzige Alternative dar. Ebenso ist eine experimentelle Prüfung der Druckauswirkungen auf Schaltanlagenräume oder –gebäude nicht oder nur eingeschränkt möglich, sodass auch hier auf die Druckberechnung zurückgegriffen werden muss. Daher werden flexibel einsetzbare und zuverlässige Berechnungsverfahren für die Bewertung der Störlichtbogensicherheit von elektrischen Anlagen benötigt.

Um die Druckbelastung der Anlagen und besonders der Räume und Gebäude zu reduzieren werden in der Regel konstruktive Maßnahmen, wie z. B. Druckentlastungsöffnungen, Druckentlastungskanäle, Strömungshindernisse oder Lichtbogenenergieabsorber, eingesetzt. Diese Maßnahmen müssen von modernen Druckberechnungsverfahren erfasst werden.

Neben luftisolierten Anlagen kommen, insbesondere wenn Platzmangel herrscht, gasisolierte Schaltanlagen (GIS) zum Einsatz, in denen Schwefelhexafluorid (SF_6) als Isoliergas (partiell) eingesetzt wird. Luft und SF_6 besitzen unterschiedliche physikalische Eigenschaften, die den Temperaturanstieg und den resultierenden Druckaufbau sowie das Strömungsverhalten maßgeblich beeinflussen. Diese Gaseigenschaften, welche sich darüber hinaus in Abhängigkeit von Umgebungstemperatur und –druck signifikant ändern, müssen in den Druckberechnungsverfahren Berücksichtigung finden, um eine hinreichende Genauigkeit zu gewährleisten. Die Vermischung von heißem Isoliergas mit der Umgebungsluft, die bei einem Fehler in einer GIS auftritt, beeinflusst die Gaseigenschaften zusätzlich und ist daher ebenfalls in der Druckberechnung zu berücksichtigen.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ist ein Druckberechnungs-Referenzverfahren entwickelt worden, das jetzt als zuverlässiges Werkzeug für die Druckberechnung in elektrischen Anlagen zur Verfügung steht. Es ist in der Lage sowohl konstruktive Maßnahmen zur Druckentlastung und insbesondere Energieabsorber sowie den Aspekt der Gasgemische aus SF_6 und Luft durch entsprechende Modelle nachzubilden und erweitert damit den Anwendungsbereich deutlich und steigert die Qualität der Druckberechnungsergebnisse. Das Referenzverfahren liefert raummittelnde Druckverläufe und zeichnet sich darüber hinaus durch seine hohe Variabilität, seine einfache Benutzeroberfläche, die schnelle, effiziente und zuverlässige Druckberechnung sowie eine direkte Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse aus. Für gängige Anlagenanordnungen insbesondere in der Mittelspannungstechnik sind die Aussagen des Referenzverfahrens im Allgemeinen voll ausreichend.

Mit Hilfe dieses qualitativ hochwertigen Verfahrens besteht die Möglichkeit anhand vergleichender Berechnungen die Güte anderer Druckberechnungsverfahren wie sie z. B. unternehmensintern durch Schaltanlagenhersteller und Ingenieurbüros verwendet werden, zu bestimmen.

Neben dem Referenzverfahren, als sogenanntes „Standardverfahren“ für raummittelnde Ergebnisse, existieren außerdem „CFD (computational fluid dynamics)-Verfahren“, die orts-aufgelöste Resultate liefern. Die CFD-Verfahren sind in der Lage, weitere strömungs-technische Effekte, wie z. B. Druckwellen, die in langgestreckten Räumen auftreten, zu modellieren und ein präzises Bild der lokalen Druckverteilung aufzuzeigen. Durch die Integration von Sub-Modellen für Energieabsorber und SF₆/Luft-Gasgemische in ein CFD-Verfahren ist dessen Funktionalität sinnvoll ergänzt und an die gestiegenen Anforderungen angepasst worden.

Die Gültigkeit und die Genauigkeit der entwickelten Modelle zur Integration von SF₆/Luft-Gasgemischen und zur Nachbildung der Effekte von Lichtbogenenergieabsorbern konnten durch eine Evaluierung mit verschiedenen Testanordnungen sowohl für das Referenz-verfahren als auch für das CFD-Verfahren belegt werden.

Zusätzlich wurde zur detaillierten Analyse der Eingangsdaten in Form des sogenannten k_p -Faktors und der Lichtbogen Spannung, die für alle Druckberechnungsverfahren benötigt, eine Datenbasis erstellt, welche auf gemessenen Größen bei durchgeführten Störlichtbogen-prüfungen beruht. Auch wenn sich der Umfang der Datenbasis wegen der Vielzahl an möglichen Parametervariationen als nicht ausreichend erwiesen hat und keine allgemeingültigen Gesetzmäßigkeiten abgeleitet werden konnten, so hat die Auswertung der gesammelten Daten dennoch neue Erkenntnisse zur Abhängigkeit des k_p -Faktors von den Eigenschaften der Schaltanlage geliefert. Insbesondere ist die Wichtigkeit exakter Eingangsdaten für die Zuverlässigkeit der Druckberechnung offenbar geworden.

Durch dieses Projekt stehen nun praxistaugliche Druckberechnungsverfahren mit einem erweiterten Anwendungspotenzial für eine Anlagenoptimierung als Voraussetzung für die Reduzierung der Druckbeanspruchung elektrischer Anlagen im Störlichtbogenfall zur Verfügung.

Ausblick auf zukünftige Forschungsaktivitäten

Die Möglichkeit zur Evaluation der Berechnungen durch Messungen und Störlichtbogen-versuche ist bisher im Wesentlichen nur für Schaltanlagen gegeben, wegen fehlender Daten/Prüfmöglichkeiten jedoch nur begrenzt für Räume und Gebäude. Deren Belastbarkeit ist insbesondere bei der Ertüchtigung von Bestandsanlagen von hoher Wichtigkeit. Neuerdings zur Verfügung stehende Prüfeinrichtungen mit Nachbildungen von Schaltanlagenräumen variabler Größe können anhand neuer Messungen vor allem zu Raumdruckverläufen, wichtige Erkenntnisse zur Zuverlässigkeit und zur Verbesserung der Verfahren beitragen.

Die in zunehmendem Maße eingesetzten Lichtbogenenergieabsorber weisen hinsichtlich ihres Aufbaus eine große Varianz auf, da jeder Hersteller eigene Konzepte und Strategien bei deren Realisierung verfolgt. Dadurch wird die Modellierung der Absorber mit Hilfe von allgemeinen Ansätzen in den Druckberechnungsverfahren erschwert. Hinzu kommt, dass die Wechselwirkung Absorber/Lichtbogenraum noch nicht ausreichend geklärt ist. Deshalb ist eine systematische Untersuchung die Technologie der Absorber und ihres Einsatzes im Zuge weiterer Forschungsaktivitäten wünschenswert. Hierzu bieten sich nicht nur die oben erwähnten neuen Prüfmöglichkeiten an, sondern auch experimentelle Untersuchungen an Modellanordnungen im Laborumfeld.

Derzeit werden alternative Isoliergase als Substitute für das klimaschädliche SF₆ für den großflächigen Einsatz in Hochspannungsschaltanlagendiskutiert. Für diese alternativen Isoliergase, wie z. B. Kohlendioxid steht derzeit jedoch weder eine Datenbasis zu

Lichtbogenspannungen und dem k_p -Faktor noch ein Berechnungsverfahren zur Verfügung, mit dem eine Druckberechnung im Störlichtbogenfall möglich ist. Eine aussichtsreiche Möglichkeit hierzu wäre eine Erweiterung des Referenzverfahrens, das im Rahmen dieses Forschungsvorhabens entwickelt worden ist. Zukünftig werden darüber hinaus auch im Bereich der Hochspannungstechnik vermehrt gasisolierte Schaltanlagen eingesetzt werden, die sich jedoch von den Mittelspannungsanlagen, die im Rahmen dieses Projekts bevorzugt betrachtet worden sind, vor allem durch ihre Dimensionen und ihren inneren Aufbau grundlegend unterscheiden.

Die Erstellung einer Datenbasis zur systematischen Abhängigkeitsanalyse des k_p -Faktors und der Lichtbogenspannung von unterschiedlichen Versuchs- und Anlagenparametern hat sich als vielversprechendes Konzept erwiesen. Um jedoch in Anbetracht der vielfältigen Parametervariationen zuverlässige und statistisch abgesicherte Aussagen treffen zu können, sollte die Datenbasis durch eine systematische Sammlung und Auswertung weiterer Störlichtbogenversuche erweitert werden.

Der Projektbegleitende Ausschuss dieses Vorhaben hat auf seiner letzten Sitzung eine Fortsetzung der Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Störlichtbögen nachhaltig begrüßt und einstimmig unterstützt. Die anwesenden Mitglieder haben ihr Interesse bekundet, auch ggfs. weiterhin im Rahmen eines Projektbegleitenden Ausschusses mitzuarbeiten.

Literaturverzeichnis

- [1] VDE 0671 Teil 200, VDE 0671 Teil 200, DIN EN 62271-200: Metallgekapselte Wechselstrom-Schaltanlagen für Bemessungsspannungen über 1 kV bis einschließlich 52 kV (IEC 62271-200:2003). 2004, VDE-Verlag
- [2] PEHLA-Richtlinie Nr. 4: Empfehlung für die Anwendung von VDE 0670, Teil 6/03.94 (HD187S5, 1992) – Anhang AA oder IEC 298, 1990-12-Annex AA für die Prüfung des Verhaltens von metallgekapselten Hochspannung-Schaltanlagen bei inneren Fehlern (Störlichtbögen). 1995, PEHLA-Richtlinie Nr. 4
- [3] U. Rütten: Modellierung der Wechselwirkung zwischen Schaltlichtbogen und Gasströmungen in SF₆-Leistungsschaltern, Dissertation, RWTH Aachen University, 1992
- [4] A. Dasbach: Untersuchungen zur Leistungsbilanz von Störlichtbögen im Hinblick auf die Druckbeanspruchung von Schaltanlagen, Dissertation, RWTH Aachen University, 1987
- [5] E. Dullni, M. Schumacher und G. Pietsch: Pressure rise in a switchroom due to an internal arc in a switchboard. in Proceedings of the 6th International Symposium "Short-circuit currents in power systems" Liege, 1994
- [6] C. Faltin: Störlichtbogen – experimentelle Bestimmung des für die Druckentwicklung maßgeblichen Transferkoeffizienten in einem realistischen Schaltanlagenzenarium. e & i, Vol. H. 7/8(122. Jg): S. 268-273, 2005
- [7] G. Friberg: Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Druckbelastung in elektrischen Anlagen im Störlichtbogenfall, Dissertation, RWTH Aachen University, 1998
- [8] H. Schuhmann: Untersuchungen zum Druckanstieg in Schotträumen SF₆-isoliert einpolig metallgekapselter Hochspannungsschaltanlagen infolge stromstarker Störlichtbögen, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 1989
- [9] M. Schumacher: Untersuchung zur Modellierung der Druckbelastung von Schaltanlagegebäuden durch Störlichtbögen, Dissertation, RWTH Aachen University, 1994
- [10] M. Schumacher, G. Pietsch und E. Dullni: Zum Druckanstieg in Gebäuden bei Störlichtbögen in Innenraum-Schaltanlagen. Elektrizitätswirtschaft, Vol. Jg. 93(H. 22): S. 1347-1353, 1994
- [11] X. Zhang: Modellierung der Auswirkungen von Störlichtbögen in elektrischen Anlagen, Dissertation, RWTH Aachen University, 2002
- [12] X. Zhang, G. Pietsch und E. Gockenbach: Investigation of the Thermal Transfer Coefficient by the Energy Balance of Fault Arcs in Electrical Installations. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21(1): S. 425-431, 2006
- [13] R. Smeets, et al.: Internal arcing: Issues related to testing and standardization. in Cigre Conference 2008, Session A3-207 Paris, 2008
- [14] VDE 0671 Teil 203, VDE 0671 Teil 203, DIN EN 62271-203: Gasisolierte metallgekapselte Schaltanlagen für Bemessungsspannungen über 52 kV (IEC 62271-203:2003), 2004, VDE Verlag
- [15] F. Pigler: Druckentwicklung in Schaltzellen durch Störlichtbögen, Energie und Technik, Vol. 24: S. 47-50, 1972

- [16] M. Kopatz: Untersuchungen über die Energiebilanz und Druckentwicklung bei elektrischen Lichtbögen zur Klärung der Explosionsursache von Kabelkästen in Niederspannungsnetzen, Dissertation, RWTH Aachen University, 1967
- [17] H. Kindler und W. Schels: Systematische Untersuchungen zur Störlichtbogensicherheit von Schaltfeldern und Schaltanlagen. Technische Mitteilungen AEG-Telefunken, Vol. 65: S. 24-34, 1975
- [18] A. Dasbach und G. Pietsch: A calculation method for pressure waves due to fault arcs. in Proceedings of the 5th Symposium on Gas Discharges and their Applications Oxford, 1985
- [19] F. Lutz: Ein Verfahren zur Berechnung der Druckentwicklung in Mittelspannungsschaltanlagen bei Störlichtbögen, Dissertation, RWTH Aachen University, 1981
- [20] F. Lutz und G. Pietsch: The calculation of overpressure in metal-enclosed switchgear due to internal arcing. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, Vol. PAS 101(11): S. 4230-4236, 1982
- [21] J. Oberthür: Dimensionierung von Druckentlastungseinrichtungen in SF6-isolierten Anlagen, in Elektrie. 1986: Berlin. p. 92-94
- [22] F. Lutz und W. Schels: Störlichtbogen-Druckentwicklung in Schaltanlagen. etz, Vol. 107(22/23): S. 1066-1069, 1986
- [23] P. Hoyer: Verfahren zur Berechnung der Druckentwicklung in Mittelspannungsschaltanlagen bei Störlichtbögen. Elektrizitätswirtschaft, Vol. 79(4): S. 138-140, 1980
- [24] G. Friberg und G. Pietsch: Calculation of pressure rise due to arcing faults. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14(2): S. 365-370, 1999
- [25] C. Faltin, H. Hauer und R. Eberhard: Ein neues Programm zur Berechnung der Druckbeanspruchung von Gebäuden im Störlichtbogenfall. e & i, Vol. 110(4): S. 201-208, 1993
- [26] G. Ludwa C. Faltin: Messung der Druckwellen bei Störlichtbogenversuchen und Verifikation des an der BVFA-Arsenal entwickelten Druckberechnungsprogramms. Vol. 111(2): S. 69-73, 1994
- [27] F.-H. Schlüter C. Faltin: Numerische Untersuchung der Druckbelastung von Stationsgebäuden. Elektrizitätswirtschaft, Vol. 97(4): S. 60-66, 1998
- [28] P. Glasmacher: Neue Störlichtbogenabsorber – Lösung für MS-Schaltanlagenräume. etz, (18): S. 42-43, 2003
- [29] K. Anantavanich: Calculation of Pressure Rise in Electrical Installations due to Internal Arcs Considering SF6-Air Mixtures and Arc Energy Absorbers, Aachener Beiträge zur Hochspannungstechnik, Band 14, ISBN 3861306778, Dissertation, RWTH Aachen University, 2010
- [30] A. Wahle: Untersuchungen zum Einsatz von Energieabsorbern in Ringkabelschaltanlagen im Störlichtbogenfall, Dissertation, RWTH Aachen University, 2007
- [31] M. Schmale: Untersuchungen zur Beeinflussung des durch Störlichtbögen verursachten Überdrucks in elektrischen Anlagen, Dissertation, RWTH Aachen University, 2006

- [32] VDI-Wärmeatlas, Berechnungsblätter für den Wärmeübergang. 8 ed, Düsseldorf: VDI Verlag, 1997
- [33] H. D. Baehr und K. Stephan, Wärme-und Stoffübertragung: Springer-Verlag, Berlin, ISBN 354087688X, 2008
- [34] W. Bohl und W. Elmendorf: Technische Strömungslehre. 14 ed, Würzburg: Vogel Buchverlag, Kamprath-Reihe, 2008
- [35] K. Anantavanich: et al. Modelling of SF6-air mixtures in MV switchgear during internal arcing using a CFD tool". in 15th Int. Symp. on High Voltage Eng. (Topic T3-282) Ljubljana, 2007
- [36] D. Welich: Zur Ausbildung mehrpoliger Störlichtbögen und zur Innendruckentwicklung in luftisolierten, metallgekapselten Mittelspannungsschaltzellen, Dissertation Technische Universität Dresden, 1984