

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 17255N

Thema

Einfluss von Energieabsorbern und alternativen Isoliergasen auf die Druckentwicklung in Schaltanlagen im Störlichtbogenfall

Berichtszeitraum

01.03.2013 – 31.12..2016

Forschungsvereinigung

Forschungsgemeinschaft für Elektrische Anlagen und Stromwirtschaft e.V.

Forschungsstelle(n)

Forschungsinstitut der Forschungsgemeinschaft für Elektrische Anlagen und Stromwirtschaft e.V.

Institut für Hochspannungstechnik der RWTH Aachen University

gez. Jan Christoph Kahlen

FS1: Jan Christoph Kahlen

gez. Gerhard Pietsch

FS2: Prof. Gerhard Pietsch

Mannheim, 19. Mai 2017

Ort, Datum

Name und Unterschrift aller Projektleiter der Forschungsstelle(n)



Kurzfassung

Störlichtbögen in elektrischen Anlagen verursachen einen schnellen Temperatur- und Druckanstieg in ihrer Umgebung und i. d. R. im Aufstellungsraum der Schaltanlage, die Personen und selbst das Schaltanlagegebäude gefährden können. Gekapselte Mittelspannungsschaltanlagen können zwar mehreren hundert Millibar Überdruck standhalten, das Anlagegebäude kann jedoch je nach Beschaffenheit der Wände bereits ab wenigen Millibar Schaden nehmen. Die Bestimmung des Überdrucks infolge von Störlichtbögen erfolgt durch Prüfungen in Hochleistungsprüffeldern oder - wo dieses nicht möglich oder praktikabel ist - über Druckberechnungen. Die vorhandenen Berechnungsverfahren sind jedoch von unterschiedlicher Güte, unterliegen verschiedenen Einschränkungen bei der Berücksichtigung von Randbedingungen und bedürfen daher der Weiterentwicklung. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Einfluss von alternativen Isoliergasen (CO_2 und einem SF_6/N_2 -Gasgemisch), der Kunststoffverdampfung sowie von Energieabsorbern auf die Druckentwicklung untersucht.

Bei den alternativen Isoliergasen werden die Lichtbogenspannung und der thermische Transferkoeffizient - der Anteil der elektrischen Energie, der zur Aufheizung des Gases aufgewendet wird - experimentell bestimmt. Anhand der gewonnenen Daten sowie bei Verwendung druck- und temperaturabhängiger Gasdaten ist es nun möglich, zuverlässige Druckberechnungen mit CO_2 und dem SF_6/N_2 -Gemisch durchzuführen.

Da insbesondere in metallgekapselten Schaltanlagen Kunststoffe verwendet werden, z. B. als Trennwände, Stützer oder bei Wandlern, können diese unter Lichtbogeneinwirkung verdampfen und die Druckentwicklung beeinflussen. Die Verdampfung bewirkt eine Erhöhung des Drucks. Die Veränderung des thermischen Transferkoeffizienten infolge von Kunststoffverdampfung wird für luftisolierte Schaltanlagen und bestimmte Kunststoffe sowie Kunststoffkombinationen ermittelt. Bei der Verwendung von alternativen Isoliergasen tritt ein ähnliches Verhalten auf.

In vorangegangenen Arbeiten wurden Modelle zur Beschreibung der Wirkung von Energieabsorbern entwickelt. Diese beruhen auf Kenngrößen, die nur ungenau bzw. unbekannt sind. Um hier Abhilfe zu schaffen, werden der thermische Wirkungsgrad und die effektive Öffnung (ein Maß für den Strömungswiderstand) verschiedener Absorberanordnungen experimentell bestimmt. Die Ergebnisse zum thermischen Wirkungsgrad können bei der Auslegung von Absorberanordnungen hinsichtlich Aufbau und Einbauort dienen. Bei der effektiven Öffnung wird für Absorber aus Streckmetall ein allgemeiner Zusammenhang zwischen effektiver Öffnung und Lagenanzahl sowie -abstand gefunden.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
I – Inhaltliche Bearbeitung	1
1. Einleitung	1
2. Einflussgrößen auf die Druckentwicklung.....	6
3. Zu Druckberechnungen.....	15
4. Versuchsanordnung und Messtechnik	18
5. Ergebnisse und Diskussion	25
6. Zusammenfassung	63
7. Quellenverzeichnis	65
II – Wissenschaftlich-technisch und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse	70
III – Ergebnistransfer in die Wirtschaft	71

I – Inhaltliche Bearbeitung

Die Ergebnisse des Projektes wurden bereits weitestgehend in verschiedenen Publikationen veröffentlicht. Der Großteil der Ergebnisse wurde 2016 in der Dissertation von Sebastian Wetzeler „Untersuchung von Einflussgrößen auf die Druckentwicklung in elektrischen Anlagen im Störlichtbogenfall“ (ISBN-10: 3958861261) veröffentlicht. Diese Veröffentlichung wurde als Grundlage für den vorliegenden Bericht mit Ergänzungen verwendet.

1. Einleitung

Störlichtbögen in elektrischen Schaltanlagen treten zwar äußerst selten auf, es wird z. B. in Deutschland in der Mittelspannungsebene nur von einem Störlichtbogen pro 10.000 Felder und Jahr ausgegangen [Pri09], jedoch macht die große Anzahl solcher Anlagen derartige Fehler nicht zu einem seltenen Ereignis. Personen, elektrische Betriebsmittel, Anlagengebäude und die Versorgung mit elektrischer Energie können dabei gefährdet werden. Daher muss das Auftreten von Störlichtbögen bei der Konstruktion und baulichen Auslegung von Schaltanlagen, Schaltanlagenräumen bzw. -gebäuden berücksichtigt werden.

1.1. Einführung in die Thematik

Störlichtbögen bewirken in ihrer Umgebung einen schnellen Temperatur- und damit Druckanstieg [Bre09]. Um die Personensicherheit im Störlichtbogenfall sicherstellen zu können, werden Prüfungen in Hochleistungsprüffeldern durchgeführt. Jedoch überall dort, wo Prüfungen nicht möglich oder praktikabel sind, muss der Sicherheitsnachweis rechnerisch erfolgen.

Fabrikfertige Mittelspannungsschaltanlagen werden z. B. gemäß DIN EN 62271-200 „*Metallgekapselte Wechselstrom-Schaltanlagen für Bemessungsspannungen über 1kV bis einschließlich 52kV*“ und IEEE Std C32.20.7-2001 „*IEEE Guide for Testing Medium-Voltage Metal-Enclosed Switchgear for Internal Arcing Faults*“ geprüft. Allerdings sind solche Prüfungen aufgrund der Inanspruchnahme von Hochleistungsprüffeldern mit großem Aufwand und damit hohen Kosten verbunden. Zusätzlich kann in vielen Fällen, wie z. B. in bereits bestehenden Gebäuden oder in der Planungsphase von Anlagen, die Druckentwicklung in Anlagenräumen nur rechnerisch bestimmt werden. Daher sind zuverlässige und leistungsfähige Druckberechnungsverfahren erforderlich. Die vorhandenen Verfahren unterscheiden sich deutlich hinsichtlich ihrer Qualität. Die Unterschiede bestehen vor allen Dingen in den Annahmen sowie in der Möglichkeit diverse Randbedingungen z. B. verschiedene Isoliergase, Energieabsorber und Kunststoffverdampfung in die Berechnungen einzubeziehen.

Die Annahmen unterscheiden sich u. a. in den mathematischen Ansätzen, der Art und Weise wie der Anteil der elektrischen Energie, der in den Druckaufbau geht, berücksichtigt wird und in der Güte der Gasdaten. Der derzeitige Stand von Wissenschaft und Technik auf diesem Gebiet ist vor allem in [Ana10] wiedergegeben.

Angesichts des hohen Global Warming Potentials¹ und der langen Verweildauer des in gasisolierten Schaltanlagen überwiegend verwendeten Schwefelhexafluorids (SF₆) in der Atmosphäre und aufgrund der Verordnung über fluorierte Treibhausgase [EG06] sowie des Kyoto-Protokolls [FCC97], die eine Reduzierung der Emission von Treibhausgasen vorsehen, müssen die Netzbetreiber und Betriebsmittelhersteller Anstrengungen unternehmen, den Ersatz bzw. die Reduzierung der Menge dieses Gases voranzutreiben. In der Planungs- und Entwicklungsphase von Schaltanlagen sind dazu unter anderem Druckberechnungen hilfreich.

¹ Das Global Warming Potential (der GWP-Wert) ist ein Maß für die Klimaschädlichkeit eines Stoffes. Das durch den GWP-Wert quantifizierte Treibhauspotential eines Gases beschreibt dessen potentiellen Beitrag zur Erwärmung bodennaher Luftschichten relativ zum Treibhauspotential von Kohlenstoffdioxid (CO₂), dessen Wert mit 1,0 festgelegt ist [Ram01].

Diese sind für die Isoliergase Luft und SF₆ bereits etabliert. Zuverlässige Druckberechnungen mit alternativen Isoliergasen sind nicht bekannt.

Vor allem wegen der kompakten Bauweise von metallgekapselten Schaltanlagen werden Kunststoffe z. B. für Trennwände, Isolierungen von Sammelschienen sowie Kabel und Wandlergehäuse verwendet, die dem Störlichtbogen ausgesetzt sein können. Im Störfall verdampft Kunststoffmaterial und die hierbei freigesetzten Gase können die Druckentwicklung beeinflussen. Dieser Effekt ist bislang noch nicht untersucht worden.

Energieabsorber werden zur Reduzierung der Druckbelastung in Schaltanlagenräumen eingesetzt. Zur Berücksichtigung in Druckberechnungsverfahren existieren Modelle, es fehlen jedoch experimentelle Daten für verschiedene Absorbersysteme [ANA10].

1.2. Ausgangssituation und Zielsetzung

Zu alternativen Isoliergasen

In den 1970er Jahren wurden erste gasisolierte Schaltanlagen in den Markt eingeführt. Seitdem konnte durch Anlagenoptimierung die verwendete SF₆-Menge pro Schaltfeld deutlich reduziert werden, siehe Abbildung 1.1 [Lec07, Cig10]. Die Anzahl der im Einsatz befindlichen Schaltfelder ist jedoch deutlich gestiegen, so dass die Suche nach alternativen Isoliergasen weiterhin erforderlich ist. Grundlegende Zielsetzung für eine SF₆-freie bzw. -arme Mittelspannungsschaltanlage ist, dass sich die Eigenschaften des Produkts aus Anwendersicht nicht wesentlich verschlechtern.

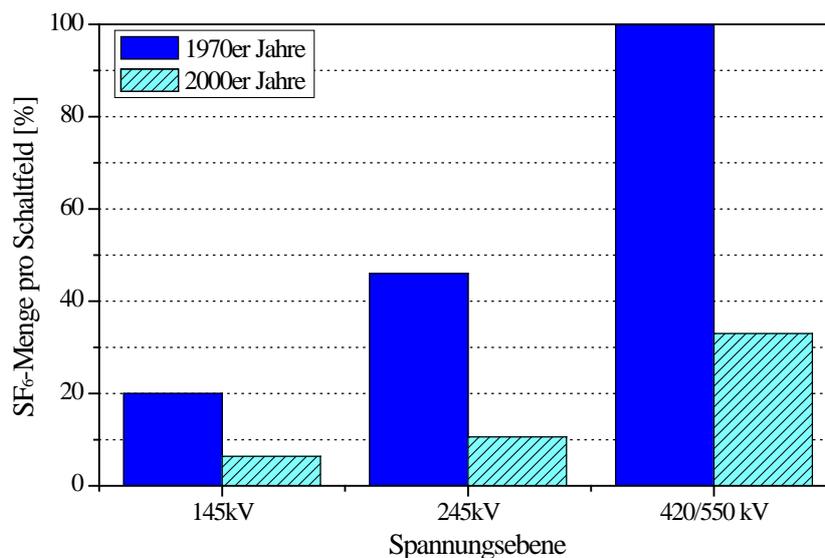


Abbildung 1.1: SF₆-Menge pro Schaltfeld für verschiedene Spannungsebenen in den 1970er und 2000er Jahren bezogen auf die Höchstspannungsebene (420/550 kV) in den 1970er Jahren [Cig10]

Alternative Gase sollen sich daher insbesondere durch

- eine möglichst hohe dielektrische Festigkeit und
- eine im Vergleich zu den aktuell verwendeten Gasen höhere Umweltverträglichkeit

auszeichnen. Des Weiteren sind folgende Aspekte relevant

- Beschaffungskosten,
- Einsatzbereich (Umgebungsbedingungen),
- Sicherheit für das Personal,
- Wartungsaufwand und
- Entsorgung.

Hierbei haben sich als potentielle Substitute für reines SF₆ insbesondere SF₆ / Stickstoff-Gemische, Kohlenstoffdioxid (CO₂) und fluoriierte Ketone ausgezeichnet [Fre75, Kos04, Nie98, Nik12, Oka07, Ham15]. Die chemischen Verbindungen der fluoriierten Ketone werden durch UV-Strahlung aufgebrochen. Aufgrund dessen haben sie eine geringe atmosphärische Verweildauer und einen niedrigen GWP-Wert. Sie können jedoch wegen ihres hohen Siedepunktes bisher nur als Mischgas und für Innenraumanlagen verwendet werden [Gau14, Ham15, Man15]. Die Zersetzungsprodukte der fluoriierten Ketone sind zum Teil toxisch und des Weiteren noch nicht vollständig bestimmt [Ham15].

Daher werden in dieser Arbeit

- ein SF₆/N₂-Gemisch (20/80 Volumenprozent) und
- CO₂

als alternative Isoliergase betrachtet.

Für zuverlässige Druckberechnungen ist die Kenntnis des Anteils der elektrischen Energie, der in den Druckaufbau geht (der thermische Transferkoeffizient), erforderlich. Dieser hängt z. B. von der Gasdichte ab und kann nicht allgemein, zumindest nicht mit vertretbarem Aufwand, rechnerisch bestimmt werden [Zha02]. Daher soll er in einer Testanordnung mit Abmessungen, die typisch für kompakte Mittelspannungs-Schaltanlagen sind, bestimmt werden.

Für Druckberechnungen ist weiterhin die Kenntnis der Lichtbogenspannung erforderlich. Sie soll für die Testanordnung ermittelt werden.

Experimentelle Ergebnisse zur Druckentwicklung, zum Transferkoeffizienten sowie zur Lichtbogenspannung mit alternativen Isoliergasen sowie Luft und SF₆ werden verglichen.

Die Gasdaten (thermodynamische Eigenschaften und Transportgrößen) der alternativen Gase sowie deren Mischungen mit Luft werden darüber hinaus in Druckberechnungsprogramme implementiert.

Zu Kunststoffen

Die Verwendung von Kunststoffen in Schaltanlagen gehört zum heutigen Stand der Technik. Sie werden hauptsächlich zur Isolierung spannungsführender Teile verwendet, ermöglichen eine kompakte Bauweise, bewirken eine deutliche Gewichtsreduzierung, verhindern das Auftreten von Lichtbogenfußpunkten an unerwünschten Stellen und bedeuten darüber hinaus einen Sicherheitsgewinn für das Bedienpersonal [Leh03].

Kunststoffe können jedoch unter der Einwirkung von Störlichtbögen verdampfen. Dabei werden Gase erzeugt, die Energiebilanz des Lichtbogens verändert und schließlich die Druckentwicklung beeinflusst.

Die Kunststoffverdampfung hat u. U. nicht nur einen Einfluss auf den Druck im geschlossenen Gefäß, sondern auch auf den Aufstellungsraum der Anlage, wenn sich Druckentlastungseinrichtungen öffnen.

Die Wechselwirkung zwischen Schaltlichtbogen und Isolierstoffwänden wird beispielsweise in [Hoc85] betrachtet. Der Fokus liegt dabei auf der Beeinflussung der Lichtbogenspannung und der Wiederverfestigung der Schaltstrecke nach dem Stromnulldurchgang bei ausgasenden Wänden. In [Kal98] wird die Anfälligkeit von Kunststoffen, sich bei der Einwirkung von Störlichtbögen zu entzünden, betrachtet. Das mechanische und thermische Verhalten von Kunststoffen in Niederspannungs-Schaltanlagen unter Störlichtbogeneinwirkung wird in [Fin05] untersucht. - Zum Einfluss der Kunststoffverdampfung auf die Druckentwicklung in Schaltanlagen gibt es bislang keine Publikationen. Dieser Einfluss soll hier behandelt werden. Dazu wird der Druckverlauf mit und ohne Lichtbogeneinwirkung auf Kunststoffe gemes-

sen. Gleichzeitig sollen der Masseverlust des Kunststoffes, die Lichtbogenspannung sowie der dichteabhängige thermische Transferkoeffizient (k_p -Faktor) bestimmt werden.

Zu Energieabsorbern

Der erste durch einen Störlichtbogen verursachte Druckstoß im Aufstellungsraum von Schaltanlagen stellt eine besondere Gefahr für Personen (Tabelle 1) und die Raumwände dar.

Ziegelwände widerstehen üblicherweise einem Überdruck von bis zu einigen 10 mbar, Betonwände bis zu etwa 160 mbar (Fertigbeton, Betongüte B 50, 140 mm ... 200 mm) [Pus11]. Um die Belastung von Wänden zu verringern, können verschiedene aktive und passive Schutzmaßnahmen angewandt werden. Als aktive Maßnahmen stehen z. B. Stoßkurzschlussstrom-Begrenzer und Schnellerder zur Verfügung. Diese begrenzen den Lichtbogenstrom bzw. schalten ihn ab, bevor sich ein zu hoher Überdruck aufbauen kann. Diese Maßnahmen sind i.d.R. kostspielig. Als passive Maßnahme kann die Schaltanlage mit Druckentlastungsöffnungen und z. B. Energieabsorbern versehen werden.

Tabelle 1: Wirkung von Druckstößen auf Menschen [Kon09], [Kai00]

Spitzenüberdruck	Wirkung
1,5	Unangenehme Knallwirkung
3	Sehr lauter Knall
10	Personen werden umgeworfen
175	Untere Grenze Trommelfellriss
300	Beschädigung des Trommelfells
850	Untere Grenze für Lungenschäden

Energieabsorber

- nehmen Wärme auf,
- stellen einen Strömungswiderstand dar (Abbildung 1.2) und
- vermindern den Austritt von Flammen und glühenden Partikeln aus der Anlage [Ana13].

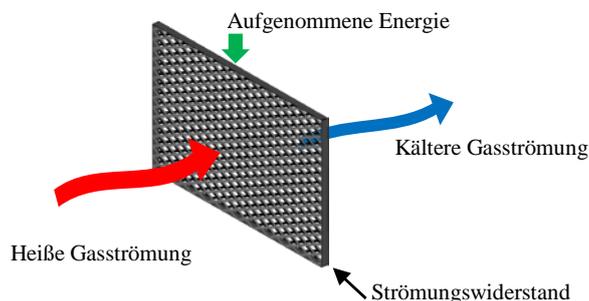


Abbildung 1.2: Zur Wirkung von Absorbern

Ein Teil der Energie des heißen aus dem fehlerbehafteten Schottraum der Anlage strömenden Gases wird vom Absorber aufgenommen und verringert damit den Druckstoß im Schaltanlagenraum (Entlastungsraum). Der Strömungswiderstand des Absorbers hat zur Folge, dass der Druckaufbau im Schaltanlagenraum verlangsamt wird. Verfügt dieser Raum über Druckentlastungsöffnungen, kann eine Verringerung der Druckbelastung des Raumes erzielt werden. Eine Verminderung des Flammenaustritts erhöht die Personensicherheit.

Die druckreduzierende Wirkung von Energieabsorbern hängt stark vom Einbauort und vom Absorbertyp, z. B. von der Anzahl und dem Abstand von Streckmetalllagen sowie dem verwendeten Material, ab.

Eine direkte, d. h. eine geometrisch exakte Berücksichtigung der Struktur von Energieabsorbersystemen in Druckberechnungsprogrammen ist nicht immer realisierbar bzw. nicht praktikabel, weil die im Verhältnis zur Schaltanlagendimension kleinen Absorberstrukturen (im Bereich weniger Millimeter bei solchen aus Streckmetall) und die große Vielfalt an Ausführungen (Bauform und Maschenweite) die Rechenzeit zu stark erhöhen würde. Stattdessen werden Modelle verwendet, die die relevanten Wirkungen des Energieabsorbers beschreiben.

Bei dieser Modellierung werden die Energieabsorption und der Strömungswiderstand getrennt berücksichtigt. Das Zurückhalten von glühenden Partikeln und Flammen wird nicht betrachtet, weil dieser Effekt keinen Einfluss auf die Druckentwicklung hat.

Modelle zur Wirkung typischer Absorber aus Streckmetalllagen sind z. B. in [Sch06], [Wah07] und [Ana10] enthalten, für poröser Absorber z. B. in [Roc07], [Roc10] und [Roc11]. Die Anwendung verlangt jedoch detaillierte Eingangsdaten. Diese sollen im Rahmen dieser Arbeit bereitgestellt werden.

2. Einflussgrößen auf die Druckentwicklung

Im Störlichtbogenfall wird die Druckentwicklung in der Schaltanlage und im Aufstellungsraum durch mehrere Faktoren beeinflusst. Hierzu gehören insbesondere:

- die Höhe des Kurzschlussstromes,
- die beteiligten Volumina für die Druckausbreitung und
- Druckentlastungsmaßnahmen.

Hier soll der Einfluss von alternativen Isoliergasen, Kunststoffen und Energieabsorbieren auf die Druckentwicklung betrachtet werden.

2.1. Alternative Isoliergase

Alternative Isoliergase besitzen neben einem geringen GWP-Wert allerdings auch eine verringerte dielektrische Festigkeit. Folglich sind in SF₆-freien bzw. -armen Betriebsmitteln erhöhte Isolierabstände bzw. erhöhte Betriebsdrücke erforderlich. Des Weiteren haben CO₂ wie auch N₂ einen höheren Wert des Adiabatenkoeffizienten als SF₆. In Tabelle 2 sind die wesentlichen Eigenschaften von CO₂, SF₆ sowie dem Beimischungsgas N₂ und Luft zum Vergleich zusammen gestellt.

Tabelle 2: Eigenschaften von Isoliergasen bei 1 bar und 293 K [Bey86, Cer96, Czi00, Uch04, IPC07, Küc05, Sol09]

	Synth. Luft	N ₂	CO ₂	SF ₆
Durchschlagsfeldstärke im hom. Gleichspa.-Feld [kV/cm]	25	24,4	32,1	88
Adiabatenkoeffizient	1,4	1,4	1,3	1,08
Schallgeschwindigkeit [m/s]	332	334	258	129
GWP-Wert	0	0	1	23900
Toxizität	Nein	Nein	Nein	Nein
Kondensationspunkt [K]	78,6	77,3	195,1	209,2
Dichte [kg/m ³]	1,19	1,15	1,82	6,18

Bei SF₆/N₂-Mischungen bewirkt bereits ein niedriger SF₆-Anteil einen erheblichen Anstieg der dielektrischen Festigkeit. Bei einem SF₆-Volumenanteil von 20 % beträgt z. B. die dielektrische Festigkeit bereits 69 % derjenigen des reinen SF₆ [Fre75] (Abbildung 2.1). Ein weiterer Vorteil solcher Mischungen ist die Absenkung der Kondensationstemperatur [Phi82], wodurch der Einsatz in kälteren Regionen erleichtert wird. Bei einem breiteren Einsatz solcher Gemische kann der Bedarf an SF₆ deutlich gesenkt werden.

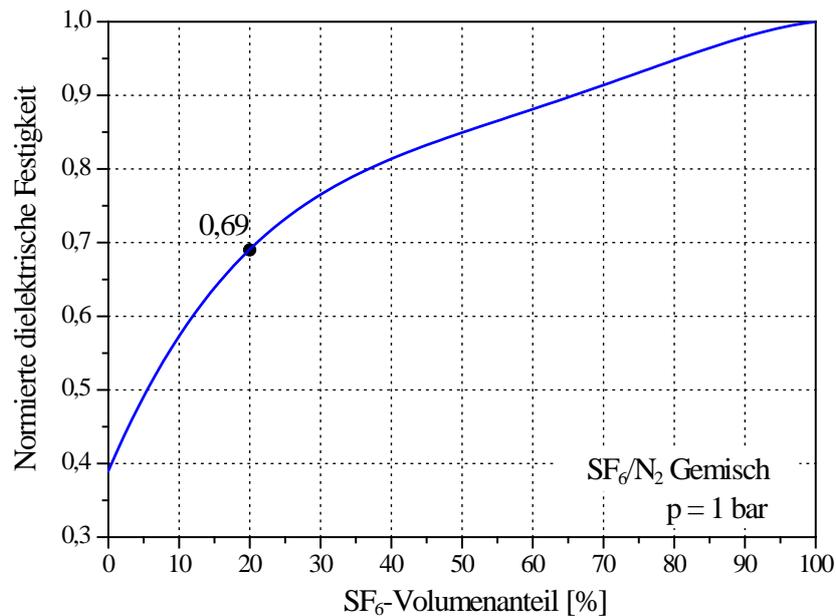


Abbildung 2.1: Dielektrische Festigkeit von SF₆/N₂-Gemischen (Volumenanteil) normiert auf die dielektrische Festigkeit von reinem SF₆ im homogenen Gleichspannungsfeld [Cig04]

Die Verwendbarkeit von CO₂ als Isoliergas in Schaltanlagen wurde bereits nachgewiesen [Oka07, Kos04, Nik12]. Aufgrund des kleineren Adiabatenkoeffizienten von CO₂ verglichen mit Luft ist ein geringerer Druckanstieg im fehlerbehafteten Schottraum zu erwarten. Ein weiterer Vorteil besteht in dem größeren Verhältnis von Impuls- zu Wechselfestigkeit, siehe Tabelle 3. Für die Auslegung von Schaltanlagen mit alternativen Isoliergasen sind ex-ante Druckberechnungen bereits in der Planungsphase von großem Interesse. Hierbei ist zu beachten, dass im Störlichtbogenfall aufgrund der hohen Temperaturen Dissoziationen und Ionisationen im Isoliergas vorkommen, d. h. dass das klassische Modell des idealen Gases für genaue Druckberechnungen nicht verwendbar ist [Ana10].

Tabelle 3: Blitzstoß- zu Wechselfestigkeit (50Hz) von CO₂ und SF₆ bei 1 bar im homogenen Feld [Kos04]

	CO ₂	SF ₆
Positiver Impuls / AC	2,46	1,54
Negativer Impuls / AC	2,49	1,50

Hier werden temperatur- und druckabhängige Gasdaten verwendet. Der Verlauf der spezifischen Wärmekapazität der untersuchten Gase über der Temperatur bei einem Druck von 1 bar ist beispielhaft in Abbildung 2.2 dargestellt. Grundsätzlich gilt, je höher die Wärmekapazität eines Gases, desto geringer ist der Druckaufbau. Die im Verlauf der spezifischen Wärmekapazität auftretenden Maxima beruhen auf dem erhöhten Energiebedarf bei Dissoziations- und Ionisationsprozessen.

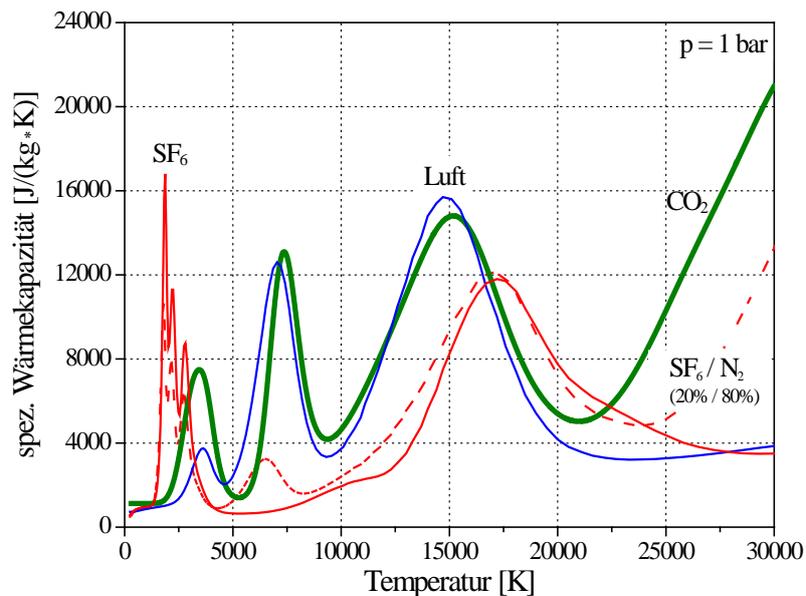


Abbildung 2.2: Verlauf der spezifischen Wärmekapazität c_v von Gasen in Abhängigkeit der Temperatur bei 1 bar [Ana10], [Doi14], [Wet15]

Beim Öffnen von Druckentlastungseinrichtungen in gasisolierten Anlagen kommt es zur Vermischung des Isoliergases mit Luft im Schaltanlagenraum. Für Druckberechnungen müssen daher die Veränderungen der Gaseigenschaften in Abhängigkeit von der jeweiligen Gaszusammensetzung bekannt sein. Dazu gehören sowohl die thermodynamischen Größen Gasdichte, Schallgeschwindigkeit, Enthalpie und Wärmekapazität als auch die Transportgrößen Viskosität und die Wärmeleitfähigkeit der Gemische. Da sich die Gasdaten nicht nur mit der Gaszusammensetzung ändern, sondern auch vom Druck und der Temperatur abhängen, müssen diese Abhängigkeiten ebenfalls berücksichtigt werden.

2.2. Kunststoffe

Je nach Einsatzzweck werden unterschiedliche Kunststoffe in Schaltanlagen verwendet. In Mittelspannungsschaltanlagen sind Feststoffisolierungen, wie sie bei Endverschlüssen, Wandlern oder gesteuerten Durchführungen vorkommen, üblich. Beim Auftreten von Erd- und Kurzschlüssen sind Brände trotz kurzer Lichtbogenbrenndauer nicht auszuschließen [Kal98]. Bei der Entzündung von Kunststoffen spielt vor allem die Brenndauer, nicht die Höhe des Kurzschlussstromes, eine Rolle. Bei einer Lichtbogendauer von z. B. 150 ms kann in vielen Fällen von einer Selbstlöschung von zunächst entstandenen Bränden ausgegangen werden. Dieses gilt nicht mehr bei einer Brenndauer ab 300 ms [Kal98]. Der Einsatz von Flammenschutzmitteln und die Nachvernetzung von Kunststoffen kann die Entflammbarkeit erheblich reduzieren [Kal98], [Kan04]. Anforderungen an die Kunststoffe in Schaltanlagen sind daher u.a. schwere Entzündbarkeit, eine möglichst hohe Verdampfungstemperatur, ungiftige und nicht-korrosive Zersetzungsprodukte sowie leichte Lösbarkeit im Brandfall [Fle70].

Kunststoffe kann man hinsichtlich ihrer thermischen und mechanischen Eigenschaften grob in drei Kategorien unterteilen, in Duroplaste, Thermoplaste und Elastomere. Diese unterscheiden sich durch die Struktur der Makromoleküle (Abbildung 2.3). Thermoplaste unterscheidet man zusätzlich über ihren Ordnungszustand in verzweigte (amorphe) und unverzweigte (teilkristalline) Polymere [Kai11].

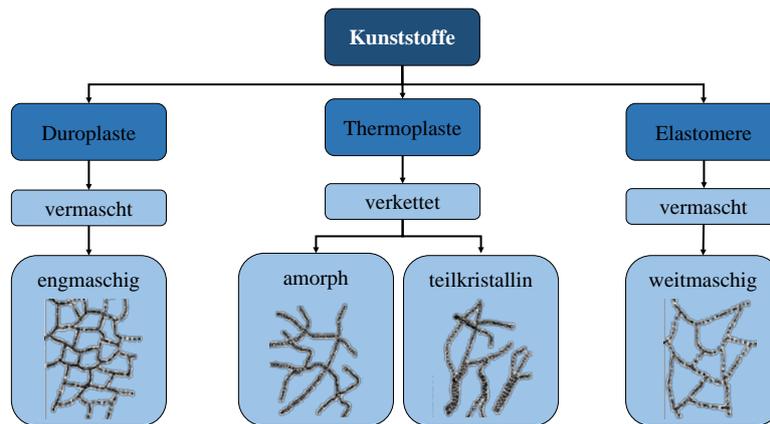


Abbildung 2.3: Kategorien von Kunststoffen

Die Verteilung auf die einzelnen Kategorien in Mittelspannungsschaltanlagen ist an einem Beispiel in Abbildung 2.4 dargestellt. Der Kunststoffanteil beträgt hier 9,5 Masseprozent bzw. etwa 32 % Volumenprozent des Materials. Im Folgenden wird auf die jeweiligen Kategorien eingegangen.

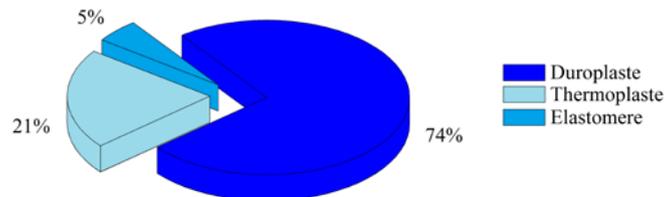


Abbildung 2.4: Beispiel für die prozentuale Aufteilung von Kunststoffen in einer Mittel-spannungsschaltanlage in Masseprozenten [Sch11]

Duroplaste

Duroplaste sind harte vernetzte glasartige Werkstoffe. Sie können nach ihrer Aushärtung nicht mehr verformt werden. Als Duroplast kommt vorwiegend ein Gießharzsystem bestehend aus Epoxidharz und Härter zum Einsatz. Flüssiges Epoxidharz auf Basis von Bisphenol A, ist z. B. unter dem Markennamen Araldit® CW 229-3 erhältlich. Als Härterkomponente kommt oft Aradur® HW 229-1 zum Einsatz. Es eignet sich besonders gut für Isolatoren im Mittelspannungs- und Hochspannungsschaltanlagenbau, weil es eine hohe dielektrische Durchschlagsfestigkeit und Maßhaltigkeit besitzt sowie gut auf anderen Werkstoffen wie z. B. Metall haftet [Brü70, Wei05]. Weiterhin zeichnet es sich durch eine hohe Rissfestigkeit, hohe Temperaturschockbeständigkeit und durch eine hohe Störlichtbogenfestigkeit (Abbrandfestigkeit) aus [Hun12].

Thermoplaste

Thermoplaste sind schwach vernetzte Werkstoffe und lassen sich in einem bestimmten Temperaturbereich reversibel verformen und verschweißen. Thermoplaste überzeugen durch ihr geringes Gewicht und ihre preiswerte Herstellung. Sie werden in Schaltanlagen hauptsächlich für Trennwände eingesetzt. Verwendet werden insbesondere Polybutylenterephthalat (PBT)², Polyamid 6.6 (PA 6.6)³ und Polycarbonat (PC)⁴ aufgrund des guten Wärmealterungsverhaltens im Vergleich zu anderen Thermoplasten [Wei05].

² Polybutylenterephthalat gehört zu den Polyestern und hat ähnliche Eigenschaften wie Polyethylenterephthalat (PET), ist jedoch für den Spritzguss aufgrund des günstigeren Abkühl- und Prozessverhaltens besser geeignet.

³ Polyamid 6.6 (Nylon) ist das am häufigsten verwendete Polyamid.

Polybutylenterephthalat

PBT hat auch bei Erwärmung eine hohe mechanische Festigkeit, hohe Spannungs- und Formbeständigkeit sowie eine gute Widerstandsfähigkeit gegenüber zahlreichen Chemikalien. Eine gute Witterungsbeständigkeit und ein gutes Wärmealterungsverhalten sind weitere positive Eigenschaften [Eye12], [Wei05]. Es wird i.A. zwischen PBT mit und ohne Flammschutzmittel (FR, flame resistant) unterschieden. Flammschutzmittel sind Stoffe, die die Entstehung und Ausbreitung von Bränden einschränken, verlangsamen oder verhindern [Tro12]. Durch Hinzufügen von Glasfasern (GF) werden diese Stoffe zum einen kostengünstiger und zum anderen erhöht sich ihre Bruchdehnung [Lan13a], [Sch05].

Polyamid 6.6

Neben einer hohen Steifigkeit und einem guten elektrischen Isoliervermögen ist PA 6.6 durch eine hohe Verschleißfestigkeit gekennzeichnet. Im Vergleich zu PBT hat PA 6.6 ein besseres elektrisches Isoliervermögen sowie ein geringeres Gewicht, die Beschaffungskosten übersteigen allerdings die von PBT [Bot98], [Eye12], [Wei05]. Des Weiteren wird zwischen flammenschutzmittelenthaltenden (FR) und flammschutzmittelfreiem PA6.6 unterschieden. Die Beimischung von Glasfasern ist ebenfalls üblich.

Polycarbonat

Polycarbonat ist transparent, schlagzäh und eignet sich daher als Abdeckung von spannungsführenden Teilen und als Trennwand. Neben seinem guten Isoliervermögen zeigt es eine hohe Formbeständigkeit bei Erwärmung und hat selbst ohne Zusatz von Flammschutzmitteln ein flammwidriges Verhalten [Pol13].

Elastomere

Elastomere sind formfeste aber elastisch verformbare Kunststoffe. Nach einer Verformung finden sie wieder in ihre ursprüngliche Form zurück. In Schaltanlagen sind Elastomere in Form von Silikonen z. B. in Kabelendverschlüssen zu finden. Sie haben ein gutes Isolierverhalten selbst bei äußerer Verschmutzung und sind unempfindlich gegen Bruch bei schockartiger Beanspruchung [Pap12]. Elastomere unterscheiden sich von den meisten anderen Kunststoffen durch ihre Molekülketten aus Silizium- und Sauerstoffatomen, die eine Abweisung von Wasser bewirken und trotzdem Wasserdampf durchlassen. Aufgrund ihrer hohen Formbeständigkeit bei Erwärmung, ihrer hohen Zähigkeit bei tiefen Temperaturen sowie guter dielektrischer Eigenschaften [Eye12] eignen sie sich besonders für den allgemeinen Einsatz in Schaltanlagen.

In Abstimmung mit Herstellern von Mittelspannungsschaltanlagen und von Kunststoffen werden die in Tabelle 4 aufgeführten Kunststoffe untersucht. Die in der Tabelle aufgeführten Quellen verweisen auf die entsprechenden Datenblätter. Bei den Untersuchungen wird der Masseverlust, der Druckanstieg sowie der Einfluss auf den k_p -Faktor bei Lichtbogeneinwirkung bestimmt.

Bei gleichzeitiger Verdampfung von unterschiedlichen Kunststoffen in Schaltanlagen können die Dämpfe je nach Zusammensetzung chemisch wechselwirken und ggf. endotherme oder exotherme Reaktionen auslösen. Um diese Wechselwirkung zu untersuchen, werden Versuche mit jeweils zwei Kunststoffen durchgeführt.

⁴ Polycarbonat ist ein Kunststoff aus der Gruppe der synthetischen Polymere und wird z. B. unter dem Namen Makrolon[®] und Polycasa[®] PC vermarktet.

Tabelle 4: Untersuchte Kunststoffe

Kategorie	Name	Abkürzung
Thermoplast	Polybutylenterephthalat, Glasfaseranteil 30 % [Lan12a]	PBT
	Polybutylenterephthalat, Glasfaseranteil 25 % mit Flammschutzmittel [Lan12b]	PBT (FR)
	Polyamid 6.6 [Lan12c]	PA 6.6
	Polyamid 6.6 mit Flammschutzmittel [Lan12d]	PA 6.6 (FR)
	Polycarbonat [Pol13]	PC
Duroplast	Epoxidharz (Araldit [®] /Aradur [®] Gießharz) [Hun12]	EP
Elastomer	Wacker SilGel 612 [Wac12a, Wac12b]	Silikon

Weiterhin ist von Interesse, ob die Art des Isoliergases einen Einfluss auf das Verdampfungsverhalten der Kunststoffe hat. Hierzu wird exemplarisch der Einfluss der Verdampfung von PBT auf die Druckentwicklung in SF₆, SF₆/N₂ (20/80 Vol.-%) und CO₂ bei Umgebungsdruck untersucht.

2.3. Energieabsorber

Bei der Modellierung der Wirkungen von Absorbern ist die Energieabsorption und die Erhöhung des Strömungswiderstandes zu berücksichtigen [Ana10].

Die Beschreibung der Energieabsorption kann u. a. über drei verschiedene Ansätze erfolgen, über den:

- Gitterwirkungsgrad
Die aufgenommene Wärmeenergie wird mittels des sogenannten Gitterwirkungsgrads beschrieben, der das Verhältnis von vom Absorber aufgenommener zur vom Lichtbogen freigesetzten thermischen Energie darstellt [Ana10].
- thermischen Wirkungsgrad
Die aufgenommene Energie wird über den gemessenen Temperaturunterschied des Gases vor und hinter dem Absorber ermittelt [Wah07].
- Wärmeübergang
Bei diesem Ansatz wird die aufgenommene Wärmenergie in Analogie zum Wärmeübergang zwischen einer Fluidströmung und einem Rohrbündel berechnet [Ana10].

Die Beschreibung des Strömungswiderstandes erfolgt in [Ana10] über zwei verschiedene Ansätze, über:

- den Druckverlust
Der Strömungswiderstand wird mit einem Modell aus der Wärmetechnik für den berechneten Druckverlust beim Durchströmen von Rohrbündeln beschrieben.

- die effektive Öffnung

Bei diesem Ansatz werden die vielen kleinen Öffnungen des Energieabsorbers durch eine einzige, konzentrierte (effektive) Öffnung ersetzt, die den gleichen Strömungswiderstand besitzt wie der Absorber. Dabei kann auf eine detaillierte Berücksichtigung des Absorberaufbaus verzichtet werden.

Zur vollständigen Beschreibung von Absorbern sind Kombinationen von je einem Ansatz für die Energieabsorption und einem für den Strömungswiderstand erforderlich. Zwei Modellkombinationen haben sich als geeignet und praktikabel erwiesen [Ana10].

Die erste Kombination besteht aus den Ansätzen Wärmeübergang und Druckverlust. Sie hat sich zwar als anwendbar gezeigt, ist jedoch aufwendig in Druckberechnungsprogramme zu implementieren und nur für orts aufgelöste Verfahren geeignet. Die hierfür benötigten Eingangsdaten werden theoretisch bestimmt.

Die zweite Kombination von Ansätzen, Gitterwirkungsgrad und effektive Öffnung, eignet sich sowohl für Druckberechnungen mit ortsmittelnden als auch mit orts aufgelösten Verfahren. Die hierfür benötigten Eingangsdaten basieren auf Messungen und müssen daher experimentell bestimmt werden. Dies hat den Vorteil, dass die nicht einfach zu modellierende Besonderheiten von Absorbersystemen mit erfasst werden.

In dieser Arbeit kommt die zweite Kombination zur Anwendung. Hierzu muss zur Bestimmung des Gitterwirkungsgrades verschiedener Absorbertypen die vom Absorber aufgenommene Energie, d. h. die Absorbtemperatur gemessen werden. Die effektive Öffnung der jeweiligen Absorber kann über einen Vergleich des Druckabfalls in einem Druckbehälter mit und ohne Absorber ermittelt werden.

Als Absorbermaterial werden drei Typen von Streckmetallen aus Stahl untersucht, siehe Abbildung 2.5.

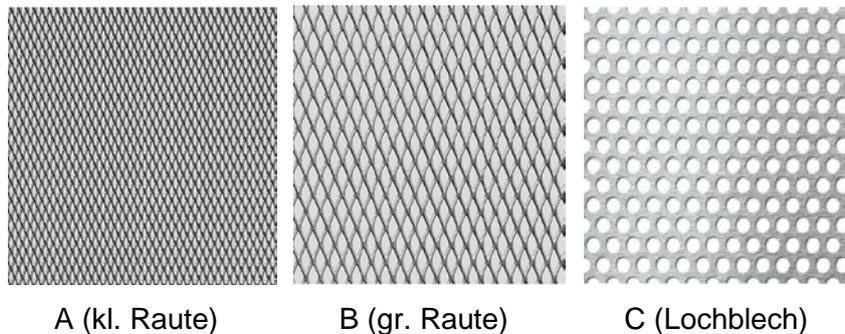


Abbildung 2.5: Typen von Streckmetallen (Kenngrößen siehe Tabelle 5) [Mev15]

Außerdem wird ein wabenförmiger Absorber aus Stahlblech mit 10 mm x 10 mm Maschenweite, einer Blechstärke von 1 mm und einer Tiefe von 85 mm verwendet, siehe Abbildung 2.6.

Die eingesetzten Absorbersysteme unterscheiden sich in der Anzahl der Lagen, deren Abstand zueinander sowie im Abstand zum Lichtbogen.

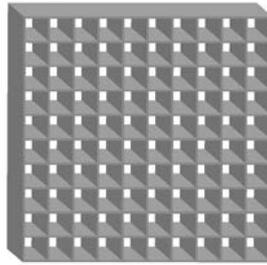


Abbildung 2.6: Wabenförmiger Energieabsorber, Typ D (Kenngrößen siehe Tabelle 5)

Tabelle 5: Kenngrößen der untersuchten Absorber

Eigenschaft	Typ A	Typ B	Typ C	Typ D
Öffnungsform	Raute	Raute	Kreis	Quadrat
Freie Öffnung [%]	44	63	48	81
Maschenlänge [mm]	8	16	8	10
Maschenweite [mm]	4	8	8	10
Materialdicke [mm]	1	1	1,5	1
Gesamtdicke [mm] /	1,7	1,5	1,5	85
Spez. Flächendichte	3,81	2,93	5,71	136,64

Bei mehrlagigen Absorbersystemen können die einzelnen Lagen gedreht/versetzt angeordnet sein (Abbildung 2.7).

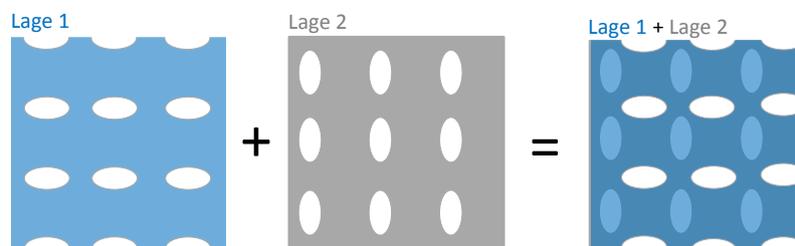


Abbildung 2.7: Beispiel für eine gedreht/versetzte Anordnung von übereinanderliegenden Absorberlagen

Mit dem Einbau von Energieabsorbern kann u. U. auch ein unerwünschter Effekt erzielt werden. Wenn der freie Strömungsquerschnitt und damit der Massenstrom in den Schaltanlagenraum (Entlastungsraum) behindert wird, führt dies zu einer erhöhten Gasdichte im Fehleraum. Damit ist im zeitlichen Mittel die Anzahl der Gaspartikel, die thermische Energie vom Lichtbogen aufnehmen können, erhöht. Der damit verbundene erhöhte Energieeintrag in das Gas bewirkt eine Druckzunahme im fehlerbehafteten Schottraum und damit im Aufstellungsraum der Schaltanlage (Abbildung 2.8). Dieses Phänomen wurde auch experimentell gefunden und wird auf den Kapselungseffekt zurückgeführt [Schu94], d.h. dass der Anteil der elektrischen Energie, der in den Druckaufbau geht, gasdichteabhängig ist.

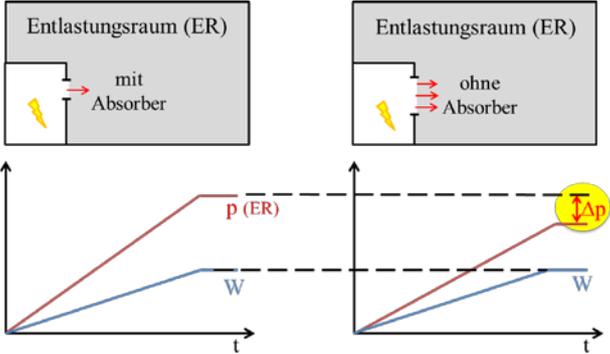


Abbildung 2.8: Zum Einfluss der Größe der Druckentlastungsöffnung auf die Druckentwicklung im geschlossenen Entlastungsraum bei identischer eingespeister elektrischer Energie

3. Zu Druckberechnungen

Um die jeweiligen Einflussgrößen bewerten zu können, müssen zuverlässige ex-ante Druckberechnungen möglich sein. Hierzu wird in diesem Kapitel zunächst auf die Energiebilanz von Störlichtbögen eingegangen. Anschließend werden zwei Druckberechnungsverfahren vorgestellt.

3.1. Energiebilanz

Brennt ein Lichtbogen in einem geschlossenen Gefäß, so kann man im Hinblick auf die Druckentwicklung im Gefäß folgende vereinfachte Energiebilanz verwenden (Abbildung 3.1) [Das87]:

$$W_{el} = W_{therm} + W_e + W_{mv} + W_{rad} \pm W_{chem} \quad (3.1)$$

Hierbei ist W_{el} die dem System zugeführte elektrische Energie, W_e die durch Wärmeleitung von den Elektroden aufgenommene Energie, W_{mv} die an den Elektroden durch Materialaufschmelzung und -verdampfung umgesetzte Energie, und W_{rad} der Energieanteil, der in Strahlung freigesetzt und von der Gefäßwand absorbiert wird.



Abbildung 3.1: Schematische Darstellung der Energiebilanz eines Störlichtbogens

W_{chem} ist der durch endo- oder exotherme Reaktionen des Isoliergases mit z. B. dem Elektrodenmaterial oder dem Kunststoffdampf umgesetzte Energieanteil. W_{therm} ist schließlich der Anteil der elektrischen Energie, der z. B. durch Wärmeleitung, Konvektion und absorbierte Strahlung insbesondere im Metall Dampf der Elektroden in den Druckaufbau geht (thermischer Transferkoeffizient, k_p):

$$W_{therm} = k_p \cdot W_{el} \quad (3.2)$$

Mithilfe der allgemeinen Gasgleichung (3.3) lässt sich der Druck im Gefäß berechnen.

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (3.3)$$

p ist der Druck im Gasvolumen V , n die Stoffmenge (Molzahl), R die allgemeine Gaskonstante und T die Temperatur.

Für die Druckänderung bei einer Erwärmung des Gases um ΔT gilt im geschlossenen Gefäß:

$$\Delta p = \frac{n \cdot R \cdot \Delta T}{V} \quad (3.4)$$

Unter Verwendung der isochoren Wärmekapazität c_v und der Gasmasse m , erhält man mit (3.4) den Druckanstieg in Abhängigkeit von der Änderung der eingespeisten elektrischen Energie:

$$\Delta p = \frac{n \cdot R \cdot \Delta W_{therm}}{V \cdot m \cdot c_v} = \frac{n \cdot R \cdot k_p \cdot \Delta P_{el} \cdot dt}{V \cdot m \cdot c_v} \quad (3.5)$$

Die Gleichung lässt sich umformen zu:

$$\Delta p = \frac{\kappa - 1}{V} \cdot k_p \cdot \Delta P_{el} \cdot dt \quad \text{mit} \quad \kappa = \frac{c_p}{c_v} \quad (3.6)$$

dem Adiabatenkoeffizienten.

Um nun den thermischen Transferkoeffizient (k_p) zu bestimmen, wird die berechnete Druckentwicklung im Fehlerraum durch Variation von k_p , an die gemessene Druckentwicklung im Fehlerraum angepasst. Durch diese Anpassung können anlagenspezifische Einflüsse auf die Druckentwicklung einbezogen werden.

Bei dieser Vorgehensweise kann auf die Modellierung des Lichtbogens selbst verzichtet werden.

3.2. Druckberechnungsverfahren

Druckberechnungsverfahren lassen sich in drei Gruppen einteilen. Zur ersten Gruppe gehören Verfahren, mit denen lediglich der Druckanstieg in geschlossenen Anlagen bestimmt wird z. B. [Das87]. In der zweiten Gruppe werden zusätzlich Druckentlastungsöffnungen in der Schaltanlage berücksichtigt, z. B. [Pig72], [Kop67], [Kin75], [Das85], [Lut81], [Lut82]. Mit der dritten Gruppe kann auch die Druckentwicklung im Schaltanlagenraum/-gebäude und weiteren Räumen berechnet werden z. B. [Fri99], [Sch89], [Fal93], [Lud94], [Ana10], [Wah07], [Zha06], [Cig14]. Hierbei kann man weiterhin zwischen Verfahren unterscheiden, die räumlich aufgelöste und räumlich gemittelte Ergebnisse liefern.

In Hinblick auf die praktische Anwendung sind Verfahren beider Varianten erforderlich [Ana10],

- ein Verfahren, mit dem die mittlere Druckbeanspruchung in elektrischen Anlagen und in Entlastungsräumen im Fehlerfall berechnet werden kann (Standardverfahren) z. B. [Fri99], [Ana10] und
- ein Verfahren für Anwendungsfälle, bei denen das Auftreten von Druckwellen von Bedeutung ist. Hierzu ist eine räumliche Auflösung der Druckphänomene erforderlich, die in der Regel mit Hilfe eines Computational Fluid Dynamics-Gleichungslösers arbeiten (CFD-Verfahren) z. B. [Fri98], [Ana10].

Erweitertes Standardverfahren

Das hier verwendete, ein weiterentwickeltes Standardverfahren zeichnet sich durch einfache Handhabung und kurze Rechendauer für Anwendungsfälle mit einfachen geometrischen Anordnungen aus und dient zur Bestimmung der mittleren Belastung der Raumwände [Ana10].

Bei Verwendung von dichteabhängigen k_p -Faktoren sowie einer hochwertigen Datenbasis für temperatur- und druckabhängige Gaseigenschaften ist eine zuverlässige Bestimmung der Druckbelastung von miteinander durch Öffnungen verbundenen Räumen möglich. Dieses Verfahren basiert auf einer Energieerhaltungsgleichung und dem Masse- / Energieaustausch zwischen Räumen. Unter Verwendung von numerischen Verfahren wird für jeden Zeitschritt der Berechnungsdauer der Druck- und Temperaturanstieg in den einzelnen Räumen iterativ bestimmt, siehe Abbildung 3.2 (weitere Details in [Ana10]).

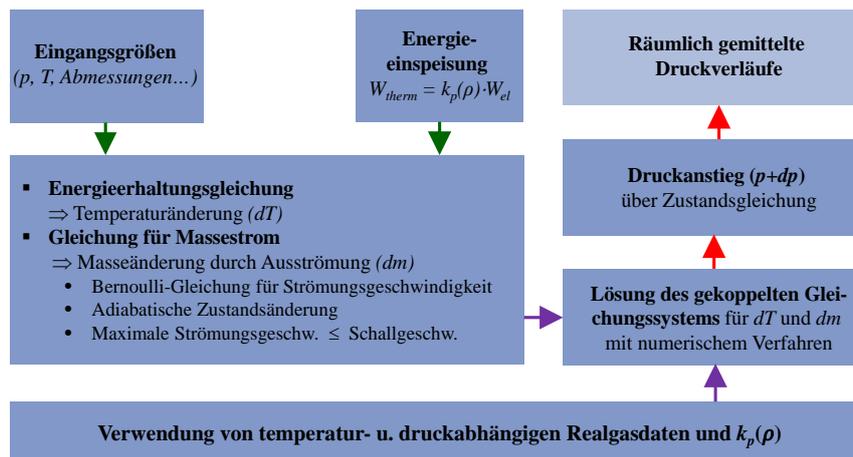


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung zum erweiterten Standardverfahren [Ana10]

Computational Fluid Dynamics-Verfahren

CFD-Verfahren beruhen u. a. auf der drei-dimensionalen Lösung der hydrodynamischen Grundgleichungen mit einem CFD-Gleichungslöser. Die gasgemischspezifischen Zustands- und Erhaltungsgleichungen werden durch druck- und temperaturabhängigen Gasdaten berücksichtigt. Turbulenzen in der Gasströmung können z. B. durch ein κ - ε -Modell erfasst werden [Wil93]. Die vollständige Beschreibung des Fluides erfolgt durch ein System partieller, nichtlinearer Differentialgleichungen. Dieses Gleichungssystem wird hier mit dem Finite-Volumen-Verfahren iterativ gelöst, d. h. für jedes Teilvolumen der diskretisierten Strömungsdomäne und für jeden Rechenzeitschritt. Auch hier sind hochwertige Eingangsdaten von Wichtigkeit.

Wenn Druckwellen beachtet werden müssen (z. B. in Kanälen und langgestreckten Räumen), ist dieses Verfahren von besonderer Bedeutung. Es ist in der Einarbeitungsphase und in der Handhabung bedeutend aufwändiger als Standardverfahren. Eine schematische Darstellung des Verfahrens ist in Abbildung 3.3 wiedergegeben (weitere Details in [Ana10]).

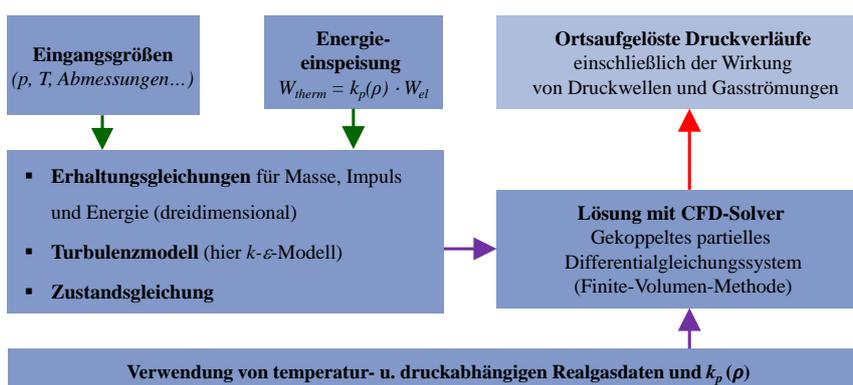


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung zum CFD-Verfahren [Ana10]

4. Versuchsanordnung und Messtechnik

In diesem Kapitel werden die unterschiedliche Versuchsaufbauten zur experimentellen Bestimmung der Einflussparameter auf die Druckentwicklung, der verwendete Prüfkreis (Energiequelle) sowie die Messeinrichtungen vorgestellt.

4.1. Versuchsaufbauten

Zu alternativen Isoliergasen

Um das Verhalten alternativer Isoliergase im Störlichtbogenfall zu charakterisieren und mit demjenigen von Luft und SF₆ zu vergleichen, wird ein Vierflansch einer einpolig gekapselten gasisolierten Schaltanlage mit einem Volumen von etwa 71 l eingesetzt. Der Vierflansch besteht aus Aluminium, die Deckel aus Stahl. Um Lichtbogenauslenkungen zu minimieren, d.h. den Lichtbogen in zentraler Lage durch magnetische Kräfte zu stabilisieren, erfolgt die Stromrückführung über eine Käfiganordnung (Abbildung 4.1). - Die Elektroden haben einen Durchmesser von 19 mm, sie bestehen aus Kupfer und haben einen Abstand von 100 mm.

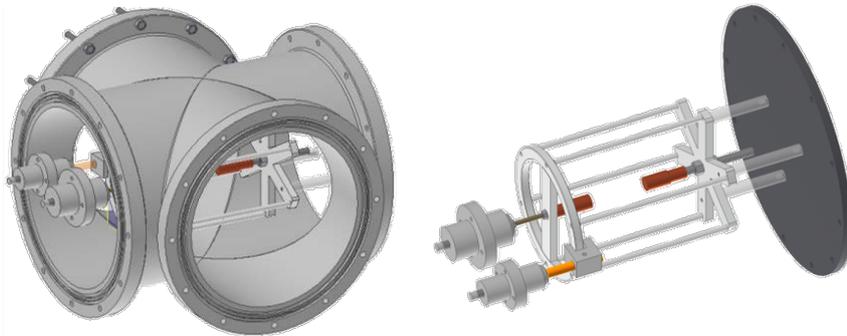


Abbildung 4.1: Vierflansch (links) und Elektrodenaufbau (rechts)

Wegen des hohen GWP-Wertes und der toxischen Zersetzungsprodukte von SF₆ müssen die Versuche in einem geschlossenen Gaskreislauf durchgeführt werden [EG06]. Mithilfe einer Pumpen-Kompressor-Einheit wird der Vierflansch zunächst evakuiert, um ihn anschließend mit Isoliergas auf den gewünschten Druck zu befüllen. Zur Aufbereitung des mit dem Lichtbogen beanspruchten SF₆ wird eine Aufbereitungseinheit verwendet, die u.a. aus einem Staubabscheider und einem Trockenfilter besteht.

Zu Kunststoffen

Die Untersuchungen zur Auswirkung der Kunststoffverdampfung werden in dem bereits beschriebenen Vierflansch durchgeführt.

Zur Vergleichbarkeit der Messergebnisse wird bei den Verdampfungsversuchen eine Anordnung gewählt, bei der der Lichtbogen parallel zu einer Kunststoffplatte brennt mit einem bei allen Versuchen identischem Abstand, (Abbildung 4.2). Es werden Kunststoffplatten von 200 mm x 200 mm verwendet. Der Abstand zum Lichtbogen (Elektrodenabstand 100 mm) beträgt 30 mm. Der Abstand wurde so gewählt, dass ein größtmöglicher Masseverlust auftritt und kein verflüssigter Kunststoff abtropft⁵.

⁵ Bei 30 mm Elektrodenabstand von der Kunststoffplatte ist der Masseverlust vergleichbar groß wie bei direkt auf der Platte angeordneten Elektroden.

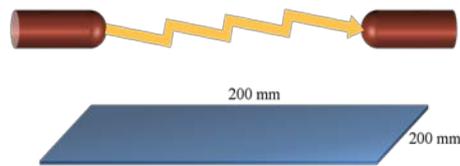


Abbildung 4.2: Anordnung zur Kunststoffverdampfung

Um die Auswirkung einer möglichen Wechselwirkung von unterschiedlichen Kunststoffdämpfen auf die Druckentwicklung zu untersuchen, werden jeweils zwei aus unterschiedlichem Material bestehende Kunststoffplatten mit einer Abmessung von jeweils 200 mm x 100 mm nebeneinander angeordnet, siehe Abbildung 4.3.

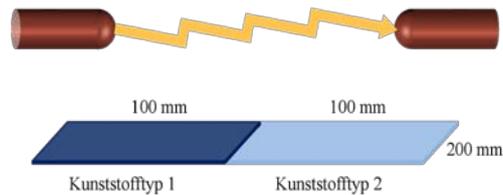


Abbildung 4.3: Anordnung zur Kunststoffverdampfung mit zwei Kunststofftypen

Zu Energieabsorbieren

Für die Untersuchungen zu Energieabsorbieren werden zwei unterschiedliche Anordnungen benötigt, eine zur Bestimmung des Gitterwirkungsgrades und eine zur Ermittlung der effektiven Öffnung von Absorbiersystemen.

Bei den Versuchen zum Gitterwirkungsgrad soll der Abstand des Absorbers vom Lichtbogen variiert werden können. Daher besteht die Versuchseinrichtung aus einem Vierflansch, in dem der Lichtbogen gezündet wird, einem Auffangbehälter für das abströmende Gas (Entlastungstank) und aus einem Zwischenstück, in dem die verschiedenen Absorber eingebaut und ihr Abstand zum Lichtbogen verändert werden kann (Abbildung 4.4).

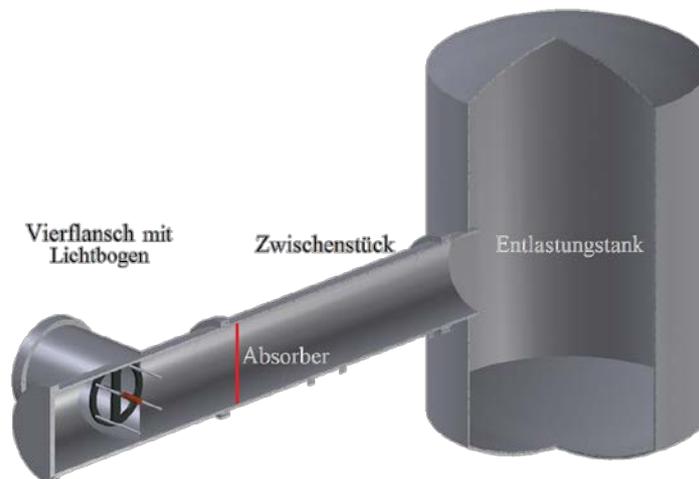


Abbildung 4.4: Anordnung zur Bestimmung des Gitterwirkungsgrades von Absorbieren

Die Absorber werden in einer Halterung aus dem weitgehend abbrandfesten PTFE (Polytetrafluorethylen) eingebaut, um die Wärmeleitung zwischen Absorberanordnung und Zwischenstück zu minimieren. Der Einbau von unterschiedlich vielen Absorberlagen mit verschiedenen Lagenabständen sowie die Positionierung der Gitter an verschiedenen Stellen im Kanal ist mit diesem Aufbau zu bewerkstelligen. Der Vierflansch hat ein Volumen von 93 l, das Zwischenstück von 83 l und der Entlastungstank von 840 l.

Zur Minimierung von Störsignalen bei der Temperaturmessung, die durch den Lichtbogen hervorgerufen und durch elektromagnetische Einkopplung übertragen werden, wird der Absorber in einen Faradayschen Käfig eingebaut. Der Faradaysche Käfig wurde so gestaltet, dass die Gasströmung nicht signifikant beeinflusst wird (Abbildung 4.5).

Der Käfig besteht aus folgenden Elementen:

- Abstandshalter aus PTFE, in die die einzelnen Absorberlagen eingebaut werden,
- Gewindestangen zur Fixierung der Abstandshalter,
- flachen Metallplatten zur Seitenschirmung,
- einem Maschendraht vor der ersten und hinter der letzten Absorberlage zur Abschirmung elektromagnetischer Strahlung.

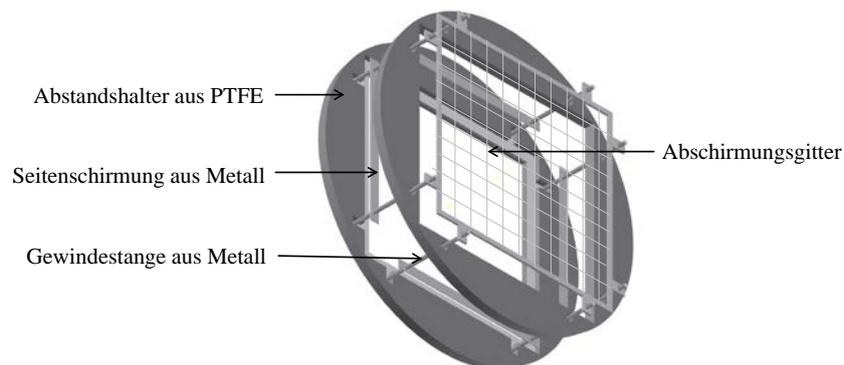


Abbildung 4.5: Schematische Darstellung des Faradayschen Käfigs zur Abschirmung von Störsignalen (zur besseren Darstellung ist das hintere Käfiggitter nicht eingezeichnet)

Bei der Maschengröße des Maschendrahtes musste ein Kompromiss zwischen dem Wunsch nach größtmöglicher Abschirmung auf der einen Seite und der Beeinflussung des Strömungswiderstandes auf der anderen Seite gefunden werden. Es wurde ein Draht von 500 μm Durchmesser und einer Maschenweite von zehn Millimetern gewählt.

Zur Bestimmung der effektiven (wirksamen) Öffnung der Absorbersysteme werden Versuche in einer Kaltgasströmung durchgeführt. Die dazu verwendete Anordnung ist in Abbildung 4.6 dargestellt. Die Anordnung besteht aus einem Druckbehälter mit 500 l Fassungsvermögen mit angeflanschem Halter für die Absorber. Der Flansch wird mit einer Stahlplatte verschlossen, die von drei Elektromagneten gehalten wird. Der Druckbehälter wird mit Druckluft befüllt.

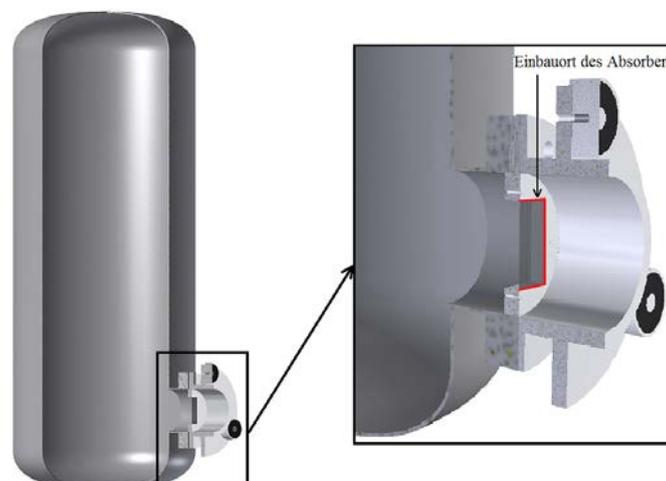


Abbildung 4.6: Versuchsanordnung zur Bestimmung der effektiven Öffnung von Absorbern

Nach Abschalten der Spannungsversorgung für die Magnete gibt die Stahlplatte die Flanschöffnung schlagartig frei, und der Druckabfall im Behälter kann gemessen werden. Durch Vergleich des Druckabfalls mit demjenigen eines Satzes konzentrierter Öffnungen unterschiedlicher Größe kann auf die effektive Öffnung des Absorbersystems geschlossen werden (Details siehe Kapitel 5.3.2).

4.2. Energiequelle

Als Energiequelle für die Lichtbogenversuche wird ein LC-Schwingkreis mit einer Kapazität von 34 mF, einer Ladespannung von bis zu 4 kV und einer Induktivität von 314 μ H benutzt.

Der Lichtbogen wird mit dem Verdampfen eines Zünddrahtes eingeleitet. Infolge des Lichtbogenwiderstands erhält man eine gedämpfte Schwingung, siehe Abbildung 4.7. Sobald in einem Stromnulldurchgang die verbleibende Kondensatorspannung unter die benötigte Lichtbogenspannung fällt, erlischt der Lichtbogen.

Die im Lichtbogen umgesetzte elektrische Energie beträgt bei voller Kondensatorladung etwa 200 kJ (Abbildung 4.8). Durch Veränderung der Kondensatorladespannung kann die Energie und damit der Kurzschlussstrom variiert werden.

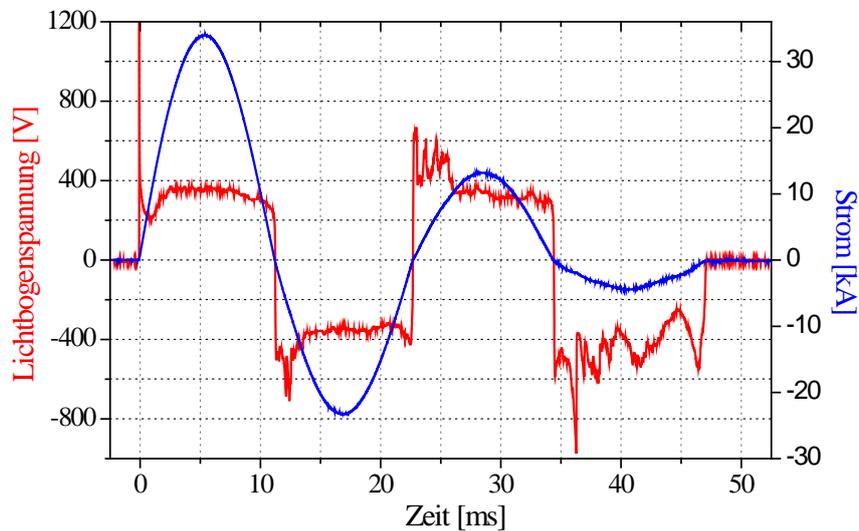


Abbildung 4.7: Typischer Strom- und Spannungsverlauf bei einem Lichtbogenversuch in CO₂ (Fülldruck 1 bar, Elektrodenabstand 100 mm)

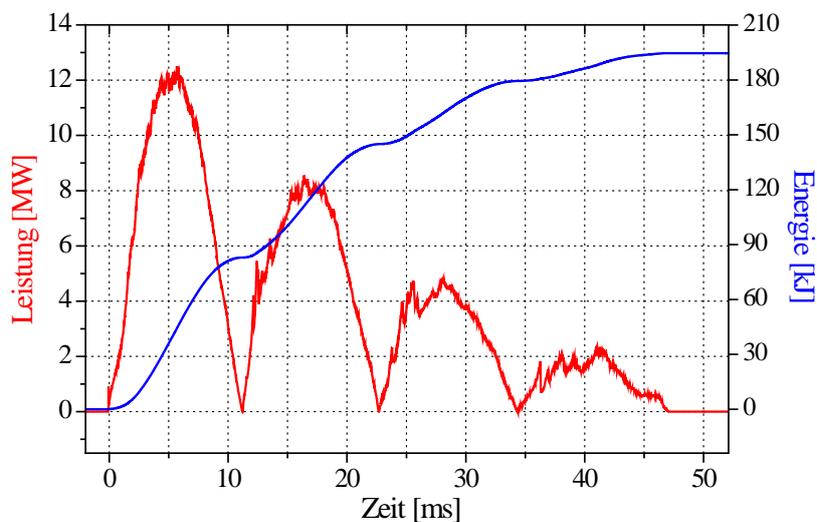


Abbildung 4.8: Typischer Leistungs- und Energieverlauf bei einem Lichtbogenversuch in CO₂ (Fülldruck 1 bar, Elektrodenabstand 100 mm)

4.3. Messeinrichtung und -aufbau

Bei den Versuchen werden vor allem Strom-, Spannungs- und Druckmessungen durchgeführt. Die Übertragung und Aufzeichnung der Messsignale erfolgt mithilfe eines Messsystems bestehend aus optischen Übertragungsstrecken und einem Transientenrekorder⁶ mit einer Abtastrate von 100 MHz pro Kanal.

Die Stromstärke wird mit einer Rogowski-Spule⁷ bestimmt. Die Auflösung beträgt 0,1 mV pro Ampere. Zur Messung der Lichtbogenspannung kommt ein Tastkopf⁸ mit einem Teilerverhältnis von 1000:1 zum Einsatz. Für die Druckmessungen wird ein piezoelektrischer, im hohen Maße beschleunigungskompensierter Sensor verwendet (Beschleunigungssensibilität < 0,2 mbar/g)⁹. Eine piezoelektrische Quarzschicht im Sensor generiert eine Ladungsverschiebung in Abhängigkeit vom Druck, die durch einen Ladungsverstärker¹⁰ in eine Spannung umgewandelt und an die Übertragungsstrecke weitergegeben wird (Details zur Druckmessung in Anhang A).

Bei den vorgegebenen Randbedingungen stellt die Wahl des Temperaturmessverfahrens eine besondere Herausforderung dar. Der Temperaturverlauf muss an mehreren Stellen des Absorbersystems gleichzeitig gemessen werden. Die Problematik bei der Temperaturmessung besteht u.a. darin, dass die zu messenden Temperaturen relativ klein sind, die Umgebung rau ist (Heißgasströmung, Strahlung), eine schnelle Ansprechzeit erforderlich ist und schließlich darin, dass der Sensor nur geringe Abmessungen haben darf (wegen der begrenzten Zugänglichkeit im Absorbersystem und um die Gasströmung während des Versuches nicht zu beeinflussen).

Hinsichtlich der Ansprechzeit wären optische Messverfahren (z. B. Pyrometer) ideal. Gegen ihren Einsatz sprechen aber z. B. der Einfluss der Lichtbogenstrahlung und die Schwierigkeit, mit solchen Systemen die Temperatur einzelner Absorberlagen zu erfassen. Die Verwendung von Glasfasern zur Übertragung der Wärmestrahlung vom Messort verbietet sich aufgrund der Absorption der Strahlung im zu messenden Temperaturbereich ebenfalls. Ausdehnungs-, Widerstands- und Halbleiterthermometer genügen nicht den dynamischen Anforderungen.

Es hat sich gezeigt, dass bei den vorliegenden Umgebungsbedingungen Temperaturmessungen am Absorber mit hochempfindlichen Thermoelementen möglich sind [Wah07]. Hier werden isolierte Thermoelemente des Typs K (NiCr-Ni, Temperaturbereich von -100 °C bis 1250 °C) verwendet [Ome01]. Um ein schnelles Ansprechen zu erreichen, kommen an den Messstellen kurze geschirmte Thermoelementdrähte mit einem Durchmesser von 130 µm zum Einsatz (Abbildung 4.9).

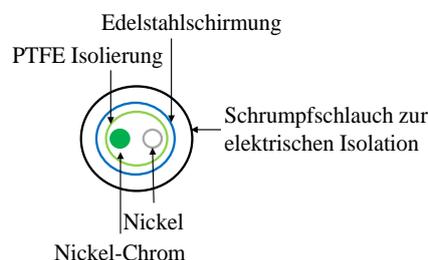


Abbildung 4.9: Schematische Darstellung des Querschnitts der Thermoelementleitung

⁶ Satellitensystem der Firma AMOtronics UG

⁷ Typ „CWT 300B“ der Firma PEM

⁸ Typ „Tektronix P6015“ der Firma North Star High Voltage

⁹ Typ „6052C“ der Firma Kistler

¹⁰ Typ „5073A“ der Firma Kistler

Eine weitere Herausforderung stellt die Befestigung der Thermoelemente dar. Eine Befestigung der Elemente auf der Absorberoberfläche kann durch einfaches Fixieren mittels eines Drahtes, durch Schweißen oder durch Kleben mit einem speziellen Thermokleber geschehen. Beim einfachen Festbinden kann sich das Thermoelement durch mechanische Kräfte der vom Lichtbogen verursachten Gasströmung vorübergehend lösen. Ferner wird das Element vom heißen Gas umströmt, so dass nicht die tatsächliche Absorbertemperatur, sondern ein Kombination aus Gitter- und Gastemperatur gemessen wird. Eine feste Schweißverbindung würde zwar das Loslösen des Thermoelementes durch die Gasströmung verhindern, jedoch wird es immer noch vom heißen Gas umströmt. Durch den Schweißvorgang kann außerdem das Material des Thermoelementepaares durch Aufschmelzen des Absorbers verunreinigt werden, wodurch die in der Auswerteeinheit hinterlegte Kennlinie nicht mehr anwendbar wäre. Wird für die Befestigung der Elemente auf der Absorberoberfläche ein Thermokleber verwendet, so ist die Messung zwar nicht mehr direkt von der Gasströmung beeinflusst, jedoch ist die benötigte Klebermenge, die für eine ausreichende mechanische Stabilität notwendig ist, so groß, dass die Erhöhung der Wärmekapazität an der Messstelle einen zu großen Einfluss auf die gemessene Temperatur hat.

Daher werden die Thermoelemente im Inneren des Absorbermaterials befestigt. In den 1 bis 1½ mm breiten Absorbersteg wird ein ca. 2 bis 3 mm tiefes Sackloch parallel zur Absorberlage in den Steg gebohrt, in dem das Thermoelement mit einem speziellen Wärmeleitkleber befestigt wird. Der Durchmesser der Bohrung beträgt 500 µm. Die Schicht, mit der das Thermoelement im Sackloch von Klebstoff umgeben ist, beträgt ca. 100 bis 200 µm und gewährleistet nach dem Aushärten die notwendige mechanische Stabilität. Eine Klebstoffschicht dieser Größenordnung hat auf das dynamische Verhalten keinen merklichen Einfluss. Weiterhin ist von Vorteil, dass der Kleber elektrisch nur bedingt leitfähig ist. Damit werden elektrische Einkopplungen gedämpft weil der Absorber nun nicht mehr elektrisch mit dem Thermoelement verbunden ist und somit nicht mehr als „Antenne“ wirken kann. Durch das Einbringen der Thermoelementspitze in das Innere des Absorbers, ist der Sensor nicht direkt dem Isoliergas ausgesetzt (Abbildung 4.10).

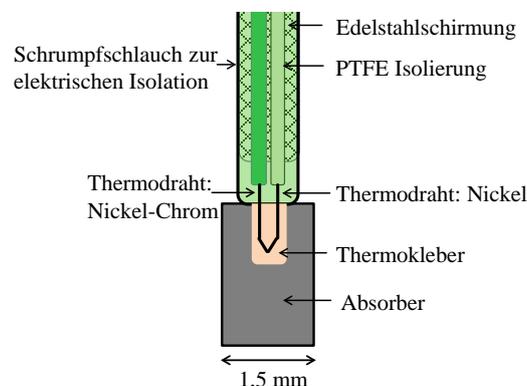


Abbildung 4.10: Schematische Darstellung Thermoelementbefestigung im Absorber

Um die Distanz zwischen Messspitze und Auswerteeinheit¹¹ überbrücken zu können, müssen die Anschlussleitungen des Thermoelementes verlängert werden. Die Verlängerung erfolgt mit einem Original-Kit des Thermoelementeherstellers bestehend aus einer Steckverbindung (Stecker / Kupplung) und der Verlängerungsleitung. Sowohl die beiden Kontakte der Steckverbindung als auch die beiden Adern der Verlängerungsleitung sind in den selben Werkstoffen ausgeführt wie die beiden Thermoelementeleitungen - Ni-Cr bzw. Ni. Die Verlängerungsleitungen sind mechanisch stabil und als isolierte, verdrehte Adern (twisted pair) ausgeführt. Die mehrkanalige Auswerteeinheit hat eine Abtastrate von bis zu 600 Hz. Wegen der Störempfindlichkeit des Messsignals wird eine durchgängige Schirmung von der Mess-

¹¹ Typ „OMB-DAQ-2408-2AO“ der Firma Omega

spitze bis hin zur Auswerteinheit angebracht. Eine schematische Darstellung der gesamten Messkette ist in Abbildung 4.11 dargestellt.

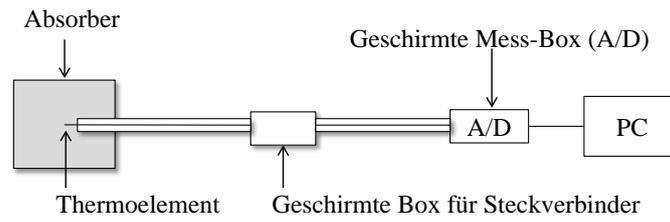


Abbildung 4.11: Schematische Darstellung der Temperaturmesskette

5. Ergebnisse und Diskussion

Im Folgenden werden die Resultate der experimentellen Untersuchungen zum Einfluss von alternativen Isoliergasen, der Kunststoffverdampfung sowie von Energieabsorbern auf die Druckentwicklung vorgestellt und diskutiert.

5.1. Wirkung von alternativen Isoliergasen (Forschungsstelle 2)

5.1.1. Druckerhöhung

Die Druckentwicklung nach Zünden eines Lichtbogens im geschlossenen Versuchsgefäß (Kapitel 4.1) bei Verwendung verschiedener Isoliergase (SF_6 , CO_2 , SF_6/N_2 20/80 Vol.-% und Luft) und vergleichbarer Energieeinspeisung ist in Abbildung 5.1 dargestellt.

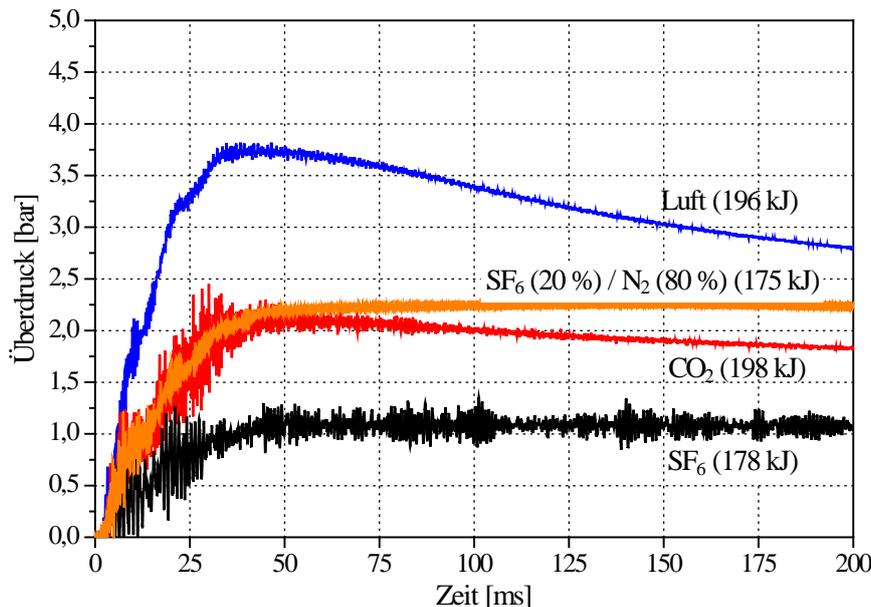


Abbildung 5.1: Druckentwicklungen im Versuchsgefäß in unterschiedlichen Isoliergasen (Fülldruck 1 bar, Elektrodenabstand 100 mm [Wet14b])

Der Überdruck in Luft ist am größten und in SF_6 am geringsten. Dieses ist auf die unterschiedlichen Wärmekapazitäten der Gase im relevanten Temperaturbereich (< 10.000 K) zurückzuführen.

Bei praktisch denselben Randbedingungen ist der maximale Druckanstieg

- in SF_6 ungefähr 68 %,
- in CO_2 ungefähr 44 % und
- in SF_6/N_2 ungefähr 40 % geringer als in Luft.

Dies gilt für den (geschlossenen) Schottraum einer Schaltanlage, indem der Lichtbogen brennt. Im Schaltanlagenraum (Aufstellungsraum) wird dagegen bei SF_6 -isolierten Schaltanlagen ein höherer Druck erwartet. Dieses resultiert aus der höheren Energiedichte des erwärmten SF_6 , das in den Schaltanlagenraum strömt.

Der in Abbildung 5.1 erkennbare Druckabfall nach Lichtbogenlöschung (ca. 50 ms nach Zündung) lässt sich auf die Wärmeleitung des heißen Gases zur Gefäßwand zurückführen. Je geringer die Wärmekapazität des Gases, desto schneller nimmt der Druck ab.

Über eine Anpassung der berechneten an die gemessene Druckentwicklung im Fehlerraum wird der k_p -Faktor bestimmt. Um die Abhängigkeit von k_p von der Gasdichte zu erhalten, wird der Fülldruck im Versuchsgefäß variiert. Die Ergebnisse für die unterschiedlichen Gase sind

in Abbildung 5.2 dargestellt (um einen einheitlichen Maßstab verwenden zu können, ist der k_p -Faktor hier über dem Fülldruck und nicht über der Gasdichte aufgetragen).

In Luft und CO_2 sinkt der k_p -Faktor mit abnehmender Dichte, wohingegen er in SF_6 und SF_6/N_2 (20/80 Vol.-%) zunimmt. Mit steigendem N_2 -Anteil beim SF_6/N_2 -Gemisch nähert sich der k_p -Faktor dem von Luft an. Der Einfluss des Elektrodenmaterials in Luft (1 bar) auf die Ergebnisse wird in Anhang B betrachtet.

Die Abnahme von k_p mit sinkender Gasdichte in Luft und CO_2 ist in erster Linie auf eine Veränderung der Energiebilanz aufgrund der höheren Temperatur bei geringer Gasdichte zurückzuführen. Dabei fallen Energieanteile, die keinen Beitrag zur thermischen Energie (Druckanstieg) leisten, wie z. B. Strahlung, immer stärker ins Gewicht. In SF_6 ist die Teilchenzahlvermehrung durch Dissoziation von Bedeutung. - Bei höheren Gasdichten (Fülldruck) nähert sich der k_p -Faktor in allen Fällen einem konstanten Wert.

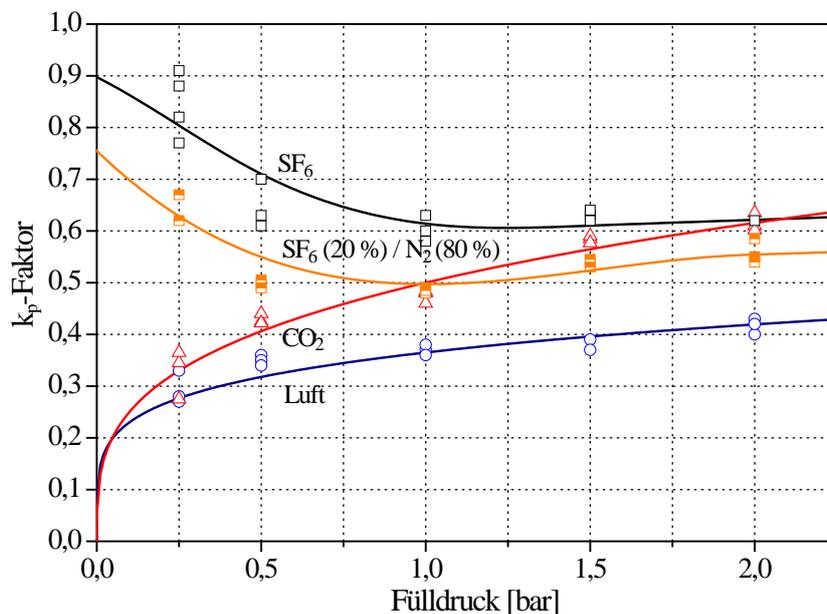


Abbildung 5.2: k_p -Faktor für verschiedene Gase in Abhängigkeit vom Fülldruck (Gasdichte) [Wet14b]

5.1.2. Lichtbogenspannung

Die Lichtbogenspannung, die die Lichtbogenleistung mitbestimmt, hängt ebenfalls von der Gasdichte im Gefäß ab. In Abbildung 5.3 ist sie in Abhängigkeit vom Fülldruck (Gasdichte im Gefäß) dargestellt. Es ist ein nahezu lineares Verhältnis zwischen Fülldruck und Lichtbogenspannung zu erkennen. Dies lässt sich mit der Anzahl der zu ionisierenden Gasteilchen im Elektrodenzwischenraum erklären, deren Anzahl mit der Gasdichte ansteigt.

Aufgrund der geringen Ionisationsenergie von Schwefelatomen (und auch aufgrund eines durch den Käfig aus Rückleitern stabilisierten Lichtbogens im Vierflansch) ist die Lichtbogenspannung in SF_6 und dem SF_6/N_2 -Gemisch (20/80 Vol.-%) kleiner als in den anderen Gasen. Die Lichtbogenspannungen in Luft und CO_2 unterscheiden sich in dieser Anordnung nicht wesentlich voneinander.

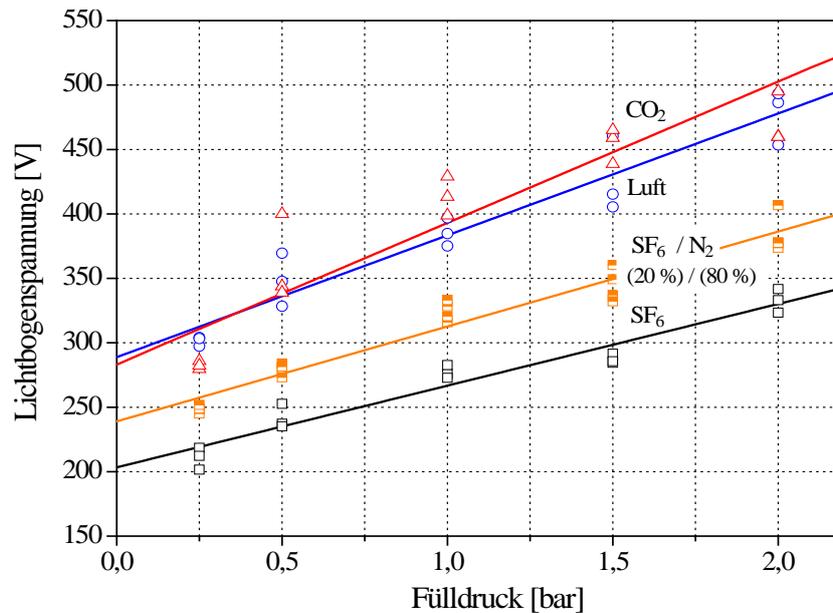


Abbildung 5.3: Gemessene Lichtbogen­spannung im Versuchsgefäß bei verschiedenen Fülldrücken (100 mm Elektrodenabstand, Kupferelektroden) [Wet14b]

5.1.3. Fallbeispiel

Um die Güte der rechnerischen Nachbildung des Effekts alternativer Gase auf die Druckentwicklung bewerten zu können, wird ein Versuch mit CO₂ als Isoliergas in der Anordnung zur Messung des Gitterwirkungsgrades von Absorbern durchgeführt. Der Absorber wird dabei durch eine Berstscheibe ersetzt (Abbildung 5.4). Der Vierflansch wird mit 1,7 bar CO₂ gefüllt; im Entlastungstank befindet sich Luft bei Umgebungsdruck.

Nach Zündung des Lichtbogens steigt der Überdruck im Vierflansch auf 2,4 bar an (30 ms nach Zünden des Lichtbogens, siehe Abbildung 5.5). Zu diesem Zeitpunkt öffnet die Berstscheibe und das erhitzte CO₂ strömt in den Entlastungstank. Der Druck im Entlastungstank steigt innerhalb von 27 ms auf etwa 300 mbar Überdruck an. 57 ms nach Zündung des Lichtbogens ist ein Druckgleichgewicht erreicht. Die Lichtbogendauer beträgt hier 35 ms. Daher steigt der Druck nicht weiter an. In Abbildung 5.5 sind die berechneten und die gemessenen Druckverläufe im Vierflansch und im Entlastungstank enthalten. Der Öffnungszeitpunkt der Berstscheibe ist durch eine senkrechte Linie markiert.

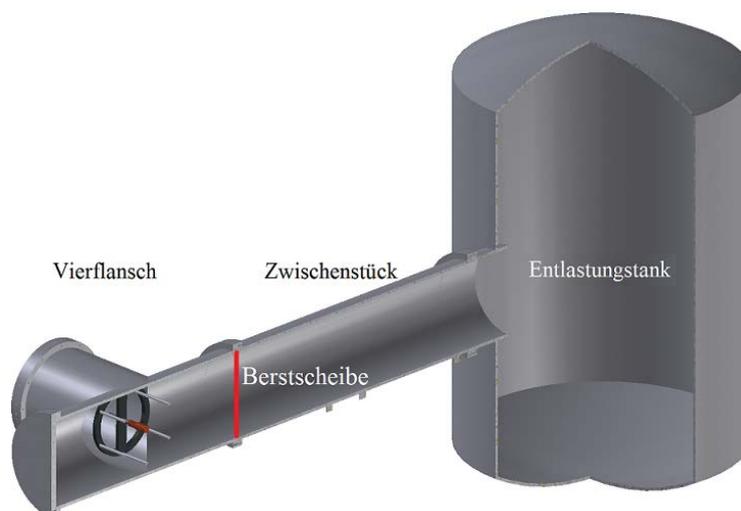


Abbildung 5.4: Versuchsaufbau mit Berstscheibe (Details siehe Kapitel 4.1)

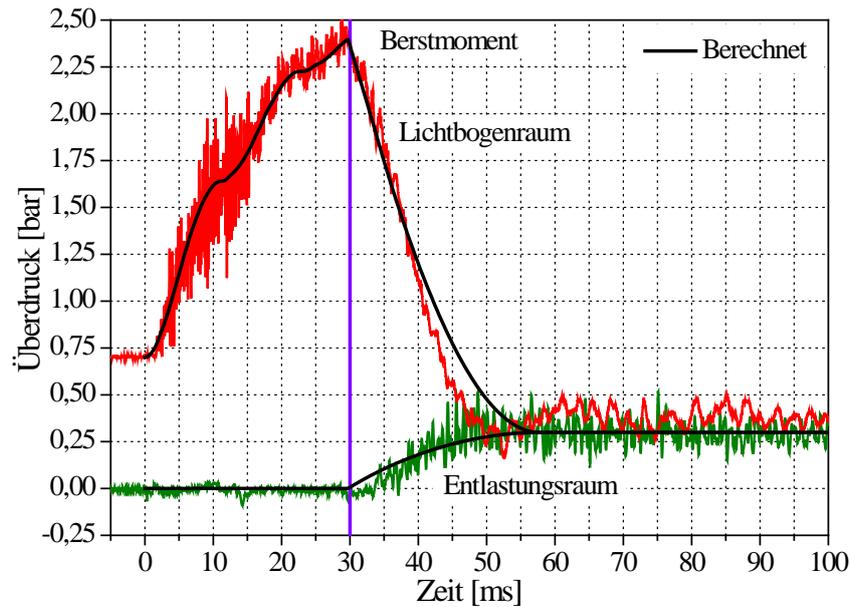


Abbildung 5.5: Druckverläufe im Vierflansch (Lichtbogenraum) und Entlastungstank (CO₂/ Luft, 180 kJ) [Wet15]

Die gemessenen und berechneten Druckverläufe stimmen gut überein. Damit ist gezeigt, dass zuverlässige Druckberechnungen mit experimentell bestimmten Berechnungsparametern und dem verwendeten Rechenprogramm mit CO₂ als Isoliergas möglich sind.

Beim Einsatz von Schaltanlagen mit alternativen Isoliergasen ist nicht nur die Störlichtbogensicherheit des einzelnen Schaltfeldes von Interesse. Wegen des meist nicht vernachlässigbaren Überdrucks im Entlastungsraum muss die Wandbelastbarkeit des Schaltanlagenraums beachtet werden.

5.2. Wirkung von Kunststoffen (Forschungsstelle 1+2)

In diesem Kapitel werden zuerst die Ergebnisse zum Kunststoffmasseverlust vorgestellt, anschließend wird auf den Einfluss der Kunststoffverdampfung auf die Lichtbogen Spannung und auf den Druckanstieg eingegangen. Im anschließenden Abschnitt wird die Einbindung der Kunststoffverdampfung in Druckberechnungsverfahren behandelt.

5.2.1. Masseverlust

Bei der Einwirkung von Störlichtbögen auf Kunststoffe tritt Verdampfung auf, die einen Einfluss auf die Druckentwicklung haben kann. Da der Masseverlust mit der Menge des erzeugten Dampfes zusammenhängt, wird zunächst der Masseverlust der einzelnen Kunststoffe untersucht. Hierzu werden Versuche bei verschiedenen Fülldrücken (Gasdichten im Fehlerraum) bei einer Lichtbogenenergie von $W_{el} \sim 180$ kJ durchgeführt. Mit jedem Kunststoff (siehe Tabelle 4) werden mehrere Versuche gemacht, anschließend werden die Ergebnisse gemittelt, siehe Abbildung 5.6. - Der Masseverlust wird über einen Massevergleich des Prüflings vor und nach dem Versuch bestimmt.

Die durchschnittlich niedrigsten Masseverluste erhält man mit Epoxidharz (EP) und Polycarbonat (PC). Zur Auflösung einer EP-Matrix ist aufgrund der engen Vernetzung der Matrix eine größere Energiemenge als bei Thermoplasten notwendig. Bei PC macht die eingeschränkte Beweglichkeit der Moleküle das Material besonders wärmostabil [Dom12]. Der Masseverlust der anderen Kunststoffe (PA 6.6, PA 6.6 FR, PBT sowie PBT FR) ist deutlich größer und bis auf PBT (FR) von vergleichbarer Größenordnung. Der Masseverlust von PBT (FR) ist (unabhängig vom Fülldruck) etwas geringer als der der anderen o.g. Kunststoffe.

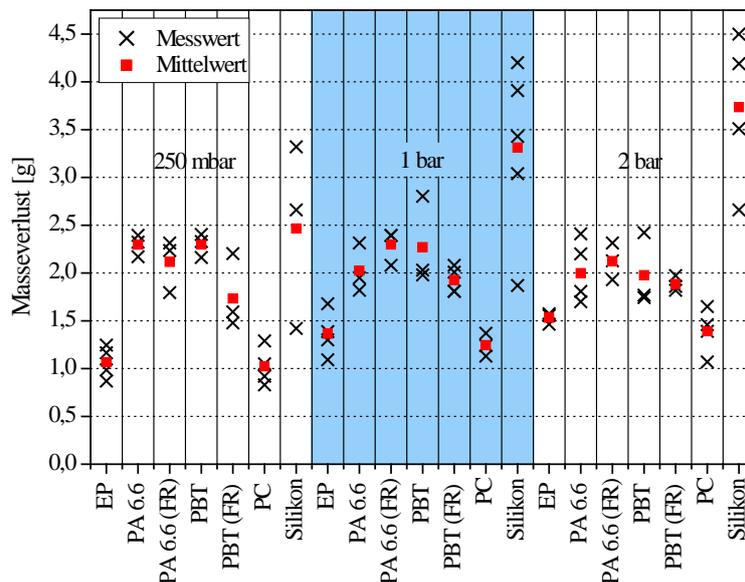


Abbildung 5.6: Masseverlust von Kunststoffen bei Lichtbogeneinwirkung in Luft (Fülldrücke 0,25 bar, 1 bar und 2 bar; $W_{el} \sim 180$ kJ)

Bei der Einwirkung des Lichtbogens auf Silikon erhält man den höchsten Masseverlust (im Mittel bis zu 3,73 g bei 2 bar) und darüber hinaus auch die größte Streuung. Der größere Masseverlust ist auf die geringere Bindungsenergie der Silikonatome in den Molekülketten des Elastomers verglichen mit der Bindungsenergie der Kohlenstoffatome in der Molekülstruktur der untersuchten Thermo- und Duroplaste zurückzuführen [Dom08]. Die große Streuung beruht auf dem Aufplatzen der Materialoberfläche unter Lichtbogeneinfluss und dem damit verbundenen Verspritzen von Silikonfragmenten im Versuchsgefäß. Hierdurch wird die Bestimmung des Masseverlusts erschwert. Im Grunde ist nahezu bei keinem der untersuchten Kunststoffe eine Abhängigkeit des Masseverlustes vom Fülldruck erkennbar.

Bei den Versuchen mit Silikon ist zwar ein Anstieg des Mittelwertes beobachtbar, jedoch überlagern sich die Streubereiche.

Es ist nicht auszuschließen, dass bei der gleichzeitigen Lichtbogeneinwirkung auf verschiedene Kunststoffe chemische Reaktionen der Kunststoffdämpfe eine Rolle spielen können, die durch exo- oder endothermen Reaktionen zu einem veränderten Masseverlust und einer veränderten Druckentwicklung führen. Um diesen Effekt zu untersuchen, wird jede mögliche Kombination der sieben verschiedenen Kunststoffe bei einem Fülldruck von einem 1 bar (absolut) in Luft betrachtet.

In Abbildung 5.7 sind zunächst die Masseverluste bei Kunststoffkombinationen dargestellt. Im Diagramm sind die Messwerte, der Mittelwerte sowie die Erwartungswerte des Masseverlusts ohne chemische Wechselwirkung für jede Kunststoffpaarung dargestellt. Die Erwartungswerte erhält man durch Mittelwertbildung der Masseverluste beider einzelner Kunststoffe. Die Mittelwerte liegen meistens geringfügig unterhalb der Erwartungswerte. Aufgrund der Lichtbogenbewegung wird nicht bei jedem Versuch jede Kunststoffhälfte gleichermaßen beansprucht und somit weisen die Versuchsreihen mit zwei Kunststoffen eine höhere Streuung auf als die Versuche mit nur einem Kunststoff. Die EP- und PC-Kombinationen führen auch hier zu den geringsten Masseverlusten. Es sind keine nennenswerten Änderungen im Masseverlust durch das gleichzeitige Verdampfen von zwei verschiedenen Kunststoffen erkennbar.

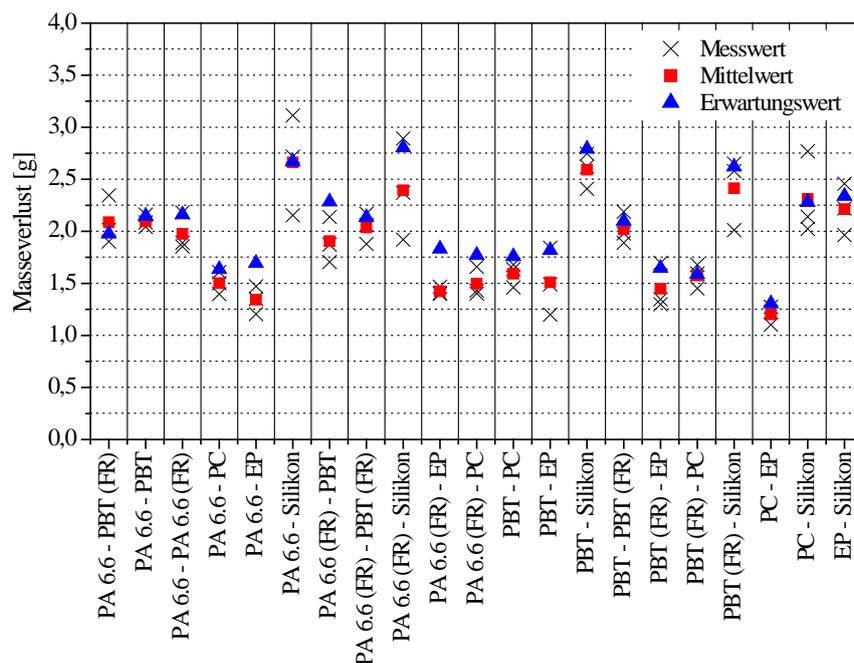


Abbildung 5.7: Masseverlust bei unterschiedlichen Kunststoffkombinationen ($W_{el} \sim 180$ kJ, $P_{Füll} = 1$ bar, Luft)

Weiterhin ist noch der mögliche Einfluss von Kunststoffverdampfung auf die Druckentwicklung in alternativen Isoliergasen von Interesse. Hierzu wurden exemplarische Versuche mit Polybutylenterephthalat (PBT) durchgeführt. Der mittlere Masseverlust in den unterschiedlichen Gasen ist in Tabelle 6 wiedergegeben.

Tabelle 6: Masseverlust bei Lichtbogeneinwirkung auf PBT in verschiedenen Isoliergasen ($W_{el} \sim 180$ kJ, $P_{Füll} = 1$ bar)

Isoliergas	Luft	CO ₂	SF ₆ /N ₂	SF ₆
Masseverlust [g]	2,27	2,08	2,13	2,06

Der Masseverlust ist in den alternativen Gasen geringfügig niedriger, er befindet sich jedoch im Streuband des Masseverlusts in Luft. Dies lässt vermuten, dass der Masseverlust durch Vergasen (z. B. pyrolytische Zersetzung) aufgrund der hohen Temperaturen in Lichtbogen-nähe entsteht und nicht durch Oxidationsprozesse (Verbrennung).

5.2.2. Lichtbogenspannung

Die Lichtbogenspannung ist für ex-ante Druckberechnungen von Bedeutung. Bei der Verdampfung von Kunststoff wird das Isoliergas mit dem Kunststoffdampf durchsetzt mit der Folge, dass sich die Leitfähigkeit des Lichtbogenplasmas und damit die Lichtbogenspannung ändern kann. In Abbildung 5.8 sind Messwerte in Abhängigkeit vom Fülldruck (anstelle der Gasdichte) im Testgefäß bei Einwirkung auf die verschiedenen Kunststoffe dargestellt.

Abgesehen vom Fülldruck 2 bar, bei dem allerdings auch eine größere Streuung der Messwerte auftritt, sind die Unterschiede in den gemessenen Lichtbogenspannungswerten beim jeweiligen Fülldruck gering. Im Vergleich zu den Versuchen ohne Kunststoffverdampfung sind die Lichtbogenspannungen mit Lichtbogeneinwirkung auf EP, PBT und PBT (FR) tendenziell geringer und bei der Einwirkung auf Silikon etwas größer.

Bei der Bestimmung der Lichtbogenspannung ist jeweils die zweite Halbschwingung zu Grunde gelegt worden, weil die Verdampfung verzögert einsetzt.

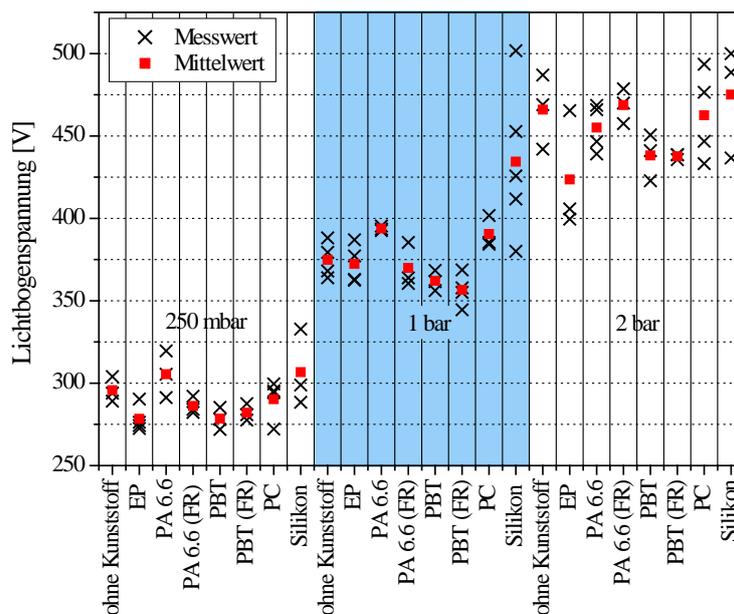


Abbildung 5.8: Gemessene Lichtbogenspannung in mit Kunststoffdampf versetzter Luft (Elektrodenabstand 100 mm; Fülldrücke 0,25 bar, 1 bar und 2 bar)

5.2.3. Druckanstieg

Der Einfluss der Kunststoffverdampfung auf den maximalen Druckanstieg in Luft (bezogen auf den Fülldruck) nimmt mit steigendem Fülldruck absolut zu (Abbildung 5.9). Es bilden sich unterschiedliche Niveaus in Abhängigkeit vom Fülldruck aus. Bei 250 mbar Fülldruck liegt der maximale Druckanstieg zwischen 1,6 und 2,1 bar, für Versuche bei 1 bar zwischen 3,1 und 3,6 bar und bei einem Fülldruck von 2 bar zwischen 3,9 und 4,9 bar.

Betrachtet man jedoch die Änderung des Druckanstiegs infolge der Kunststoffverdampfung bezogen auf den Mittelwert der Versuche ohne Kunststoffbeteiligung bei identischer Energieeinspeisung und beim jeweiligen Fülldruck, so zeigt sich keine systematische fülldruckabhängiges Verhalten (Abbildung 5.10). Bei den Versuchen mit Epoxidharz ist die bezogene Änderung des Druckanstiegs gering. Dieses kann auf die komplexen Molekülketten im Epoxidharz zurückgeführt werden, die nicht so leicht zu zersetzten sind [Loh95]. Bei den Ther-

moplasten und Silikon ist aufgrund der Streubandes eine systematische Fülldruckabhängigkeit nicht erkennbar.

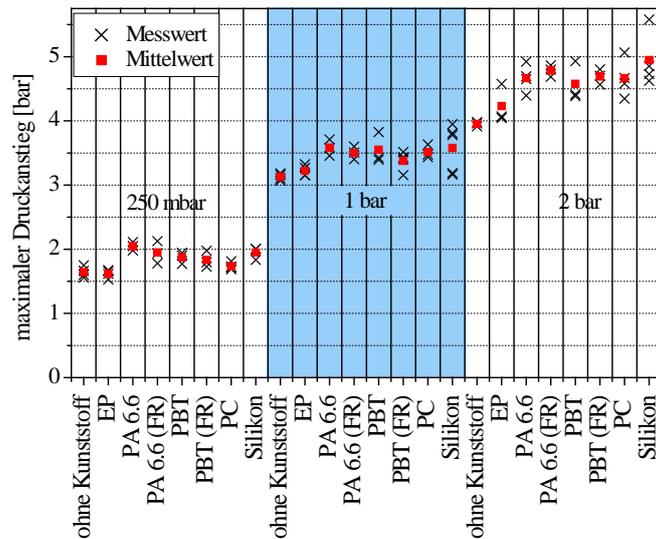


Abbildung 5.9: Maximaler Druckanstieg im Versuchsgefäß (bezogen auf den Fülldruck) mit und ohne Kunststoffverdampfung bei unterschiedlichen Fülldrücken und identischem Energieeintrag

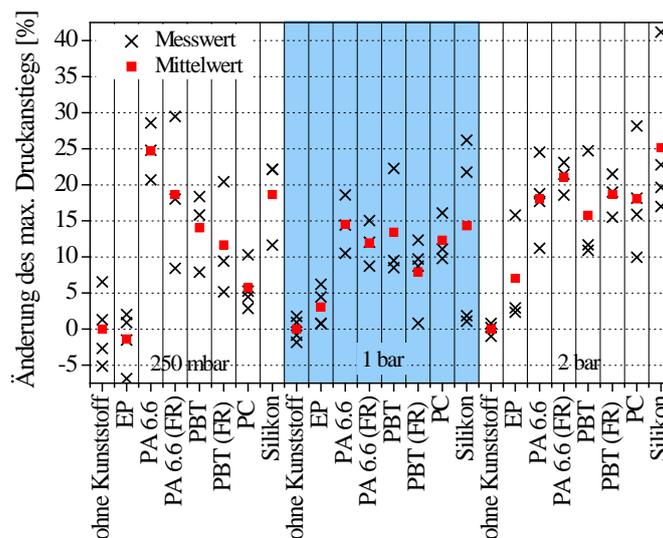


Abbildung 5.10: Änderung des Druckstiegs im Versuchsgefäß bezogen auf den Mittelwert der Werte ohne Kunststoffbeteiligung beim jeweiligen Fülldruck und identischem Energieeintrag

Betrachtet man den maximalen Druckanstieg bei gleichzeitiger Verdampfung zweier verschiedener Kunststoffe, so ist zu erkennen, dass die Messwerte im Mittel meist geringfügig unterhalb der einzelnen Erwartungswerte liegen (Abbildung 5.11). Die Erwartungswerte befinden sich jedoch im Streuband der Messwerte. Aufgrund der Lichtbogenbewegung ist auch hier die größere Streuung der Einzelwerte durch die ungleichmäßige Beanspruchung der beteiligten Kunststoffe bedingt.

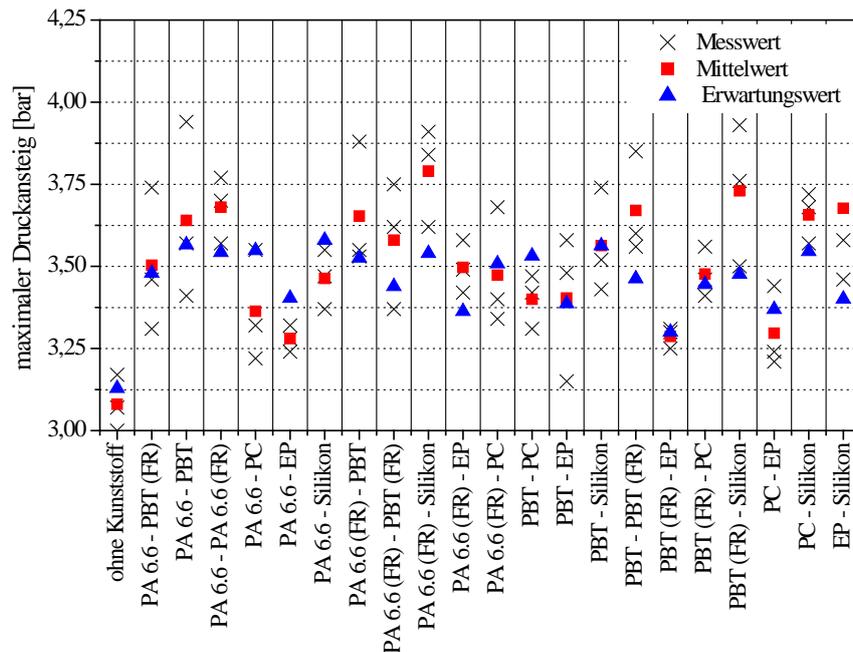


Abbildung 5.11: Maximaler Druckanstieg im Versuchsgefäß bei unterschiedlichen Kunststoffkombinationen ($W_{el} \sim 180 \text{ kJ}$, $P_{\text{füll}} = 1 \text{ bar}$, Luft)

Bei der Verdampfung von PBT in den alternativen Isoliergasen ist ebenso wie in Luft im Mittel ein Anstieg des maximalen Überdrucks zu verzeichnen. Aufgrund der stark unterschiedlichen Druckanstiege in den verschiedenen Gasen wird an dieser Stelle auf die Darstellung der einzelnen Werte verzichtet und erst im folgenden Kapitel (5.2.4) im Zusammenhang mit dem k_p -Faktors diskutiert.

5.2.4. Berücksichtigung bei Druckberechnungen

Um den Einfluss der Kunststoffverdampfung auf den Druck im Versuchsgefäß zu erfassen wird hier der Ansatz verfolgt, diesen über den Transferkoeffizienten zu berücksichtigen. Hierzu wird zuerst wie in Kapitel 1.2 beschrieben der k_p -Faktor in Abhängigkeit vom Fülldruck (der Gasdichte) mit und ohne Kunststoffverdampfung bestimmt.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.12 und Abbildung 5.13 enthalten, in Abbildung 5.12 sind die k_p -Werte mit Silikon- und Epoxidharzverdampfung und in Abbildung 5.13 sind die k_p -Werte mit Lichtbogeneinwirkung auf die Thermoplaste.

Durch die jeweiligen ermittelten Werte sind Näherungskurven gezeichnet. In allen Fällen steigt der k_p -Faktor mit dem Fülldruck an, die Steigung nimmt jedoch mit zunehmendem Druck ab. Der absolute Einfluss der Kunststoffverdampfung auf den k_p -Wert erhöht sich mit steigendem Fülldruck.

Die k_p -Werte mit Silikonverdampfung befinden sich deutlich oberhalb der Werte ohne Kunststoffbeteiligung, diejenigen mit Epoxidharzverdampfung befinden sich nahe bei den Werten ohne Kunststoffverdampfung.

Die k_p -Werte mit Verdampfung von Thermoplasten sind zu Gunsten der Übersichtlichkeit zu beiden Seiten vom Fülldruck verschoben eingetragen. Aufgrund des engen Streubandes ist eine Unterscheidung bei den einzelnen Thermoplasten nicht erforderlich. Sie liegen zwischen den k_p -Werten mit Epoxidharz- und mit Silikonbeteiligung.

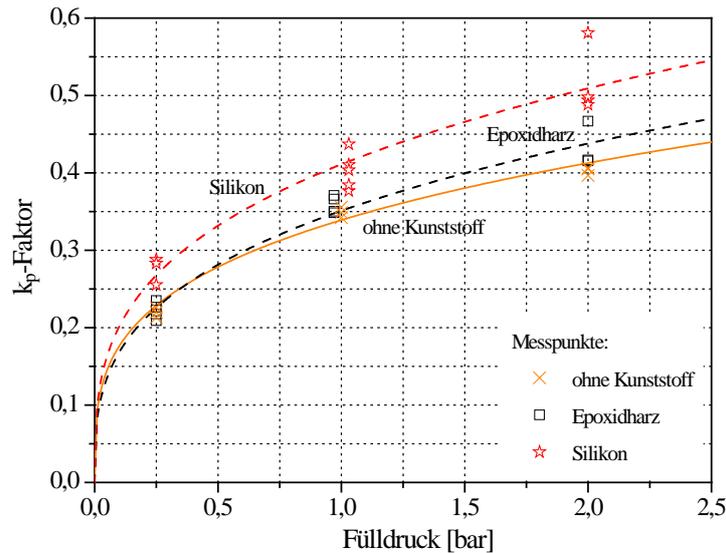


Abbildung 5.12: k_p -Werte in Luft mit EP- bzw. Silikonverdampfung sowie ohne Kunststoffbeteiligung in Abhängigkeit vom Fülldruck ($W_{el} \sim 180$ kJ)

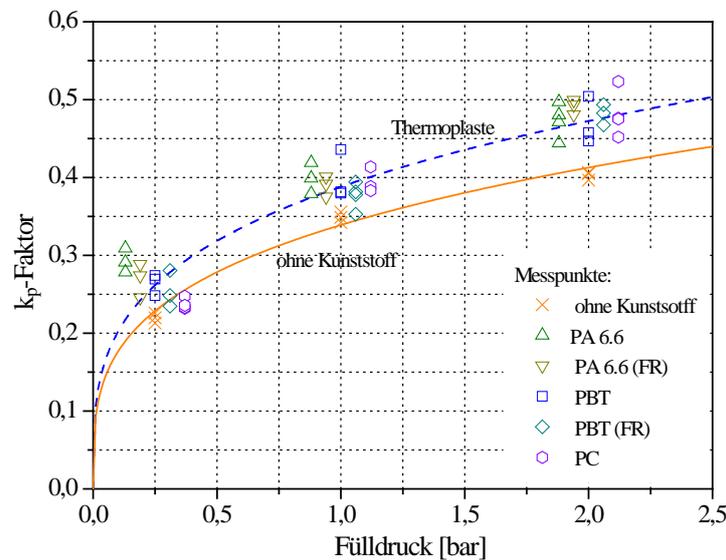


Abbildung 5.13: k_p -Werte in Luft mit Verdampfung von Thermoplasten sowie ohne Kunststoffbeteiligung in Abhängigkeit vom Fülldruck ($W_{el} \sim 180$ kJ)

Die k_p -Faktoren von Versuchen mit Kunststoffkombinationen in Luft weisen ebenfalls höhere Werte auf als diejenigen von Versuchen ohne Kunststoffbeteiligung. Es gibt keine Anzeichen von chemischen Wechselwirkungen (endo- oder exotherme Reaktionen) zwischen den Kunststoffdämpfen, die auf einen Einfluss auf die Druckentwicklung hinweisen. – Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.14 enthalten. Die Kombination EP mit PC sticht mit den im Mittel geringsten thermischen Transferkoeffizienten erneut hervor. Ebenfalls auffällig sind die Ergebnisse mit Silikonbeteiligung, die abermals die höheren Werte und die größte Streuung aufweisen.

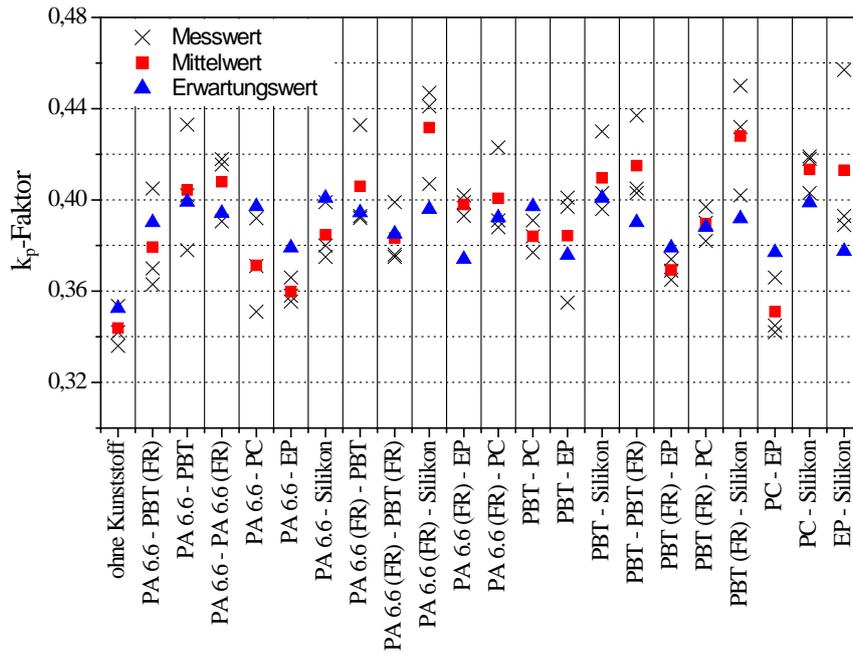


Abbildung 5.14: k_p -Werte von Versuchen mit und ohne Verdampfung unterschiedlicher Kunststoffkombinationen ($W_{el} \sim 180$ kJ, $P_{füll} = 1$ bar, Luft)

Die k_p -Werte mit und ohne PBT-Verdampfung in unterschiedlichen Isoliergasen sind in Abbildung 5.15 wiedergegeben. - In den betrachteten Isoliergasen sind die k_p -Werte mit PBT-Verdampfung größer als ohne. Bei SF_6 fällt diese Erhöhung geringer aus. Der Mittelwert befindet sich im Streuband der Werte ohne PBT-Verdampfung.

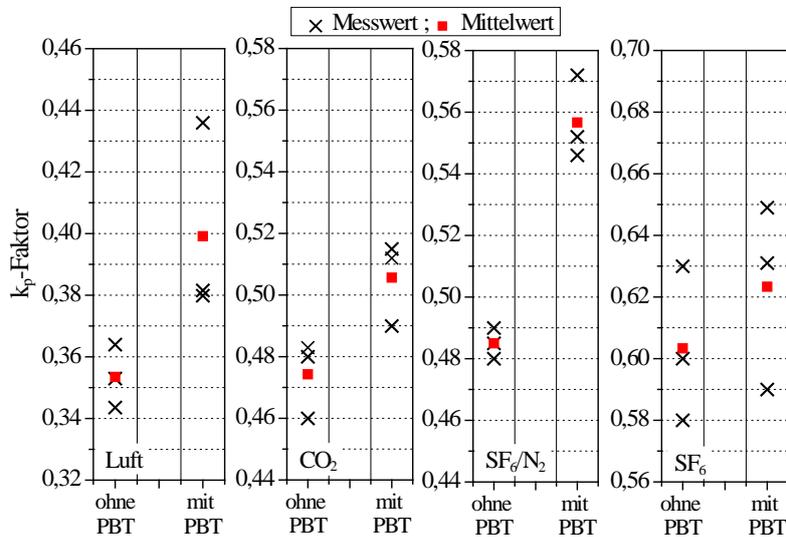


Abbildung 5.15: k_p -Werte von Versuchen in den Gasen Luft, CO_2 , SF_6/N_2 und SF_6 mit und ohne Lichtbogeneinwirkung auf PBT ($W_{el} \sim 180$ kJ)

Veränderung des k_p -Faktors

Um die Auswirkungen der Kunststoffverdampfung in Druckberechnungsverfahren über den k_p -Faktor unmittelbar berücksichtigen zu können, wird die Veränderung des k_p -Faktors infolge der Kunststoffverdampfung ermittelt. Diese Veränderung wird als hier Δk_p bezeichnet:

$$\Delta k_p [\%] = \frac{k_p \text{ mit Kunststoffverdampfung} - \bar{k}_p \text{ ohne Kunststoffverdampfung}}{\bar{k}_p \text{ ohne Kunststoffverdampfung}} \times 100$$

In Abbildung 5.16 sind diese Werte von Einzelversuchen sowie deren Mittelwerte bei verschiedenen Fülldrücken angegeben. Die EP-Verdampfung hat den geringsten Einfluss auf die Druckerhöhung. Δk_p liegt hier zwischen 2 und 8 %.

Bei der PA-Verdampfung beträgt Δk_p zwischen 13 % und 33 % und bei PA (FR)-Verdampfung zwischen 10 % und 24 %. Die Versuche mit PBT und PBT (FR)-Verdampfung weisen unabhängig vom Fülldruck eine Erhöhung zwischen 13 % und 20 % auf. Versuche mit PC-Verdampfung ergeben durchgehend einen Anstieg von 6 % bis 13 %. Bei Silikon-Verdampfung wird der k_p -Wert durchschnittlich um 14 % bis 28 % größer.

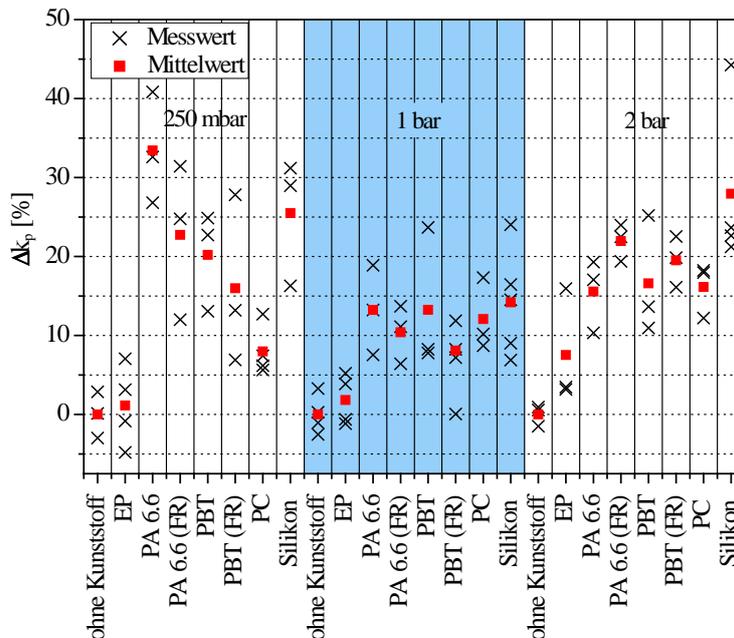


Abbildung 5.16: Änderung des k_p -Wertes (Δk_p) im geschlossenen Versuchsgefäß unter Einfluss der Verdampfung verschiedener Kunststoffe bei Variation des Fülldrucks in Luft

Zusammenfassend sind in Abbildung 5.17 die Mittelwerte der Δk_p -Werte (Änderung des k_p -Faktors) von Versuchen mit Kunststoffbeteiligung in Luft bei verschiedenen Fülldrücken im Versuchsgefäß dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich die Δk_p -Werte bei einem Fülldruck nicht durchgehend oberhalb oder unterhalb der Mittelwerte bei allen Fülldrücken mit einem Kunststofftyp in Luft befinden. Damit kann man keine systematische Abhängigkeit vom Fülldruck erkennen. Auch hier wird deutlich, dass die Verdampfung von EP die geringste k_p Änderung bewirkt.

Der mittlere Einfluss der Verdampfung von Kunststoffen kann daher folgendermaßen zusammengefasst werden:

Tabelle 7: Mittleres Δk_p für verschiedene Kunststoffgruppen

Kunststoff	Epoxidharz	Thermoplaste	Silikon
Mittlerer Δk_p Wert	3,5 %	16,5 % (12,0 % - 22,1 %)	22,5 %

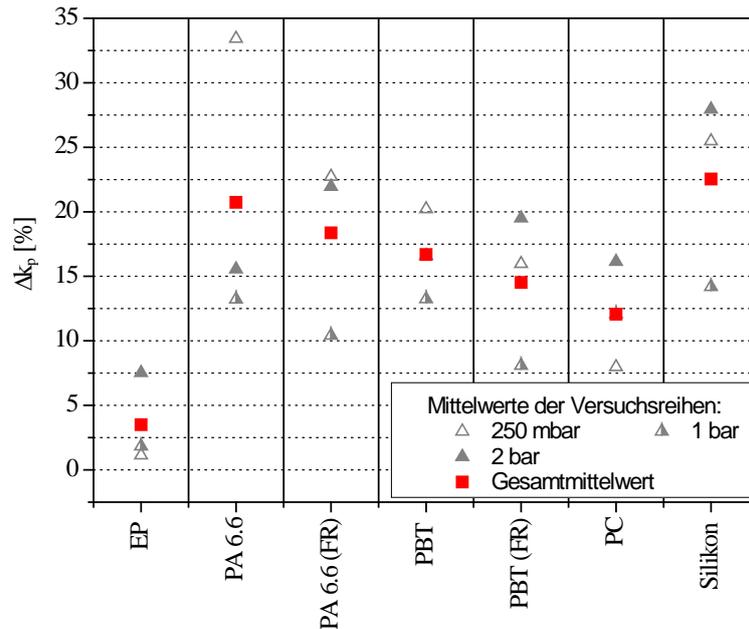


Abbildung 5.17: Mittelwerte der Δk_p -Werte (Änderung des k_p -Faktors) von Versuchen mit Kunststoffbeteiligung in Luft bei verschiedenen Fülldrücken im geschlossenen Versuchsgefäß

Diese Werte gelten bei intensiver Lichtbogeneinwirkung auf den Kunststoff (bestimmt bei einer Lichtbogenenergien von ca. 200 kJ).

Als Ergänzung sind in Abbildung 5.18 die Δk_p -Werte von Versuchsreihen mit Kunststoffkombinationen aufgeführt. Die verschiedenen Kombinationen von EP und PC mit PA und PBT weisen die geringsten Δk_p -Werte auf, die Mittelwerte betragen alle weniger als 17 %. Die höheren Δk_p -Werte erhält man mit Silikonbeteiligung bei meistens einer großen Streuung. Die mittleren Δk_p -Werte betragen hier zwischen 12 % und 25 %.

Die Änderung des k_p -Faktors bei der Verdampfung von PBT in alternativen Isoliergasen ist Abbildung 5.19 zu entnehmen.

In CO_2 ist der mittlere Δk_p -Werte etwa halb so groß und im SF_6/N_2 -Gemisch in derselben Größenordnung wie in Luft. In SF_6 fällt der Anstieg des k_p -Wertes deutlich geringer aus. Der Mittelwert der Δk_p -Werte mit PBT-Verdampfung befindet sich im Streuband derjenigen ohne PBT-Verdampfung.

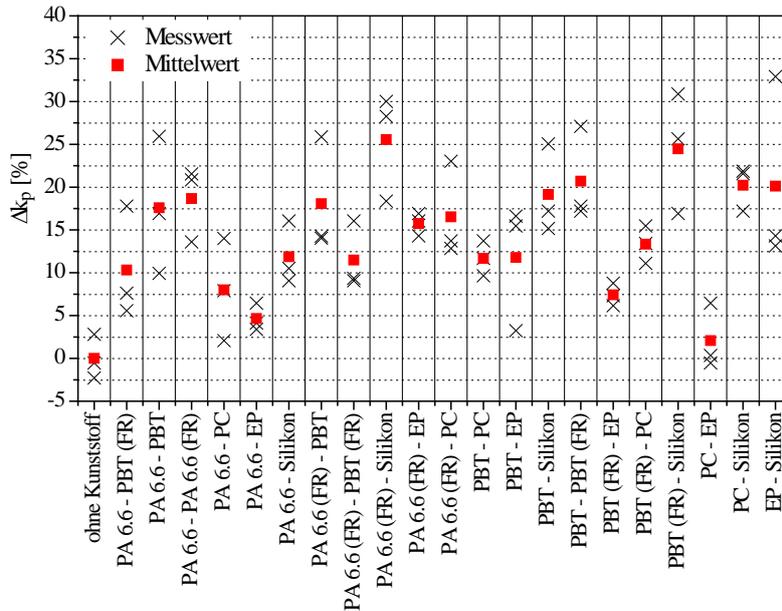


Abbildung 5.18: Änderung des k_p -Wertes (Δk_p) bei Versuchen mit Verdampfung von Kunststoffkombinationen im geschlossenen Versuchsgefäß (Luft 1 bar)

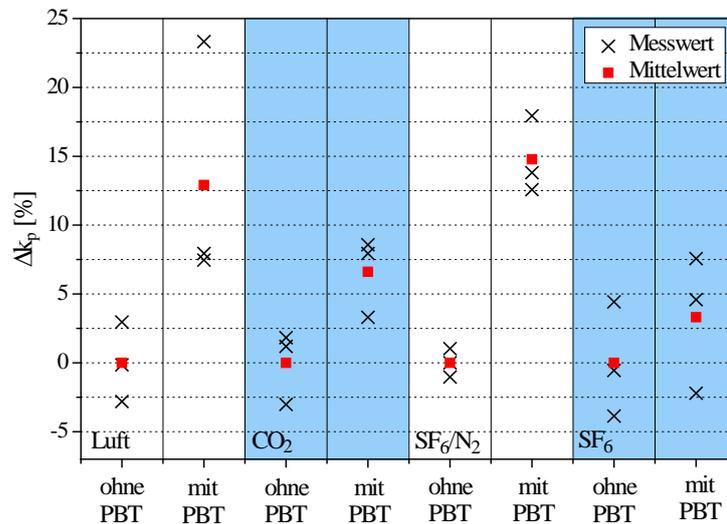


Abbildung 5.19: Änderung des k_p -Wertes mit und ohne Verdampfung von PBT in verschiedenen Isoliergasen im geschlossenen Versuchsgefäß (Fülldruck 1 bar)

5.2.5. Kunststoffverdampfung bei erhöhter Energieeinspeisung

Bisher sind Untersuchungen bei Prüfstromamplituden von bis zu 35 kA (bei einer Lichtbogenbrennspannung von circa 400 V) erfolgt. Die maximale Versuchsdauer betrug etwa 40 ms (entsprechend vier Halbschwingungen bei 50 Hz) mit exponentiell abklingender Stromamplitude. Um den Einfluss erhöhter Energieeinspeisung exemplarisch mit PBT und PBT (FR) zu untersuchen, wurde die elektrisch gespeicherte Energie der Kondensatorbank nahezu verdoppelt. Die maximale Versuchsdauer bei gleicher maximaler Stromamplitude wird auf circa 80 ms bei 400V Lichtbogenbrennspannung erhöht sowie der exponentielle Abfall der Stromamplitude reduziert. Siehe beispielhaft der Stromverlauf im Kurzschlussfall in Abbildung 5.20.

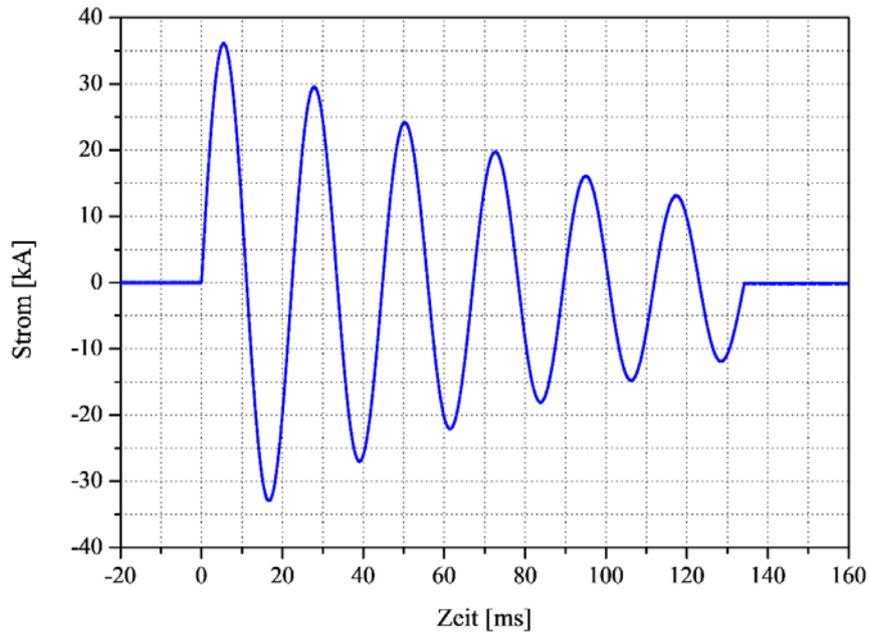


Abbildung 5.20: Kurzschlussstrom mit erweiterter Kondensatorbank

Durch die Erweiterung der Kondensatorbank konnte die im Lichtbogen elektrische umgesetzte Energie von 180 kJ auf 315 kJ erhöht werden.

Abbildung 5.21 zeigt zunächst den maximalen Druckanstieg im Prüfgefäß bei verschiedenen Energien ohne Kunststoffverdampfung. Es ist ein nahezu energieproportionaler Druckanstieg zu erkennen. Des Weiteren ist rechts der k_p -Faktor dargestellt. Es ist kein Einfluss der Energievariation auf den k_p -Faktor erkennbar, siehe Abbildung 5.21.

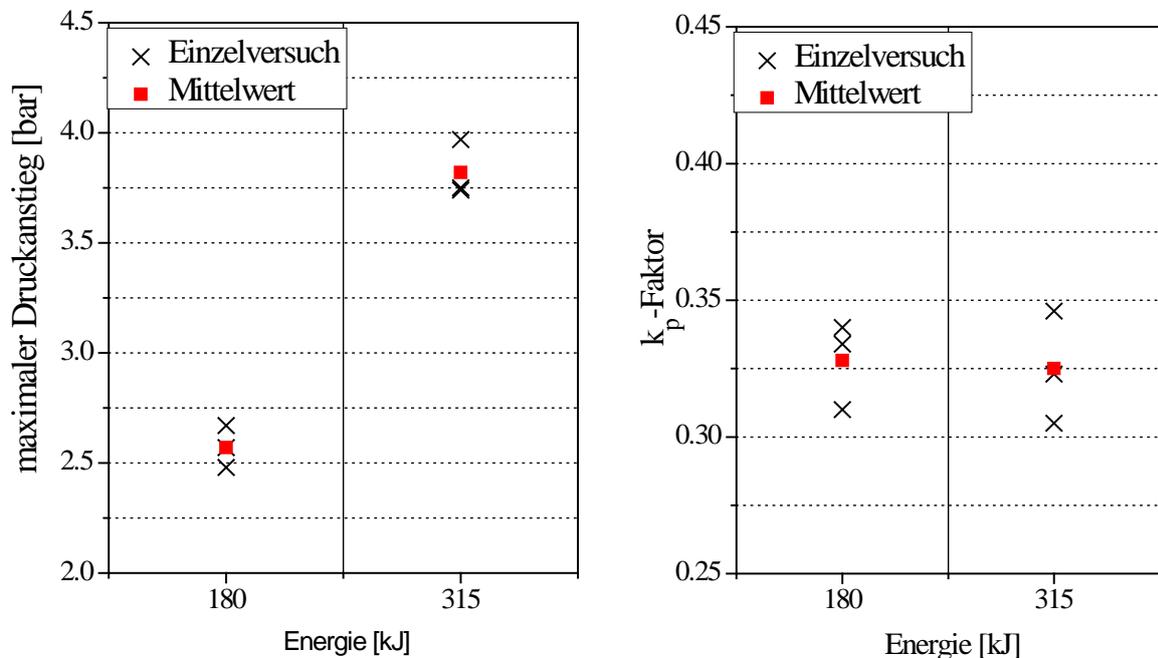


Abbildung 5.21: Maximaler Druckanstieg und k_p -Faktor im Prüfgefäß ohne Kunststoffverdampfung in Abhängigkeit von der elektrischen Energie (bei 1 bar Luft)

Bei den Untersuchungen zur Kunststoffverdampfung wird zunächst der Masseverlust der einzelnen Kunststoffe betrachtet. Hierzu werden Versuche bei verschiedenen Lichtbogenenergien durchgeführt.

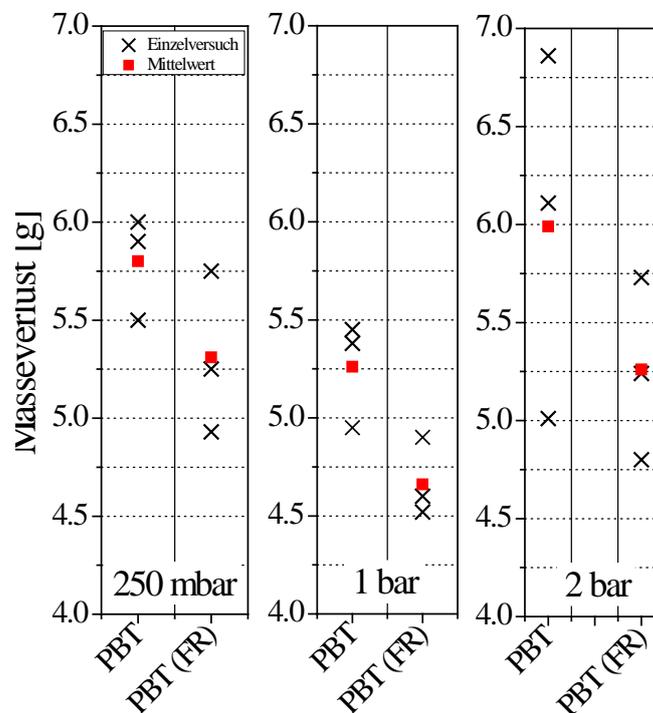


Abbildung 5.22: Masseverlust von PBT und PBT (FR) bei verschiedenen Fülldrücken

Bei PBT steigt der Mittelwert des Masseverlusts bei Erhöhung der Energie auf 315 kJ um 118 %. Für PBT (FR) ergibt sich dazu im Mittel eine Steigerung von 119 %. Der höhere Masseverlust bei der größeren Energie kann u.a. mit der verstärkten Zersetzung der Kunststoffpolymere durch Strahlung bei der nahezu doppelt so langen Lichtbogendauer begründet werden. Weiterhin ist auch hier zu erkennen, dass die Zugabe von Flammenschutzmitteln einen reduzierten Masseverlust im Störlichtbogenfall zur Folge hat.

Des Weiteren werden durch Auswertung von Druckmessungen der maximale Druckanstieg sowie der k_p -Faktor bei dem höheren Energieeintrag bestimmt. Versuche ohne Kunststoffbeteiligung weisen – bei allen Fülldrücken – den geringsten Druckanstieg auf, siehe Abbildung 5.23. Der größte Druckanstieg tritt bei Verwendung von PBT auf. Bei Verwendung von PBT (FR) ist das Druckmaximum sowohl bei 180 kJ als auch bei 315 kJ im Mittel 6 % geringer. Die Druckmessungen mit PBT bei einem Fülldruck von 250 mbar sind nicht auswertbar. Die bestimmten k_p -Faktoren (Abbildung 5.24) ergeben sich aus den Druckmessungen wie in Abbildung gezeigt.

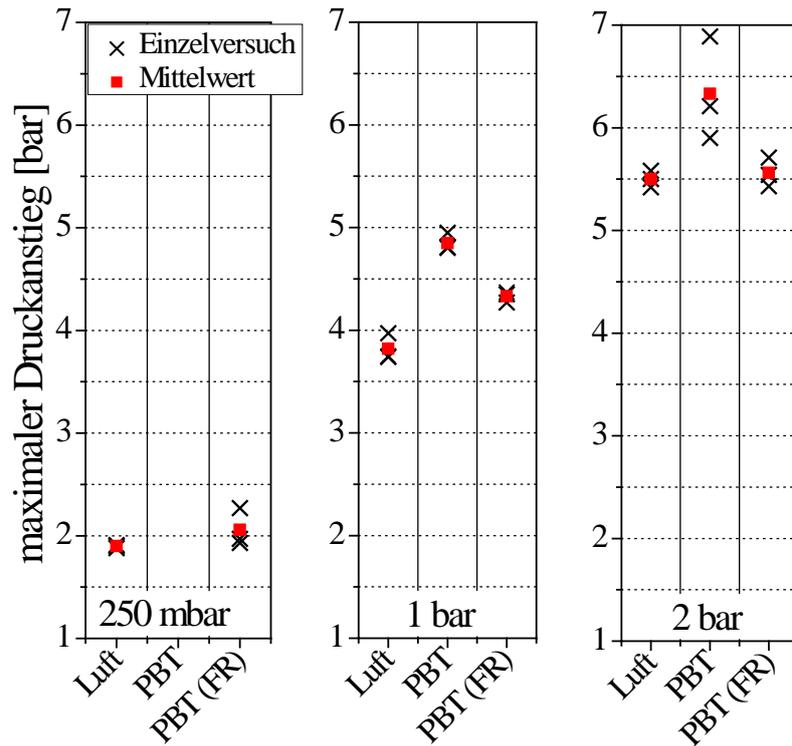


Abbildung 5.23: Maximaler Druckanstieg mit und ohne Kunststoffe in Abhängigkeit des Fülldrucks (315 kJ)

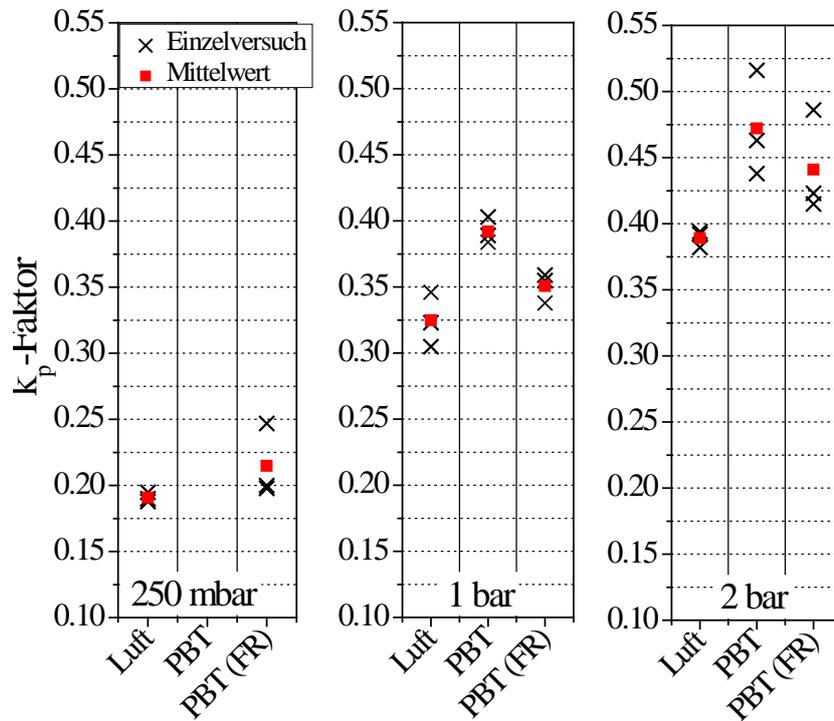


Abbildung 5.24: k_p -Faktor mit und ohne Kunststoffe in Abhängigkeit des Fülldrucks (315 kJ)

Um auch hier die Auswirkungen der Kunststoffverdampfung in Druckberechnungsverfahren über den k_p -Faktor unmittelbar berücksichtigen zu können, wird die Veränderung des k_p -Faktors infolge der Kunststoffverdampfung analog zum vorherigen Kapitel ermittelt, siehe Abbildung 5.25. Die Δk_p -Werte sind tendenziell leicht höher befinden sich jedoch im Streuband.

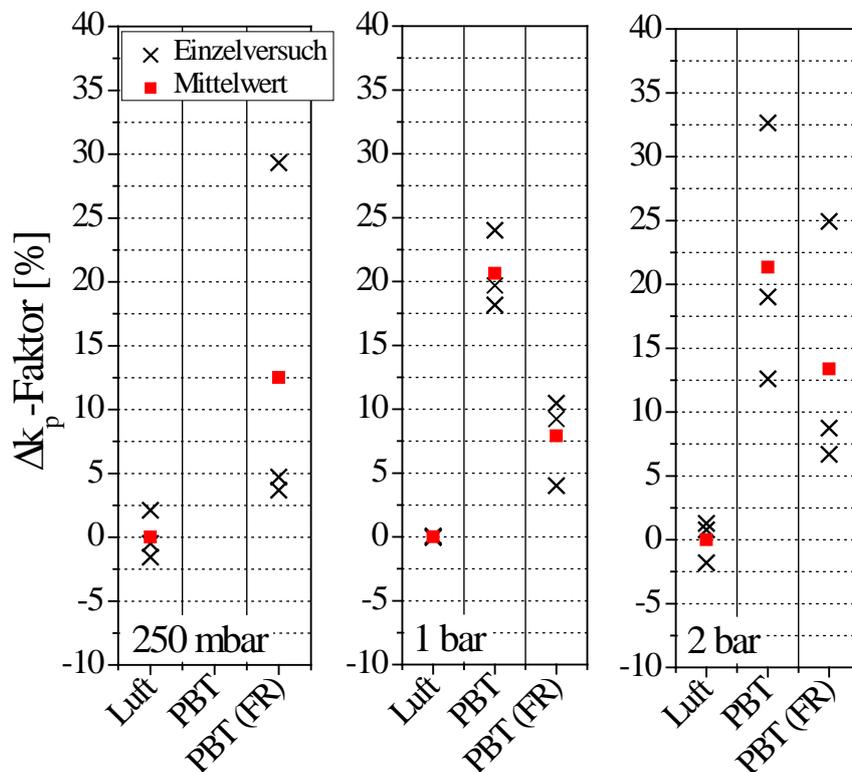


Abbildung 5.25: Δk_p -Faktor mit und ohne Kunststoffe in Abhängigkeit des Fülldrucks (315 kJ)

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass bei einer Verdoppelung des Energieumsatzes keine signifikante die Änderung des Wertes des k_p -Faktors für Luft als Isoliermedium als auch bei Verdampfung von PBT fest zu stellen ist, d. h. dass Druckberechnungen wie in Kapitel 5.2.4 beschrieben auch bei größerem Energieumsatz durchgeführt werden können.

5.3. Wirkung von Energieabsorbern (Forschungsstelle 2)

Um die Wirkung von Energieabsorbern auf die Druckentwicklung angeben zu können, muss der Wirkungsgrad und der Strömungswiderstand bzw. die effektive Öffnung bestimmt werden.

5.3.1. Wirkungsgrad

Der Gitterwirkungsgrad (η) ist hier definiert als Quotient der vom Absorber aufgenommenen Energie ($W_{abs} = m \cdot c \cdot \Delta T$) zu dem Anteil der elektrischen Energie, der in den Druckaufbau geht ($k_p \cdot W_{el}$):

$$\eta = \frac{W_{abs}}{k_p \cdot W_{el}} \quad (5.1)$$

Um η angeben zu können, ist also der Temperaturanstieg des Absorbers zu messen und der k_p -Faktor zu bestimmen.

Temperaturmessung

Bei der Temperaturmessung sind allen Messsignalen elektromagnetische Störungen überlagert. Abbildung 5.26 zeigt beispielhaft Temperaturmessungen mit und ohne Schirmung (Faradayscher Käfig um den Absorber mit durchgängiger Schirmung bis zur Auswerteeinheit). Trotz Schirmung haben sich Störungen in den ersten 100 ms nicht vollständig unterdrücken lassen. Daher ist es notwendig, den Temperaturverlauf im gestörten Bereich festzulegen.

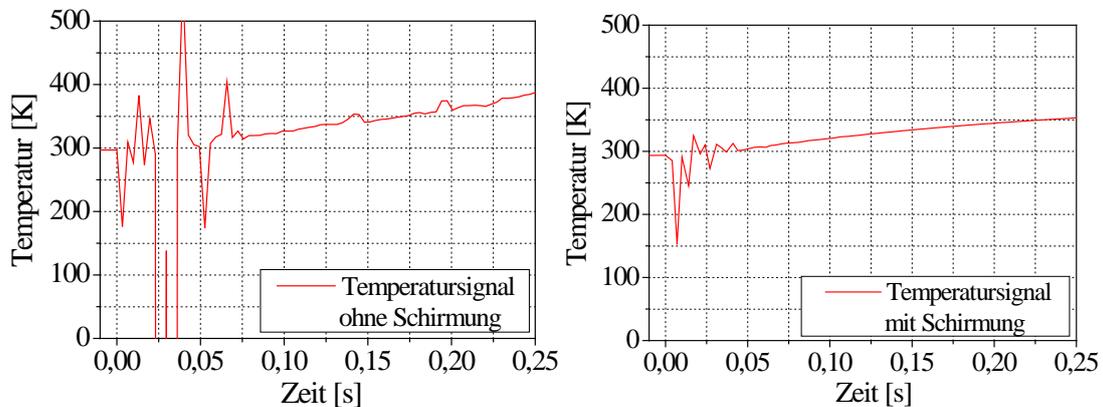


Abbildung 5.26: Typische gemessene Temperatur-Signalverläufe ohne (links) und mit Schirmung (rechts)

Hierzu werden zwei Stützpunkte benötigt. Der erste Stützpunkt ist der Anfangszeitpunkt des Temperaturanstiegs. - Das heiße Gas braucht eine gewisse Zeit, ehe es vom Lichtbogenort zum Absorber gelangt ist, d. h. der Temperaturanstieg beginnt nicht schon mit Zünden des Lichtbogens (Beginn der Messung).

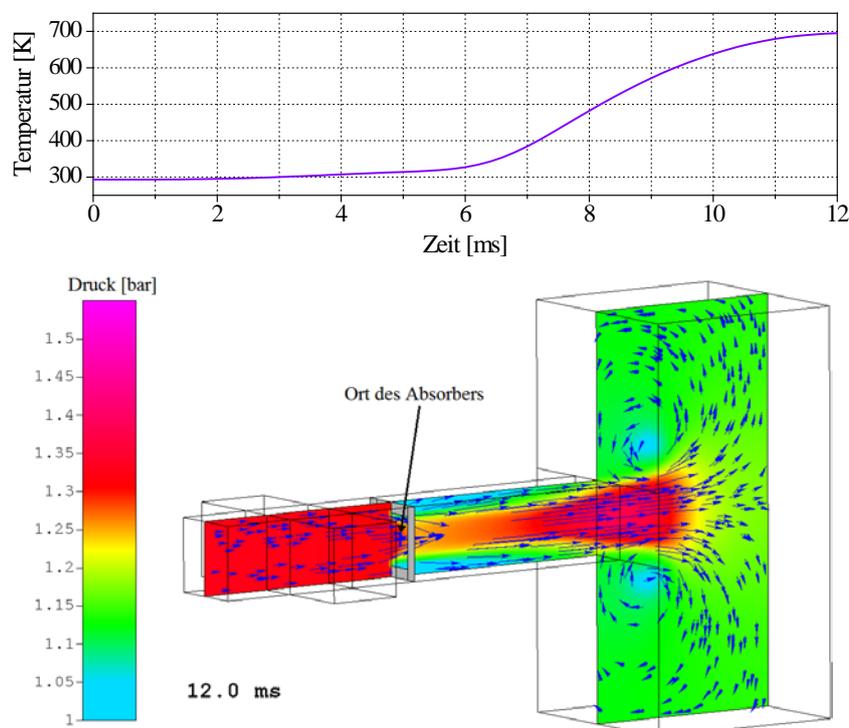


Abbildung 5.27: Berechneter Temperaturverlauf mittig am Ort des Absorbers in den ersten 12 ms nach Lichtbogenzündung (oben) sowie die Druck- und Temperaturverteilung in der Versuchsanordnung zum Zeitpunkt 12 ms (unten)

Zur Ermittlung dieses Stützpunktes wird eine CFD-Simulation durchgeführt. In Abbildung 5.27 (oben) ist der Temperaturverlauf des ausströmenden Gases mittig am Ort des Absorbers sowie die Druckverteilung und Strömungsrichtung in einer zentralen Schnittebene durch

die Versuchsanordnung 12 ms nach Zündung des Lichtbogens gezeigt. Die Farben repräsentieren den absoluten Druck. Die Pfeile geben die Richtung der Gasströmung an, die Pfeillänge ist proportional zur Gasgeschwindigkeit.

Anhand der in der Grafik abgebildeten Temperaturkurve lässt sich der Beginn des Temperaturanstiegs angeben (hier ca. 6 ms nach Lichtbogenzündung).

Der zweite Stützpunkt im Temperaturverlauf ist so festgelegt, dass er im ungestörten Bereich des Messsignals liegt. Zur Bestimmung des Störungsendes wird die erste Ableitung des Signals betrachtet. Der Zeitpunkt, ab dem die Ableitung nur geringe Änderungen aufweist, d.h. hochfrequente Störungen im Messsignal (starke Änderungen in der Ableitung) nicht mehr vorhanden sind, wird als Ende der Messstörung definiert.

Da der Absorber den Druck im Schaltanlagenraum (Entlastungsraum) reduzieren soll, ist nur die Zeitspanne bis zum Erreichen des Druckmaximums im Entlastungsraum für die druckreduzierende Wirkung von Bedeutung. Auf Grund von Druckwellen und Messrauschen ist es jedoch nicht möglich, den exakten Zeitpunkt des Druckmaximums im Entlastungstank zu bestimmen.

Das Druckmaximum tritt in der Versuchsanordnung im Allgemeinen ungefähr zum Zeitpunkt der Lichtbogenlöschung auf, d. h. bei ca. 50 ms, siehe Abbildung 5.28.

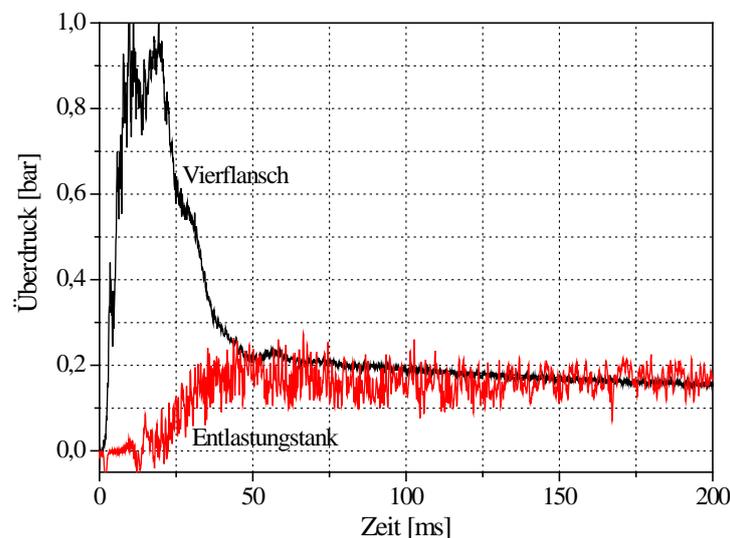


Abbildung 5.28: Typischer gemessener Druckverlauf im Lichtbogen- und Entlastungsraum

Daher wird für die Bestimmung der Temperaturzunahme des Absorbers die Temperaturänderung bis 50 ms nach Lichtbogenzündung betrachtet. Aufgrund der Schirmung sind die Störungen in der Temperaturmessung von so kurzer Dauer, dass eine einfache lineare Interpolation zwischen den beiden Stützpunkten gute Ergebnisse liefert.

Bestimmung des k_p -Faktors

Zur Bestimmung des Gitterwirkungsgrads muss ferner der Anteil der elektrischen Energie, der in den Druckaufbau geht, ermittelt werden. Da sich der k_p -Faktor mit der jeweiligen Gasdichte im Fehlerraum ändert, muss auch der zeitliche k_p -Verlauf berücksichtigt werden.

Hierzu wird der k_p -Verlauf, mit Zugrundelegung des gemessenen dichteabhängigen k_p -Faktors, mit dem erweiterten Standardverfahren bestimmt. Da das vom Lichtbogen erhitzte Gas während der Fehlerdauer aus dem Vierflansch ausströmt, nimmt die Gasdichte im Fehlerraum und somit der Wert des k_p -Faktors mit der Zeit ab (Abbildung 5.29) beispielhaft für eine effektive Öffnung von 42 % in der gegebenen Anlage.

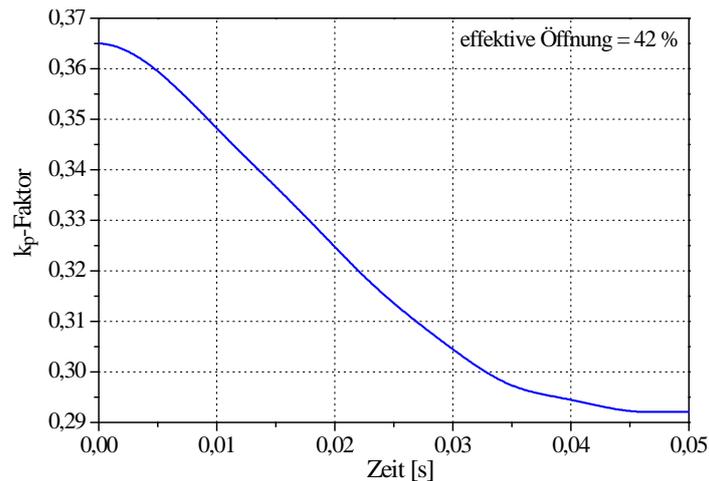


Abbildung 5.29: Zeitlicher Verlauf des k_p -Faktors – beispielhaft für die gegebenen Randbedingungen

Aus diesem Verlauf wird ein gemittelter k_p -Faktor zur Bestimmung des Gitterwirkungsgrades bestimmt. Die Mittelung erfolgt nicht arithmetische (linear) sondern gewichtet über die elektrische Leistung zum jeweiligen Zeitpunkt und daher fällt der größere k_p -Wert zu Beginn der Lichtbogenbrenndauer stärker ins Gewicht:

$$\bar{k}_p = \frac{\int P_{elek}(t) \cdot k_p(\rho(t)) dt}{W_{elek}} \quad (5.2)$$

Dieses wurde für verschiedene effektive Öffnungen durchgeführt. In Abbildung 5.30 sind die gemittelten k_p -Werte über die effektive Öffnung aufgetragen.

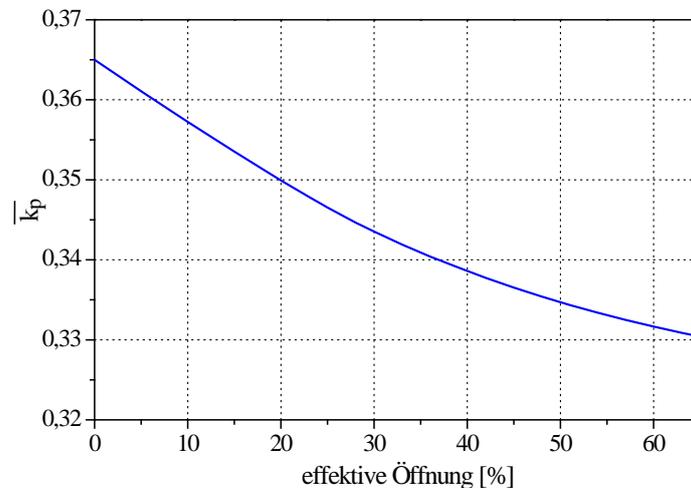


Abbildung 5.30: Zeitlicher gemittelter k_p -Faktor in Abhängigkeit der effektiven Öffnung – beispielhaft für die gegebenen Randbedingungen

Mit den so bestimmten k_p -Werten ist der Gitterwirkungsgrad einlagiger Absorber bestimmt worden und zwar für eine Zeitspanne von der Zündung des Lichtbogens bis zum Erreichen des Druckmaximums im Entlastungstank bei 50 ms (Tabelle 8):

Tabelle 8: Gitterwirkungsgrade der verschiedenen (einlagigen) Absorbertypen im untersuchten Versuchsgefäß (lichtbogennaher Einbauort, Wel ~ 180 kJ)

	Typ A	Typ B	Typ C	Typ D
	(kl. Raute)	(gr. Raute)	(Lochblech)	(Waben)
Gitterwirkungsgrad	0,83 %	0,86 %	0,79 %	12,12 %

Auffallend ist, dass der Absorbentyp D (Wabenabsorber) einen vergleichsweise hohen Wirkungsgrad aufweist. Dies ist durch seine große Masse und Oberfläche zu erklären. Als Temperaturanstieg wird hier die gemittelte Temperatur am Gaseintritt und Gasaustritt des Absorbers verwendet.

Um mit Streckmetallen einen höheren Wirkungsgrad zu erzielen, werden die Absorber üblicherweise mehrlagig aufgebaut. In der folgenden Untersuchung werden Absorber des Typs A, B, und C mit Lagenanzahlen eins, zwei, drei und sechs sowie den Lagenabständen 0 und 5 mm in gedreht/versetzter Anordnung verwendet. Da die Temperaturmessung aufgrund der begrenzten Abtastrate nur an drei Absorberlagen gleichzeitig mit ausreichender Genauigkeit möglich ist, wird bei den sechslagigen Absorbern die Temperaturerhöhung jeder zweiten Lage gemessen.

In Abbildung 5.31 ist beispielhaft der Wirkungsgrad einzelner Lagen eines mehrlagigen Absorbers vom Type C dargestellt. Die vorderen Lagen des Absorberpaketes (am Gaseintritt) haben wesentlich höhere Wirkungsgrade als die hinteren Lagen (am Gasaustritt). Dabei nimmt der Wirkungsgrad insbesondere der ersten Lage mit zunehmender Lagenzahl des Absorbers zu. Dieser Anstieg des Wirkungsgrades lässt sich auf die zunehmende Behinderung des abströmenden Gases und damit mit der höheren Kontaktzeit des Heißgases mit dem Absorber zurückführen.

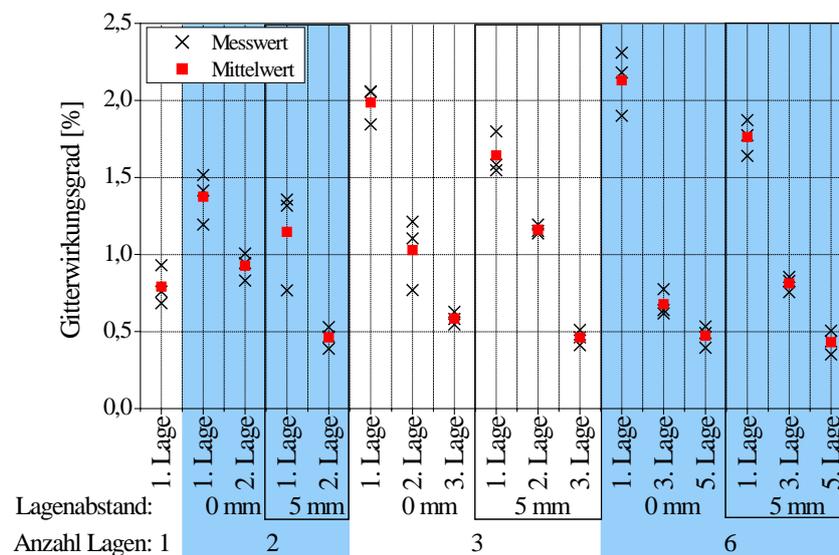


Abbildung 5.31: Gitterwirkungsgrade einzelner Absorberlagen – Absorbentyp C, Abstand der Lagen 0 mm und 5 mm

Zur Berechnung des Gesamtwirkungsgrades des Absorbers werden die Wirkungsgrade der einzelnen Absorberlagen aufsummiert. Da für sechslagige Absorber lediglich die Temperaturerhöhung jeder zweiten Lage gemessen wird, werden die fehlenden Werte durch Regression bestimmt. Abbildung 5.32 zeigt dies exemplarisch für einen sechslagigen Absorber des Typs C mit 5 mm Lagenabstand.

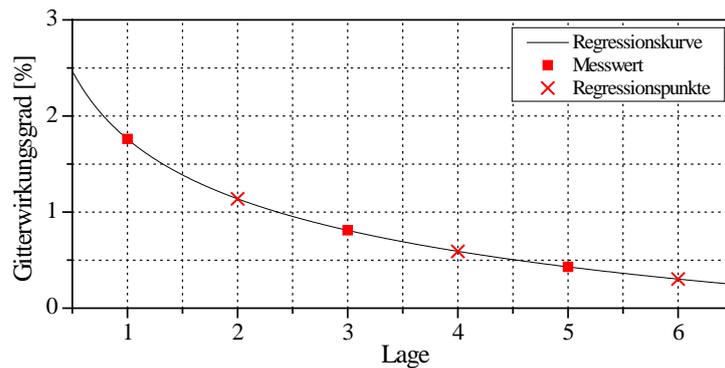


Abbildung 5.32: Wirkungswerte der einzelnen Lagen eines sechslagigen Absorbers vom Typ C mit 5 mm Lagenabstand; fehlende Werte durch Regression bestimmt

Die Gesamtwirkungsgrade aller Streckmetallabsorber sind in Abbildung 5.33 enthalten. Die Werte für die vier- und fünflagigen Absorber wurden durch lineare Interpolation bestimmt. Die Messwerte sind sowohl bei 0 mm als auch 5 mm Lagenabstand bei den verschiedenen Typen bis auf 20 % identisch.

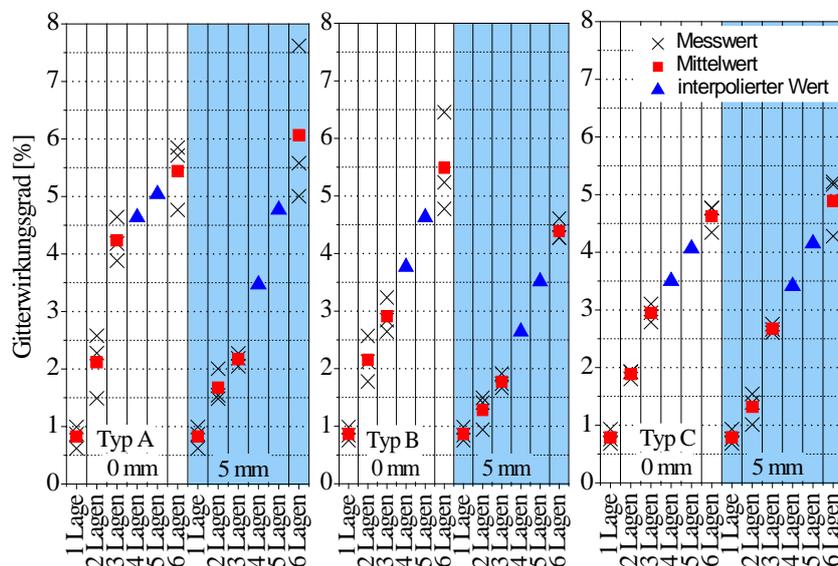


Abbildung 5.33: Gitterwirkungsgrade der ein- bis sechslagigen Absorberanordnungen des Typs A, B und C für die Lagenabstände 0 mm und 5 mm

Aufgrund geometrischer Gegebenheiten ist es nicht immer möglich, den Absorber in direkter Nähe zum Fehlerort zu platzieren. Daher wird der Einfluss der Entfernung zum Lichtbogen am Beispiel eines zweilagigen Streckmetallabsorbers vom Typ A, B und C mit 0 mm Lagenabstand sowie des Wabenabsorbers (Typ D) untersucht. Die Entfernung zum Lichtbogen beträgt bei lichtbogennaher Anordnung ca. 375 mm (in diesem Abstand wurden alle bisherigen Untersuchungen durchgeführt). Bei der lichtbogenfernen Montage beträgt der Abstand ca. 1285 mm. Aufgrund der geringeren Strahlungseinwirkung auf den Absorber und der niedrigeren Gastemperatur beim größeren Abstand nimmt der Gitterwirkungsgrad beim Typ A und C auf etwa 1/5 des Wertes bei lichtbogennahem Einbau ab, beim Typ B auf ca. 1/10 und beim Typ D, dem Wabenabsorber, auf ein 1/3 (Abbildung 5.34). Die Veränderung des Abstands zum Lichtbogen hat somit einen starken Einfluss auf die Größe des Gitterwirkungsgrades.

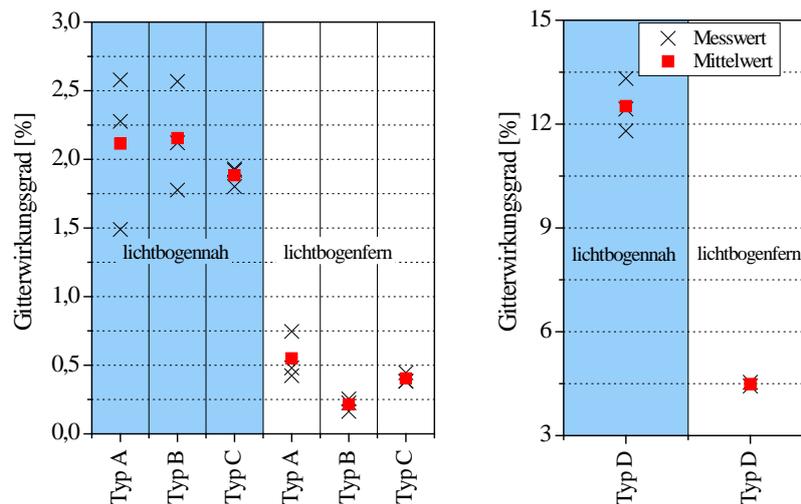


Abbildung 5.34: Gitterwirkungsgrad zweilagiger Absorber mit 0 mm Lagenabstand (Typ A, B und C) und des Typ D bei lichtbogennahem (375 mm) und lichtbogenferner (1285 mm) Anordnung des Absorbers

Ein Vergleich der erzielten Ergebnisse mit Werten aus Veröffentlichungen ist schwierig, weil die Beurteilung des Gitterwirkungsgrades zum Teil aus unterschiedlichen Blickwinkeln und mit unterschiedlichen Kriterien erfolgt und keine einheitliche Definition für die Absorbereffizienz existiert.

Der Wert des Wirkungsgrades hängt von vielen Parametern ab, u.a. von der Größe des Absorbers, von der Entfernung zum Lichtbogenort, von dem Wert des verwendeten k_p -Faktors zur Bestimmung der thermisch eingespeisten Energie und von den räumlichen Gegebenheiten des Gebäudes, die die Zeitspanne bis zum Erreichen des Druckmaximums im Entlastungsraum bestimmen.

Die maximale Temperatur des Absorbers wird erst nach Lichtbogenlöschung erreicht, wenn die Gastemperatur am Ort des Absorbers nicht mehr größer als die Absorbertemperatur ist. Diese Temperatur ist i.d.R. (erheblich) größer als die Temperatur des Absorbers zum Zeitpunkt des Druckmaximums im Aufstellungsraum der Schaltanlage. Dazu ein Beispiel: Wertet man den Versuch mit einem zweilagigen Absorber des Typs C mit 5 mm Lagenabstand bis zum Druckmaximum im Entlastungstank bei 50 ms aus, so erhält man einen Wirkungsgrad von 1,8 % (1,3 % für die erste Lage und 0,5 % für die zweite Lage, siehe Abbildung 5.31). Wird aber das Temperaturmaximum bei ca. 1,2 s genommen, so erhöht sich der Wert auf 15 % (7,9 % für die erste Lage und 7,1 % für die zweite Lage). Die dazugehörigen Temperatur- und Druckverläufe sind in Abbildung 5.35 dargestellt.

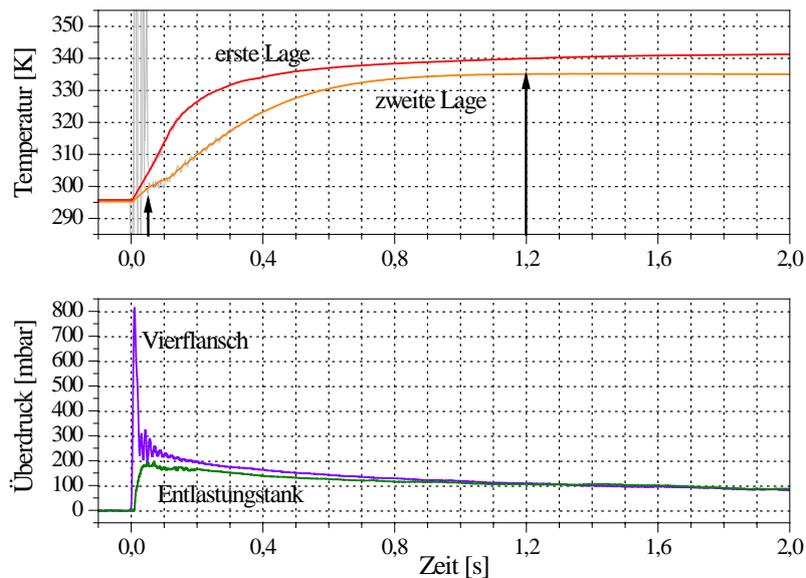


Abbildung 5.35: Gemessener Temperaturverlauf an den Lagen eines zweilagigen Absorbers des Typs C (oben) und die dazugehörigen gemessenen Überdruckverläufe im Vierflansch und im Entlastungstank (unten)

Für die Druckreduzierung ist der Temperaturverlauf bis zum Erreichen des Maximaldrucks im Aufstellungsraum der Schaltanlage von Bedeutung. Der Wirkungsgrad bezogen auf die Maximaltemperatur des Absorbers ist dagegen für thermische Effekte von Interesse, z. B. für das Entflammen von Indikatoren bei Störlichtbogenprüfungen von Schaltanlagen.

Mit den vorliegenden Messergebnissen ist gezeigt worden, dass der Wirkungsgrad steigt, wenn die Gesamtoberfläche des Absorbers vergrößert wird - sei es durch die Oberflächenstruktur des Absorbermaterials oder sei es durch Vervielfachung der Lagenzahl. Der Wirkungsgrad wächst nichtlinear mit der Lagenzahl. Der Zuwachs in der Effizienz wird mit zunehmender Lagenanzahl kleiner.

Eine große Oberfläche weist zum Beispiel der Wabenabsorber (Typ D) auf, die tiefe und wabenförmige Struktur bietet dem Gas eine große Berührungsfläche zur Energieaufnahme. Hinzu kommt die große Masse, die zu einem vergleichsweise geringen Temperaturanstieg und damit zu einem großem Temperaturgradienten zwischen Heißgas und Absorber, d. h. zu einem erhöhten Wärmestrom in den Absorber führt. Ein weiterer Vorteil des Wabenabsorbers ist, dass der bei großer Oberfläche eine große effektive Öffnung hat, sodass die Gasdichte im Fehlerfall schnell abgebaut wird und der Anteil der elektrischen Energie, die in den Druckaufbau geht, im Mittel abnimmt.

5.3.2. Effektive Öffnung

Messmethode

Anstelle des Strömungswiderstandes des Absorbers wird hier die effektive Öffnung bestimmt, die den gleichen Strömungswiderstand hat wie der tatsächliche Absorber. Dazu wird der in Abbildung 4.6 dargestellte Druckbehälter mit Ausströmungsflansch verwendet.

In die Öffnung des Flansches werden die Absorber eingesetzt. Der verschlossene Druckbehälter wird zunächst mit Umgebungsluft auf 1 bar Überdruck gefüllt. Danach wird der Verschlussdeckel schlagartig geöffnet und der zeitliche Verlauf des Druckabfalls im Tank gemessen. Die Druckabfallszeit, die zur Bestimmung der effektiven Öffnung verwendet wird, wird hier als Zeitspanne im Druckverlauf zwischen 90 % und 10 % des Fülldrucks definiert. Als obere Grenze wird 90 % gewählt, weil sich der Stahldeckel gelegentlich nicht über seinen

gesamten Umfang gleichmäßig abhebt. Im unteren Bereich des Druckverlaufs wird zur genaueren Ablesbarkeit 10 % des Maximalendrucks gewählt.

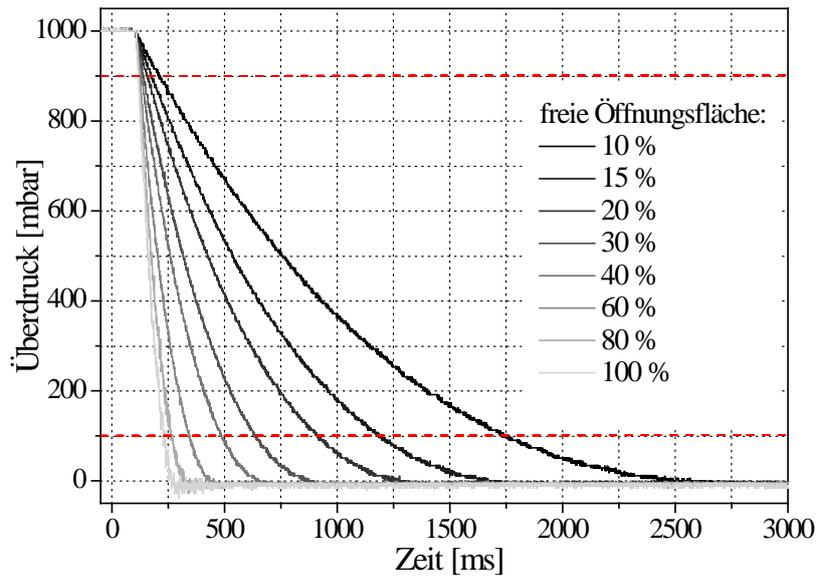


Abbildung 5.36: Druckabfall im Entlastungstank bei Variation der freien Öffnungsfläche bezogen auf die Öffnungsfläche des Ausströmflansches (100 %)

Die Druckabfallszeit wird für eine Reihe zentrierter quadratischer Öffnungen mit freien Öffnungen zwischen 10 % und 100 % der Öffnung des Austrittsflansches bestimmt (Abbildung 5.36). Trägt man die Öffnungsfläche über der Druckabfallszeit auf (Abbildung 5.37), dann erhält man einen Kurvenverlauf, mit dem man die effektive Öffnung von unbekanntem Absorbersystemen bestimmen kann. Ein Beispiel dafür enthält Abbildung 5.38.

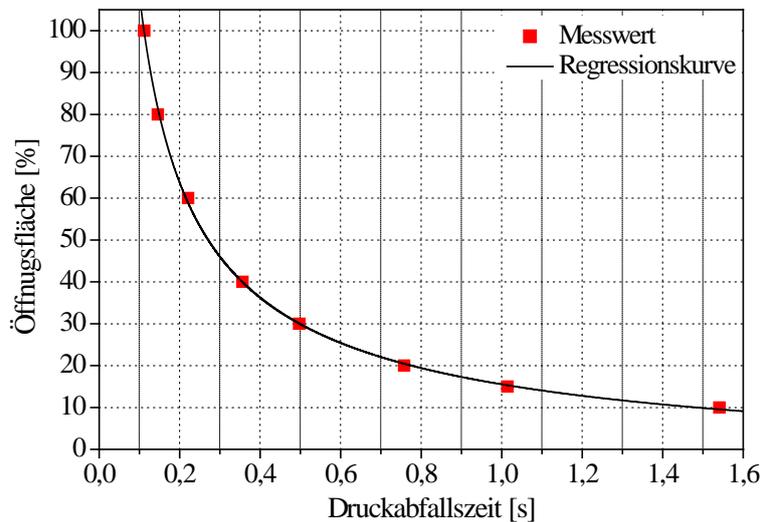


Abbildung 5.37: Öffnungsfläche über der Druckabfallszeit im Entlastungstank

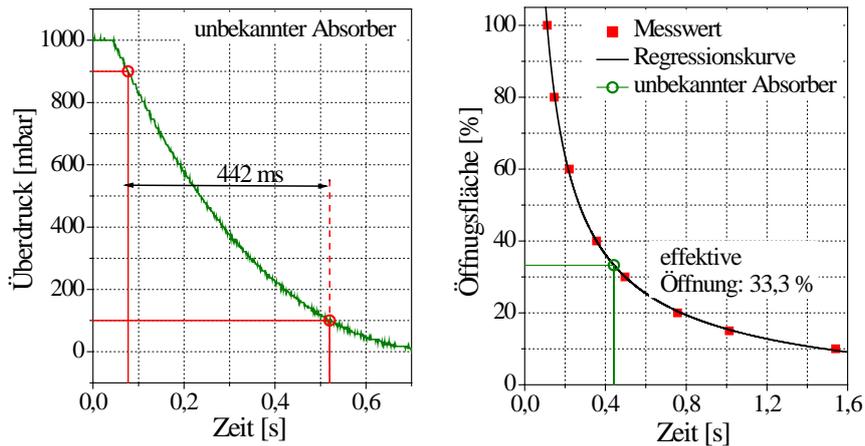


Abbildung 5.38: Links: Druckverlauf im Druckbehälter nach Einbau eines unbekannten Absorbers, rechts: Bestimmung der dazugehörigen effektiven Öffnung

Messergebnisse

Die effektiven Öffnungen der untersuchten Absorbertypen mit jeweils einer Lage sind in Abbildung 5.39 dargestellt.

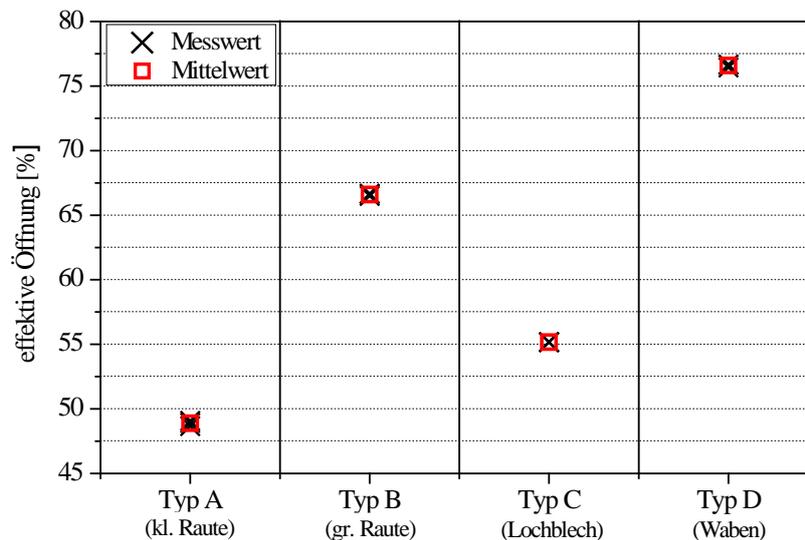


Abbildung 5.39: Effektive Öffnung der einlagigen Absorbertypen A, B, C und D

Mit jedem Typ wurden drei Messungen durchgeführt. Aufgrund der geringen Streuung werden im Folgenden nur noch Mittelwerte angegeben.

In Tabelle 9 sind die geometrischen freien Öffnungen und die effektiven Öffnungen der einlagigen Absorbertypen enthalten. Bei den Streckmetallen fällt auf, dass die effektiven Öffnungen größer als die geometrisch freien Öffnungen sind. Das heißt, das Gas strömt durch diese Absorber effektiver aus als durch eine konzentrierte Öffnung mit gleicher geometrischer Öffnungsfläche.

Tabelle 9: Geometrisch freie und effektive Öffnung der einlagigen Absorbertypen

Absorber	Typ A	Typ B	Typ C	Typ D
Geometrisch freie Öffnung [%]	44	63	48	81
Effektive Öffnung (bestimmt durch quadratische Vergleichsöffnung) [%]	49	67	55	77

In Abbildung 5.40 sind die effektiven Öffnungen der Streckmetallabsorber in Abhängigkeit von der Lagenanzahl angegeben. Die Lagen sind wie in der Praxis üblich gedreht/versetzt angeordnet und haben unterschiedliche Lagenabstände. Die gestrichelten Geraden geben die geometrische freie Öffnung des jeweiligen Absorbertyps an.

Die zweite und dritte Lage bewirkt eine erhebliche Verringerung der effektiven Öffnung. Bei den höheren Lagenzahlen ist dieser Effekt weniger ausgeprägt, d. h. der Strömungswiderstand steigt in geringerem Maße an.

Die Größe des Lagenabstands hat bei den Absorbertypen A und B einen nahezu vernachlässigbaren Einfluss auf die effektive Öffnung. Nur bei höherer Lagenanzahl sind geringe Abweichungen bemerkbar.

Beim Absorbertyp C sind die Verhältnisse anders, insbesondere beim Lagenabstand 0 mm. Hier ist die effektive Öffnung beträchtlich kleiner als bei den anderen Lagenabständen. Dieses Verhalten ist durch die glatte Oberfläche und die gedreht/versetzt Anordnung zu erklären.

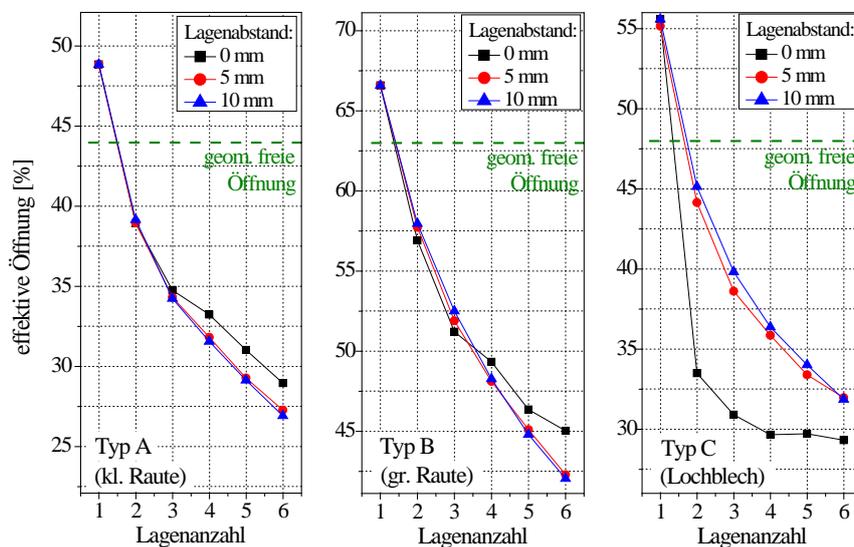


Abbildung 5.40: Effektive Öffnung der Absorbertypen A, B und C in Abhängigkeit der Lagenanzahl und dem Lagenabstand (gedreht/versetzte Anordnung)

Bei fluchtend angeordneten Absorberlagen (nicht gedreht/versetzt) hat der Lagenabstand einen größeren Einfluss auf die Größe der effektiven Öffnung (Abbildung 5.41).

Bei Typ A (kl. Raute) ist die effektive Öffnung bei direkt aufeinander liegenden Lagen deutlich größer als bei den Anordnungen mit den Lagenabständen 5 mm und 10 mm und gedreht/versetzter Anordnung der Lagen.

Beim Typ B (gr. Raute) ist dieses Verhalten aufgrund der größeren Maschen nicht so stark ausgeprägt.

Beim Typ C (Lochblech) fällt auf, dass beim Lagenabstand 0 mm, die effektive Öffnung bei einem zweilagigen Absorber zunimmt. Dieses ist durch die glatte Oberfläche der Bleche zu erklären. Der aus zwei Lagen bestehende Absorber wirkt somit wie ein einlagiger Absorber desselben Typs mit doppelter Absorbertiefe. Aufgrund der Absorbergeometrie ändert sich das Strömungsverhalten, das Gas kann unbehinderter ausströmen.

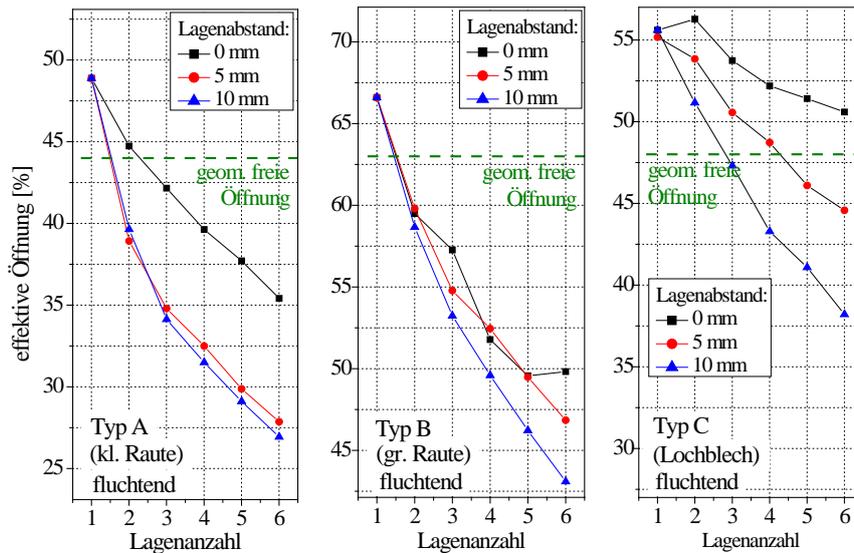


Abbildung 5.41: Effektive Öffnung der Absorbertypen A, B und C in Abhängigkeit der Lagenanzahl bei fluchtender Anordnung der Lagen

In Abbildung 5.42 sind die effektiven Öffnungen für sechslagige Absorberanordnungen bei unterschiedlichen Lagenanordnungen angegeben. Die Unterschiede in der Anordnung sind bei den Typen A und B weniger ausgeprägt als beim Typ C. Allgemein gilt bei geringem Lagenabstand ist der Unterschied in der effektiven Öffnung größer als bei großem Lagenabstand.

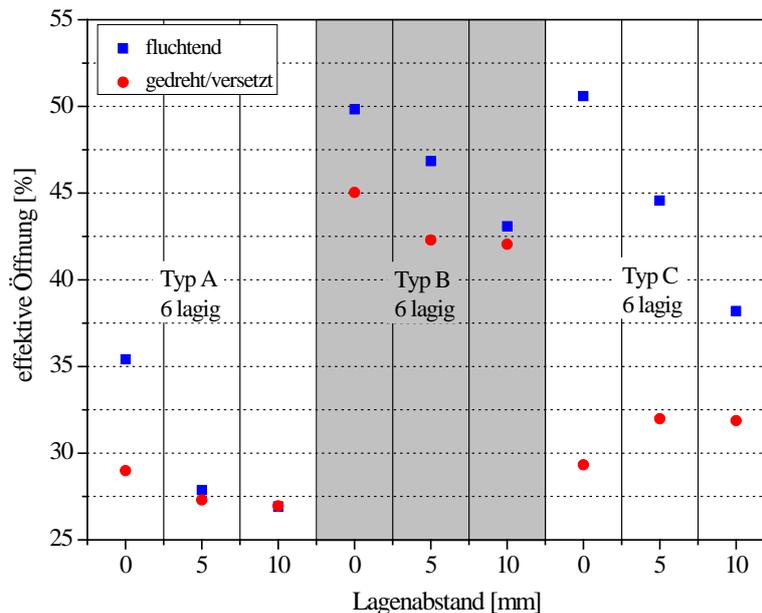


Abbildung 5.42: Effektive Öffnungen der sechslagigen Absorber bei fluchtender und gedreht/versetzter Anordnung bei verschiedenen Lagenabständen

Bezieht man die effektive Öffnung der mehrlagigen Absorber auf die geometrische freie Fläche einer Lage, so ist zu erkennen, dass die Verringerung der effektiven Öffnung mit jeder weiteren Lage kleiner wird (Abbildung 5.43). In der Abbildung repräsentieren die Formen der Symbole die verschiedenen Absorbertypen. Das Füllmuster (Füllgrad) der Symbole kennzeichnet den verwendeten Lagenabstand. Alle Werte - abgesehen von Typ C beim Lagenabstand 0 mm - liegen innerhalb eines Streubandes auf einer Kurve. Das heißt, die Abnahme der effektiven Öffnung der Streckmetallabsorber bezogen auf die freie Öffnung ist weitgehend unabhängig vom Absorbertyp und dem Lagenabstand.

Die deutlich geringere (bezogene) effektive Öffnung beim Absorbertyp C mit direkt aufeinander liegenden Lagen (Lagenabstand 0 mm) ist auf dessen glatte Oberfläche zurückzuführen. Anders als bei den Typen A und B kann hier bei gedreht/versetzter Lagenanordnung kein Gas zwischen die Lagen dringen.

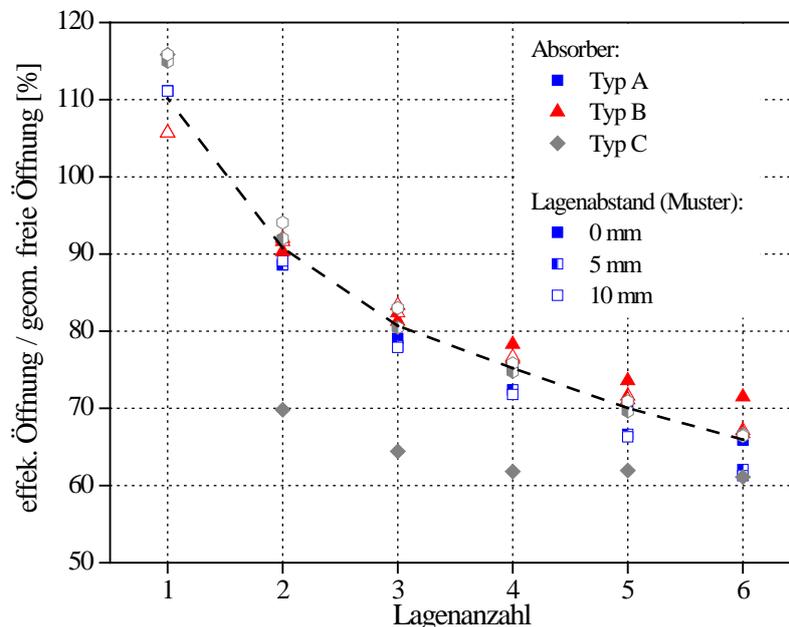


Abbildung 5.43: Effektive Öffnungen von Streckmetallabsorbieren bezogen auf die geometrisch freie Öffnung einer Lage in Abhängigkeit von der Lagenzahl (Lagen gedreht/versetzt)

Damit lässt sich die effektive Öffnung eines mehrlagigen Absorbiers bei bekannter geometrisch freier Fläche abschätzen (Tabelle 10). Für einen vierlagigen Streckmetallabsorbier mit der geometrisch freien Öffnung einer Lage von 62 % erhält man z. B. eine effektive Öffnung von (bezogen auf eine quadratische Vergleichsöffnung) 62 % x 0,752 = 46,6 %.

Tabelle 10: Auf die geometrisch freie Öffnung einer Lage bezogene effektive Öffnungsfläche von mehrlagigen gedreht/versetzten Absorbieren (Abbildung 5.43)

Absorberlagen	1	2	3	4	5	6
Änderung der freien Öffnung [%]	110,1	90,8	80,7	75,2	70,0	65,9

Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit

Es ist nicht auszuschließen, dass die Strömungsgeschwindigkeit durch den Absorbier einen Einfluss auf die Größe der effektiven Öffnung hat. Sie hängt u. a. vom Einbauort des Absorbiers sowie der Druckdifferenz zwischen Fehler- und Entlastungsraum ab. Die Gasgeschwindigkeit steigt mit zunehmender Druckdifferenz an und bleibt ab ca. 900 mbar konstant. Dies ist damit zu begründen, dass sich beim Überschreiten des kritischen Druckverhältnisses von Außen- zu Kesselinndruck, die Ausströmgeschwindigkeit nicht mehr ändert [Bös07] und das Gas mit Schallgeschwindigkeit ausströmt. Das kritische Druckverhältnis hängt ausschließlich von den Eigenschaften des betrachteten Fluids sowie dessen Temperatur ab. Für zweiatomige Gase (z. B. Luft, Stickstoff) und 293 K gilt Gleichung (5.3) [Sig09]:

$$\left(\frac{p_{\text{innen}}}{p_{\text{außen}}}\right) = \left(\frac{2}{\kappa + 1}\right)^{\frac{\kappa}{1-\kappa}} = 1,89 \quad (5.3)$$

d.h. bei atmosphärischem Außendruck (1 bar) wird dieses Verhältnis bei einem (absoluten) Kesseldruck von 1,89 bar erreicht.

Um nun den Einfluss der Gasgeschwindigkeit auf die effektive Öffnung des Absorbers zu untersuchen wird der Fülldruck im Versuchskessel variiert (1,5 bar, 2 bar und 2,4 bar). Zur gesonderten Betrachtung des Zeitbereiches, in dem Schallgeschwindigkeit herrscht, wird die Auswertemethodik variiert. Hierzu wird die untere Grenze zur Bestimmung der Druckabfallzeit auf 70 % gesetzt ($t_{90\%-70\%}$). Damit kann der Bereich oberhalb des kritischen Druckverhältnisses bei einem Fülldruck von 2,4 bar betrachtet werden. Um die Ergebnisse vergleichen zu können, werden beide Druckabfallszeiten ($t_{90\%-10\%}$ und $t_{90\%-70\%}$) bei allen Fülldrücken ausgewertet.

Die Ergebnisse sind für die zweilagigen Streckmetallabsorber A, B, und C (Lagenabstand 0 mm) in Abbildung 5.44 und für den Wabenabsorber D in Abbildung 5.45 wiedergegeben. Die Größe der Strömungsgeschwindigkeit (abhängig vom Fülldruck) hat einen geringen Einfluss auf die effektive Öffnung. Die über t_{90-70} bestimmten effektiven Öffnungen sind in der Regel geringfügig niedriger als die mit t_{90-10} bestimmten. Dies ist auf den erhöhten Strömungswiderstand durch Turbulenzbildung an den Absorbern bis zur Einstellung einer gleichmäßigeren Gasströmung zurückzuführen. Hierdurch verringert sich die effektive Öffnung zu Beginn der Strömung (t_{90-70}).

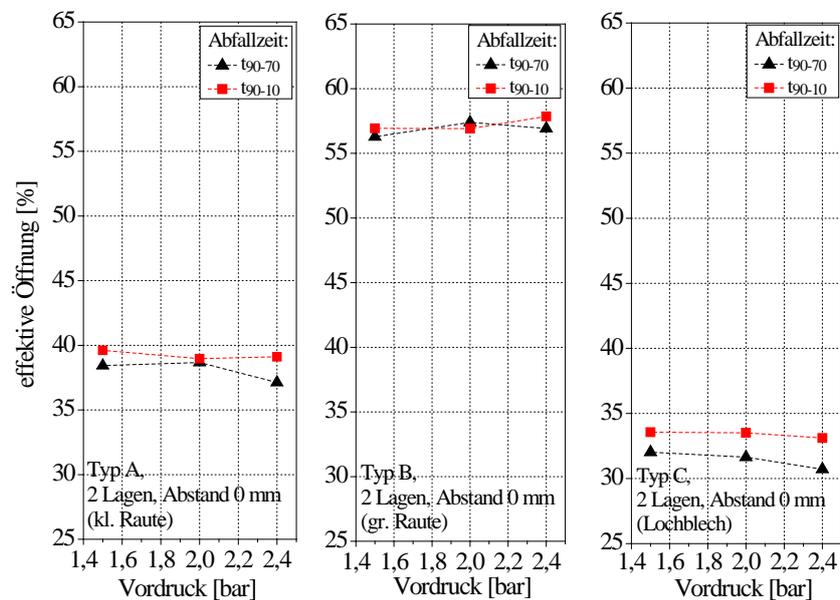


Abbildung 5.44: Effektive Öffnung der Absorbertypen A, B und C (Streckmetalle) in Abhängigkeit des Vordruckes (Gasgeschwindigkeit) bei zwei Lagen in einem Abstand von 0 mm ausgewertet mit der Abfallzeit t_{90-70} und t_{90-10}

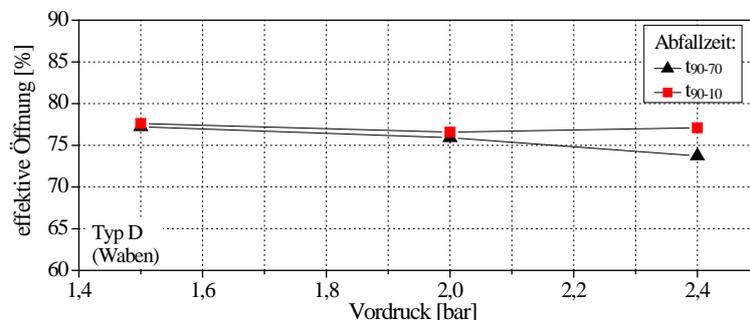


Abbildung 5.45: Effektive Öffnung des Typs D in Abhängigkeit des Vordruckes (Gasgeschwindigkeit) und bei Auswertung mit der Abfallzeit t_{90-70} und t_{90-10}

Sollen Absorber bei Druckberechnungen mit dem erweiterten Standardverfahren berücksichtigt werden, so kann die über die Abfallzeit t_{90-10} bestimmte effektive Öffnungen verwendet werden, der Einfluss der Gasgeschwindigkeit auf die effektive Öffnung ist gering.

Einfluss der Form der Öffnung

Bislang beruhen alle Ergebnisse zur effektiven Öffnung auf Versuchen mit quadratischen Vergleichsöffnungen. Um den Einfluss der Form der Öffnung auf den Druckverlauf im fehlerbehafteten Schottraum (oder im Schaltanlagenraum mit Druckentlastungsöffnung) bestimmen zu können, werden Versuche mit verschiedenen Öffnungsformen (Abbildung 5.46) bei identischer Öffnungsfläche von jeweils 1000 mm² durchgeführt. - Der Fülldruck im Tank beträgt 1,5 bar, 2 bar bzw. 2,5 bar (absolut).

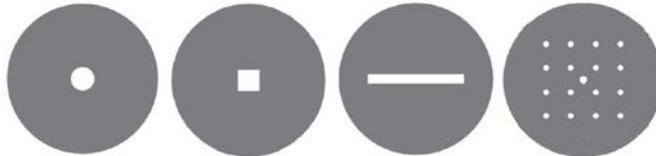


Abbildung 5.46: Öffnungsformen: Kreis, Quadrat, Rechteck, Lochblech

Abbildung 5.47 enthält den Druckverlauf im Tank bei Verwendung der verschiedenen Öffnungsformen.

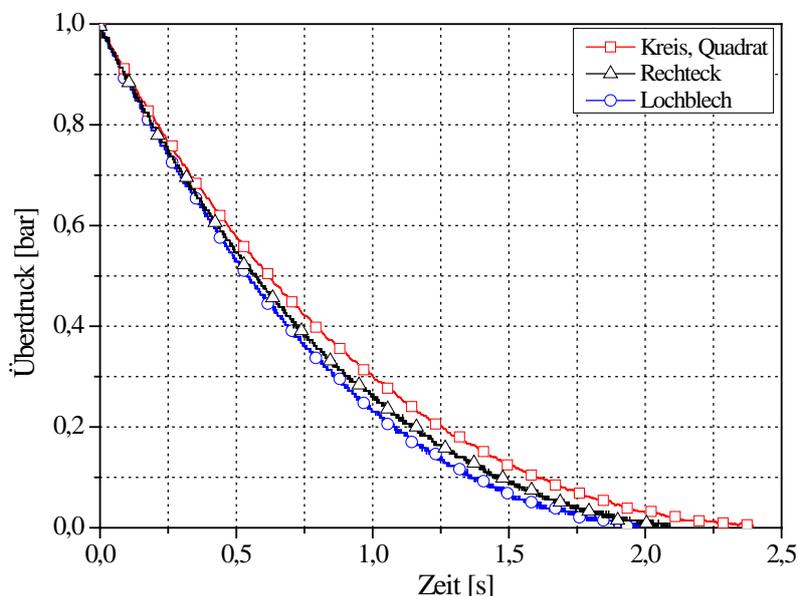


Abbildung 5.47: Druckverlauf im Tank bei Verwendung verschiedener Öffnungsformen

Der Druckverlauf bei einer kreisförmigen oder einer quadratischen Öffnungsform ist praktisch identisch. Wird eine schmale rechteckige Öffnungsform (z. B. ein Schlitz in einer Schaltanlage) betrachtet, so fällt der Druck schneller ab. Die Lochblechblende weist den schnellsten Druckabfall und damit die wirkungsvollste Druckentlastung auf. - Bei der Bestimmung der effektiven Öffnung macht es somit keinen Unterschied, ob eine kreisförmige oder eine quadratische Öffnung verwendet wird.

Die Öffnungsform hat weiterhin einen Einfluss auf die Ausflussziffer die zur Druckberechnung mit dem erweiterten Standardverfahren benötigt wird. Die Ausflussziffer gibt das Verhältnis vom realen zum theoretischen Massefluss (ohne Strömungseinschnürung) an [Boh14]:

$$\dot{m}_{real} = \alpha \cdot \dot{m}_{th} \quad (5.4)$$

Die mit Hilfe des erweiterten Standardverfahrens bestimmten Druckabfallzeiten werden durch Variation der Ausflussziffer an gemessene Verläufe angeglichen. Wird bei der Messung beispielsweise eine kreisförmige Öffnung verbaut, erhält man gute Ergebnisse, wenn im Druckberechnungsverfahren eine Ausflussziffer von 0,7 verwendet wird, Abbildung 5.48

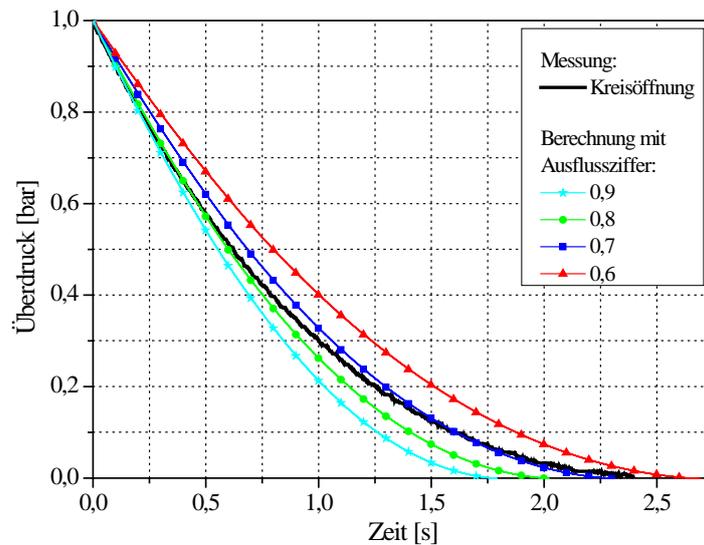


Abbildung 5.48: Gemessener und berechneter Druckabfall durch eine Kreisöffnung bei Variation der Ausflussziffer

Eine bessere Übereinstimmung des gemessenen Druckabfalls mit dem berechneten würde man bei Verwendung von veränderlichen Ausflussziffern erhalten. Dies ist jedoch mit Hinblick auf die Genauigkeit der Druckberechnungsverfahren nicht erforderlich.

Um die unterschiedliche Wirkung der jeweiligen Öffnungsform quantifizieren zu können, wird eine Umfangskennzahl eingeführt. Sie wird definiert als Verhältnis des Umfangs der Öffnungsfläche (Länge der Strömungskante) zum Umfang der Kreisöffnung:

$$\begin{aligned} & \text{Umfangskennzahl} \\ & = \frac{\text{Umfang der Öffnungsfläche}}{\text{Umfang der Kreisblende}} \end{aligned} \quad (5.5)$$

Tabelle 11 enthält die Umfangskennzahlen der verschiedenen Öffnungsformen bei identischer freier Öffnungsfläche sowie das Seitenverhältnis bei rechteckigen Öffnungen.

Tabelle 11: Seitenverhältnis und Umfangskennzahl für Öffnungsformen mit identischer freier Öffnungsfläche

Form	Seitenverhältnis	Umfangskennzahl
Kreis		1,00
Quadrat	1:1	1,13
Rechteck	1:10	1,96
Lochblech (17 Löcher)		4,10

Die bei verschiedenen Fülldrücken und Öffnungsformen bestimmten Ausflussziffern sind in Abbildung 5.49 angegeben. Hieraus ist ersichtlich, dass eine höhere Umfangskennzahl zu einer höheren Ausflussziffer führt. Dies bedeutet, dass schlitzförmige Öffnungen und lochblech-ähnliche Öffnungen (wie bei Absorbern) eine höhere Ausflussziffer aufweisen als quadratische und kreisrunde Öffnungen. – Im Bereich der untersuchten Fülldrücke unterscheiden sich die Ausflussziffern nur um wenige Prozent.

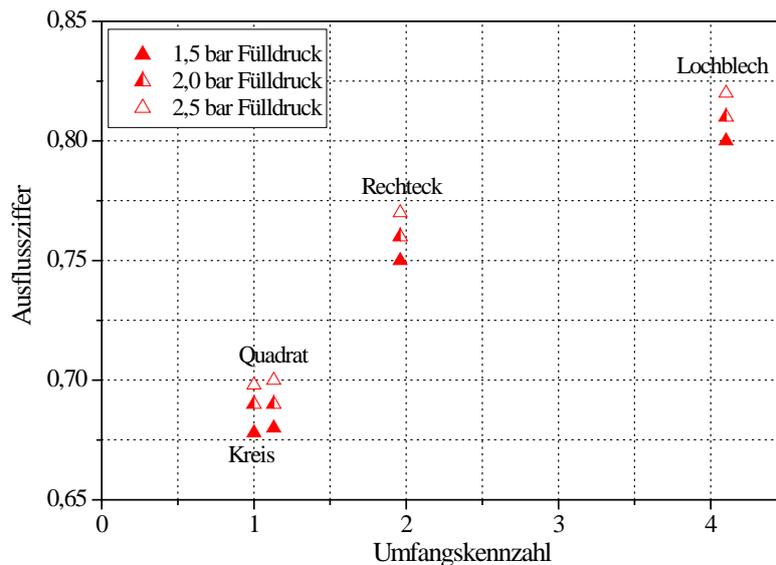


Abbildung 5.49: Ausflussziffer in Abhängigkeit von der Umfangskennzahl bei unterschiedlichem Fülldruck (Gasgeschwindigkeit)

Einfluss der Temperatur des Gases

Bislang beruhen alle Ergebnisse für die effektive Öffnung auf Messungen in einer Kaltgasströmung. Zur Ermittlung des Einflusses der Gastemperatur auf die Bestimmung der effektiven Öffnung werden Berechnungen der Druckabfallszeit bei einer Lufttemperatur von 300 K und 3000 K mit einem Computational Fluid Dynamics Programm [ESI09] herangezogen.

Hierzu wird ein quaderförmiger Tank mit zwei verschiedenen Öffnungsformen (konzentrierte Öffnung und Lochblech) mit gleicher freier Öffnungsfläche betrachtet, siehe Abbildung 5.50. Wie bei den Messungen zur Bestimmung der effektiven Öffnung wird von 2 bar (absolut) Tankdruck ausgegangen und der mittlere Überdruck im Tank während des Entlastungsvorgangs berechnet (Abbildung 5.51 und Abbildung 5.52). Aufgrund der höheren Temperatur und den damit veränderten Gaseigenschaften strömt die heiße Luft schneller aus als die kältere, sodass der Tank bereits nach ca. 20 ms auf Umgebungsdruck abgefallen ist anstatt nach 55 ms bei 300 K.

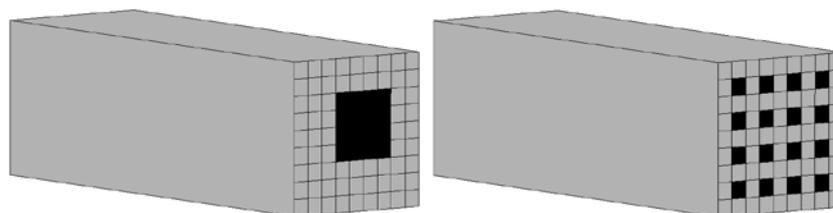


Abbildung 5.50: Simulationsmodell zur Bestimmung der Druckabfallszeit in einer Gasströmung (schwarz gekennzeichnet: die Öffnungen zur Umgebung; links: konzentrierte Öffnung, rechts: Lochblech)

Betrachtet man jedoch die prozentuale Änderung der Druckabfallszeit t_{90-10} bei den jeweiligen Gastemperaturen, so erhält man bei Umgebungstemperatur mit einem Lochblech eine um 10,6 % kürzere Druckabfallszeit als mit einer konzentrierten Öffnung und 11,8 % bei der heißen Gasströmung. Die prozentualen Änderungen der Druckabfallszeiten sind somit vergleichbar. Die Gastemperatur hat folglich einen vernachlässigbaren Einfluss bei der Bestimmung der effektiven Öffnung.

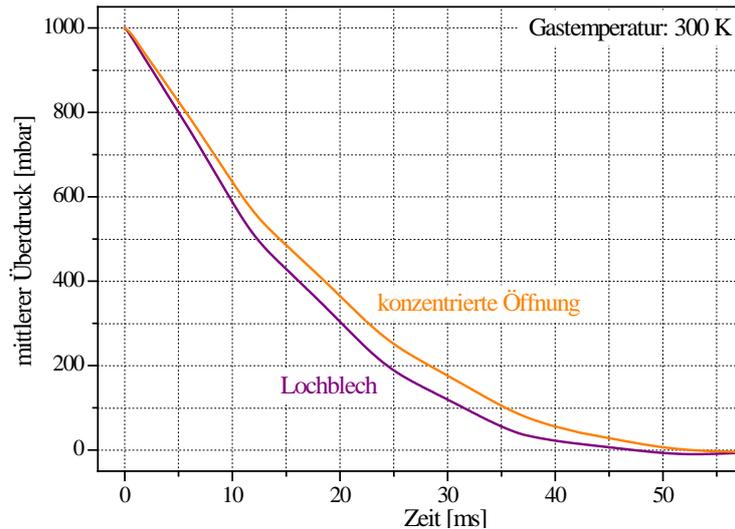


Abbildung 5.51: Gemittelter Überdruckverlauf im Tank bei einer Lufttemperatur von 300 K durch eine konzentrierte Öffnung und ein Lochblech mit identischer Öffnungsfläche

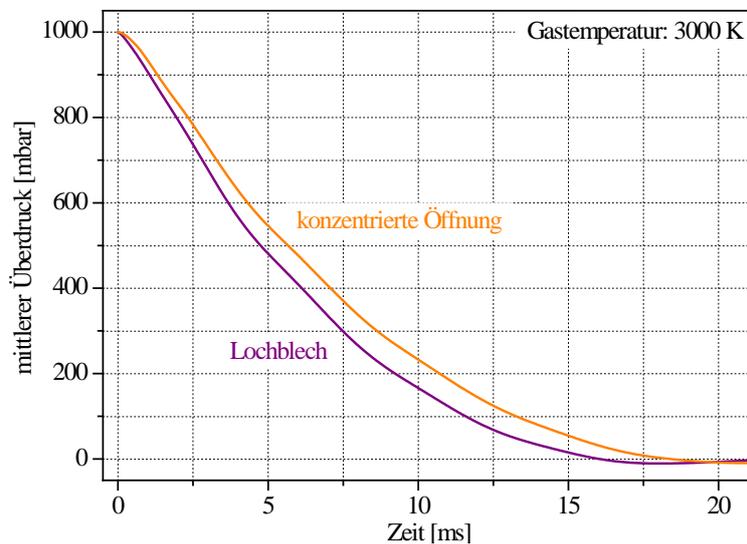


Abbildung 5.52: Gemittelter Überdruckverlauf im Tank bei einer Lufttemperatur von 3000 K durch eine konzentrierte Öffnung und ein Lochblech mit identischer Öffnungsfläche

5.3.3. Fallbeispiel

Wie bereits in Kapitel 2.3 erwähnt, kann der Einbau von Energieabsorbern in die Druckentlastungsöffnung eines Schottraums, in dem ein Störlichtbogen auftreten kann, zu einer Verringerung der Wirkung des Absorbers führen. Diese tritt auf, wenn durch den Einbau des Absorbers der Strömungsquerschnitt verringert und damit der Gasaustritt behindert wird. Dieses soll mit der folgenden Anordnung (Abbildung 5.53) demonstriert werden:

Die Anordnung besteht aus einem Fehlerraum (Schaltanlage) von $0,512 \text{ m}^3$ und einem geschlossenen Entlastungsraum von 27 m^3 , siehe Abbildung 5.53 mit folgenden Randbedingungen [Wet14a]:

- Isoliergas Luft mit einem anfänglichen Druck von 1 bar (absolut)
- Elektrodenabstand 170 mm
- dreiphasiger Kurzschlussstrom 15 kA, $t = 200 \text{ ms}$
- $X/R = 13$ (Netzimpedanz-Verhältnis)
- effektive Öffnung des Absorbers zwischen 15 % und 100 % (100 % bedeutet Öffnung ohne Absorber)
- Absorbereffizienz zwischen 2 und 10 %.

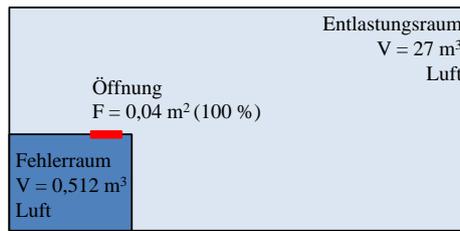


Abbildung 5.53: Querschnitt der untersuchten Anordnung (Fallbeispiel)

In den folgenden Abbildungen sind die mit dem CFD-Verfahren berechneten gemittelten Überdrücke im Fehler- sowie Entlastungsraum über der effektiven Öffnung aufgetragen.

Je kleiner die effektive Öffnung vom Lichtbogen- zum Entlastungsraum desto größer ist die mittlere thermische Energiedichte und damit der mittlere Druck im Fehlerraum bei identischem elektrischen Energieeintrag aufgrund des in Kapitel 2.3 beschriebenen Effekts (Abbildung 5.54).

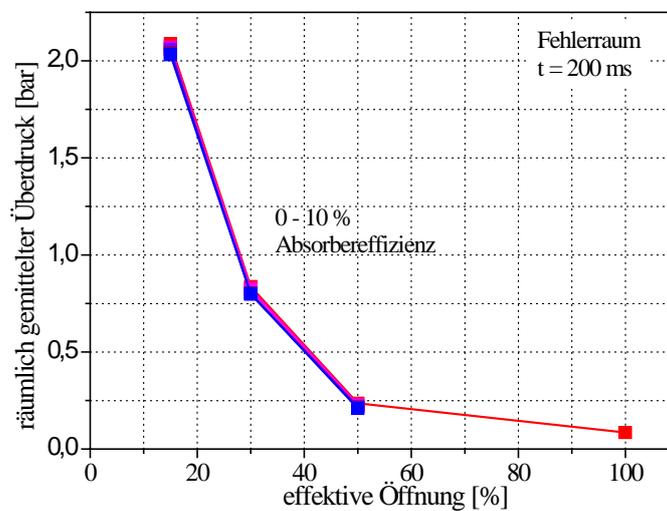


Abbildung 5.54: Überdruck im Fehlerraum zum Zeitpunkt der Lichtbogenlöschung ($t = 200 \text{ ms}$) in Abhängigkeit der effektiven Öffnung und Absorbereffizienz

Der räumlich gemittelte Überdruck im (geschlossenen) Entlastungsraum zum Zeitpunkt der Lichtbogenlöschung verhält sich invers zum Überdruck im Fehlerraum bei Veränderung der effektiven Öffnung und ist außerdem abhängig von der Absorbereffizienz (Abbildung 5.55). Die vom Absorber aufgenommene Energie reduziert den Druck im Entlastungsraum.

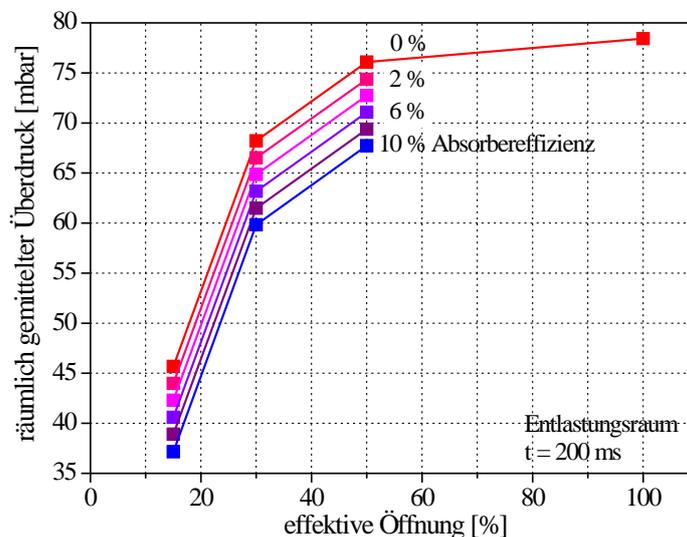


Abbildung 5.55: Überdruck im Entlastungsraum zum Zeitpunkt der Lichtbogenlöschung ($t = 200 \text{ ms}$) in Abhängigkeit der effektiven Öffnung und Absorbereffizienz

Aufgrund des größeren Strömungswiderstands bei kleiner Öffnungsgröße sind die ermittelten Überdruckwerte bei $t = 200$ ms nicht immer die endgültigen (maximalen) Überdrücke im Fehlerraum, das heißt, bei kleiner Öffnungen ist das Druckgleichgewicht zwischen Fehler- und Entlastungsraum noch nicht erreicht. 300 ms nach Lichtbogenlöschung ist der Druckausgleich zwischen Fehler- und Entlastungsraum selbst bei den kleinen Öffnungen erreicht (Abbildung 5.56).

In Abbildung 5 sind die maximalen Überdruckwerte im Entlastungsraum in Abhängigkeit von der effektiven Öffnung und des Wirkungsgrades nach dem Erreichen des Druckausgleichs dargestellt. Der Überdruck steigt mit abnehmender effektiver Öffnung.

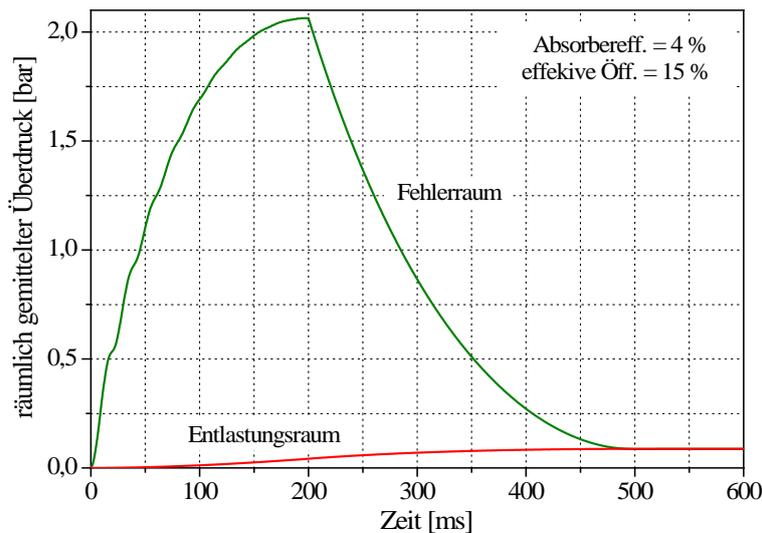


Abbildung 5.56: Räumlich gemittelter Überdruckentwicklung im Fehler- und Entlastungsraum bei einer Absorbereffizienz von 4 % und einer effektiven Öffnung von 15 %

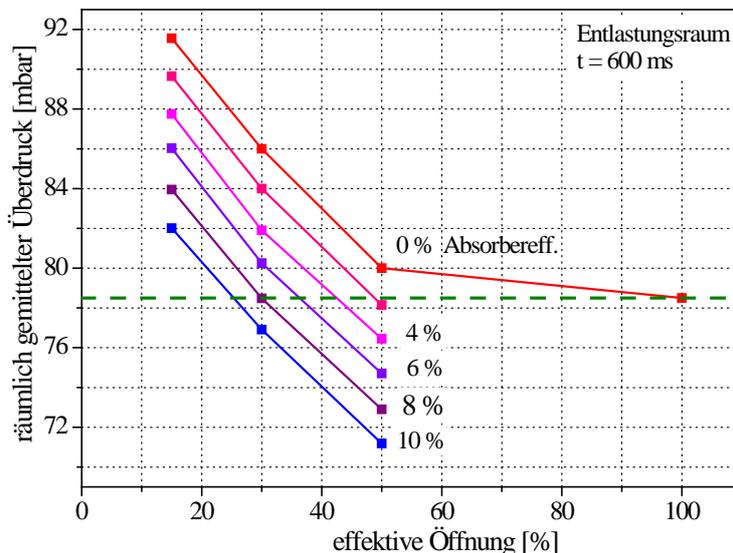


Abbildung 5.55: Räumlich gemittelter Überdruck im Entlastungsraum in Abhängigkeit der effektiven Absorberöffnung und -effizienz bei $t = 600$ ms

Bei den gegebenen Bedingungen erreicht der Überdruck im (geschlossenen) Entlastungsraum ohne Absorber einen Wert von 78,2 mbar. Mit Absorber erhält man eine Druckreduzierung nur für eine effektive Öffnung / Absorbereffizienz-Kombination, die unterhalb der gestrichelten Linie in Abbildung 5.55 liegt.

Für Entlastungsräume mit Öffnungen zur Umgebung ist die Situation komplexer. Wegen der Öffnung zur Umgebung kann (aufgrund der verringerten Öffnung zwischen Fehler- und Entlastungsraum) der langsamere ansteigende Druck im Schaltanlagenraum effektiver abgebaut werden.

6. Zusammenfassung

Störlichtbögen verursachen einen schnellen Temperatur- und damit Druckanstieg in ihrer Umgebung. Zur Beschreibung dieser Phänomene in elektrischen Anlagen sind Druckberechnungen erforderlich. Sie ermöglichen die Auslegung von Druckentlastungseinrichtungen auch in der Planungsphase.

Die vorhandenen Druckberechnungsverfahren unterscheiden sich u. a. in ihrer Güte und ihrem Anwendungsbereich. Diese Arbeit leistet einen Beitrag zur Berücksichtigung von alternativen Isoliergasen, Kunststoffverdampfung und Energieabsorbern in Druckberechnungsverfahren.

Als alternative Isoliergase in Schaltanlagen kommen nicht-toxische und chemisch stabile Gase infrage, welche ein geringes Global Warming Potential aufweisen. Als potentielle Substitute für reines SF₆ werden hier ein SF₆/N₂-Gemisch (20/80 Vol.-%) und CO₂ betrachtet. Der entstehende Überdruck im Fehlerraum ist abhängig von der Wärmekapazität des Isoliergases und daher in Luft am größten. Unter den gegebenen Randbedingungen ist der maximale Druckanstieg in SF₆ etwa 68 %, in CO₂ 44 % und im SF₆/N₂-Gemisch rund 40 % niedriger als in Luft.

Um ex-ante Druckberechnungen mit den untersuchten alternativen Isoliergasen durchführen zu können, müssen einerseits der thermische Transferkoeffizient (k_p), der Anteil der elektrischen Energie der in den Druckaufbau geht, in Abhängigkeit der Gasdichte und andererseits die Lichtbogenspannung bekannt sein.

Bei Verwendung von Luft und CO₂ als Isoliergas wird der k_p -Faktor mit abnehmender Dichte kleiner, wohingegen er mit SF₆ und dem SF₆/N₂-Gemisch größer wird. Die Lichtbogenspannung nimmt bei allen Gasen nahezu linear mit der Gasdichte aufgrund der zunehmenden Anzahl der zu ionisierenden Gasteilchen im Elektrodenzwischenraum zu.

Die gemessene Lichtbogenspannung ist aufgrund der Lichtbogenstabilisierung in der vorliegenden Versuchsanordnung in SF₆ und SF₆/N₂ geringer als in den anderen Gasen. Die Lichtbogenspannungen in Luft und CO₂ unterscheiden sich nicht wesentlich voneinander.

Beim Öffnen von Druckentlastungseinrichtungen in gasisolierten Anlagen kommt es zur Vermischung des Isoliergases mit Luft im Schaltanlagenraum. Für zuverlässige Druckberechnungen werden hochwertige Gasdaten (thermodynamische Eigenschaften und Transportgrößen) der alternativen Isoliergase und deren Mischungen mit Luft benötigt und in Programme integriert.

In modernen Mittelspannungsanlagen werden vermehrt Kunststoffe verwendet. Dazu gehören insbesondere Silikon, Epoxidharz sowie die Thermoplaste Polybutylenterephthalat, Polyamid und Polycarbonat. Im Störfall verdampft Kunststoffmaterial unter Lichtbogeneinwirkung und die hierbei freigesetzten Gase können die Druckentwicklung beeinflussen. Die hierzu durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass Epoxidharz und Polycarbonat die durchschnittlich niedrigsten Masseverluste in Luft haben. Silikon weist die höchsten auf und diejenigen der übrigen Thermoplaste liegen dazwischen. Der maximale Druckanstieg bedingt durch den Einfluss der Kunststoffverdampfung nimmt mit steigendem Fülldruck zu. Die Kunststoffverdampfung hat auch Einfluss auf die Lichtbogenspannung. Sie steigt geringfügig, wenn Kunststoffe mit einem geringen Kohlenstoffanteil verdampfen, und nimmt bei Kunststoffen mit einer hohen Anzahl von Kohlenstoffatomen in den Makromolekülen ab.

Um die Auswirkungen der Kunststoffverdampfung in Druckberechnungsverfahren beschreiben zu können, wird hier die Veränderung des k_p -Faktors infolge der Verdampfung ermittelt.

Der Anstieg des k_p -Faktors beträgt unabhängig vom Fülldruck bei Verwendung von Epoxidharz 3,5 %, bei Thermoplasten 16,5 % und bei Silikon 22,5 % mit Luft als Isoliergas.

Mit den anderen Isoliergasen (CO_2 , SF_6 bzw. SF_6/N_2), untersucht für den Thermoplast PBT, gilt folgendes: In CO_2 ist der Anstieg des k_p -Wertes etwa halb so groß wie in Luft. In SF_6 ist er deutlich niedriger und in SF_6/N_2 von vergleichbarer Größe wie in Luft.

Bei gleichzeitiger Lichtbogeneinwirkung auf zwei unterschiedliche Kunststoffe sind keine Druckeffekte gefunden worden, die auf chemische Reaktionen der verdampften Materialien zurückzuführen sind.

Die dritte untersuchte Einflussgröße auf die Druckentwicklung in elektrischen Anlagen sind Energieabsorber. Sie nehmen Wärmeenergie auf, haben einen Strömungswiderstand und halten Flammen und glühende Partikel zurück. Hinsichtlich der Druckentwicklung sind jedoch nur die ersten beiden Effekte von Interesse.

Zur Untersuchung der Energieaufnahme durch Absorber wird u. a. die Absorbtemperatur im Fehlerfall und damit der Gitterwirkungsgrad mehrerer Absorbertypen experimentell bestimmt. Hierbei ist nicht die maximale Absorbtemperatur beim Auftreten eines Störlichtbogens von Interesse, sondern der Temperaturanstieg bis zum Erreichen des Maximaldrucks im Aufstellungsraum der Schaltanlage. Die maximale vom Absorber aufgenommene Energie ist dagegen für thermische Effekte von Interesse z. B. für das Entflammen von Indikatoren bei Prüfungen von Schaltanlagen.

Es konnte gezeigt werden, dass die Energieaufnahme durch Absorber desto größer ist je größer die Oberfläche ist, realisierbar z. B. durch eine Erhöhung der Lagenanzahl oder durch Verwendung von Wabenabsorbern. Absorber mit einer großen Oberfläche und einer großen effektiven Öffnung sind von Vorteil. Dieses ist darauf zurückzuführen, dass sich kein hoher Druck im Fehlerraum aufbaut und somit der k_p -Faktor während der Fehlerdauer schneller abnimmt als mit einer kleinen effektiven Öffnung.

Als ein Maß für den Strömungswiderstand wird die effektive Öffnung eines Absorbersystems eingeführt. Die effektive Öffnung ist eine konzentrierte Öffnung, die denselben Druckverlauf (Strömungswiderstand) aufweist wie die (komplexe) Öffnung des Absorbers. Sie wird über einen Vergleich des Druckabfalls in einem Druckbehälter mit Absorber und verschiedenen großen konzentrierten Öffnungen ermittelt. Einlagige Streckmetallabsorber weisen eine größere effektive Öffnung (einen geringeren Strömungswiderstand) auf als geometrisch gleichgroße konzentrierte Öffnungen. Bei mehrlagigen Absorbern nimmt der Einfluss auf die effektive Öffnung mit jeder weiteren Lage ab. Der Lagenabstand hat bei Streckmetallen i. A. einen geringen Einfluss auf die effektive Öffnung. Bezieht man die effektive Öffnung eines Absorbers auf die geometrische freie Fläche einer Lage, so ist zu erkennen, dass für Streckmetallabsorber eine vergleichbare Änderung der effektiven Öffnung bei Hinzunahme weiterer gedrehter/versetzter Lagen vorliegt. Somit lässt sich in einfacher Weise die effektive Öffnung eines mehrlagigen Absorbers angeben, wenn die geometrisch freie Fläche einer Lage bekannt ist.

Bei der Verwendung von Absorbern ist die Wechselwirkung von Energieaufnahme und Strömungswiderstand zu beachten. An einem Beispiel wird gezeigt, dass unerwünschte Effekte auftreten können, wenn der Absorber den Ausströmquerschnitt am fehlerbehafteten Schottraum verringert.

Mit den Ergebnissen dieser Arbeit ist es möglich, ex-ante Druckberechnungen mit alternativen Isoliergasen durchzuführen. Des Weiteren wurde eine Möglichkeit geschaffen, den Einfluss von Kunststoffverdampfung im Störlichtbogenfall in vorhandenen Druckberechnungsverfahren in einfacher Weise zu berücksichtigen. Weiterhin wurden neue Erkenntnisse zur Wirkung und zum Einsatz von Absorbern bestimmt.

7. Quellenverzeichnis

- [Ana10] K. Anantavanich: "Calculation of pressure rise in electrical installations due to internal arcs considering SF₆-air mixtures and arc energy absorbers", Dissertation, RWTH Aachen, Aachen, 2010.
- [Ana13] K. Anantavanich, G. J. Pietsch, N. Uzelac, P. Milovac, B. Wang: "Effect of Arc Energy Absorber in a Wind Turbine Switch Unit", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 28, p. 549-556, 2013.
- [Bey86] M. Beyer, W. Boeck, K. Möller, W. Zaengl: „Hochspannungs-technik – Theoretische und praktische Grundlagen für die Anwendung“, ISBN 3540160140, Springer Verlag, Berlin, 1986.
- [Boh14] W. Bohl, W. Elmendorf, Technische Strömungslehre, 15. Auflage, Vogel Buchverlag, 2014.
- [Bös07] L. Böswirth: „Technische Strömungslehre“, ISBN 978-3-8348-0272-9, Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden 2007.
- [Bot98] L. Bottenbruch, R. Binsack: „Polyamie – Kunststoff-Handbuch: Technische Thermoplaste“, ISBN 3446164863, Hanser Verlag, München, 1998.
- [Bre09] M. Bremers: „Ganzheitliches, modulares Konzept: Mittelspannungstechnik und Störlichtbogenschutz“, ew, Bd. 108, No. 5, S. 64-70, 2009.
- [Brü70] P. Brückner: „Kunststoffisolierte Schaltanlagen“, Elektrotechnische Zeitschrift, Band 91, H. 3, p. 154-155, 1970.
- [Cer96] G. Cerbe, H.-J. Hoffmann: „Einführung in die Thermodynamik“, ISBN 3446188495, Hanser Verlag, 1996.
- [Chr97] L. G. Christophorou, J. K. Olthoff, D. S. Green: "Gases for Electrical Insulation and Arc Interruption: Possible Present and Future Alternatives to Pure SF₆", NIST Technical Note 1425, U.S. Government Printing Office, Washington, 1997.
- [Cig04] Cigré Working Group D1.03: "N₂/SF₆ mixtures for gas insulated systems", Cigre Technical Brochure, vol. 260, 2004.
- [Cig10] Cigré Working Group B3.18: "SF₆ Tightness Guide", Cigre Technical Brochure, vol. 430, 2010.
- [Cig14] Cigré Working Group A3.24: "Tools for the Simulation of Effects Due to Internal Arc in MV and HV Switchgear", Cigre Technical Brochure, vol. 602, 2014.
- [Czi00] H. Czichos: „Hütte – Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften“, ISBN 3540668829, Springer Verlag, Berlin, 2000.
- [Das85] A. Dasbach, G. J. Pietsch: "A calculation method for pressure waves due to fault arcs", Proceedings of the 5th Symposium on Gas Discharges and their Applications, p. 91-94, Oxford, 1985.
- [Das87] A. Dasbach: „Untersuchungen zur Leistungsbilanz von Störlichtbögen im Hinblick auf die Druckbeanspruchung von Schaltanlagen“, Dissertation, RWTH Aachen, Aachen, 1987.
- [Doi14] C. Doiron: „Calculation of thermodynamic and transport properties of thermal plasmas based on the Cantera software toolkit“, Proceedings of the ESCAMPIG XXII conference, Greifswald, 2014.
- [Dur08] F. Durst: "Fluid mechanics: An introduction to the theory of fluid flows", ISBN 9783540713425, Springer Verlag, Berlin, 2008.

- [EG06] Amtsblatt der Europäischen Union: „Verordnung (EG) Nr. 842/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über bestimmte fluorierte Treibhausgase“, 2006.
- [ESI09] ESI CFD Inc.: „CFD-ACE+ V2009.0 User Manual“, USA, 2009.
- [Eye12] P. Eyerer, P. Elsner, T. Hirth, H. Domininghaus: „Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften“, 8. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2012.
- [Fal93] C. Faltin, H. Hauer, R. Eberhard: „Ein neues Programm zur Berechnung der Druckbeanspruchung von Gebäuden im Störlichtbogenfall“, e & i, vol. 110, No. 4, S. 201-208, 1993.
- [FCC97] FCCC, U.: "Kyoto Protocol to the united nations framework convention on climate change", United Nations Framework Convention on Climate Change, 1997.
- [Fin05] S. Finke: „Auswirkungen von Störlichtbögen auf Kunststoff-trennwände in Niederspannungs-Schaltanlagen“, Dissertation, TU Darmstadt, 2005.
- [Fle70] B. Fleck: „Wie, insbesondere wie klein, soll man eine Mittelspannungsschaltanlage bauen?“, Elektrotechnische Zeitschrift, Band 91, H. 3, VDE-Verlag, S. 155-160, 1970.
- [Fre75] W. Fredebold, E. Wühle, K. Rangs, M. Ermel: „Das N₂-SF₆-Gasgemisch als Isoliermittel der Hochspannungstechnik“, Elektrotechnische Zeitschrift, Ausgabe A, p. 231-235, 1975.
- [Fri99] G. Friberg: „Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Druckbelastung in elektrischen Anlagen im Störlichtbogenfall“, Dissertation, RWTH Aachen, 1999.
- [Fri99] G. Friberg, G. J. Pietsch: "Calculation of pressure rise due to arcing faults", IEEE Transactions on Power Delivery, ISSN 0885-8977, vol. 14, No. 2, p. 365-370, 1999.
- [Gau14] D. Gautschi, K. Pohlink: "Ist SF₆ in Hochspannungsanlagen ersetzbar? - Neue Forschungsarbeiten bringen ermutigende Resultate" Bulletin – Fachzeitschrift und Verbandsinformationen, Electrosuisse und Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen, Schweiz, 2014
- [Ham15] T. Hammer, M. Ise, T. Kishimoto, F. Kessler: "Lebensdauer von Isoliergasen mit niedrigem Treibhauspotential: Gaszersetzung durch Teilentladungen“, GIS-Anwenderforum, Darmstadt, 2015.
- [Hoc85] H. Hochhaus: „Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Schaltlichtbögen und Isolierstoffwänden“, Dissertation, TU Braunschweig, Braunschweig, 1985.
- [Hun12] Huntsman: „Betriebsanweisung zum Epoxid-Giessharzsystem Araldit CW 229-3 Aradur HW 229-1“, Firma Huntsman, 2012.
- [IPC07] Intergovernmental Panel on Climate Change: "Climate Change 2007- Synthesis Report", 2007.
- [Kai00] W. Kaiser, P. Rogazewski, M. Schindler, A. Acikalin, M. Lambert, J. Steinbach: „Ermittlung und Berechnung von Störfallablaufszszenarien nach Maßgabe der 3. Störfallverwaltungsvorschrift“, Forschungs- und Entwicklungsvorhaben 297 48 428, Band 2 / Umweltbundesamt, 2000.
- [Kai11] Kaiser, W.: „Kunststoffchemie für Ingenieure“, Carl Hanser Verlag, 2011.
- [Kal98] U. Kaltenborn: „Über die thermische Wirkung von Störlichtbögen auf Kunststoffe in elektrischen Schaltanlagen“, Dissertation, TU Darmstadt, 1998.
- [Kan04] J. Kanzow: „Struktur, Vernetzung und Metallisierung duroplastischer Polymere“, Dissertation, Christian-Albrecht-Universität, Kiel, 2004.

- [Kin75] H. Kindler, W. Schels: „Systematische Untersuchungen zur Störlichtbogen-sicherheit von Schaltfeldern und Schaltanlagen“, Technische Mitteilungen AEG-Telefunken, Bd. 65, p. 24-34, 1975.
- [Kon09] R. Konersmann, C. Kühl, J. Ludwik: „Zu den Risiken des Transports flüssiger und gasförmiger Energieträger in Pipelines – Forschungsbericht 285 / BAM Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung“ Berlin, – Forschungsbericht. – ISBN 978-3-9812354-7-0, 2009.
- [Kop67] M. Kopatz: „Untersuchungen über die Energiebilanz und Druckentwicklung bei elektrischen Lichtbögen zur Klärung der Explosionsursache von Kabelkästen in Niederspannungsnetzen“, Dissertation, RWTH Aachen, 1967.
- [Kos04] N. Koshino, Y. Yoshitake, N. Hayakawa, H. Okubo: “Partial discharge and breakdown characteristics of CO₂-based gas mixtures as SF₆ substitutes”, in Gaseous Dielectrics X, Springer, New York, 2004.
- [Küc05] A. Küchler: „Hochspannungstechnik: Grundlagen – Technologie – Anwendung“, Springer Verlag, Berlin, 2005.
- [Lan13a] LANXESS Energizing Chemistry, „Datenblatt zu PBT 30% Glasfaser Spritzguss“, 2013.
- [Lan13b] LANXESS Energizing Chemistry, „Datenblatt zu PBT 25% Glasfaser Spritzguss, halogenfrei flammgeschützt“, 2013.
- [Lan13c] LANXESS Energizing Chemistry, „Datenblatt zu PA6.6 30% Glasfaser Spritzguss, wärmestabilisiert“, 2013.
- [Lan13d] LANXESS Energizing Chemistry, „Datenblatt zu PA6.6 30% Glasfaser Spritzguss, flammgeschützt“, 2013.
- [Lec07] F. Leclerc: “New gas-insulated switchgear of voltage rating 420 kV, compact and environmentally friendly”, Mat Post, 2007.
- [Leh03] A. Lehnertz, G. Voß: „Brandversuche an einem Kunststoff-Schaltfeld“, etz, H. 10, S. 24, 2003.
- [Loh95] Lohmeyer, S.: „Die speziellen Eigenschaften der Kunststoffe II.“ Renningen-Malmsheim Expert Verlag, Ehningen, 1995.
- [Lud94] G. Ludwa, C. Faltin: „Messung der Druckwellen bei Störlichtbogenversuchen und Verifikation des an der BVFA-Arsenal entwickelten Druckberechnungsprogramms“, e & i, Bd. 111, No. 2, p. 69-73, 1994.
- [Lut81] F. Lutz: „Ein Verfahren zur Berechnung der Druckentwicklung in Mittelspannungs-Schaltanlagen bei Störlichtbögen“, Dissertation, RWTH Aachen, 1981.
- [Lut82] F. Lutz, G. Pietsch: “The calculation of overpressure in metal-enclosed switchgear due to internal arcing”, in IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, vol. PAS-101, No. 11, pp. 4230-4236, 1982.
- [Man15] M. Mann, T. Diggelmann, P. Müller: „Ein Beitrag zur Evaluierung alternativer Isoliergase in GIS“, GIS-Anwenderforum, TU Darmstadt, 2015.
- [Mev15] Mevaco GmbH eingesehen am 01.11.14 auf <http://www.mevaco.de>
- [Nie98] L. Niemeyer. “A Systematic Search for Insulation Gases and their Environmental Evaluation”, Gaseous Dielectrics VIII, Springer US, p. 459-464, 1998.
- [Nik12] P. G. Nikolic, A. Kurz, M. Hoffacker, A. Schnettler: “Investigations on the dielectric strength of carbon dioxide and carbon dioxide mixtures for the application in gas insulated switchgear”, Proceedings of the 2012 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference, San Diego, p. 67-69, 2012.

- [Oka07] S. Okabe, H. Goshima, A. Tanimura, S. Tsuru, et al.: "Fundamental insulation characteristic of high-pressure CO₂ gas under actual equipment conditions", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 14, S. 83-90, 2007.
- [Ome01] OMEGA Engineering Inc.: "Introduction to Thermocouples" (www.omega.com/prodinfo/thermocouples.html), Stand: 03.08.13.
- [Pap12] K. O. Papailiou, F. Schmuck: „Silikon-Verbundisolatoren“, ISBN 9783642238147, Springer Verlag, Heidelberg, 2011.
- [Phi82] E. Philippow. Taschenbuch der Elektrotechnik - Band 6: „Systeme der Elektroenergie-technik: Hochspannungstechnik“, Carl Hanser Verlag, 1982.
- [Pig72] F. Pigler: „Druckentwicklung in Schaltzellen durch Störlichtbögen“, in Energie und Technik, Bd. 24, No. 2, S. 47-50, 1972.
- [Pol13] Polycasa, „Product Guide Polycasa PC“ (technical information), Geel, 2013.
- [Pus11] P. Pusch: „Schaltberechtigung für Elektrofachkräfte und befähigte Personen“, VDE Verlag 79, S. 214, 6. Aufl., 2011.
- [Pri09] I.-F. Primus: „Netzstationen“, ISBN 3802211146, EW Medien und Kongresse, 2014.
- [Ram01] V. Ramaswamy, O. Boucher, J. Haigh, D. Hauglustaine, J. Haywood, G. Myhre, T. Nakajima, G. Y. Shi, S. Solomon: "Radiative Forcing of Climate Change", in Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, 2001.
- [Roc07] D. Rochette, S. Clain, P. André, W. Bussiére, C. Besnard: "Two-dimensional modelling of internal arc effects in an enclosed MV cell provided with a protection porous filter", Journal of Physics D: Applied Physics, ISSN 0022-3727, vol. 40, p. 3137-3144, 2007.
- [Roc10] D. Rochette, S. Clain, W. Bussiére, P. André, C. Besnard: "Porous Filter Optimization to Improve the Safety of the Medium-Voltage Electrical Installations During an Internal Arc Fault", IEEE Transactions on Power Delivery, ISSN 0885-8977, vol. 25, No. 4, pp. 2464-2471, 2010.
- [Roc11] D. Rochette, S. Clain, W. Bussiére, P. André, C. Besnard: "Corrections to Porous Filter Optimization to Improve the Safety of the Medium-Voltage Electrical Installations During an Internal Arc Fault", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 26, No. 1, p. 486-487, 2011.
- [Sch94] M. Schumacher, G. Pietsch, E. Dullni: „Zum Druckanstieg in Gebäuden bei Störlichtbögen in Innenraum-Schaltanlagen“, Elektrizitätswirtschaft 93, S. 1346-1352, 1994.
- [Sch05] H. Schürmann: „Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden“, ISBN 9783540402831, Springer Verlag, Berlin, 2005.
- [Sch06] M. Schmale: „Untersuchungen zur Beeinflussung des durch Störlichtbögen verursachten Überdrucks in elektrischen Anlagen“, Dissertation, RWTH Aachen, 2006.
- [Sch11] Schneider Electric: „PI100: bis 24 kV luftisolierte Leistungsschalteranlage für die Primärverteilung, Projektierungshinweise“, Schneider Electric, 2011.
- [Sch75] E. Schmidt, K. Stephan, F. Mayinger: „Technische Thermodynamik: Grundlagen und Anwendungen, Band 1: Einstoffsysteme“, ISBN 3540064494, Springer Verlag, Berlin, 1975.

- [Sch89] H. Schuhmann: „Untersuchungen zum Druckanstieg in Schotträumen SF₆-isolierter, einpolig metallgekapselter Hoch-spannungs-Schaltanlagen infolge stromstarker Störlichtbögen“, Dissertation, TU Darmstadt, Darmstadt, 1989.
- [Sig09] H. Sigloch, „Technische Fluidmechanik“, ISBN 978-3-642-03089-5, Springer Verlag, Berlin, 2009.
- [Sol09] Solvay Fluor GmbH: "Sulphur Hexafluoride - Datasheet", 2009, eingesehen am 17.03.2009 auf <http://www.solvay-fluor.com>.
- [Tro12] J. Troitzsch: „Flammschutzmittel: Anforderungen und Innovationen“, in Kunststoffe, H. 11, Hanser Verlag, 2012.
- [Uch04] T. Uchii, Y. Hoshina, T. Mori, H. Kawano: “Investigations on SF₆-free Gas Circuit Breaker Adopting CO₂ Gas As an Alternative Arc-quenching and Insulating Medium”, Gaseous Dielectrics X, 9781461347453, Springer US, p. 205-210, 2004.
- [Uch07] T. Uchii, Y. Hoshina, H. Kawano, K. Suzuki, et al.: “Fundamental Research on SF₆-free Gas Insulated Switchgear Adopting CO₂ Gas and Its Mixtures”, ISETS07, Proceedings of International Symposium on Eco Topia Science, Nagoya, p. 516-520, 2007.
- [Ver96] H. K. Versteeg, W. Malalasekera: “An introduction to computational fluid dynamics, Longman Scientific & Technical”, Essex, 1996.
- [Wac12a] WACKER, „Sicherheitsdatenblatt (1907/2006/EG), Material: 60004790 WACKER SilGel® 612 A“, 2012.
- [Wac12b] WACKER, „Sicherheitsdatenblatt (1907/2006/EG), Material: 60004784 WACKER SilGel® 612 A“, 2012.
- [Wah07] A. Wahle: “Untersuchungen zum Einsatz von Energieabsorbieren in Ringkabelschaltanlagen im Störlichtbogenfall”, Dissertation, RWTH Aachen, 2007.
- [Wei05] C. Weiß: „Kunststoffe in der Elektronik: Ein Handbuch für die Praxis“, ISBN 3874802043, Eugen G. Leuze Verlag, 2005.
- [Wet14a] S. Wetzeler, K. Anantavanich, G. J. Pietsch, : „Influence of arc energy absorbers on the enclosure effect in case of internal arcing in electrical installations“ in Proc. 20th Int. Conf. on Gas Discharges and their Applications, p. 438-441, Orléans, 2014.
- [Wet14b] S. Wetzeler, Y. Cressault, G. J. Pietsch, : „Influence of insulation gas on pressure rise in electrical installations due to internal arcs“ Proc. 20th Int. Conf. on Gas Discharges and their Applications, p. 442-445, Orléans, 2014.
- [Wet15] S. Wetzeler, Y. Cressault, G. Pietsch, L. Hermette: „Pressure Rise in Electrical Installations due to Internal Arcing in CO₂ as Insulating Gas”, Journal of Energy and Power Engineering, ISSN: 1934-8975, vol. 9, no. 6, 2015.
- [Wil93] D. Wilcox: „Turbulence Modeling for CFD“, DCW Industries, 1993.
- [Zha02] X. Zhang: „Modellierung der Auswirkung von Störlichtbögen in elektrischen Anlagen“, Dissertation, RWTH Aachen, 2002.
- [Zha06] X. Zhang, G. Pietsch, E. Gockenbach: “Investigation of the Thermal Transfer Coefficient by the Energy Balance of Fault Arcs in Electrical Installations”, IEEE Transactions on Power Delivery, ISSN 0885-8977, vol. 21, no. 1, p. 425-431, 2006.

II – Wissenschaftlich-technisch und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse

Heutzutage wird zunehmend eine hohe Zuverlässigkeit und Betriebssicherheit von elektrischen Anlagen der Energieübertragung und -verteilung gefordert, wobei bedingt durch das Wirtschaftswachstum und neue Einspeisestrukturen das bestehende Energieversorgungsnetz erweitert werden muss. Dieses führt u. U. zur Erhöhung des Kurzschlussstromes in den Schaltanlagen und damit ggf. der Lichtbogenenergie im Störlichtbogenfall. Dementsprechend erhöht sich die Gefährdung aufgrund eines höheren Überdrucks im Schaltfeld und Anlagenraum, so dass Maßnahmen zur Reduzierung der zunehmenden Druckbelastung erforderlich sind.

Hersteller und Betreiber von elektrischen Anlagen sind in der Regel verpflichtet, deren Zuverlässigkeit und Betriebssicherheit vor allen Dingen im Hinblick auf Personen- und Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Um diesen Anforderungen bei zunehmenden Kurzschlussleistungen gerecht zu werden, müssen sie ihre Produkte kontinuierlich weiterentwickeln, ständig überprüfen und optimieren. Hierzu gehört z. B. auch die Entwicklung von kompakteren Bauweisen mit z. T. gasisolierten Komponenten, um am Markt leistungs- und wettbewerbsfähig sein und bleiben zu können.

Dieses ist gerade deswegen von zunehmender Bedeutung als die Berücksichtigung von komplexen Phänomenen in modernen Schaltanlagen, hervorgerufen z. B. durch Energieabsorber und die Verdampfung von Kunststoff durch Lichtbogeneinwirkung auf die Druckentwicklung im Fehlerfall immer wichtiger wird. Die Berücksichtigung dieser Phänomene und die Einbindung alternativer Isoliergase in Druckberechnungsverfahren fördern die Wettbewerbs- und Zukunftsfähigkeit von KMU.

Wie bereits erwähnt sind Störlichtbogenprüfungen kostenintensiv und zeitaufwendig. Aus diesem Grund sind zuverlässige Eingangsdaten für eine Druckberechnung notwendig, mit der die Auswirkung von Neukonstruktionen auf die Druckbelastung günstig und zuverlässig untersucht werden kann. Für KMU, die insbesondere in der Energieverteilung tätig sind u. a. auch Architekten- und Ingenieurbüros bei der Planung und Dimensionierung von Schaltanlagegebäuden, Handwerksbetriebe, die Schaltanlagen installieren, als auch für Schaltanlagehersteller, sind solche Daten und Verfahren unerlässlich, insbesondere dann, wenn Störlichtbogenprüfungen sowohl aus wirtschaftlichen als auch technischen Gründen schwierig durchzuführen oder sogar unmöglich sind (z. B. bei der Planung von Schaltanlagegebäuden und in bereits existierenden Gebäuden bei einer Aufrüstung).

Die Erfolgsaussicht zur unmittelbaren Nutzung der Ergebnisse nach Projektende ist als außerordentlich positiv. - Hinsichtlich der Finanzierbarkeit der industriellen Umsetzung bestehen keine Zweifel, da zur Umsetzung keine größeren materiellen Ausgaben von Nöten sind.

III – 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.

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.

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

Durchgeführte Transfermaßnahmen in 2013:

Nr.	Transfermaßnahme	Ziel	Zeitraum
1	Vorstellung der (Zwischen-) Ergebnisse auf den Sitzungen des Projektbegleitenden Ausschusses	Steuerung des Entwicklungsprozesses durch Rückmeldung der beteiligten Unternehmen	13.05.2013 12.11.2013
2	Übernahme in die akademische Lehre der RWTH Aachen	Vorbereitung zukünftiger Fachkräfte auf die Thematik	Wintersemester 2013/2014

Durchgeführte Transfermaßnahmen in 2014:

Nr.	Transfermaßnahme	Ziel	Zeitraum
1	Vorstellung der (Zwischen-) Ergebnisse auf den Sitzungen des Projektbegleitenden Ausschusses	Steuerung des Entwicklungsprozesses durch Rückmeldung der beteiligten Unternehmen	12.05.2014 11.11.2014
2	Seminar „Hoch- und Mittelspannungsschaltgeräte und -anlagen“ am Institut für Hochspannungstechnik der RWTH	Bereitstellung der Ergebnisse für Personen aus der Praxis und Vorbereitung zukünftiger Fachkräfte	27.-28.01.2014 23.-24.06.2014
3	Übernahme in die akademische Lehre der RWTH Aachen	Vorbereitung zukünftiger Fachkräfte auf die Thematik	Sommersemester 2014
4	Konferenzbeitrag (20th Int. Conf. on Gas Discharges and their Applications): “Influence of insulating gas on pressure rise in electrical installations due to internal arcs”	Bereitstellung der Ergebnisse für Personen aus der Praxis und Vorbereitung zukünftiger Fachkräfte	Juli 2014
5	Konferenzbeitrag (20th Int. Conf. on Gas Discharges and their Applications): “Influence of arc energy absorbers on the enclosure effect in case of internal arcing in electrical installations”	Bereitstellung der Ergebnisse für Personen aus der Praxis und Vorbereitung zukünftiger Fachkräfte	Juli 2014
5	Mitwirkung bei der Erstellung der technischen Broschüre von der CIGRE-Arbeitsgruppe A3.24	Bereitstellung der Ergebnisse für Personen aus der Praxis und Vorbereitung zukünftiger Fachkräfte	Dezember 2014

Durchgeführte Transfermaßnahmen in 2015:

Nr.	Transfermaßnahme	Ziel	Zeitraum
1	Vorstellung der (Zwischen-) Ergebnisse auf den Sitzungen des Projektbegleitenden Ausschusses	Steuerung des Entwicklungsprozesses durch Rückmeldung der beteiligten Unternehmen	12.05.2015 20.10.2015
2	Seminar „Hoch- und Mittelspannungsschaltgeräte und -anlagen“ am Institut für Hochspannungstechnik der RWTH	Bereitstellung der Ergebnisse für Personen aus der Praxis und Vorbereitung zukünftiger Fachkräfte	29.-30.01.2015 29.-30.06.2015
3	Konferenzbeitrag (XXIst Symposium on Physics of Switching Arc): “Investigation of the Influence of Plastic Evaporation on Pressure Rise due to Fault Arcs in Electrical Installations”	Bereitstellung der Ergebnisse für Personen aus der Praxis und Vorbereitung zukünftiger Fachkräfte	September 2015
4	Veröffentlichung (Journal of Energy and Power Engineering): “Pressure Rise in Electrical Installations due to Internal Arcing in CO2 as Insulating Gas”	Bereitstellung der Ergebnisse für Personen aus der Praxis und Vorbereitung zukünftiger Fachkräfte	Juni 2015

Durchgeführte Transfermaßnahmen in 2016:

Nr.	Transfermaßnahme	Ziel	Zeitraum
1	Information des FGH-Forschungsbeirates	Bewertung und Diskussion der Ergebnisse im Expertenkreis	5.04.2016 22.11.2016
3	Seminar „Hoch- und Mittelspannungsschaltgeräte und -anlagen“ am Institut für Hochspannungstechnik der RWTH	Bereitstellung der Ergebnisse für Wissenschaftlicher und Vorbereitung zukünftiger Fachkräfte auf die Thematik	11.-12.01.2016 13.-14.06.2016
4	Konferenzbeitrag (21th Int. Conf. on Gas Discharges and their Applications): “Experimental Determination of the effects of arc energy absorbers on pressure development in electrical installations”	Bereitstellung der Ergebnisse für Personen aus der Praxis und Vorbereitung zukünftiger Fachkräfte	Juli 2016
5	Dissertation, Sebastian Wetzler: Untersuchung von Einflussgrößen auf die Druckentwicklung in elektrischen Anlagen im Störlichtbogenfall. ISBN-10: 3958861261	Bereitstellung der Ergebnisse für Wissenschaftlicher und Vorbereitung zukünftiger Fachkräfte auf die Thematik	November 2016

Geplante Transfermaßnahmen in 2017:

Nr.	Transfermaßnahme	Ziel	Zeitraum	Realisierbarkeit
1	Information des FGH-Forschungsbeirates	Bewertung und Diskussion der Ergebnisse im Expertenkreis	26.04.2017	sicher
2	Publikation im Internet auf der FGH-Homepage	Bereitstellung der Ergebnisse für wissenschaftliche Fachkräfte	nach Abgabe des Schlussberichts an AiF	sicher
3	Übernahme in die akademische Lehre der RWTH Aachen	Vorbereitung zukünftiger Fachkräfte auf die Thematik	ca. 12 Mon. nach Projektende	sicher
4	Publikation in Fachzeitschriften, z.B. etz, ew, Electrical Engineering (Archiv für Elektrotechnik)	Bereitstellung der Ergebnisse für wissenschaftliche Fachkräfte	innerhalb 2 Jahren nach Projektende	sehr wahrscheinlich

Die geplanten Transfermaßnahmen sind insgesamt mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit realisierbar. Einige Maßnahmen sind als gesichert (z.B. Übernahme in die Lehre, Publikation auf Homepages der Forschungsstellen) andere zumindest als sehr wahrscheinlich einzuschätzen, da z.B. Publikationen zu den Kernkompetenzen der Forschungsstellen gehören.