



Benjamin Bauer, BSc

Messung von Paschenkurven für Gasgemische

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Elektrotechnik

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Schichler

Institut für
Hochspannungstechnik und Systemmanagement

Univ.-Prof. Dr.-Ing Uwe Schichler

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Datum

Unterschrift

Danksagung

Die Masterarbeit stellt nicht nur den Gipfelpunkt in meinem Studium dar, sondern beendet auch einen großartigen Lebensabschnitt. Ich nehme dies zum Anlass, um mich bei all jenen zu bedanken, die mich bis hierher begleitet und unterstützt haben.

Ich bedanke mich bei meinen Betreuern Univ.-Prof. Dr.-Ing Uwe Schichler und Dipl.-Ing. Mohammad Zamani für die Vergabe dieser interessanten Masterarbeit und die gute Betreuung. Sie hatten stets eine offene Tür für mich und standen mit Rat und Tat zur Seite.

Weiter möchte ich mich bei den Mitarbeitern des Instituts für Hochspannungstechnik und Systemmanagement bedanken, die sich stets hilfsbereit zeigten und ebenfalls zum Gelingen dieser Arbeit beitrugen.

Mein Dank geht auch an Univ.-Prof. Dipl.-Chem. Dr.rer.nat. Frank Uhlig und Astrid Falk vom Institut für Anorganische Chemie, die mich zu chemischen Fragestellungen beraten haben.

Einen großen Teil meines Studiums prägte die Mitgliedschaft im Hochspannungszeichensaal. Hier waren mein Arbeitsplatz, meine Lerngruppe, meine Küche und mein Wohnzimmer. Darum vielen Dank an den Hochspannungszeichensaal, dem ich immer verbunden bleiben werde.

Ein Technikstudium bestreitet man nicht alleine. Ein großes Dankeschön geht an meine Kommilitonen: Arno, Bene, Harry und Robert sowie auch an Christopher, Matthias und Wolfgang.

Mein besonderer Dank geht an meine Familie. Ihr habt mir dieses Studium ermöglicht und den nötigen Rückhalt gegeben. Vielen Dank!

Kurzfassung

In der Energietechnik ist Schwefelhexafluorid das wichtigste Isoliergas für gekapselte Anlagen. Gelangt es in die Atmosphäre, so wird es mit einem Treibhauspotential von 23900 wirksam. Auf der Suche nach einer umweltverträglichen Alternative gelten Gasgemische als aussichtsvolle Kandidaten. Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Messung der Paschenkurven von Gasgemischen. Es wurde hierfür ein geeigneter Messaufbau entwickelt. In einem gasdichten Prüfgefäß befinden sich zwei Kugelelektroden in geringem Abstand. Die Anordnung hat einen Homogenitätsgrad von 0,96 und wird mit negativer Gleichspannung beansprucht. Der Versuchsbereich beträgt 0,05 bar*mm bis 20 bar*mm. Jede Paschenkurve besteht aus neun Messpunkten zu jeweils 20 Einzelmessungen. Es wurden die Paschenkurven von N₂/CO₂ im Verhältnis 80%/20% und 60%/40%, SF₆/N₂/O₂ im Verhältnis 90%/8%/2% und N₂/SF₆ im Verhältnis 80%/20% gemessen. Die Regressionskurven konnten anhand einer Näherungsformel für stark elektronegative Gase mit einem iterativen Least-Squares-Verfahren eingepasst werden. Die erhaltenen Paschenkurven zeigen deutlich die Überlegenheit von Gasmischungen mit Schwefelhexafluorid. Abschließend beschäftigt sich diese Arbeit mit der Berechnung elektrischer Eigenschaften von Gasgemischen. Es wurde der effektive Ionisierungskoeffizient für verschiedene Verhältnisse eines N₂/CO₂ Gemisches berechnet.

Abstract

In the field of power engineering sulphur hexafluoride is the main insulating gas for gas-insulated systems. When it passes into the atmosphere it gets active as a greenhouse gas with a global warming potential of 23900. In search of an environmentally friendly alternative, gas mixtures are regarded as promising candidates. This work deals with the measurement of the Paschen curves of gas mixtures. For this purpose, a suitable measurement set-up has been developed. In a gas tight test vessel, there are two spherical electrodes at a short distance. The assembly has a degree of homogeneity of 0.96 and gets stressed with a negative DC voltage. The test range is 0.05 bar*mm to 20 bar*mm. Each Paschen curve consists of nine measurement points, each with 20 individual measurements. The Paschen curves of following Gas mixtures were measured: N₂/CO₂ at 80%/20% ratio and 60%/40% ratio, SF₆/N₂/O₂ at 90%/8%/2% ratio, and N₂/SF₆ at 80%/20% ratio. The regression curves were fitted based on an approximation formula for strongly electronegative gases with an iterative least-squares method. The Paschen curves clearly show the superiority of gas mixtures of sulphur hexafluoride. The last point in this work deals with calculating the electrical properties of gas mixtures. The effective ionization coefficient for different ratios of N₂/CO₂ mixture was calculated.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Gase	2
2.1	Ideales Gas	2
2.2	Reales Gas	3
2.3	Gasgemische	4
2.3.1	Dynamisch-volumetrisches Verfahren.....	4
2.3.2	Manometrisch-statisches Partialdruckverfahren.....	4
2.3.3	Gravimetrisches Verfahren	5
2.4	Homogenisierung / Entmischung.....	5
3	Gasentladung.....	6
3.1	Generation von Ladungsträgern in Gasen	6
3.1.1	Photoionisation	6
3.1.2	Thermoionisation	6
3.1.3	Stoßionisation	7
3.1.4	Oberflächenemission	7
3.1.5	Rekombination.....	8
3.2	Ladungsträgerbewegung im elektrischen Feld.....	8
3.3	Raumladungen und Polaritätseffekt.....	9
3.4	Gasentladungskennlinie	10
3.4.1	Unselbstständige Entladung	10
3.4.2	Selbstständige Entladung	10
3.4.3	Generationenmechanismus nach Townsend	11
3.4.4	Streamer- und Leader-Mechanismus.....	11
4	Paschenkurve	13
5	Messvorbereitung / Planung.....	15
5.1	Homogenität.....	15
5.2	Elektroden	16
5.3	Versuchsbereich.....	16
5.4	Schnellabschaltung	17
5.5	Statistische Auswertung der Messergebnisse.....	19
5.6	Gasreinheit / Gase mischen	19
5.7	Untersuchung von Gasproben.....	21
5.8	Prüfspannung.....	22

5.9	Spannungsmessung.....	23
5.10	Druckmessung	25
5.11	Elektrodenabstand	25
5.12	Leckrate	25
5.13	Auswahl der Gasmischungen	27
6	Messaufbau	29
6.1	Prüfgefäß	29
6.2	Elektroden	30
6.3	Messschaltungen	31
6.3.1	Spannungsbereich bis 10 kV	31
6.3.2	Spannungsbereich von 10 kV bis 100 kV	32
6.3.3	Überprüfung der Spannungsmessung	33
6.4	Messvorbereitung.....	33
6.5	Messprozedur.....	34
7	Messergebnisse	35
7.1	Referenzmessungen	35
7.1.1	Referenzmessung für Stickstoff	35
7.1.2	Referenzmessung für Kohlendioxid	36
7.1.3	Referenzmessung für Synthetische Luft.....	38
7.1.4	Kontrollmessungen	40
7.2	Paschenkurven für neue Gasgemische	41
7.2.1	Kurve 1: N ₂ /CO ₂ im Mischverhältnis 80%/20%.....	41
7.2.2	Kurve 2: N ₂ /CO ₂ im Mischverhältnis 60%/40%.....	42
7.2.3	Kurve 3: SF ₆ /N ₂ /O ₂ im Mischverhältnis 90%/8%/2%.....	43
7.2.4	Kurve 4: N ₂ /SF ₆ im Mischverhältnis 80%/20%.....	44
7.3	Diskussion.....	45
8	Berechnung elektrischer Eigenschaften für binäre Gasgemische.....	47
9	Zusammenfassung.....	50
10	Literaturverzeichnis	52
11	Anhang.....	54

1 Einleitung

Die Versorgung mit elektrischer Energie gilt in der modernen Gesellschaft als eine Selbstverständlichkeit. Seit Beginn der Elektrifizierung steigt der Stromverbrauch stetig. Dieser Trend hält bis heute an. Aktuellen Entwicklungsszenarien zufolge könnte sich der Weltstromverbrauch von 2011 bis 2035 um über zwei Drittel erhöhen [1]. Um den prognostizierten Energiebedarf der Verbraucher zuverlässig decken zu können, muss die Elektrizitätswirtschaft die Energieerzeugung und ihre Verteilung zukunftssicher ausbauen. Eine Möglichkeit, die zusätzliche Energie übertragen zu können, ist die Umstellung bestehender Anlagen auf höhere Übertragungsspannungen [2]. Besonders im urbanen Bereich stellt das begrenzte Platzangebot für Energieversorger ein Problem dar. Eine bereits etablierte Lösung sind gasisolierte Schaltanlagen. Diese zeichnen sich vor allem durch geringen Raumbedarf, sicheren Berührungsschutz und hohe Betriebssicherheit aus [3]. Zur Energieübertragung können auch gasisolierte Leitungen (GIL) eingesetzt werden. Aktuell handelt es sich hierbei noch weitgehend um Nischenanwendungen. Eine GIL wird überall dort eingesetzt, wo Freileitungen oder Kabel außer Betracht stehen. Etwa aus optischen Gründen oder in Bereichen, in denen Brandschutz besonders sensibel ist, beispielsweise in Tunneln. Auch das sehr geringe magnetische Feld entlang von GIL-Trassen, kann ausschlaggebend für den Bau sein [4]. Als Isoliergas wird in gekapselten Anlagen Schwefelhexafluorid (SF_6) in Reinform oder in Gasgemischen verwendet. Es besitzt ausgezeichnete Isoliereigenschaften und hat sich auch als Löschgas in Schaltern bewährt [5]. Schwefelhexafluorid ist sehr reaktionsträge und nach Zersetzung gut regenerationsfähig [6]. Problematisch an diesem Isoliergas ist jedoch das hohe Treibhauspotential und die Anschaffungskosten, die aktuell je nach gewünschter Reinheit zwischen 8 \$ / kg und 30 \$ / kg liegen. Gelangt SF_6 in die Atmosphäre, wird es als Treibhausgas wirksam. Mit einem Treibhauspotential von 23900 ist es das stärkste bekannte Treibhausgas [4, 6]. Darüber hinaus hat es eine atmosphärische Verweildauer von etwa 3200 Jahren [7]. Es ist daher anzustreben, Schwefelhexafluorid durch alternative Isoliergase abzulösen. Mischungen aus Stickstoff und Schwefelhexafluorid werden in GIL bereits eingesetzt. Dabei genügen bereits SF_6 -Anteile von weniger als 30 %. Um dieselbe elektrische Festigkeit wie bei reinem SF_6 zu erhalten sind jedoch höhere Drücke notwendig [5]. Im homogenen, elektrischen Feld ist die Durchschlagspannung eines Gases abhängig vom Gasdruck und der Schlagweite. Um die elektrischen Eigenschaften für ein Gas oder ein Gasgemisch zu beschreiben eignet sich daher die Paschenkurve, welche über einen weiten Bereich den Zusammenhang zwischen Durchschlagspannung und dem Produkt aus Druck und Schlagweite zeigt. Diese Masterarbeit hat zum Ziel, die Paschenkurven von erfolgversprechenden Gasgemischen zu messen. Anhand von bekannten Messungen aus der Literatur und den technischen Möglichkeiten des Hochspannungslaboratoriums wurde ein Messaufbau zu diesem Zweck realisiert. Die Messungen wurden durchgeführt und diskutiert. Abschließend betrachtet diese Arbeit noch die theoretische Ermittlung der elektrischen Eigenschaften von Gasgemischen.

2 Gase

2.1 Ideales Gas

In der Gasphysik wird vereinfachend das ideale Gas, vom realen Gas unterschieden. Das ideale Gas ist per Definition ein Gas dessen Verhalten vollständig und uneingeschränkt durch die kinetische Gastheorie beschrieben wird [8]. Es werden folgende Voraussetzungen angenommen:

- *Das Gas besteht aus kugelförmigen Molekülen derselben Masse.*
- *Die Moleküle führen ständig Zufallsbewegungen aus.*
- *Sämtliche Stöße sind vollkommen elastisch.*
- *Der mittlere Abstand zweier Moleküle ist viel größer als ihr Durchmesser.*
- *Kräfte zwischen Molekülen, den Behälterwänden und Gravitation sind vernachlässigbar [9].*

Für ein Gas mit diesen Eigenschaften besagt das Gesetz von Boyle-Mariotte (Gleichung 2.1) einen konstanten Zusammenhang zwischen Druck p und Volumen V . Das Gesetz von Gay-Lussac (Gleichung 2.2) beschreibt die Volumenänderung bei Veränderung der Temperatur T , wobei α den räumlichen Ausdehnungskoeffizienten darstellt. Durch Kombination der beiden Gesetze lässt sich die Zustandsgleichung idealer Gase ableiten (Gleichung 2.3). Unter Berücksichtigung der Masse M und durch Einführen der speziellen Gaskonstante R_G ergibt sich Gleichung 2.4. Zusätzlich gilt noch das Gesetz von Dalton (Gleichungen 5.6 und 5.7) siehe Abschnitt 2.3.2 [10]. In Bild 2.1 ist das Verhalten eines idealen Gases, bei Veränderung seiner Temperatur abgebildet. V, R_G und M werden hier als konstant vorausgesetzt und in der Konstante k_n zusammengefasst. Wie aus Gleichung 2.4 hervorgeht ist nun p linear abhängig von T . Im Grenzfall $\lim_{T \rightarrow 0} p(T) = 0$ verschwindet der Gasdruck völlig, was bedeutet, dass der Impuls der Gasmoleküle zu null wird. Diese Betrachtung funktioniert in der Realität nicht und zeigt, dass das ideale Gasmodell nur begrenzt und unter besonderen Voraussetzungen verwendet werden kann.

$$p V = \text{konstant} = k \quad (2.1)$$

$$V_{T_1} = V_{T_0}(1 + \alpha \Delta T_{1-0}) \quad (2.2)$$

$$\frac{p V}{T} = k \quad (2.3)$$

$$p V = M R_G T \quad (2.4)$$

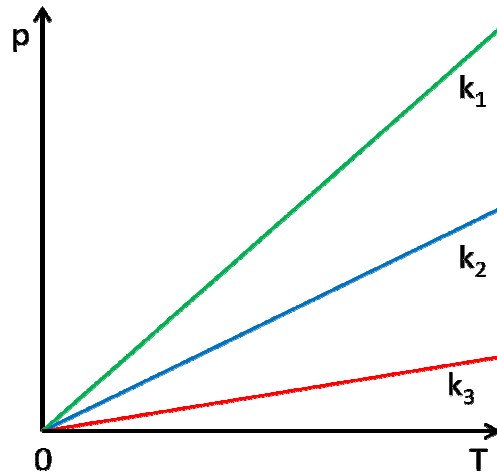


Bild 2.1: p-T-Diagramm ideales Gas mit V, M und R_G = const. = k

2.2 Reales Gas

Bei der Betrachtung realer Gase lassen sich Kraftwirkungen zwischen den Gaspartikeln nicht mehr vernachlässigen. Es sind die Gaspartikel nicht als punktförmig, sondern mit ihren Volumina zu berücksichtigen. Der sogenannte Kompressionsfaktor oder Realgasfaktor Z beschreibt diesen zwischenmolekularen Krafteinfluss als Verhältnis des realen Volumens zum idealen Gasvolumen (Gleichung 2.5) [10].

$$Z_{p,T} = \frac{p V_{Mol}}{R T} = \frac{V_{real}}{V_{ideal}} \quad (2.5)$$

Durch Berücksichtigung dieser Krafteinflüsse kommt es zum Übergang in andere Aggregatzustände. Unter den entsprechenden Bedingungen können Gase also auch fest und flüssig vorkommen. Genauso können Feststoffe und Flüssigkeiten in den gasförmigen Zustand übergehen, wie in Bild 2.2 ersichtlich ist. Es ist also zweckmäßig, Gase zu definieren. Nach ADR 2003 (Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße) ist ein Gas ein Stoff der:

- a) bei 50°C einen Dampfdruck von mehr als 300 kPa (3 bar¹) hat oder
- b) bei 20 °C und dem Standarddruck von 101,3 kPa vollständig gasförmig ist [11].

Der mathematische Umgang mit realen Gasen ist um ein vielfaches komplexer als der Umgang mit idealen Gasen und übersteigt den Rahmen dieser Arbeit. Es wurden daher geringe Ungenauigkeiten in Kauf genommen und mit idealen Gasen gerechnet.

¹ Zur besseren Vergleichbarkeit wird im Rahmen dieser Arbeit neben der SI-Einheit Pascal (Pa) die Maßeinheit Bar (bar) verwendet. Es gilt: 1 bar = 100.000 Pa = 0,1 MPa

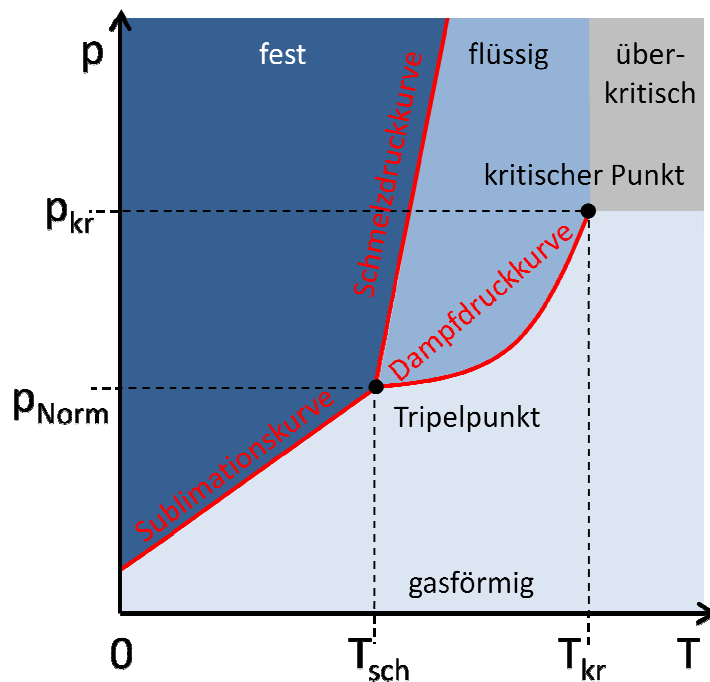


Bild 2.2: Vereinfachtes Phasendiagramm für reales Gas [10]

2.3 Gasgemische

Die Wahl des geeigneten Mischverfahrens hängt von der geforderten Präzision und den zur Verfügung stehenden Mitteln ab. Im Wesentlichen haben drei Verfahren technische Bedeutung.

2.3.1 Dynamisch-volumetrisches Verfahren

Beim dynamisch-volumetrischen Verfahren werden kontinuierlich Volumen- oder Massenströme vermischt. Das Gasgemisch ist die Summe der Einzelkomponenten und entsprechend ihrer Anteile aufgebaut. Das Verfahren funktioniert analog zu einer Mischbatterie, wie sie in jedem Haushalt vorkommt, und lässt sich so leicht nachvollziehen. Der Vorteil liegt in der Möglichkeit große Gas-mengen in gleichbleibender Zusammensetzung zu mischen. Das Verfahren ist aber nur für einfache Gasmischungen, mit wenigen Komponenten geeignet und in der Anschaffung kostenintensiv [12].

2.3.2 Manometrisch-statisches Partialdruckverfahren

Das manometrisch-statische Partialdruckverfahren (kurz: Manometrisches Verfahren) basiert auf der Druckänderung in einem Behälter, bei aufeinanderfolgender Zugabe der Gemischanteile[12]. Die theoretische Grundlage liefert das Gesetz von Dalton (Gleichungen 5.6 und 5.7). Dieses besagt: *In einem Gemisch idealer, chemisch nicht miteinander reagierender Gase ist der Gesamtdruck gleich der Summe der Partialdrücke. Der Partialdruck ist der Druck des jeweiligen Gases, den man messen würde, wenn dieses Gas allein in dem Gesamtvolumen vorhanden wäre* [13]. Aus Formel 2.4 ergibt sich, dass der Druck p durch drei Zustandsgrößen M, V und T beeinflusst

werden kann. Voraussetzung für die Anwendung des Daltonschen Gesetzes ist isothermes, isochores befüllen. Die Änderung des Volumens kann bei massiven Gefäßen vernachlässigt werden. Es ist jedoch auf eventuelle Temperaturänderungen zu achten. Auch dieses Verfahren lässt sich anhand einer Analogie leicht verstehen. Möchte man ein wohltemperiertes Bad nehmen, so kann nacheinander kaltes und danach heißes Wasser in die Wanne gefüllt werden. Das Ansteigen des Wasserspiegels ist analog zum Druckanstieg zu sehen.

2.3.3 Gravimetrisches Verfahren

Das gravimetrische Verfahren funktioniert ähnlich dem manometrischem Verfahren. Auch hier werden nacheinander die Gemischanteile in den Behälter gefüllt. Es wird jedoch nicht die Druckänderung beobachtet, sondern die Massenzunahme. Dies hat den Vorteil, dass der direkte Bezug zu den Basisgrößen kg und Mol besteht. Eine Umrechnung über die Zustandsgleichungen ist nicht erforderlich. Es muss also nicht auf Temperaturschwankungen geachtet werden. Das ermöglicht die Herstellung von hochpräzisen Gasmischungen. Problematisch sind jedoch die Anforderungen an die Waagen. Diese müssen selbst bei hohen Belastungen bis etwa 100 kg, Unterschiede im Milligramm-Bereich reproduzierbar messen können. Dabei ist sogar der Auftrieb des Gasbehälters zu berücksichtigen [12].

2.4 Homogenisierung / Entmischung

Die genannten Mischverfahren garantieren nicht automatisch eine homogene Gasmischung. Das muss jedoch für die weitere Verwendung sichergestellt werden. Grundsätzlich findet eine selbstständige Durchmischung durch die Brownsche Molekularbewegung statt. Der Vorgang kann je nach den verwendeten Gasen, von Minuten bis zu einigen Jahren in Anspruch nehmen. Dies lässt sich aber deutlich beschleunigen. Entweder durch eine erzwungene Umwälzung, zum Beispiel durch drehen des Gefäßes oder durch Konvektion, indem das Gefäß lokal erwärmt wird. Durch die Erwärmung steigt außerdem die Beweglichkeit der Gaspartikel was die selbstständige Durchmischung weiter beschleunigt. Eine Entmischung findet nur statt, wenn mindestens eine Komponente der Gasmischung ihre Kondensationstemperatur unterschreitet [10].

3 Gasentladung

3.1 Generation von Ladungsträgern in Gasen

Damit Gase den elektrischen Strom leiten können, müssen frei bewegliche Ladungsträger vorhanden sein. Dabei handelt es sich um freie Elektronen und Ionen. Werden diese direkt im Gas erzeugt, ist die Rede von Volumenionisation. Bei Austritt von Ladungsträgern aus der Elektrodenoberfläche wird von Oberflächenemission gesprochen (γ -Effekt) [14].

3.1.1 Photoionisation

Treffen Photonen mit ausreichend kurzer Wellenlänge auf Gasteilchen, so kommt es zur Photoionisation. Für eine Ionisation muss gelten [13] :

$$h \nu \geq E_i \quad (3.1)$$

Reicht die Energie des Photons nicht für eine Ionisation, so kann es zu einer Anregung kommen. Dabei geht die Energie auf ein Elektron über, so dass es ein energetisch höheres Orbital besetzen kann. Durch weiteres zuführen von Energie in diesem Zustand kann es zur Ionisation kommen. Es handelt sich um einen Mehrstufenprozess. Hierfür wird eine Wellenlänge von etwa 200nm (UV-C) benötigt. Für direkte Photoionisation werden Wellenlängen kleiner 100 nm benötigt [14]. (harte UV Strahlung \rightarrow Röntgenstrahlung \rightarrow Gammastrahlung) Zu natürlicher Photoionisation kommt es beispielsweise durch kosmische Strahlung, radioaktiven Zerfall und UV-Licht.

3.1.2 Thermoionisation

Zur Thermoionisation kommt es wenn zufällig vorhandene Elektronen durch Stöße genug Energie aufgenommen haben, um Gasmoleküle ionisieren zu können. Eine Ionisation durch Stöße zwischen Ionen oder Neutralteilchen ist unwahrscheinlich und tritt erst bei sehr hohen Temperaturen nennenswert auf. Die Eggert-Saha-Gleichung 3.2 beschreibt den Ionisationsgrad eines Gases durch Thermoionisation [13]. Der Zusammenhang zwischen Temperatur und Ionisierungsgrad ist in Bild 3.1 qualitativ abgebildet.

$$\frac{x^2 p}{1 - x^2} = \left(\frac{2 \pi m}{h^2} \right)^{3/2} \cdot (k T)^{5/2} \cdot e^{-\left(\frac{E_i}{kT}\right)} \quad (3.2)$$

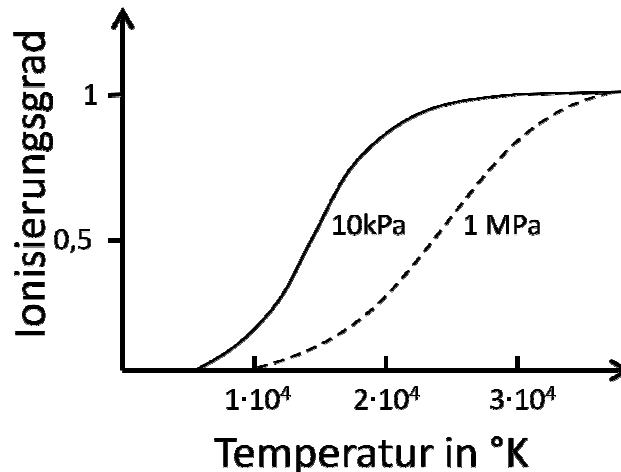


Bild 3.1: Temperaturabhängigkeit des Ionisierungsgrades [13]

3.1.3 Stoßionisation

Unter Stoßionisation ist die Ionisation von Gasmolekülen zu verstehen, die durch Stoßprozesse mit energiereichen Ladungsträgern stattfindet. Im Unterschied zur Thermoionisation gewinnen die Ladungsträger ihre Energie jedoch nicht aus der thermischen Teilchenbewegung, sondern durch Beschleunigung in einem elektrischen Feld. Zur Stoßionisation kann es somit nur kommen, wenn die elektrische Feldstärke ausreichend groß ist um die Ladungsträger auf die erforderliche Ionisierungsenergie zu beschleunigen. Siehe auch Abschnitt 3.4.3.

3.1.4 Oberflächenemission

Bei der Oberflächenemission treten Elektronen aus Festkörpern aus und stehen dann als freie Ladungsträger zur Verfügung. Die Prinzipien sind ähnlich der Volumenionisation. Eine thermische Emission setzt als Folge der Wärmebewegung von Elektronen ein. Es muss für eine Emission die Austrittsenergie des Elektrodenmaterials aufgebracht werden. Die Photoemission basiert auf dem photoelektrischen Effekt. Dabei werden Elektronen aus der Oberfläche abgelöst wenn die Energie der Photonen größer der Austrittsenergie E_a ist. Die Überschussenergie geht auf das Abgelöste Elektron über, in Form einer Anfangsgeschwindigkeit v . Diese errechnet sich nach der Einsteinschen Gleichung 3.3. Es ist dabei zu bemerken, dass die Austrittsenergie eines Stoffes deutlich geringer ist als seine Ionisierungsenergie. Somit sind wesentlich langwelligere Photonen in der Lage zur Photoemission, nicht jedoch zur Photoionisation [13, 14].

$$\frac{m}{2} v^2 = h \nu - E_a \quad (3.3)$$

Positiv geladene Ionen driften im elektrischen Feld zur Kathode. Beim Aufprall können sogenannte Sekundärelektronen entstehen. Dafür müssen zwei Elektronen freigesetzt werden. Ein Elektron, um das Ion zu neutralisieren, und ein Sekundärelektron. Durch das Neutralisieren wird die Ionisierungsenergie wieder frei und unterstützt den Prozess. Formel 3.4 beschreibt diese Bedingung.

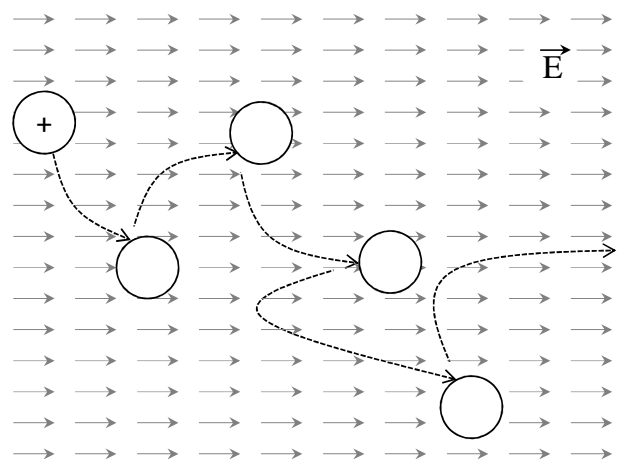
$$\frac{m v^2}{2} + E_i \geq 2 E_a \quad (3.4)$$

3.1.5 Rekombination

Treffen Ladungsträger mit entgegengesetzter Ladung aufeinander, so kann es zur Rekombination zu neutralen Teilchen kommen. Ein Aufeinandertreffen geschieht durch thermische Bewegung und wird durch die gegenseitigen, coulombschen Kräfte weiter begünstigt. Treffen positive Ionen mit Elektronen zusammen, ist von einer Zweierstoßkombination die Rede. Dabei wird die Summe aus der freiwerdenden Ionisierungsenergie E_i und der kinetischen Energie der Ladungsträger in Form eines Photons wieder abgegeben. Es handelt sich um den Umkehrprozess der Photoionisation, was sich als Rekombinationsstrahlung zeigt. Diese befindet sich im Serien-Grenzkontinuum, also dem Bereich, welcher der charakteristischen Spektrallinie nachfolgt. Darum sind Photonen aus Rekombinationsprozessen wiederum in der Lage neutrale Moleküle zu ionisieren [13, 14].

3.2 Ladungsträgerbewegung im elektrischen Feld

Auf jedes geladene Teilchen in einem elektrischen Feld \vec{E} , wirkt eine Kraft \vec{F} die dieses beschleunigt. Durch elastische Stöße an anderen Teilchen wird das geladene Teilchen abgelenkt. Es stellt sich eine Driftgeschwindigkeit v_d ein. Die Driftgeschwindigkeit und die beschleunigende Kraft sind durch die Beweglichkeit μ in ein Verhältnis gesetzt. Aus Formel 3.7 ist zu erkennen, dass die Beweglichkeit umso größer wird je weniger Masse das Teilchen besitzt und



je geringer seine Stoßfrequenz ist. Die Trajektorie setzt sich daher aus vielen, kleinen, parabolischen Bahnen zusammen. Dies ist in Bild 3.2 dargestellt [15].

Bild 3.2: Drift eines geladenen Teilchens im elektrischen Feld [15]

$$\vec{F} = q \vec{E} \quad (3.5)$$

$$\vec{a} = \vec{F}/m \quad (3.6)$$

$$\vec{v}_d = \mu q \vec{E} = \frac{q \vec{E}}{2 m \nu} \quad (3.7)$$

3.3 Raumladungen und Polaritätseffekt

Elektronen werden bei elastischen Stößen durch ihre kleine Masse praktisch nicht gebremst. Formel 3.6 zeigt eine starke Abhängigkeit der Beschleunigung von der Teilchenmasse. Daher werden die leichten Elektronen wesentlich schneller abgesaugt als die viel schwereren Ionen, die als Raumladungswolke im Gas zurückbleiben. Das bewirkt eine Feldverzerrung, was zu lokalen Feldüberhöhungen und Feldschwächungen führen kann. Im inhomogenen Feld wird daher der Polaritätseffekt beobachtet. Dieser besagt, dass bei einer inhomogenen Elektrodenanordnung die Polung sich auf das elektrische Verhalten auswirkt. Bei negativer Spitze über positiver Platte bildet sich eine positive Raumladungswolke vor der Spitze, die eine lokale Feldüberhöhung bewirkt. Dadurch kommt es bei verhältnismäßig geringen Spannungen zum Einsetzen von Koronaentladungen, jedoch erst bei hohen Spannungen zum Durchschlag. Umgekehrt verhält es sich bei positiver Spitze über negativer Platte. Die positive Raumladung vor der Spitze bewirkt ein „Vorwachsen“ der Anode, wodurch es verfrüht zu einem Durchschlag kommt. Dieser Sachverhalt ist in Bild 3.3 abgebildet [4].

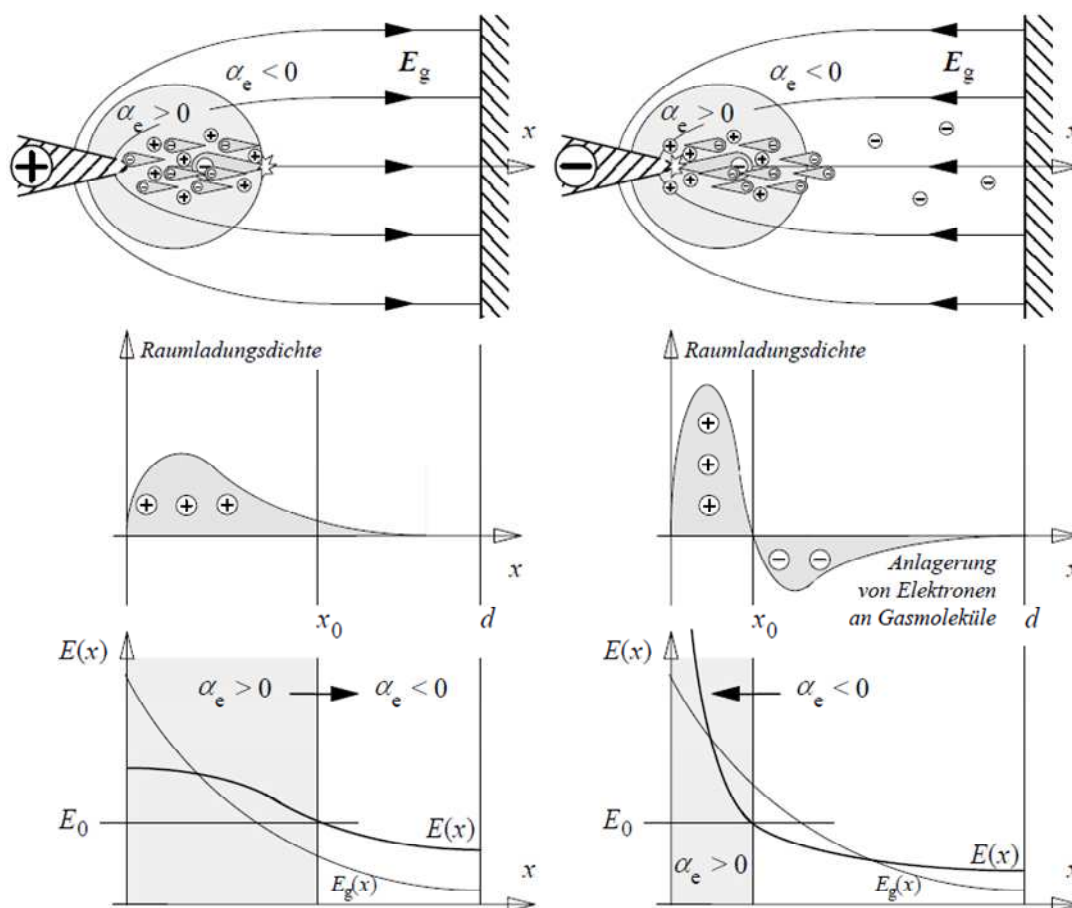


Bild 3.3: Polaritätseffekt im stark inhomogenen Feld [4]

3.4 Gasentladungskennlinie

3.4.1 Unselbstständige Entladung

Wie in Abschnitt 3.1 beschrieben, kann bei geringen Feldstärken keine zusätzliche Generation von Ladungsträgern stattfinden. Es wird von einer unselbstständigen Entladung gesprochen. Im Bereich der Standardbedingungen sind Gase gute Isolierstoffe. Die Stromleitung kann nur durch im Gas frei bewegliche Ladungsträger erfolgen. Es handelt sich daher um freie Elektronen und Ionen, die durch natürliche Ionisationsprozesse im Gas vorkommen. Wegen der ständigen Ionisations- und Rekombinationsprozesse stellt sich ein Gleichgewicht an vorhandenen Ladungsträgern ein. Durch Erhöhen der Feldstärke erhöht sich der Ladungsträgerdrift. In Bild 3.4 ist der Zusammenhang zwischen Strom und Spannung bei unselbstständiger Entladung abgebildet. Im ohmschen Bereich steigt der Strom linear mit der ansteigenden Spannung. Dies lässt sich steigern bis alle Ladungsträger im elektrischen Feld abgesaugt werden, ohne rekombinieren zu können. Die Sättigungsstromdichte ist erreicht, wenn ein Steigern der Spannung keinen Stromanstieg mehr bewirkt. Diese beträgt etwa $J_{\text{sätt}} \approx 10^{-18} \text{ A/cm}^2$ [4].

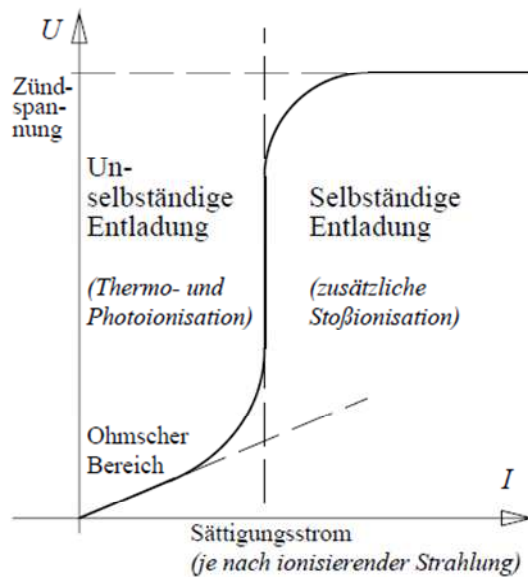


Bild 3.4: Gasentladungskennlinie bei unselbstständiger Entladung [4]

3.4.2 Selbstständige Entladung

Im Gegensatz zur unselbstständigen Entladung kommt es bei der selbstständigen Entladung zur Generation von zusätzlichen Ladungsträgern durch die in Abschnitt 3.1 genannten Verfahren. Die dafür nötige Energie kommt aus dem elektrischen Feld. Dadurch werden Stromdichten möglich, welche die Sättigungsstromdichte bei unselbstständiger Entladung um viele Zehnerpotenzen übersteigt. Abhängig von Spannung und Innenwiderstand lässt sich nun die Gasentladungskennlinie nachvollziehen. In den verschiedenen Bereichen dominieren jeweils spezifische Entladungsmechanismen. Diese sind in Bild 3.5 zu sehen und werden nachfolgend diskutiert.

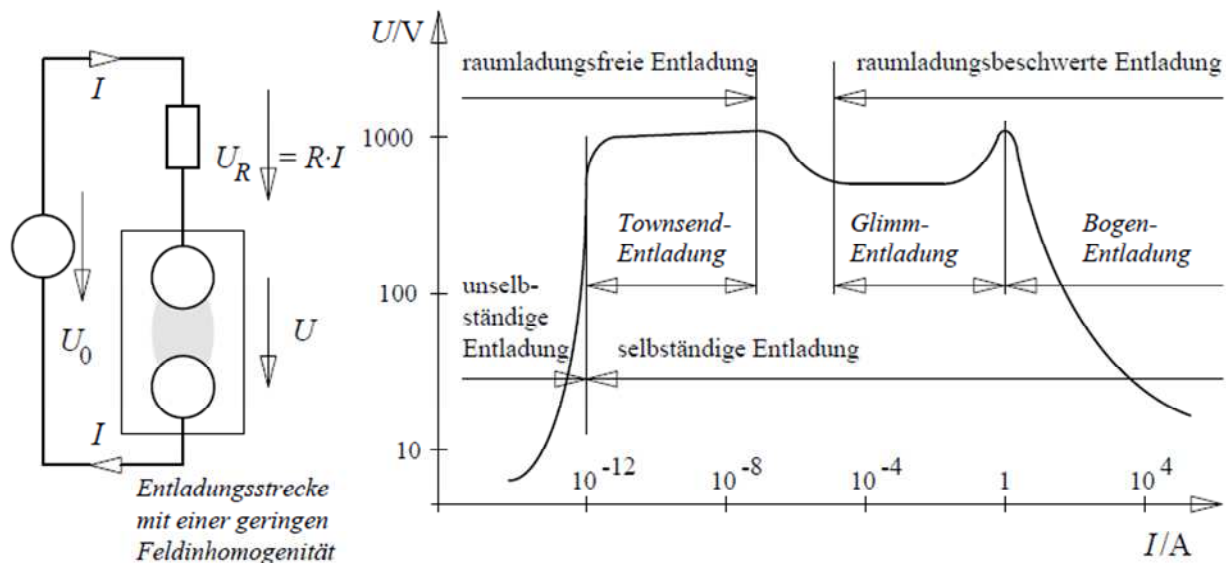


Bild 3.5: Gasentladungskennlinie bei selbstständiger Entladung [4]

3.4.3 Generationenmechanismus nach Townsend

Um eine Elektronenlawine zu starten wird ein bereits vorhandenes Startelektron benötigt. Dieses ist durch natürliche Ionisationsprozesse im Gasvolumen vorhanden. Im elektrischen Feld wird das Elektron beschleunigt, wodurch es zu Stößen mit Gasmolekülen kommt. Die Stöße verlaufen elastisch, solange das Elektron nicht die nötige Energie für eine Ionisierung aufgenommen hat. Da das Elektron bei den Stößen kaum Impuls verliert, kann es solange Energie ansammeln, bis es zu einem ionisierenden Stoß kommt. Es werden weitere Elektronen freigesetzt, die nun ihrerseits im elektrischen Feld beschleunigt werden. Die Folge ist eine lawinenartige exponentielle Ladungsträgervermehrung. Durch Anregungs- und Rekombinationsprozesse kommt es zur Emission von Photonen, die wiederum durch Photoionisation neue Elektronenlawinen auslösen können. Es gilt: *Erzeugt jede Elektronenlawine durch Rückwirkung auf die Kathode mindestens ein neues Startelektron, so entsteht ein leitfähiger Entladungskanal* [4]. In mathematischer Form lässt sich diese Bedingung als Formel 3.8 anschreiben. Hierbei beschreibt γ , der Rückwirkungskoeffizient, den Materialeinfluss der Elektroden. Die Ionisierungszahl α gibt die Zahl der je Elektron neuerzeugten Elektronen pro Längeneinheit an. Bei d handelt es sich um den Elektrodenabstand [4].

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) \geq 1 \quad (3.8)$$

3.4.4 Streamer- und Leader-Mechanismus

Durch Beobachtung von elektrischen Entladungen bei hohen Feldstärken lässt sich erkennen, dass sich im Gasvolumen sehr lokale, dünne Entladungskanäle bilden. Dies kann mit dem Generationenmechanismus nach Townsend nicht erklärt werden. Eine Antwort hierfür liefert der Streamer-Mechanismus. Erreicht eine Elektronenlawine die kritische Anzahl von ca. 10^8 Elektronen, die sich im Kopf der Lawine bewegen, kommt es zu einer signifikanten Beeinflussung des elektrischen Fel-

des, wie abgebildet in Bild 3.6. Es wird von einer raumladungsbeschwerten Entladung gesprochen. Dabei erhöht sich die Feldstärke im Kopf deutlich über die Grundfeldstärke und es kommt zur Ausendung von sehr energiereicher, elektromagnetischer Strahlung. Diese löst vor- und nachgelagerte Sekundärlawinen aus, die sich zu einem Entladungskanal vereinen. So lange in dem Entladungskanal Photo- und Stoßionisationsprozesse dominieren bleibt dieser hochohmig und es ist die Rede von einer kalten Entladung. Ist der Energieeintrag groß genug, heizt sich der Kanal so stark auf, dass es zur Thermoionisation kommt. Wie in Bild 3.1 zu erkennen ist, tritt dies erst bei sehr hohen Temperaturen dominierend auf. Es bildet sich ein Leader, ein gut leitfähiger Plasmakanal aus [4, 16].

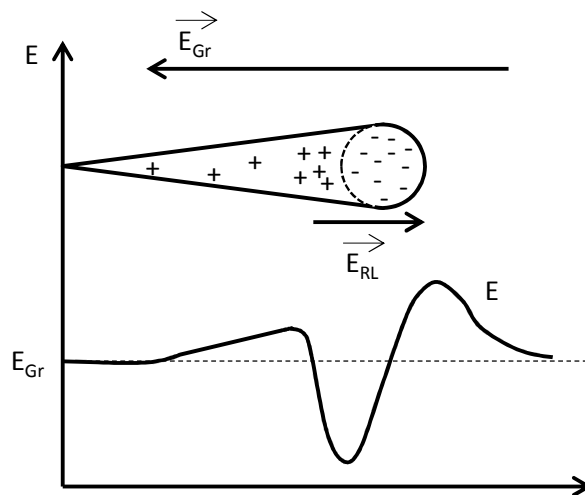


Bild 3.6: Beeinflussung des elektrischen Feldes durch eine Elektronenlawine [16]

4 Paschenkurve

Wird für die Townsendsche Zündbedingung (Formel 3.8) der Extremfall betrachtet, dass jede Elektronenlawine genau ein neues Startelektron produziert, so lässt sich die Zündspannung herleiten. Formel 4.1 zeigt die analytische Näherungsbeziehung des Paschengesetzes. Die Konstanten A und B beschreiben experimentell ermittelte Gasparameter. Da auch der Rückwirkungskoeffizient γ konstant ist, lässt sich erkennen, dass der Zusammenhang $U_d = f(p s)$ gilt [4]. Dies ist auch jener Zusammenhang den Friedrich Paschen in seiner Dissertation beschreibt [17].

$$U_d = \frac{B p s}{\ln \frac{A p s}{\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}} \quad (4.1)$$

Stark elektronegative Gase wie SF_6 , CO_2 oder O_2 , neigen dazu Elektronen anzulagern. Dabei bilden sich negative Ionen, die für die Stoßionisation nicht relevant sind. Dadurch wird die Elektronenlawine geschwächt und potentielle Startelektronen eingefangen. Die effektive Ionisierungszahl α_e berücksichtigt dieses Verhalten. Dabei ist η der Anlagerungskoeffizient. Siehe Formel 4.2. Für hohe Werte von $p s$ kann unter Berücksichtigung der Elektronenanlagerung bei stark elektronegativen Gasen, eine Näherungsformel 4.3 verwendet werden. Dabei sind $(E/p)_0$ und c wieder als Konstanten zu sehen [4].

$$\alpha_e = \alpha - \eta \quad (4.2)$$

$$U_d = (E/p)_0 p s + c (p s)^{1/2} \quad (4.3)$$

Bild 4.1 zeigt dünn gezeichnet den analytischen Verlauf einer Paschenkurve, der durch Berechnung nach Formel 4.1 erhalten wird. Die dick gezeichnete Linie zeigt einen dazu passenden Verlauf, wie dieser bei einer realen Messung bei doppelt logarithmischer Darstellung erwartet werden kann. Vom Paschenminimum bis zum Übergangsbereich sind die Kurven kongruent. Es handelt sich auch um jenen Bereich in dem die Messungen dieser Arbeit stattfanden. (Siehe auch Abschnitt 5.3) Prägnant in der Paschenkurve ist ein Minimum, das im Bereich von $1 \cdot 10^{-3}$ bar · mm bis etwa $50 \cdot 10^{-3}$ bar · mm erwartet werden kann. In diesem Punkt ist das Verhältnis aus der Anzahl ionisierbarer Gasmoleküle und der mittleren freien Weglänge ideal für die Entwicklung von Elektronenlawinen. Links des Minimums (Nahdurchschlag) steigt die Spannung, da die geringere Anzahl an Molekülen auch die Anzahl der erzeugten Ladungsträger senkt. Die effektive Ionisierungszahl α_e korrigiert die Ionisierungszahl α um die Elektronenanlagerung an Moleküle und ist sowohl Druck- als auch Feldstärkeabhängig. Somit muss die Feldstärke erhöht werden, um die zur Verfügung stehenden Ladungsträger ausreichend zu beschleunigen. Dadurch können wiederum genügend Ladungsträger für Lawinen erzeugt werden. Bei sehr kleinen $p s$ -Werten gegen null ist der Generationenmechanismus nicht mehr anwendbar. Wie im analytischen Verlauf zu sehen ist, strebt die Kurve hier gegen unendlich. Bei realen Messungen kann sehr wohl eine endliche Durch-

schlagspannung nachgewiesen werden. Es dominiert dann der Vakuumdurchschlag. Rechts des Minimums (Weitdurchschlag) sinkt die mittlere freie Weglänge, die benötigt wird, um die Ladungsträger auf ausreichend hohe Energien zu beschleunigen. Durch Erhöhen der Feldstärke kann die notwendige Ionisierungsenergie wieder erreicht werden. Bei sehr hohen Werten steigt die Ladungsträgerdichte soweit an, dass die Beeinflussung des Feldes nicht mehr vernachlässigt werden kann. Es handelt sich um den Bereich der raumladungsbeschweren Entladung [4].

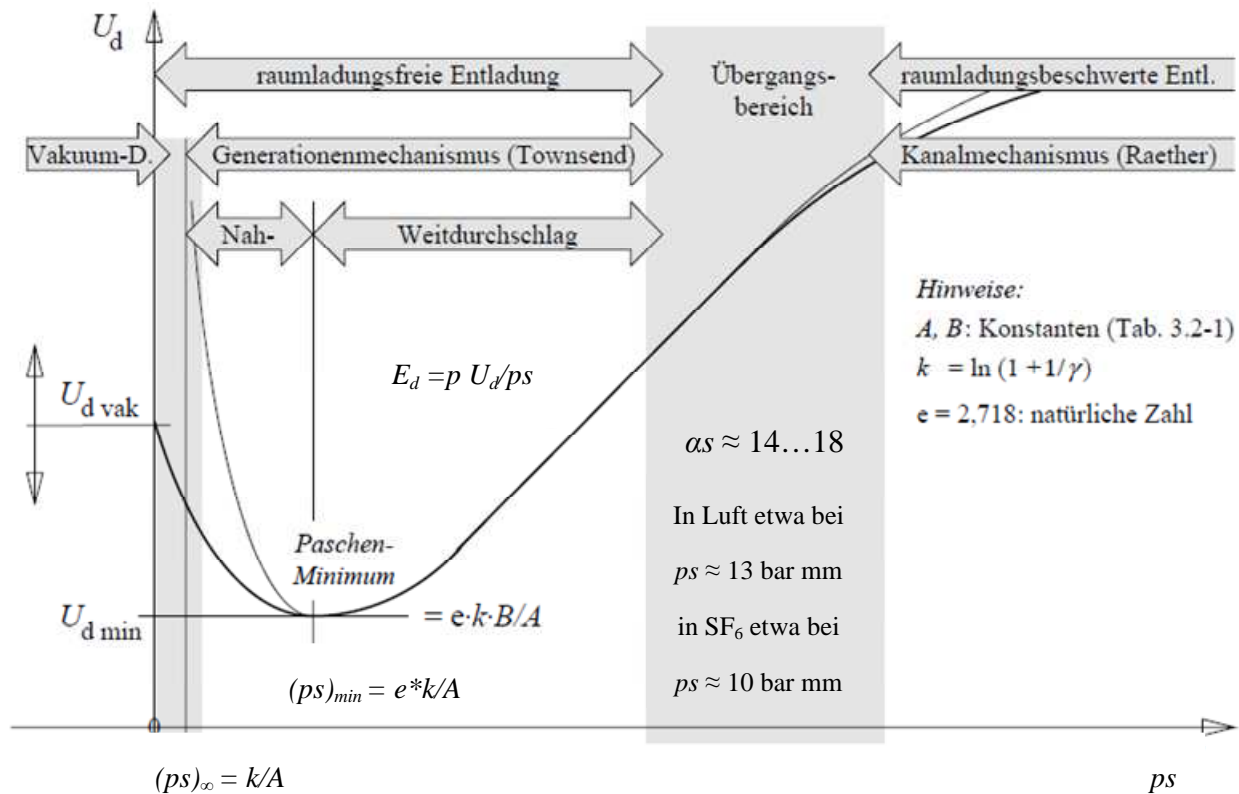


Bild 4.1: Paschenkurve als analytischer- und realer Verlauf [4]

5 Messvorbereitung / Planung

5.1 Homogenität

Um eine aussagekräftige Messung von Paschenkurven zu gewährleisten ist ein ausreichend homogenes Feld zwischen den Elektroden sicherzustellen. Bei üblichen Elektrodenanordnungen kann eine schnelle und einfache Ermittlung des Homogenitätsgrades nach Schwaiger erfolgen. Dieser Schwaigersche Ausnutzungsfaktor ist definiert als der Quotient aus der mittleren Feldstärke E_{mi} und der maximalen Feldstärke E_{max} nach Formel 5.1 [16].

$$\eta = E_{mi}/E_{max} \quad (5.1)$$

Es ist zunächst der Homogenitätsgrad aus dem Messaufbau bekannter Paschenkurven zu ermitteln. Ausgewählt wurden hierfür Publikationen mit Paschenkurven im angestrebten bar · mm Bereich und Kugel-Kugel Elektroden. Für die Ermittlung des Homogenitätsgrades nach Schwaiger werden die Geometrie Kennwerte p und q benötigt. Diese errechnen sich nach Formel 5.2 und Formel 5.3 .

$$q = R/r \quad (5.2)$$

$$p = 1 + s/r \quad (5.3)$$

Mit den errechneten Geometriewerten kann aus Tabellen der Homogenitätsgrad abgelesen werden. Lineares Interpolieren für Werte zwischen zwei Tabellenwerten ist zulässig [16].

Quelle	s [mm]	Ø [mm]	q	p	η
[18]	1,5	300	1	1,01	0,983
[19]	50	300	1	1,33	0,892
[19]	5	50	1	1,20	0,936
[19]	400	2000	1	1,40	0,878

Tabelle 1: Berechnung des Homogenitätsgrades von bekannten Messaufbauten

Die ermittelten Homogenitätsgrade liegen zwischen 0,88 und 0,98. Anzustreben ist ein Homogenitätsgrad möglichst nahe bei $\eta=1$. Für die Messungen dieser Arbeit wurde eine Elektrodenkonfiguration gewählt, die einen Homogenitätsgrad von 0,96 aufweist und somit für die Messungen gut geeignet ist.

5.2 Elektroden

Paschenkurven können mit verschiedenen Elektrodenanordnungen gemessen werden. Voraussetzung ist ein ausreichend homogenes Feld. Es sind im Wesentlichen zwei Anordnungen verbreitet: Kugel-Kugel und Platte-Platte, wobei hier auf Feldüberhöhungen im Randbereich zu achten ist. Abhilfe schaffen zum Beispiel Rogowski-Elektroden. Für die Messungen in dieser Arbeit wurden Kugel-Elektroden gewählt. Die Verwendung von Kugel-Elektroden bietet einige Vorteile. Sie sind vergleichsweise einfach in der Herstellung und daher unkompliziert und kostengünstig zu beschaffen. Auch das Einstellen der Schlagweite ist bei Kugel-Elektroden wesentlich unkomplizierter. Hier muss lediglich der Minimalabstand berücksichtigt werden. Bei Platten ist noch zusätzlich auf eine möglichst parallele Montage zu achten. Verhindern mechanische Ungenauigkeiten des Messgefäßes eine parallele Montage, ist eine Korrektur kaum möglich. Die Wahl der Elektrodenform ermöglicht nun weitere Parameter zu bestimmen. Es wurde in Abschnitt 5.1 ein Homogenitätsgrad von $\eta = 0,96$ festgelegt. Der Kugelradius ist durch die Dimensionen des Prüfgefäßes auf maximal 45 mm begrenzt. Der minimale Kugelradius wird durch die Vorgabe an den Homogenitätsgrad und die minimale Schlagweite, sowie durch die Überlegungen zum Versuchsbereich begrenzt. (Abschnitt 5.3).

Das Elektrodenmaterial bzw. das Oberflächenmaterial wird durch den Rückwirkungskoeffizienten γ berücksichtigt. Durch die zweifache Logarithmierung wirkt sich γ bei höheren $p \cdot s$ -Werten kaum noch auf die Durchschlagspannung aus. Die Wahl des Elektrodenmaterials ist hauptsächlich für Messungen im Nahbereich relevant [4, 16]. Aus Abschnitt 5.3 geht hervor, dass die Messungen dieser Arbeit nur im Fernbereich erfolgen. Somit ist die Wahl des Elektrodenmaterials aus messtechnischer Sicht unkritisch. In anderen Untersuchungen zur Messung von Paschenkurven fanden folgende Elektrodenmaterialien Verwendung: Chrom, Edelstahl, Eisen, Kupfer, Messing, Nickel, Platin, Silber, Stahl und Wolfram [19, 20].

Auf Basis all dieser Überlegungen kommen Kugelelektroden aus Edelstahl, mit einem Durchmesser von 75 mm zum Einsatz. Bei einer Schlagweite von 5 mm wird der geforderte Homogenitätsgrad sehr gut erreicht.

5.3 Versuchsbereich

Nach dem Gesetz von Paschen hängt die Spannungsfestigkeit eines Gases im homogenen Feld im Wesentlichen vom Gasdruck und der Schlagweite ab. (Abschnitt 4) Grundsätzlich ist bei der messtechnischen Ermittlung von Paschenkurven ein möglichst großer Versuchsbereich erwünscht. Es ist jedoch kaum möglich Paschenkurven über viele Dekaden mit einem Messaufbau abzudecken. Begrenzende Faktoren stellen beispielsweise Druck, Spannung, Schlagweite, Elektrodenmaterial und Leckrate dar. Der mechanische Aufbau des Prüfgefäßes (Bild 6.1) lässt ein Variieren der Schlagweite nur unter großem Aufwand zu. Zusätzlich wäre der Homogenitätsgrad dann nicht konstant. Es ist nun naheliegend, den Versuchsbereich über den Druck p zu variieren.

Bei sehr niedrigen Drücken können spezielle, entgaste Elektroden erforderlich werden [19]. Wie sich zeigen wird ist diese Maßnahme aufgrund anderer, limitierender Faktoren hier nicht notwendig. Die Druckmessungen für geringe Drücke übernimmt der Sensor CMR-262. Dieser Sensor ist

geeignet für einen Bereich von 10 μbar – 100 mbar. Die Dichtverhältnisse des Messaufbaus erlauben sinnvolle Messungen bis 10 mbar. (Abschnitt 5.12) Somit ist der Versuchsbereich unter Berücksichtigung der 5 mm Schlagweite nach unten bei 0,05 bar · mm begrenzt.

Als obere Grenze wurde der Versuchsbereich bei 20 bar · mm festgelegt. Diese Grenze ist sinnvoll, da der Gasdruck mit 4 bar noch relativ gering ist. Die Paschenkurven befinden sich hier bereits im linearen Bereich. Messpunkte bei höheren bar · mm-Werten versprechen nur einen geringen Wissenszuwachs, welcher die zeitaufwändigen Messungen nicht mehr rechtfertigt.

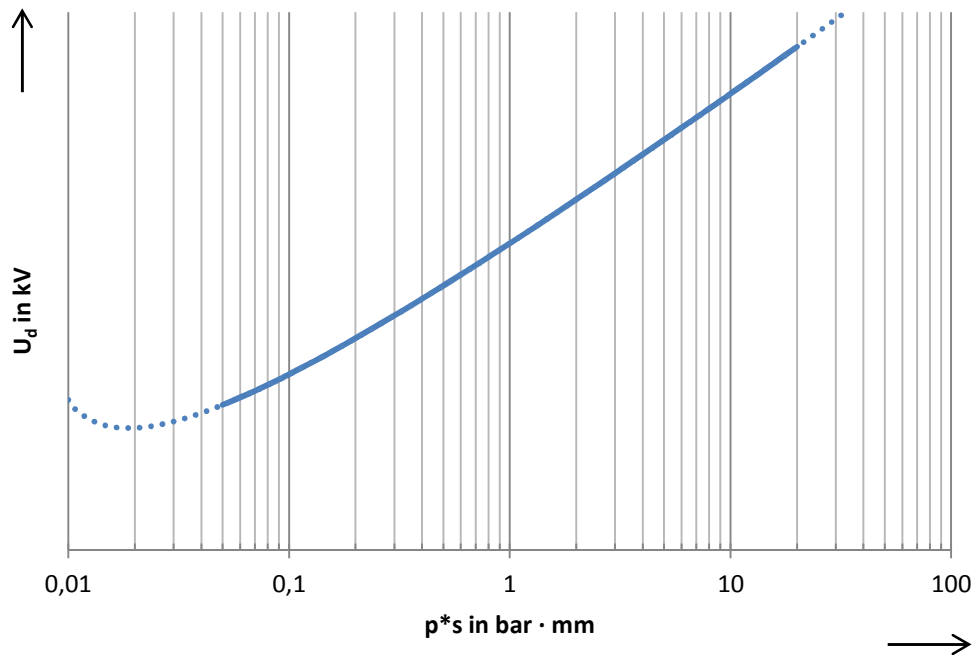


Bild 5.1 Typischer Verlauf einer Paschenkurve mit festgelegtem Versuchsbereich

In Bild 5.1 ist der geplante Versuchsbereich sichtbar als durchgezogene Linie bei einer typischen Paschenkurve eingezeichnet. Es zeigt sich deutlich, dass die Messungen im Bereich rechts des Paschenminimums durchgeführt werden.

5.4 Schnellabschaltung

Für aussagekräftige, reproduzierbare Messergebnisse ist es wesentlich, die Messbedingungen möglichst konstant zu halten. Bei jeder Messung wird die Spannung solange erhöht bis es zum Zünden der Gasfunkenstrecke kommt. Im leitfähigen Zustand wird im Gas Energie umgesetzt. Ein großer Teil dieser Energie erwärmt das Gas, was zu einer Druckänderung und somit zum Driften des eingestellten Messpunktes führt. Die Elektroden werden stark belastet und schmelzen lokal auf. Es kommt zur Bildung einer rauen Oberfläche, welche durch ihre nadelförmigen Strukturen das Feld mikroskopisch verzerrt. Bild 5.2 zeigt links eine Elektrode unmittelbar vor einer Messung und rechts die Elektrode nach der Messreihe. Es sind deutlich Anzeichen von Funkenerosion zu erkennen. Dies führt zu Feldemission, was die Messungen wiederum beeinflussen kann. Durch einen Teil des Energieeintrags dissoziieren Gasmoleküle. Es können sich neue Verbindungen bil-

den. Bei reinem SF_6 beeinflussen diese Zerfallsprodukte die elektrische Festigkeit nicht nennenswert [6]. Der Energieeintrag in das Prüfgefäß sollte möglichst gering bleiben um die erwähnten Effekte klein zu halten. Dies wird durch eine Schnellabschaltung erreicht.

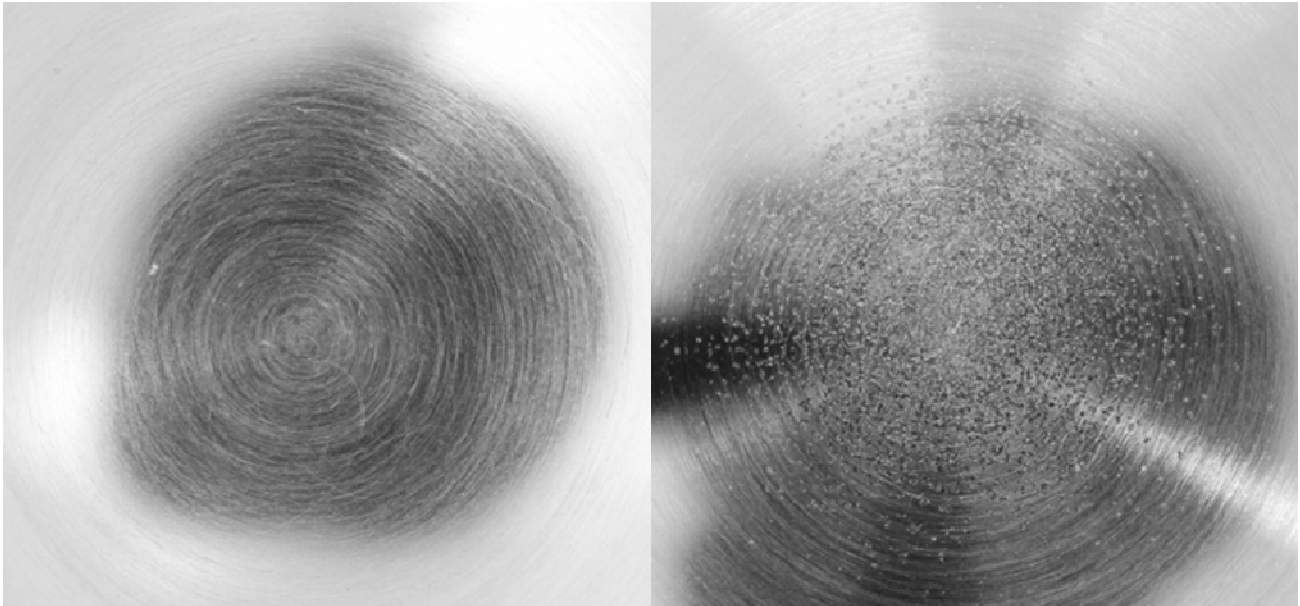


Bild 5.2: Elektrodenoberfläche, links vor und rechts nach Aufnahme einer Paschenkurve

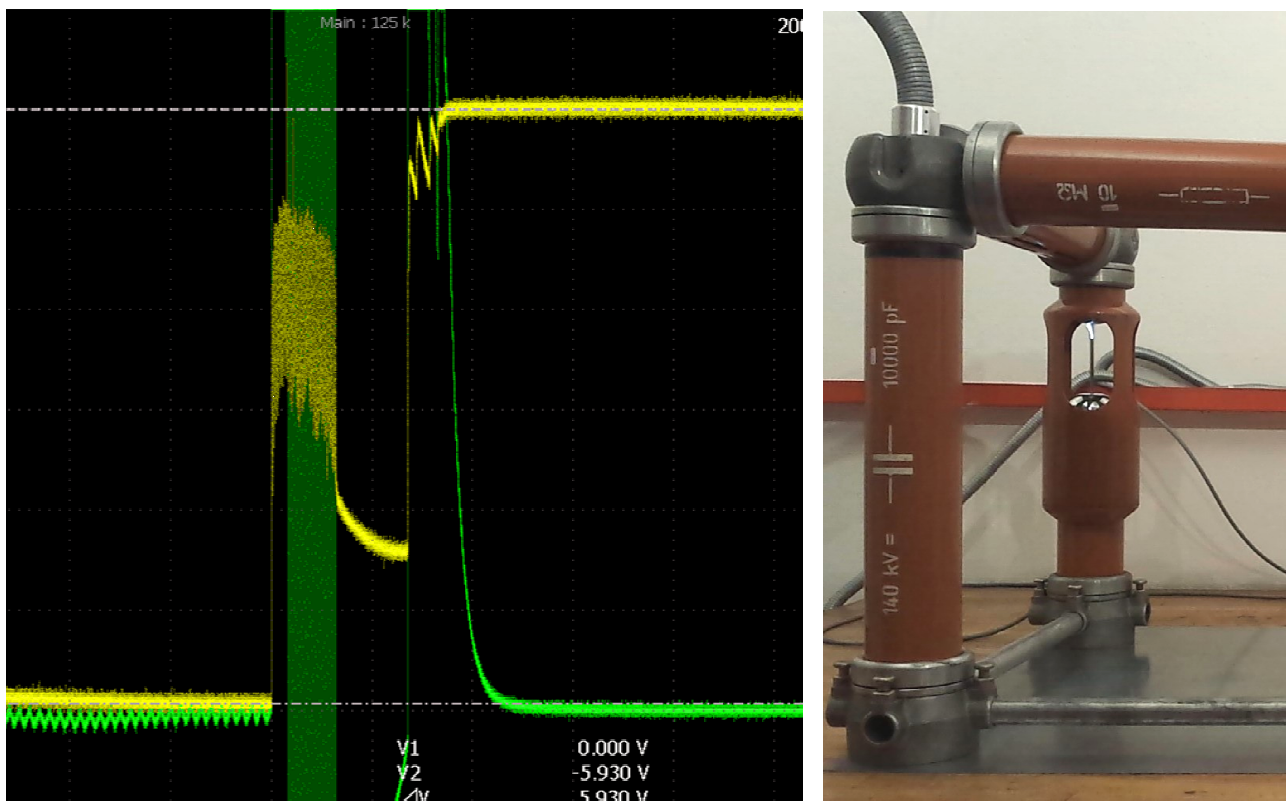


Bild 5.3: Oszillogramm einer Schnellabschaltung und Foto

Bild 5.3 zeigt links ein Oszillogramm des Spannungsverlaufs bei einer Schnellabschaltung. Diese Messung erfolgte bei negativer Polarität. In Gelb ist die Spannung U_d am Prüfgefäß eingezeichnet

und in Grün der Spannungsgradient $\delta U_d / \delta t$. Getriggert wird die Schnellabschaltung auf den differentiellen Spannungsverlauf. Beim Durchschlag bricht die Spannung bis auf die Lichtbogenspannung zusammen, sichtbar als ein Rauschen in Gelb. Hier leitet die Schnellabschaltung ein. Die Spannungsversorgung wird sofort unterbrochen. Nach 140 ms erlischt die Gasentladung. Restladung aus den Glättungskondensatoren lässt die Spannung am Prüfgefäß wieder steigen bevor der Erdungsschalter die Schaltung kurzschließt. Der Erdungsschalter benötigt durch den langen Isolationsweg ca. 250 ms bis zum endgültigen Abschalten. Bild 5.3 rechts zeigt den Erdungsschalter während des Abschaltvorgangs. Beim Schließen kommt es mehrmals zum Zünden der Luftstrecke, was sich im Oszillogramm in Gelb als kleine Zacken abbildet. (Bild 5.3 links)

5.5 Statistische Auswertung der Messergebnisse

Bei der Messung handelt es sich um einen Spannungssteigerungsversuch, wie in Abschnitt 5.8 näher erläutert wird. Für diese Art von Versuchen wird eine Messreihe aus n Durchschlägen aufgenommen. Es ist naturgemäß eine Streuung der Durchschlagspannung U_d zu erwarten. Davon wird der Mittelwert $\overline{U_d}$ und die Standardabweichung s nach den Formeln 5.4 und 5.5 berechnet. Im Falle einer Normalverteilung gilt: 68% der Durchschläge müssen innerhalb des Intervalls $[\overline{U_d} - s, \overline{U_d} + s]$ liegen [21]. Zur grafischen Darstellung der Messergebnisse werden die Mittelwerte der Messpunkte in einem Diagramm mit doppelt logarithmischer Skala aufgetragen. Ein Fehlerbalken der Länge $2s$ zeigt jeweils das 68% Intervall an.

$$\overline{U_d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{d_i} \quad (5.4)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (U_{d_i} - \overline{U_d})^2} \quad (5.5)$$

Es wurden für jeden Messpunkt $n = 20$ Durchschläge durchgeführt. Ungültige Messungen, beispielsweise bei einer Fehlauflösung der Schnellabschaltung, wurden wiederholt. Eine Messreihe besteht aus neun Messpunkten, die für jede Dekade x im Versuchsbereich nach dem Schema $\{1, 2, 5\} * 10^x$ durchgeführt wird. Somit werden für eine Paschenkurve 180 Einzelmessungen benötigt.

5.6 Gasreinheit / Gase mischen

Sämtliche Druckangaben in dieser Arbeit verstehen sich als absolute Angaben. Um die Messungen nicht durch Verunreinigungen zu beeinflussen, ist beim Hantieren der Gase in jedem Schritt auf die Reinheit zu achten. Verunreinigungen können im gesamten Messablauf auftreten und neigen dazu sich anteilig zu akkumulieren. Selbst Gase mit hoher Reinheit weisen üblicherweise einige ppm an Fremdgasen auf. Das Prüfgefäß ist vor dem Befüllen mit Umgebungsluft gefüllt. Der 30-minütige Evakuierungsvorgang wird mit einer zweistufigen, ölgedichteten Drehschieber-Vakuumpumpe durchgeführt. Es ist dabei darauf zu achten, dass ein Druck von $p < 100 \text{ Pa}$ über

einen längeren Zeitraum aufrechterhalten bleibt. So ist gewährleistet, dass auch Hohlräume (Die Kugelelektroden sind angebohrte Hohlkugeln) geleert werden. Im quasi luftleeren Zustand ist die Gefahr von einströmender Luft durch Undichtigkeiten besonders groß. Unmittelbar auf das Evakuieren folgt daher das Befüllen und Mischen des Prüfgases bis zu einem Druck von 6 bar.

Die Herstellung der Gasmischungen passiert nach dem manometrisch-statischen Partialdruckverfahren. (Siehe Abschnitt 2.3) Es beruht auf der Messung der Druckänderung bei Zugabe der einzelnen Gaskomponenten. Das Verfahren setzt jedoch isothermes Füllen voraus. Dies kann insofern ein Problem darstellen, als dass die Gase beim Befüllen sich vom hohen Flaschendruck auf den niedrigen Behälterdruck entspannen und dabei abkühlen. Bereits im Behälter befindliches Gas komprimiert beim weiteren Befüllen wieder und erwärmt sich dabei [12]. Um dem Problem zu begegnen, wird die Gaskomponente bis knapp unter den berechneten Druck gefüllt und abgewartet, bis sich das Gas thermisch eingeschwungen hat. Ist dies geschehen, kann bis zur gewünschten Marke aufgefüllt werden. Durch die mit wenigen Gramm geringe Gasmasse im Vergleich zur großen Behältermasse, ist der Vorgang als näherungsweise adiabatisch zu sehen. Es gilt die Annahme: Wenn sich der Druck stabilisiert hat, hat das Gas die Behältertemperatur erreicht. (Siehe 6.4)

Rechenbeispiel für die Herstellung von 80%N₂ 20%SF₆ bei 600 kPa

Bei der Berechnung der einzelnen Partialdrücke findet das Daltonsche Gesetz Anwendung [22]. Mathematisch ausgedrückt als die Formeln 5.6 und 5.7 .

$$p_i \equiv x_i p \quad (5.6)$$

$$p = \sum_{i=1}^k p_i \quad (5.7)$$

$$p_{SF_6} = p_{gesamt} x_1 \% = 600 \text{ kPa } 20\% = 120 \text{ kPa}$$

$$p_{N_2} = p_{gesamt} x_2 \% = 600 \text{ kPa } 80\% = 480 \text{ kPa}$$

$$p_{gesamt} = p_{SF_6} + p_{N_2} = 600 \text{ kPa}$$

Es wird zuerst bis 1,2 bar mit Schwefelhexafluorid gefüllt. Danach kommen weitere 4,8 bar N₂ hinzu, sodass in Summe die gewünschte Gasmischung mit 6 bar erreicht wird. Weiter ist nun die Reinheit der Gasmischung interessant, unter der Annahme, dass exakt gemischt wurde. Dafür gilt es, die Stoffmengen im Behälter rechnerisch zu ermitteln. Vereinfachend kann die Zustandsgleichung idealer Gase herangezogen werden [22]. Zunächst werden die Stoffmengen und Massen der Restluft und der Gaskomponenten im Prüfgefäß berechnet. Exemplarisch einmal für Luft angeschrieben. Hinweis: Da Luft selbst ein Gasgemisch ist, gilt für M_{Luft} ein zuvor empirisch ermittelter Wert zur Berechnung. Die Temperatur T ist ein Mittelwert der Labortemperatur.

Komponente	n [kPa]	n [mol]	M [g/mol]	M [g]
Luft	0,1	1,75E-04	28,73	5,03E-03
SF ₆	119,9	2,10E-01	146,05	3,07E+01
N ₂	480	8,40E-01	28,02	2,35E+01
Summe	600	1,050		54,205

Tabelle 2: Berechnung der Massenanteile einer Gasmischung

$$pV = nRT \text{ mit } R_s = \frac{R}{M} \text{ und } n = \frac{m}{M} \quad (5.8)$$

p ... Druck; V ... Volumen; n ... Stoffmenge; R ... molare Gaskonstante; R_s ... spezielle Gaskonstante; T ... abs. Temperatur; m ... Masse; M ... molare Masse

$$n_{\text{Luft}} = \frac{100 \text{ Pa } 4,32 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3}{8,3145 \frac{\text{J}}{\text{mol K}} 296,8 \text{ K}} = 175,1 \cdot 10^{-6} \text{ mol}$$

$$m_{\text{Luft}} = 175,1 \cdot 10^{-6} \text{ mol } 28,7303 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 5,029 \cdot 10^{-3} \text{ g}$$

$$\text{Reinheit} = \frac{m_{\text{Luft}}}{m_{\text{SF}_6} + m_{\text{N}_2}} = 92,79 \cdot 10^{-6} \cong 100 \text{ ppm}_{\text{Masse}}$$

Hierbei ist zu beachten, dass die Fremdgase des verwendeten Flaschengases bei SF₆ mit ~1000 ppm_{Masse} und bei N₂ mit ~5 ppm_{mol} angegeben sind. Somit ist gezeigt, dass durch sorgsames evakuieren vor dem Befüllen die entstehende Verunreinigung durch Restluft vernachlässigbar gering ist.

5.7 Untersuchung von Gasproben

Wie aus Abschnitt 5.6 hervorgeht, gibt es viele Einfluss- und Unsicherheitsfaktoren bei der Berechnung der Reinheit. Auch die Durchmischung ist dabei nicht sichergestellt. Um eine ungenaue Gasmischung auszuschließen, sollten Gasproben unmittelbar vor dem Beginn der Messungen, für eine spätere Analyse genommen werden. Diese Maßnahme konnte im Rahmen der Masterarbeit nicht realisiert werden. Daher wird die Untersuchung von Gasproben theoretisch betrachtet. Die Proben werden in spezielle Probengefäße (Vials) aus Borsilikatglas gefüllt. Es eignen sich Vials mit einem metallischen Schraubverschluss. Dieser drückt eine PTFE-beschichtete Silikonmembran (PTFE / Silicone Septum) oben auf den Gefäßrand. Die Membran ist grundsätzlich gasdicht. Für eine längere Lagerungsdauer sind auch spezielle, aluminiumbedampfte Membranen erhältlich, die sich durch eine besonders hohe Gasdichtheit auszeichnen.

Es ist anzumerken, dass auch spezielle Gassammelrohre, umgangssprachlich auch Gasmaus genannt, zum Sammeln von Gasproben eingesetzt werden können. Diese sind jedoch ausgesprochen teuer und in den Analyzelabors nicht immer verfügbar. Mit Hilfe eines geeigneten GC-MS (gas chromatography - mass spectrometry) Messgerätes kann das Gasgemisch gewichtet in seine Bestandteile getrennt werden. Es lässt sich sowohl die Reinheit des Gases feststellen, als auch die Durchmischung und Homogenisierung überprüfen.

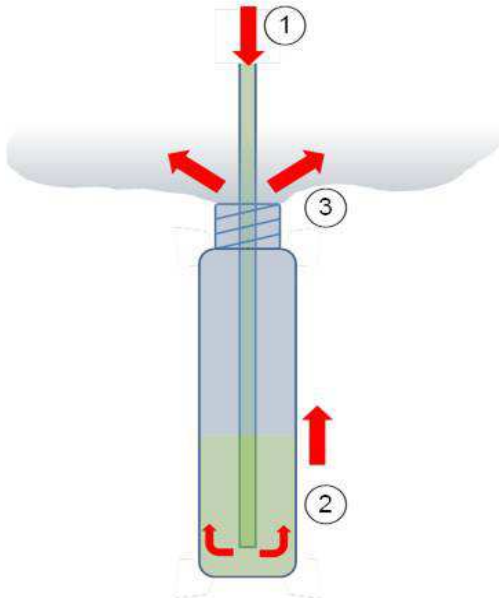


Bild 5.4: Befüllen von Vials mit Gas

1. Das Gasgemisch wird durch ein Rohr eingeleitet.
2. Das Injektionsfläschchen (Vial) wird vom Boden weg aufgefüllt. Da ständig Gas von unten nachströmt wird die Luft nach oben verdrängt, ungeachtet der Gasdichte.
3. Luft entweicht oben in die Umgebung. Diese Prozedur dauert einige Sekunden um sicherzustellen, dass sich nur noch das gewünschte Gas im Vial befindet. Danach wird das Fläschchen sofort gasdicht verschlossen.

5.8 Prüfspannung

Bei der Messung von Paschenkurven ist die Höhe der Durchschlagsspannung U_d praktisch unabhängig von der angelegten Prüfspannung. (DC-, DC+, AC, Stoß 1/50 μ s +, -) Lediglich bei positiver Stoßspannung sind leicht erhöhte Messwerte, verglichen mit anderen Prüfspannungen zu erwarten. Vorausgesetzt es gilt: $s < \frac{D}{2}$, mit Abstand s und Durchmesser D [19]. Vor diesem Hintergrund wurde eine negative Gleichspannung (DC-) als Prüfspannung ausgewählt. Die Spannung erzeugt ein Prüftransformator (BAUR PGK 150/5) mit Einweggleichrichtung. Die Glättung der Spannung erfolgt über ein nachgeschaltetes RC-Netzwerk. (Siehe auch Abschnitt 6.4) Durch erste Tests konnte ein Problem identifiziert werden. Da ein Stelltransformator mit diskreten Spannungsstufen den Prüftransformator speist, weist auch die Prüfspannung einen stufenförmigen Verlauf auf. Die nachgeschalteten Glättungskondensatoren dämpfen die Anstiegszeit wirkungsvoll, in Bild 5.5 gut zu erkennen. Wie beschrieben sollte diese Welligkeit in der Rampe keine Auswirkungen auf die Durchschlagsspannung haben. Bei geringen Spannungen ist jedoch die Ablesbarkeit des Spannungswertes schwierig. Um die Spannungsstufen zu verkleinern ist es zweckmäßig, einen Transformator zwischen den Prüftransformator und den Stelltransformator zu schalten. Diese Option steht leider nicht zur Verfügung. Als Alternativlösung dient ein Spannungsteiler. Realisiert wird der Teiler als Parallelwiderstand zum Prüfgefäß. Das belastete RC-Netzwerk teilt die Spannung im

Verhältnis 1:3. Somit können auch geringere Spannungen gut ablesbar gemessen werden. Die Welligkeit steigt nur unwesentlich.

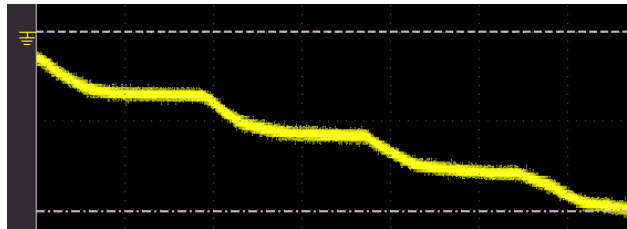


Bild 5.5: Spannungsstufen

5.9 Spannungsmessung

Die Spannungsmessung wird mit einem Oszilloskop (YOKOGAWA DL9040) durchgeführt. Es muss ein weiter Bereich abgedeckt werden. Spannungen von einigen hundert Volt bis über einhundert Kilovolt sind aufzunehmen. Dies geschieht mit einem ohmschen Hochspannungsteiler (1:10 000). Die höchste Eingangsspannung am Oszilloskop beträgt somit 10 V bei 100 kV. Zunächst gilt es systematische Messfehler festzustellen. Die Theorie macht hierfür einen Vergleich des gemessenen Wertes mit dem wahren Wert. Da der wahre Wert nicht bekannt ist, wird ein Vergleich mit einem Präzisionsgerät gemacht [23]. Dafür dient derselbe Messaufbau wie zur Messung der Paschenkurven. Siehe Bild 6.7. Ein kalibrierter Referenzteiler ersetzt hier jedoch die Funkenstrecke. Verwendet wurde der Referenzteiler: SIEMENS MR270kV mit MU14 AC/DC Peak Voltmeter. Somit ist auf beiden Messsystemen dieselbe Spannung sichergestellt. Es zeigt sich, in Bild 5.7 gut zu erkennen, eine deutliche Abweichung vom idealen Spannungsverlauf. Die Abweichung wurde nach Formel 5.9 berechnet. Sie ist relativer Natur und somit ist eine Behebung des Fehlers durch den Korrekturfaktor k möglich. Dieser berechnet sich nach Formel 5.10. Wird nun die am Oszilloskop gemessene Spannung mit k multipliziert, verringert sich die maximale Abweichung von $F_r\% = 5,55\%$ auf $F_r\% = 0,85\%$. Vergleiche Bild 5.7 und Bild 5.8. Um Umwelteinflüsse wie Temperatur oder Luftfeuchtigkeit beziehungsweise ein zeitliches Driften auszuschließen, wurde diese Messung mehrmals mit einigen Tagen Abstand wiederholt. Einflüsse dieser Art konnten dabei nicht festgestellt werden.

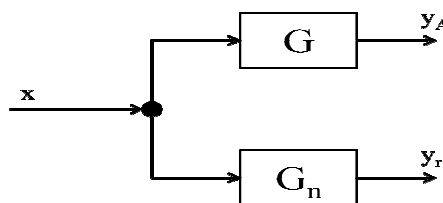


Bild 5.6: Vergleich mit einem Präzisionsgerät [23]

$$F_r\% = \frac{y_r - y_A}{y_r} * 100 \quad (5.9)$$

$$k = \frac{100 n}{100 n - \sum_{i=1}^n F_r\%_i} = 1,04981 \quad (5.10)$$

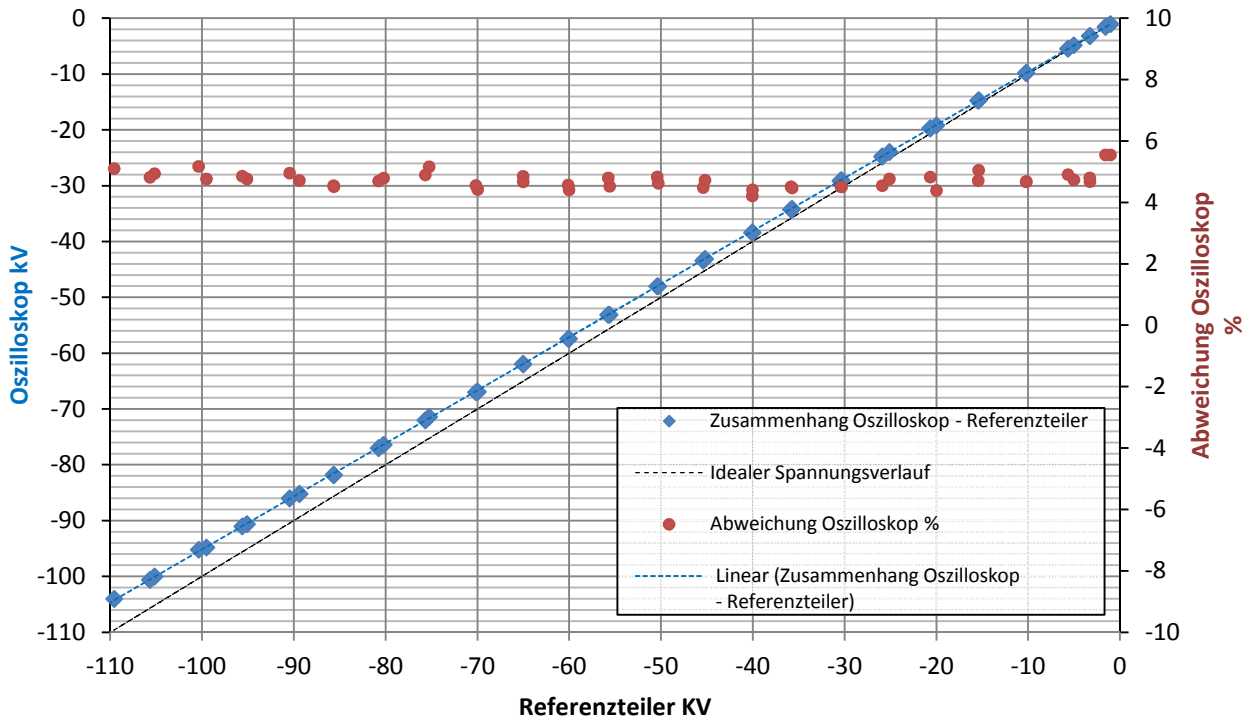


Bild 5.7: Spannungsmessung nicht korrigiert

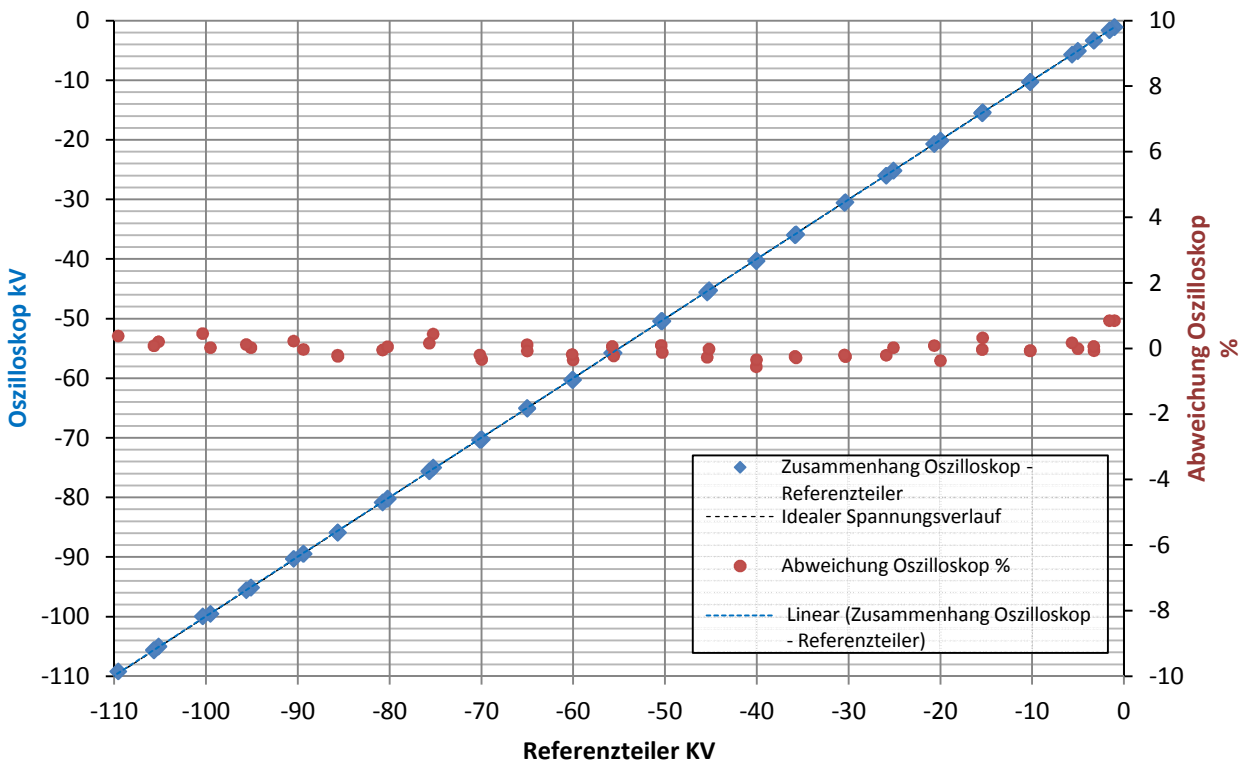


Bild 5.8: Spannungsmessung mit Korrekturfaktor

5.10 Druckmessung

Vor jeder Messung muss der gewünschte Messpunkt möglichst exakt eingestellt werden. Die Messpunkte sind charakterisiert durch die zu messende Gasmischung, den Elektrodenabstand und den Druck. Der Elektrodenabstand kann sehr genau eingestellt werden. (Siehe Abschnitt 5.11) Die Ungenauigkeit des Messpunktes auf der bar · mm Skala ist somit hauptsächlich von der Druckmessung abhängig. Aus Abschnitt 5.3 und 5.6 geht hervor, dass die Druckmessung von 1 mbar bis 6 bar fast 4 logarithmische Dekaden abdecken muss. Es werden hierfür zwei Drucksensoren eingesetzt. Drücke kleiner als 100 mbar werden mit dem Sensor CMR-262 gemessen. Darüber wird mit dem Sensor APR267 gemessen. Beide Sensoren lassen sich mit dem Steuergerät Pfeiffer TPG261 auslesen. Diese Apparaturen sind elektrisch sehr empfindlich und für eine On-Line-Messung nicht geeignet. Die Druckmessung findet beim Einstellen des Messpunktes statt. Sensor und Steuergerät müssen für die Versuche aus dem Hochspannungsbereich entfernt werden. Der Sensor APR267 besitzt eine Schnellkupplung der Firma Parker und kann einfach an- und abgesteckt werden. Beim CMR-262 ist das nicht möglich. Beim Ankuppeln bei Unterdruck gelangt eine kleine Menge Luft in das Messgefäß. Für sehr geringe Drücke bedeutet das einen messbaren Druckanstieg und somit eine nicht tolerierbare Verunreinigung. Darüber hinaus ist der CMR-262 stark lageempfindlich. Nach dem Nullabgleich sollte die Lage nicht mehr verändert werden. Der Grund liegt im Aufbau des Sensors. Es handelt sich um einen kapazitiven Drucksensor mit einer keramischen Membran. Je nach Lage des Sensors verbiegt sich diese unter ihrem Eigengewicht. Diese Probleme werden umgangen indem der Sensor mit dem Prüfgefäß fix verbunden ist. Der Sensor befindet sich außerhalb der Hochspannungszelle. Über einen elektrisch nichtleitenden Kunststoffschlauch ist dieser mit dem Prüfgefäß verbunden. Da der Sensor nicht überdruckfest ist, gibt es einen Absperrhahn, zwischen Prüfgefäß und Sensor, der nur bei Unterdruck geöffnet ist.

5.11 Elektrodenabstand

Der Elektrodenabstand beträgt 5 mm. (Abschnitt 5.2). Um diesen Abstand reproduzierbar und exakt einstellen zu können, wurde ein Metallplättchen aus Aluminium mit 5 mm Dicke angefertigt. Eine ebenfalls angefertigte Haltevorrichtung aus Kunststoff stellt sicher, dass das Plättchen waagrecht und zentriert auf dem Scheitelpunkt der unteren Kugel liegt. Wie in Bild 6.1 erkennbar ist, ist die obere Elektrode mit dem Deckel verbunden und kann entfernt werden. Die obere Elektrode wird nun so eingestellt, dass erst beim Festziehen der Deckelschrauben ein elektrischer Kontakt zwischen den Elektroden und dem Metallplättchen im Zwischenraum zustande kommt. Dies lässt sich einfach mit einem Durchgangsprüfer feststellen.

5.12 Leckrate

Wie beschrieben werden für jeden Messpunkt 20 Messungen vorgenommen. Eine Messung benötigt, abhängig von U_d , etwa drei Minuten. Gasverlust, der während der Messungen auftritt, kann nicht ausgeglichen werden. Somit ist ein Driften des Messpunktes möglich. Bild 5.9 zeigt das exemplarisch. Es handelt sich um Testmessungen mit anderen Elektroden und einem anderen,

undichten Prüfgefäß. Im Abstand von je ca. 45 Minuten erfolgten drei Testmessungen. Es lässt sich deutlich der Zusammenhang zwischen Druck und Drift erkennen.

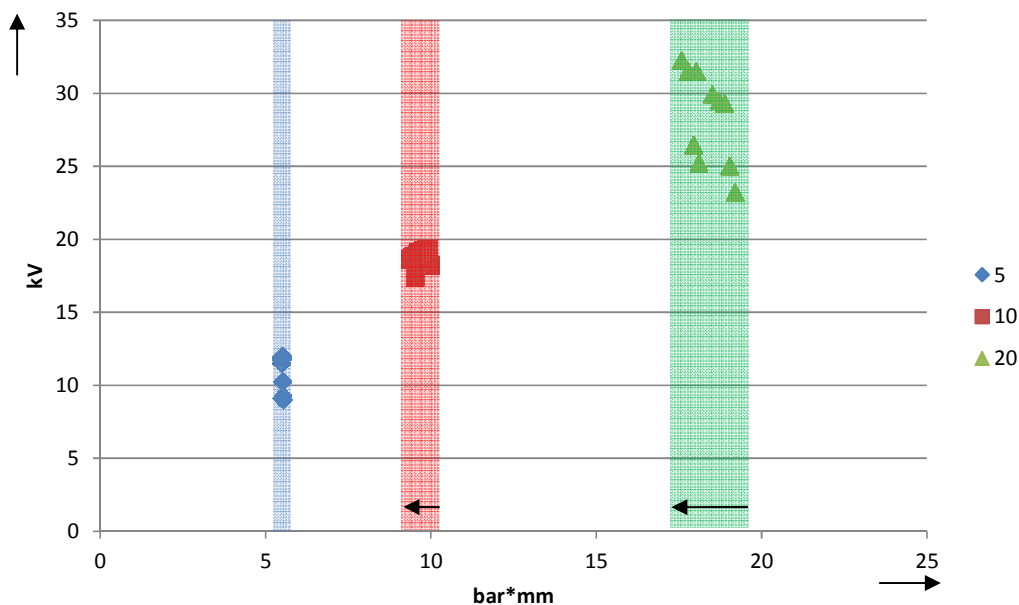


Bild 5.9: Driften des Messpunktes

Ähnliches passiert bei Unterdruck. Hier strömt noch erschwerend Luft ein und verunreinigt die Gasmischung. Messungen unter solchen Voraussetzungen sind gänzlich unbrauchbar. Es gilt, die Leckrate so gering wie möglich zu halten. Zur Quantifizierung der Leckrate wird zwischen der Druck-Leckrate L_p und der Vakuum-Leckrate L_{Vak} unterschieden.

$$L_p = \frac{V}{t} [cm^3 s^{-1}] \quad (5.11)$$

$$L_{Vak} = \frac{\Delta p V_{geom}}{t} [mbar s^{-1}] \quad (5.12)$$

Näherungsweise gilt:

$$L_p \approx p L_{Vak} \quad (5.13)$$

$$1 \text{ mbar Liter } s^{-1} \cong 1 \text{ cm}^3 s^{-1}$$

Formel 5.13 ist nur als Faustformel zu verwenden, da L_p und L_{Vak} nur ungenau in einander umzurechnen sind. Es gilt zu bedenken, dass der Gasdruck die Gefäßform verändert und Lecks erst beim Überschreiten von spezifischen Drücken auftreten können [10]. Druckfeste Verbindungen sind daher nicht automatisch auch vakuumfest. Da die Messungen bei positiven sowie negativen Drücken stattfinden, ist auf diesen Sachverhalt besonders zu achten. Überprüfungen haben gezeigt, dass das Prüfgefäß sowohl druck- als auch vakuumfest ist. Eine Leckage ist nur bei tiefem Unterdruck und gleichzeitig geöffnetem Absperrhahn zum Drucksensor bemerkbar. (Siehe Abschnitt 5.10)

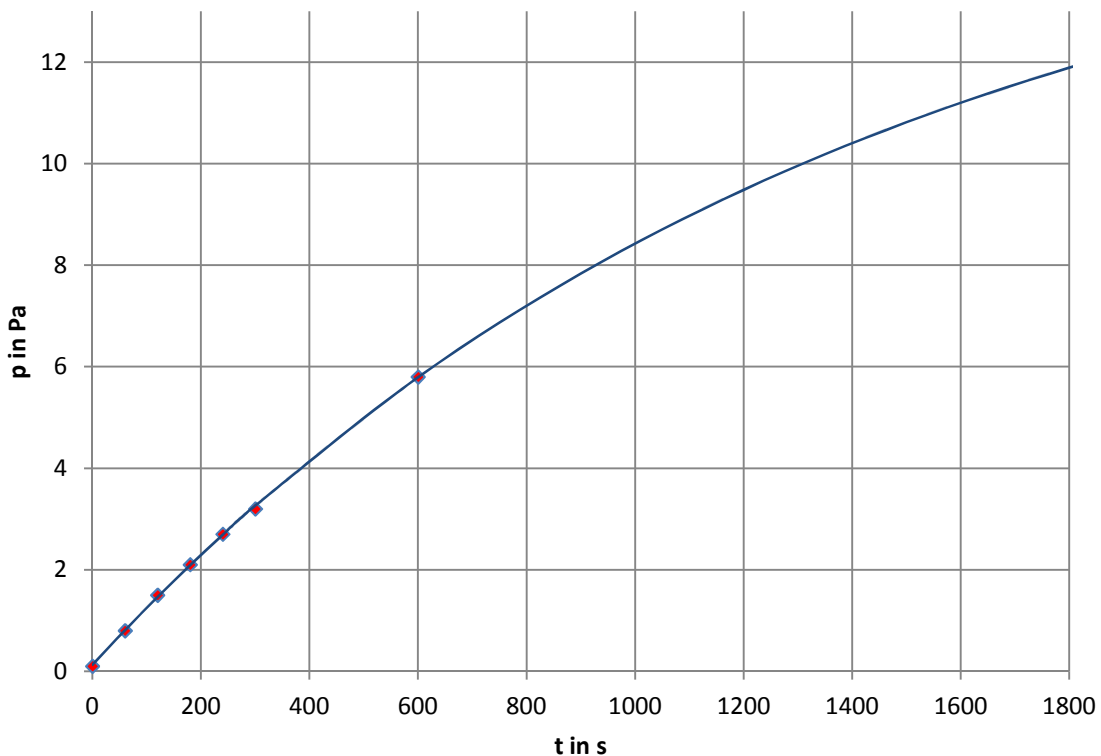


Bild 5.10: Vakuum-Leckrate

Durch den komplexen Aufbau mit seinen unzähligen Leckagemöglichkeiten ist eine Extrapolation des Druckanstiegs nur näherungsweise möglich. Hierfür wurde das Gefäß evakuiert und danach der Druckanstieg beobachtet. Empirisch zeigt sich, dass eine $1 - e$ Funktion den Druckanstieg sehr präzise beschreibt. Diese wurde iterativ mit dem Least-Squares-Verfahren in die Daten eingepasst. In Bild 5.10 abgebildet. Bereits bei 10 Pa ist eine deutliche Abflachung erkennbar. Dies ist ein Hundertstel des Drucks, des kleinsten Messpunktes im Versuchsbereich. Um den Fremdgas eintrag in das Prüfgefäß möglichst gering zu halten wird der Absperrhahn nur während der Druckmessung geöffnet. Der Sensorschlauch weist ein sehr kleines Volumen im Vergleich zum Prüfgefäß auf, was die Leckage noch einmal deutlich reduziert.

5.13 Auswahl der Gasmischungen

Diese Arbeit soll die Suche nach alternativen Isoliergasen für die Hochspannungstechnik unterstützen. Die Auswahl der Gasmischungen konzentriert sich daher auf Gasmischungen mit potentiell interessanten Isoliereigenschaften. Das am weitesten verbreitete Isoliergas stellt Luft dar. Die Hauptbestandteile sind Stickstoff (~77%), Sauerstoff(~21%), Argon(~1%), Wasserdampf(~1%) und in Spuren Kohlendioxid und andere Gase. In der Hochspannungstechnik werden die hervorragenden Isolier- und Löscheigenschaften von Schwefelhexafluorid geschätzt. Um die Genauigkeit des Messaufbaus zu überprüfen, werden zunächst bereits bekannte Paschenkurven nachgemessen. Für die erste Verifikation reichen wenige Messpunkte. Im weiteren Verlauf werden die Paschenkurven einfacher Gasmischungen aufgenommen. Einzelmessungen und irrelevante Versuche

werden in Tabelle 3 nicht aufgeführt. Die Aufnahme weiterer Paschenkurven war ursprünglich vorgesehen, konnte aber aus Zeitgründen nicht mehr durchgeführt werden.

Nummer	Gasmischung	Messpunkte	
1	N ₂ 100%	4	Referenz
2	CO ₂ 100%	3	Referenz
3	N ₂ 80% O ₂ 20%	3	Referenz
4	N ₂ 80% CO ₂ 20%	9	Versuch
5	N ₂ 60% CO ₂ 40%	9	Versuch
6	SF ₆ 90% N ₂ 8% O ₂ 2%	9	Versuch
7	N ₂ 80% SF ₆ 20%	9	Versuch

Tabelle 3: Versuchsplan Gasmischungen

6 Messaufbau

6.1 Prüfgefäß

Ein zentrales Element des Messaufbaus ist das Prüfgefäß. Es handelt sich um eine druckdichte, einstellbare Funkenstrecke für das Hochspannungs-Baukastensystem des Laboratoriums. Die Elektroden sind austauschbar und frei einstellbar. Somit kann mit verschiedenen Elektrodenanordnungen gemessen werden. Der Abstand lässt sich über die obere Elektrode, die mit einer Gewindestange verbunden ist, sehr exakt einstellen. Dies ist genauer beschrieben in den Abschnitten 5.2 und 6.2. Eine Kontermutter verhindert ein nachträgliches, ungewolltes Verstellen. Das Prüfgefäß (ohne externe Anschlüsse) ist sowohl vakuumdicht als auch druckfest bis weit über den verwendeten Bereich hinaus. Es zeichnet sich durch eine kaum feststellbare Leckrate aus. Das Bild 6.1 zeigt in Schwarz einen Zylinder aus Hochdruckpolyethylen PE100. Dieser weist eine Wandstärke von 20 mm auf und ist druckfest bis 2,5 MPa. Der Gefäßinnenraum hat einen Durchmesser von 100 mm und eine Höhe von 525 mm. Dies ergibt ein Leervolumen von $4,123 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ [6]. Da als Elektroden angebohrte Hohlkugeln zum Einsatz kommen, verringert sich das Volumen nicht wesentlich. Um die mechanische Festigkeit bei hohen Drücken sicherzustellen, sind Boden und Deckel durch acht duroplastische Gewindestangen (in Rot) miteinander verbunden. Am Boden des Versuchsgefäßes befinden sich drei Absperrhähne mit Schnellverbindern. Zur einfachen Druckkontrolle ist ein analoges Manometer vorhanden.

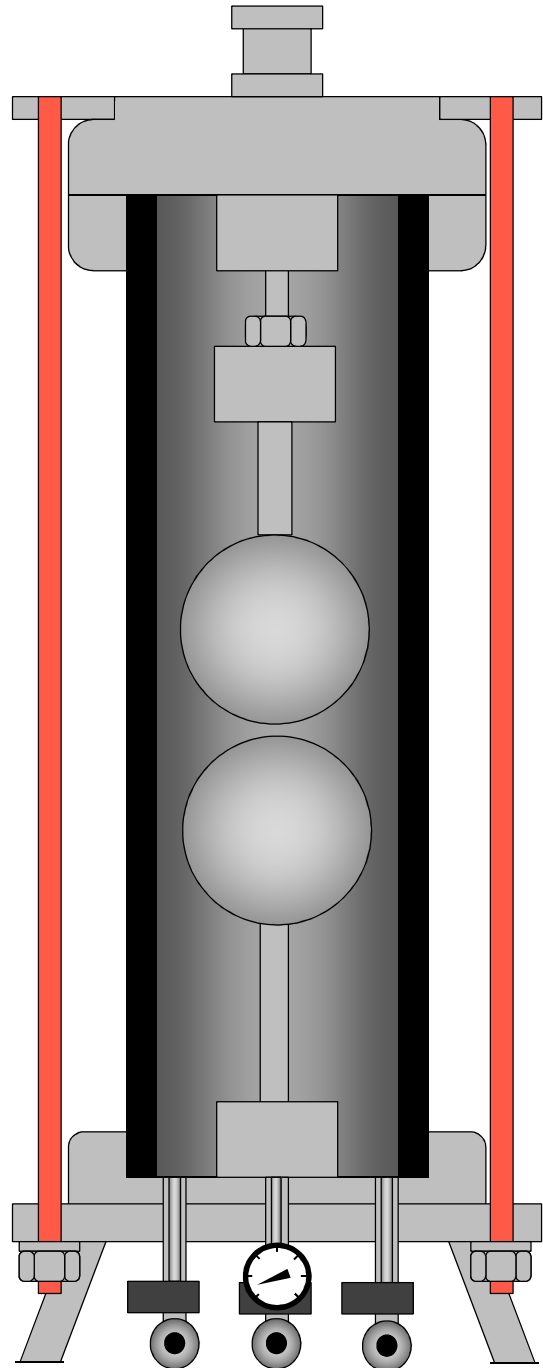


Bild 6.1: Skizze des Prüfgefäßes

6.2 Elektroden

Als Elektroden dienen zwei Hohlkugeln aus Edelstahl mit der Materialbezeichnung V2A. Diese haben eine Wandstärke von ca. 3 mm und einen Durchmesser von 75 mm. Zur Befestigung besitzen die Elektroden eine Bohrung mit einem 8 mm Gewinde. Die Elektroden kommen vom Hersteller geschliffen, matt Korn 240. Dies ist jedoch viel zu grob für die Messungen, da es zu Mikrofeldverzerrungen kommen kann. Daher ist es notwendig, die Elektroden vor Beginn jeder Paschenkurvenmessung mit Korn 1000 Schleifpapier zu polieren, wie in Bild 6.2 abgebildet. Neben der Gewindebohrung wurden die Elektroden nachträglich noch zusätzlich angebohrt, um die Kugeln sauber evakuieren zu können. So wird sichergestellt, dass kein eingeschlossenes Restgas langsam durch das Gewinde austritt und somit die Messung verfälscht.

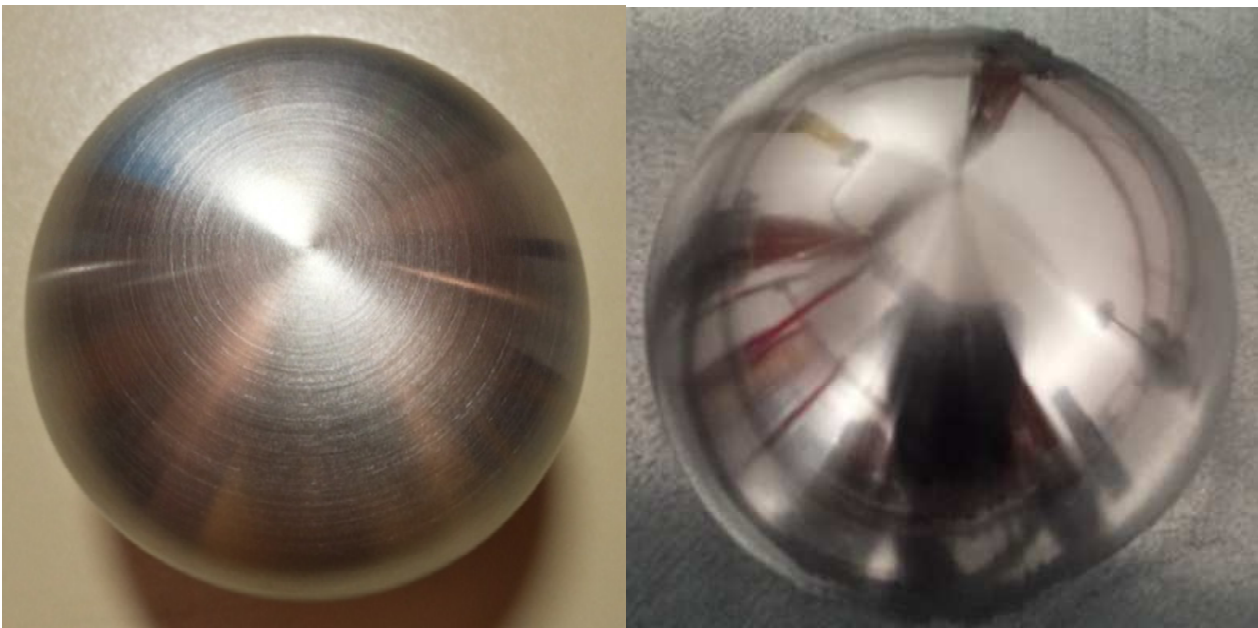


Bild 6.2: Elektroden, links wie geliefert vom Hersteller und rechts mit Korn 1000 nachgeschliffen

Die Schlagweite wirkt sich direkt auf das Messergebnis aus. Es ist somit essentiell den Kugelabstand exakt und reproduzierbar einstellen zu können. Hierfür wurde ein Metallplättchen aus Aluminium dessen Dicke dem Kugelabstand entspricht, hochpräzise angefertigt. Dieses wird in eine Halterung aus Kunststoff eingepasst. Dickenänderungen aufgrund von Temperaturschwankungen des Metallplättchens betragen $\Delta s < 1 \mu\text{m}$. Bild 6.3 zeigt ein Modell des beschriebenen Abstandshalters und schematisch das Einstellen des Elektrodenabstands. Der genaue Einstellvorgang wird in Abschnitt 6.4 erklärt.

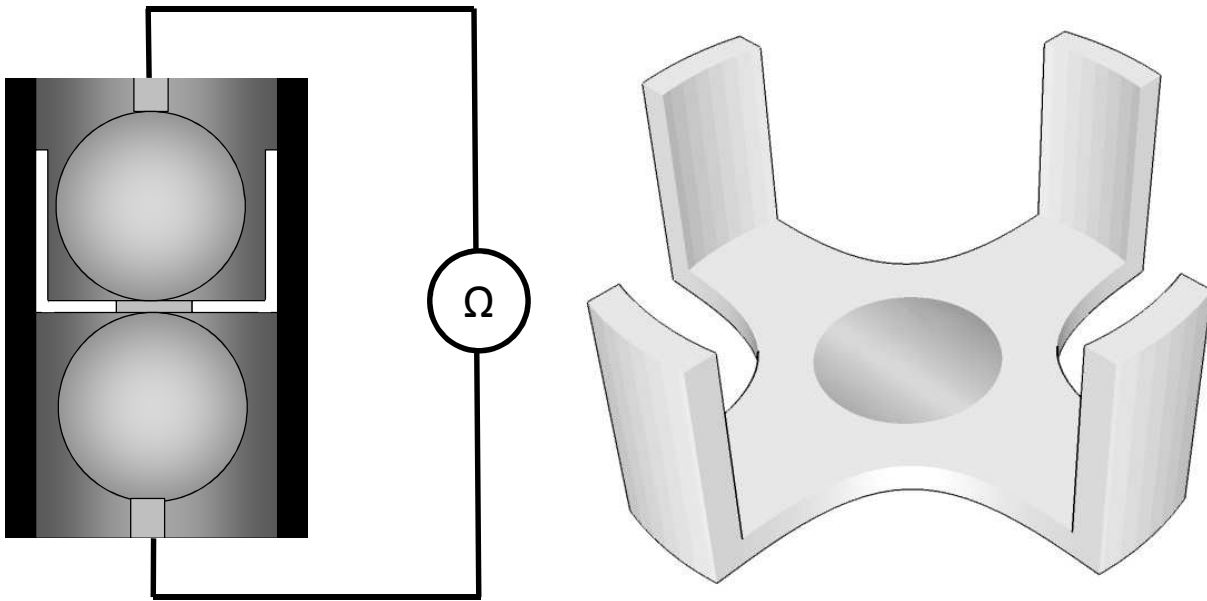


Bild 6.3: Abstandshalter für das Einstellen des Elektrodenabstands

6.3 Messschaltungen

6.3.1 Spannungsbereich bis 10 kV

Wie in Abschnitt 5.8 erklärt, muss zur besseren Ablesbarkeit bei kleinen Spannungen ein Belastungswiderstand parallel zum Prüfgefäß geschaltet werden. Es hat sich gezeigt, dass sich dies bis etwa 10 kV Messspannung empfiehlt. In Bild 6.4 sieht man den praktischen Aufbau der Schaltung im Laboratorium mit dem Hochspannung-Baukastensystem.



Bild 6.4: Prinzipieller Messaufbau mit Belastungswiderstand

Die Messschaltung für diesen Bereich ist in Bild 6.5 dargestellt. Diese setzt sich zusammen aus dem Prüftransformator mit integrierter Gleichrichterdiode, links im Bild. Es folgen zwei RC-Glieder zur Glättung der Prüfspannung. Parallel zum Prüfgefäß ist der 10 M Ω Belastungswiderstand geschaltet, welcher die Prüfspannung verringert. Ebenfalls parallel zum Prüfgefäß befindet sich ein Spannungsteiler im Verhältnis 1:10000 über den die Spannungsmessung durch ein Oszilloskop erfolgt.

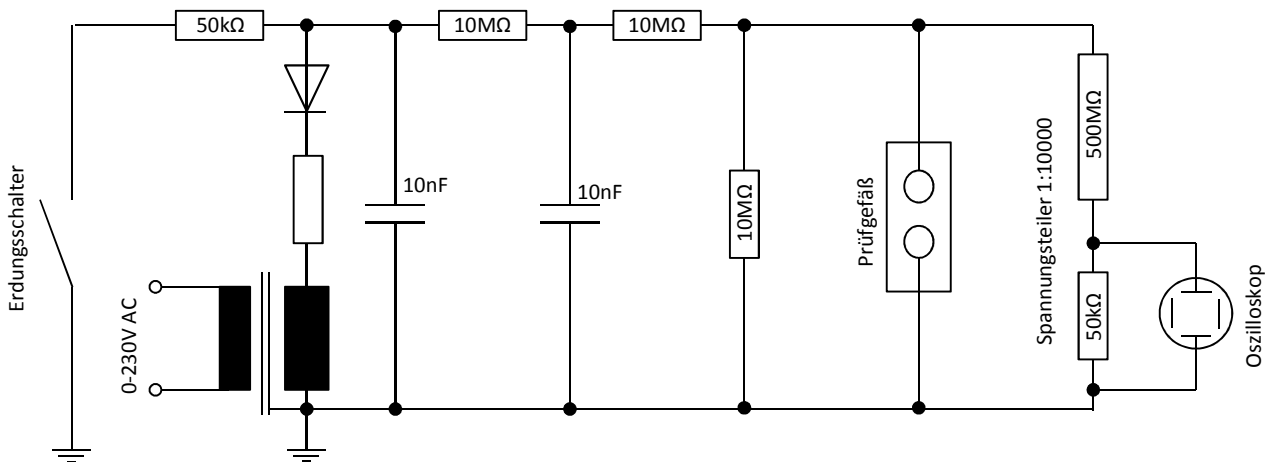


Bild 6.5: Messschaltung mit Belastungswiderstand

6.3.2 Spannungsbereich von 10 kV bis 100 kV

Für Durchschlagspannungen über 10 kV wird der Belastungswiderstand nicht mehr benötigt. Die Spannungsstufen des Stelltransformators sind dann klein genug um eine Messung ohne Belastungswiderstand zu erlauben. Die Notwendigkeit des Belastungswiderstandes wird in Kapitel 5.8 genauer erklärt. Die Schaltungen sind bis auf diesen zusätzlichen Widerstand identisch, wie aus dem Vergleich von Bild 6.5 mit Bild 6.6 schnell erkennbar ist.

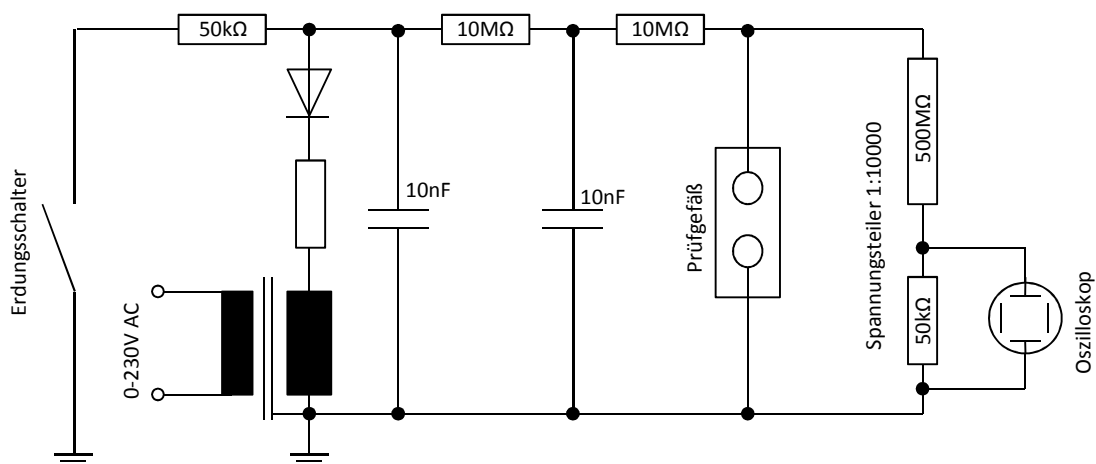


Bild 6.6: Messschaltung ohne Belastungswiderstand

6.3.3 Überprüfung der Spannungsmessung

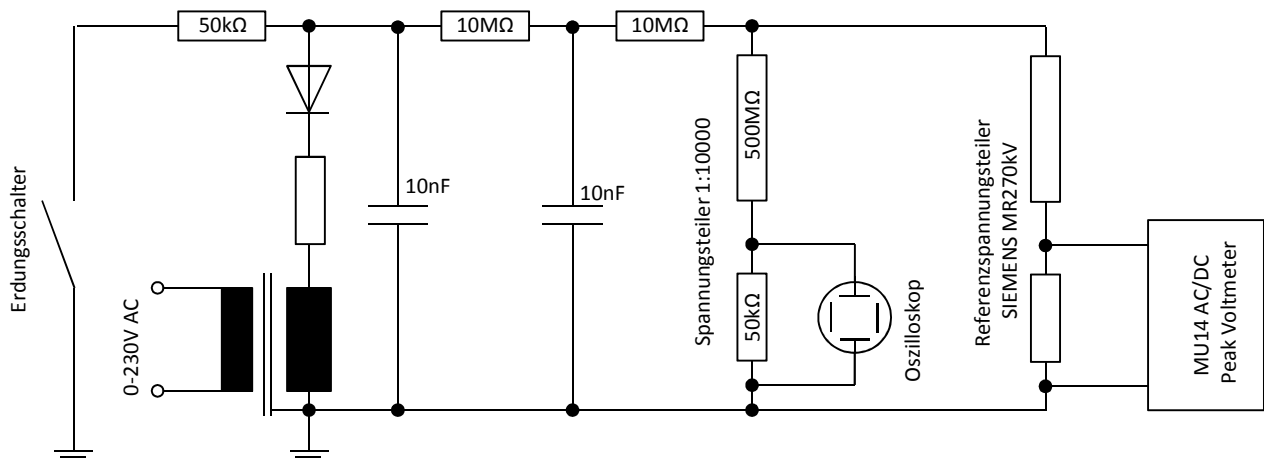


Bild 6.7: Schaltung zur Überprüfung der Spannungsmessung

Um die Überprüfung der Spannungsmessung, wie in Abschnitt 5.9 erklärt, zu erlauben, wird das verwendete Oszilloskop samt Spannungsteiler parallelgeschaltet mit einem kalibrierten Referenzteiler und dem dazugehörigen Peak Voltmeter.

6.4 Messvorbereitung

Zur Messung einer Paschenkurve ist es nötig, einige vorbereitende Arbeiten zu erledigen:

1. Kugeln polieren: Da während der Versuche an den Elektroden Funkenerosion auftritt, wie in Abschnitt 5.4 beschrieben, müssen die Elektroden für die Folgemessung erneut poliert werden. Es gibt für die Elektroden hierfür einen speziellen Bohrmaschinenaufsatz. Eine Standbohrmaschine dreht die Elektroden mit ca. 750 rpm. Das Polieren erfolgt mit Korn 1000 Schleifpapier. Der Poliervorgang wird beendet, wenn die Elektrode wieder makellos ist.
2. Funkenstrecke einstellen: Die Elektroden werden mit Ethanol entfettet, mit destilliertem Wasser gespült und mit einem fusselfreien Papiertuch getrocknet. Danach wird die untere Elektrode fest eingeschraubt. Es kommt der Abstandshalter, ebenfalls sauber, auf die untere Elektrode. Die Kunststoffkonstruktion hält die Metallscheibe horizontal und zentriert auf der Elektrode. Dies ist zu sehen in Bild 6.3. Die obere Elektrode wird nun so eingestellt, dass erst beim Festschrauben des Deckels ein elektrischer Kontakt zustande kommt. Nach dem Entfernen des Abstandshalters sind die Elektroden und Innenwände noch einmal sorgfältig zu reinigen.
3. Evakuieren: Das Prüfgefäß wird messfertig zusammengeschraubt und evakuiert, bis ein Druck von etwa 100 Pa erreicht ist. Dabei muss der Absperrhahn, an dem der Drucksensor CMR-262 fix montiert ist, geöffnet sein um den Schlauch mitzuevakuierten und so eine spätere Verunreinigung zu verhindern. Das Messgefäß bleibt dann 30 Minuten unter Vakuum um eingeschlossenes Gas, beispielsweise im Gewindespalt, und Feuchtigkeit zu entfernen. Auf die Wartezeit folgt weiteres Evakuieren, bis kein signifikanter Druckabfall mehr erkenn-

- bar ist. Zum Schluss wird der Absperrhahn zum CMR-262 geschlossen und gegen versehentliches Öffnen gesichert. Drücke über Atmosphärendruck können den Sensor zerstören.
4. Befüllen mit Messgas: Der Vorgang des Gasmischens ist in Abschnitt 5.6 erklärt. Der Behälter wird fünf Minuten lang abwechselnd alle 30 Sekunden umgelegt und wieder aufgerichtet. Dies soll die Durchmischung unterstützen. Die anderen Verfahren, wie in 2.4 erwähnt, sind hier aus konstruktiven Gründen nicht möglich. Es folgt eine Wartezeit von einer Stunde, um eine weitere Homogenisierung durch die Brownsche Molekularbewegung auszunutzen.
 5. Abschließendes: Von 6 bar wird nun auf 4 bar reduziert. Dabei wird eine Gasprobe nach Anleitung aus Abschnitt 5.7 genommen. Der Drucksensor APR267, zusammen mit dem Steuergerät TPG-261, dient dabei zur Überwachung des Vorgangs und muss vor Beginn der Messungen aus dem Gefahrenbereich entfernt werden.

6.5 Messprozedur

Eine Paschenkurve setzt sich aus 9 Messpunkten zu je 20 gültigen Einzelmessungen zusammen. Die Messprozedur besteht daher aus dem Einstellen des Messpunktes und den eigentlichen Messungen. Durch die fest eingestellte Schlagweite passiert das Einstellen des Messpunktes durch Einstellen des Gasdrucks. Für eine möglichst exakte Druckmessung wird der Drucksensor etwa fünf Minuten vor seiner Verwendung in Betrieb genommen. Das verhindert ein thermisches Driften des Sensors wegen seiner Eigenerwärmung. Bei Überdruck kann durch Ablassen des zu untersuchenden Gases in die Umgebung der Druck reduziert werden. Vorausgesetzt ist natürlich, die Umweltverträglichkeit der Gasmischung lässt dies zu. Andernfalls muss das Gas in einen entsprechenden Behälter abgepumpt werden. Bei Unterdruck bleibt ohnehin nur die Möglichkeit das Gas abzapfen. Die Messung beginnt bei 400 kPa und reduziert sich für jeden Messpunkt, bis ein Druck von 1 kPa erreicht ist. Der Messpunkt wird möglichst exakt eingeteilt. Leichte Abweichungen sind jedoch kaum vermeidbar und werden bei der Erstellung der Paschenkurven berücksichtigt. Bild 6.8 zeigt den Ablauf zur Messung einer Paschenkurve. Die Messvorbereitung ist nicht eingezeichnet.

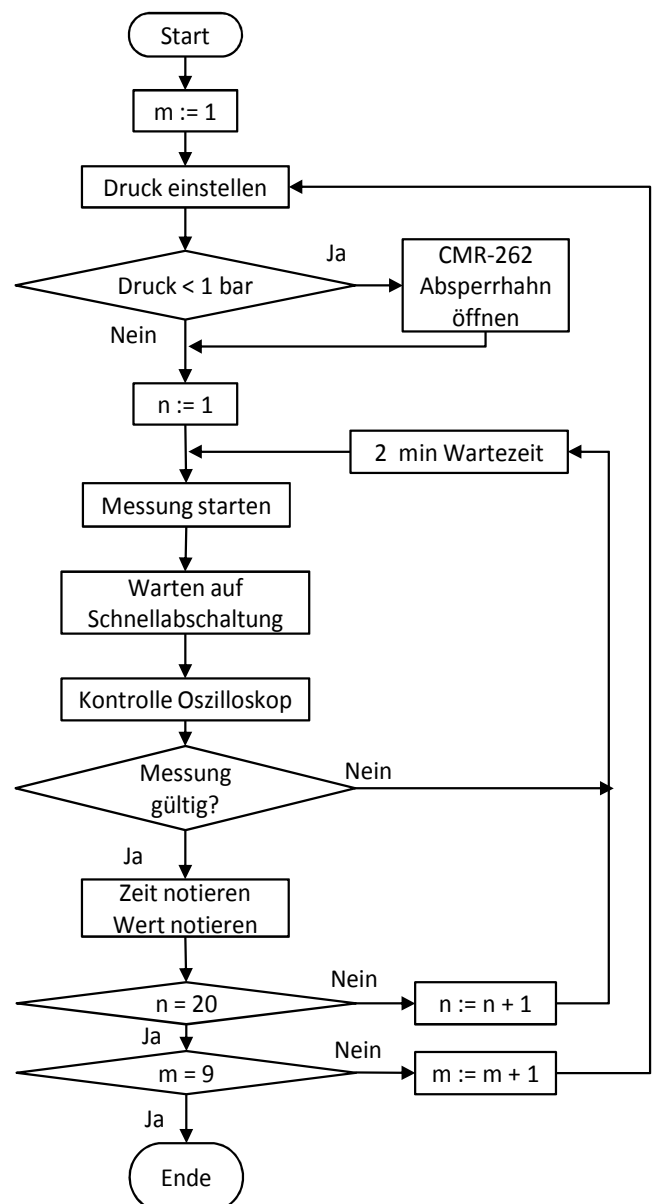


Bild 6.8: Ablauf einer Paschenkurvenmessung

7 Messergebnisse

7.1 Referenzmessungen

Die Referenzmessungen haben den Zweck, den Messaufbau und den gesamten Messablauf zu überprüfen. Es gilt durch Reproduzieren bekannter Messergebnisse das eigene Messverfahren zu verifizieren. Sämtliche Messungen dieses Abschnitts erfolgten nach den Beschreibungen aus Abschnitt 6. Lediglich die Anzahl der Messpunkte ist verkleinert. Der in Abschnitt 5.9 erwähnte Korrekturfaktor ist in den Abbildungen bereits berücksichtigt.

7.1.1 Referenzmessung für Stickstoff

Die Referenzmessung für N_2 wurde mit trockenem Stickstoff der Reinheit 5.0 (99,999 Vol. %) durchgeführt. Als Referenz dient die Paschenkurve für Stickstoff aus Bild 7.2. Die erhaltenen Werte aus der Referenzmessung sind in Bild 7.1 als schwarzes X eingetragen, in Rot sind die Messwerte aus Bild 7.2 für den Versuchsbereich zu sehen. Die interpolierte Kurve wurde nach Formel 4.1 eingepasst.

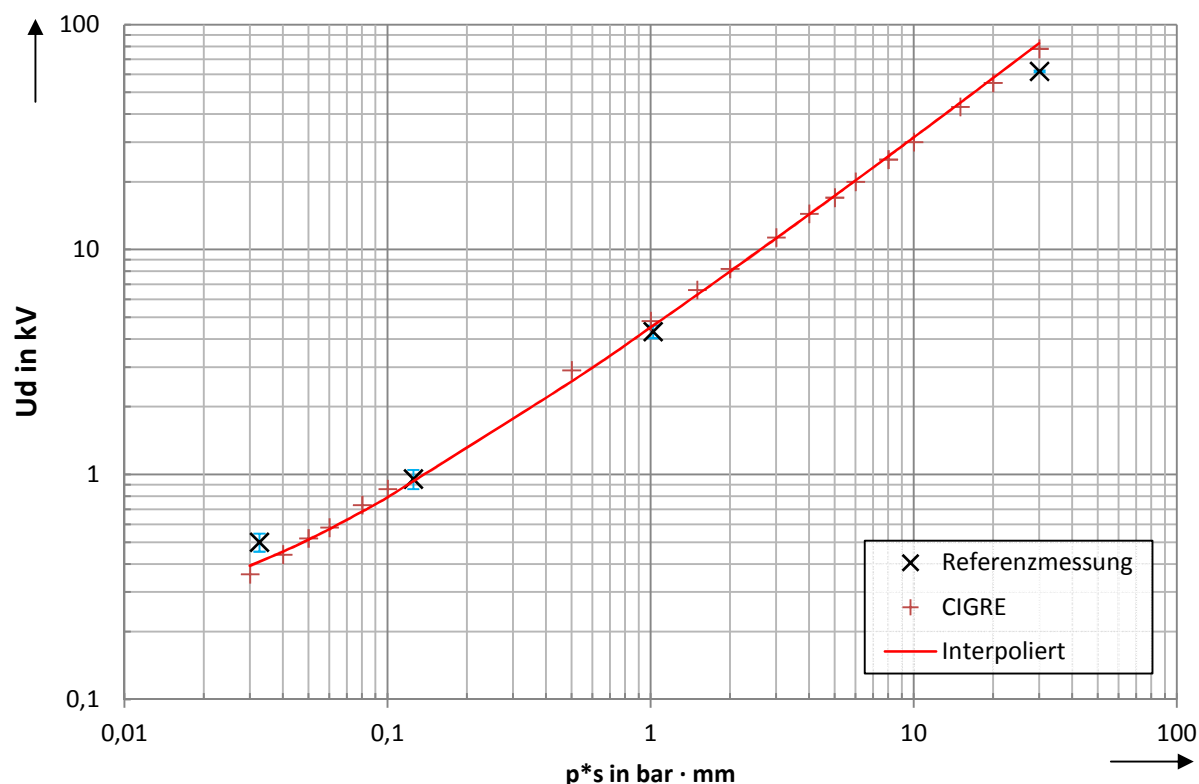


Bild 7.1: Referenzmessung für Stickstoff durch Vergleich mit CIGRÉ-Paschenkurve [19]

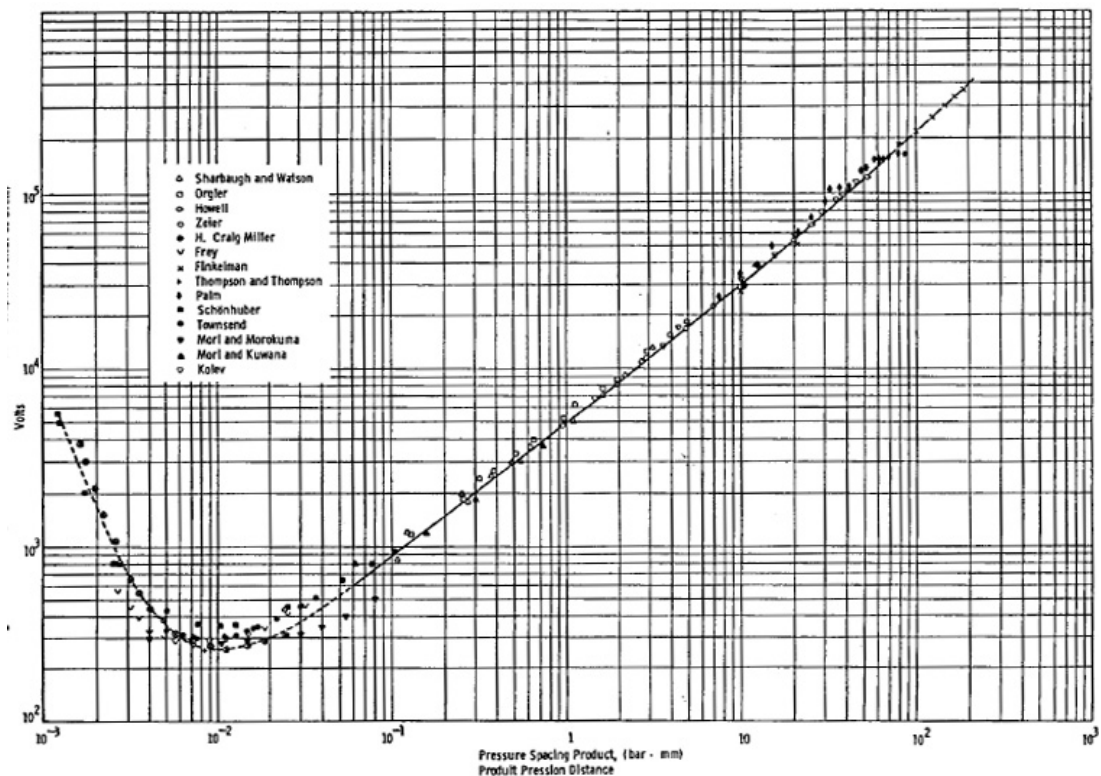


Bild 7.2: Referenz-Paschenkurve für Stickstoff [19]

Versuchsbereich	Referenzmessung	CIGRE-interpoliert	Fehler	Fehler
bar · mm	kV	kV	kV	%
0,033	0,500	0,408	0,092	22,467
0,125	0,954	0,922	0,032	3,466
1,020	4,313	4,577	-0,263	-5,752
30,001	61,949	82,550	-20,601	-24,956

Tabelle 4: Messwerte und Fehler für Stickstoff

Im Bereich mittig der Paschenkurve gibt es eine gute Übereinstimmung. Bei 0,03 bar · mm und bei 30 bar · mm ist eine Abweichung erkennbar. Dies ist in Tabelle 4 durch Zahlen angeführt. Es ist anzumerken, dass in diesem CIGRÉ-Bericht eine Vielzahl an Messungen von verschiedenen Papers zu einer Paschenkurve vereinigt wurden. Entsprechend gibt es auch in diesem Bericht eine deutliche Streuung um die interpolierte Kurve.

7.1.2 Referenzmessung für Kohlendioxid

Die Referenzmessung für Kohlendioxid wurde mit trockenem CO₂ der Reinheit 4.5 (99,995 Vol.%) von der Firma Air Liquide durchgeführt. Als Referenz dient die Paschenkurve für Kohlendioxid aus

Bild 7.4. In Bild 7.3 sind in Rot die Referenzpunkte, in Schwarz die Messpunkte der Referenzmessung und in Blau die Streuung eingetragen. Zur Berechnung des Fehlers in Tabelle 5 wurde aus den Messpunkten der Referenz eine Kurve nach Formel 4.3 interpoliert. Für die Referenzmessungen wurden drei Messpunkte aufgenommen. Diese decken kleine, mittlere und große Werte im Versuchsbereich ab. Generell zeigt sich eine gute Übereinstimmung mit der Referenz. Speziell bei 30 bar · mm ist eine deutliche Abweichung zu erkennen. Als elektronegatives Gas hat Kohlendioxid die Neigung, Elektronen anzulagern. Dieser Umstand wirkt sich in einer erhöhten Durchschlagspannung, verglichen mit weniger elektronegativen Gasen aus [4]. Das lässt sich in sämtlichen Messungen erkennen.

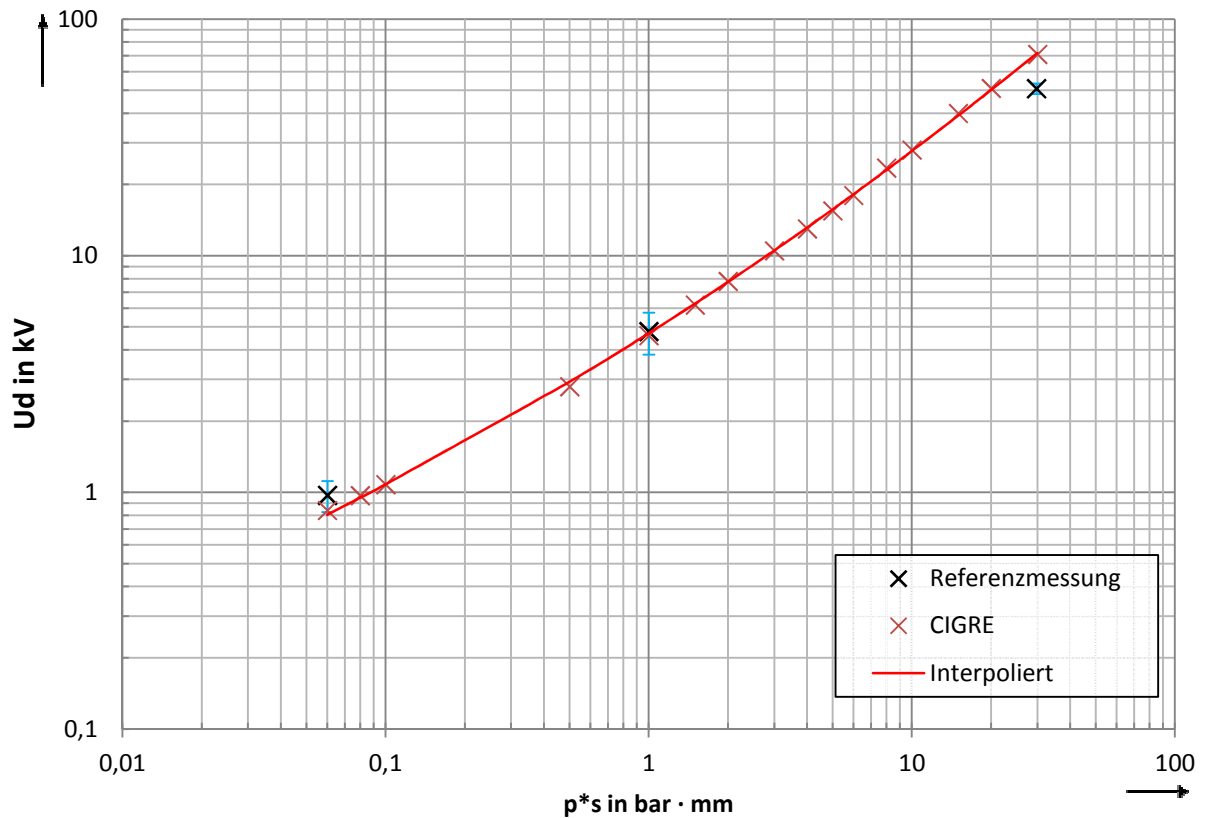


Bild 7.3: Referenzmessung für Kohlendioxid durch Vergleich mit CIGRÉ-Paschenkurve [19]

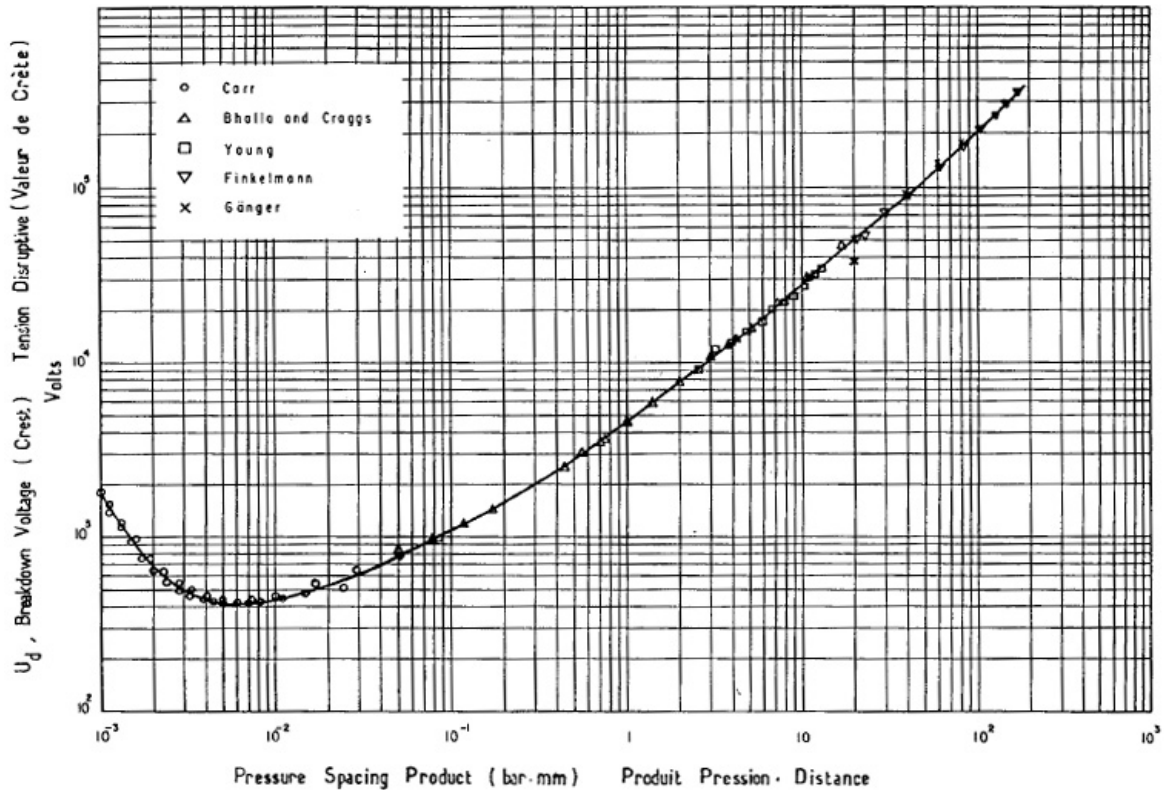


Bild 7.4: Paschenkurve für Kohlendioxid [19]

Versuchsbereich	Referenzmessung	CIGRE-interpoliert	Fehler	Fehler
bar · mm	kV	kV	kV	%
0,06	0,974	0,806	0,168	20,861
1	4,791	4,704	0,087	1,851
29,725	50,877	71,133	-20,256	-28,476

Tabelle 5: Messwerte und Fehler für Kohlendioxid

7.1.3 Referenzmessung für Synthetische Luft

Die Referenzmessung für N₂ 80% O₂ 20% ±1% (Synthetische Luft) wurde mit einem trockenen, fertigen Gasmisch der Reinheit 5.0 (99,999 Vol.%) von der Firma Air Liquide durchgeführt. Als Referenz dient die Paschenkurve für Luft aus Bild 7.6. Es sei angemerkt, dass es sich bei Luft um ein komplexeres Gasmisch handelt. Bei Verwendung von Umgebungsluft müssten Feuchtigkeit, Staubpartikel und Verunreinigungen durch den Verdichter aufwändig entfernt werden. Die synthetische Luft wurde der Umgebungsluft daher vorgezogen, auch aus Gründen der Reproduzierbarkeit. Die Messung ähnelt stark der Referenzmessung für CO₂. Abweichungen sind bei sehr kleinen und großen bar · mm-Werten festzustellen. Tabelle 6 zeigt die Messwerte und Abweichungen zur interpolierten Kurve, welche nach Formel 4.3 eingepasst wurde. Auch für diese Gasmischung sei angemerkt, dass die Sauerstoffkomponente deutlich elektronegativer und somit elektronenanlagernd wirkt.

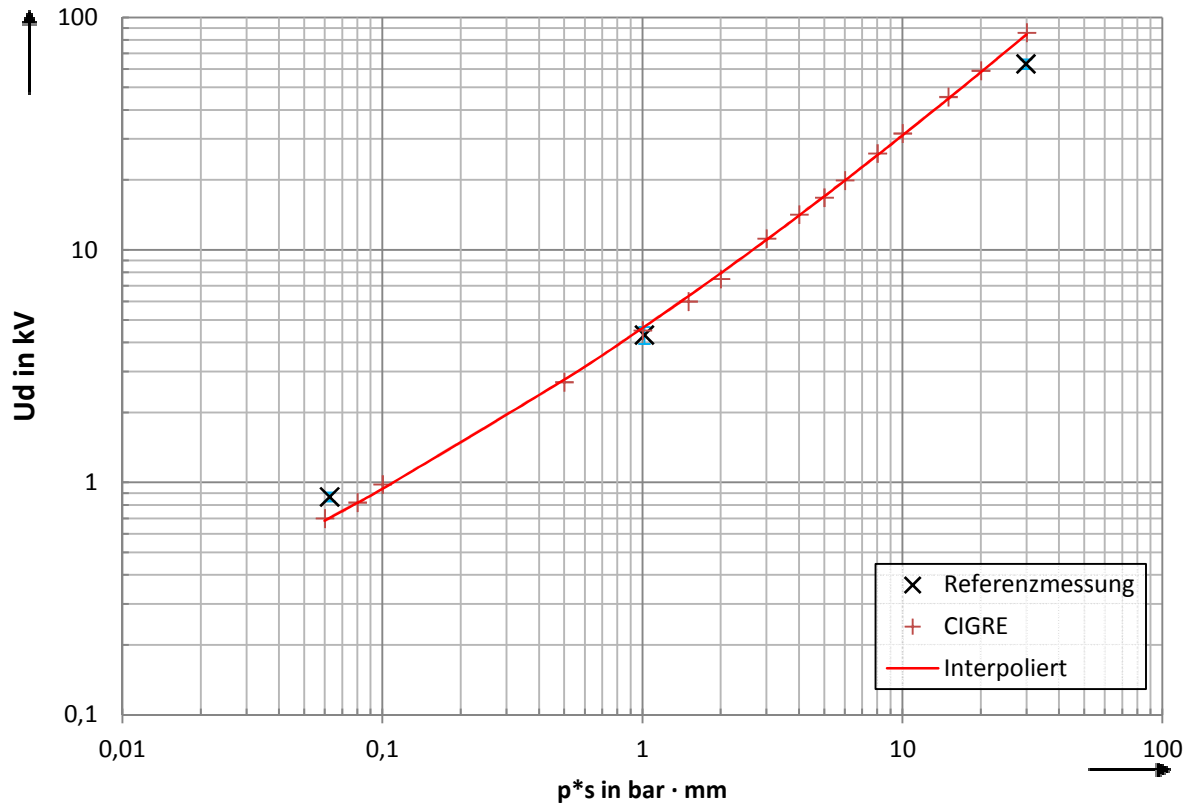


Bild 7.5: Referenzmessung für synthetische Luft durch Vergleich mit CIGRÉ-Paschenkurve [19]

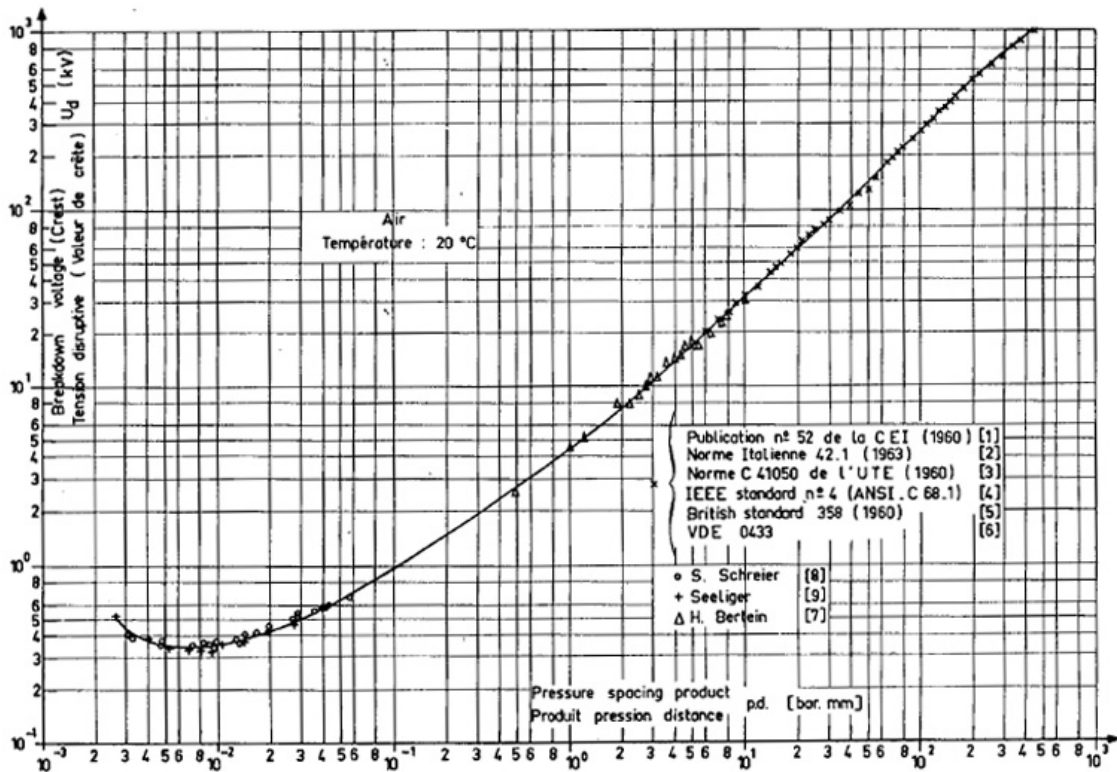


Bild 7.6: Paschenkurve für Luft [19]

Versuchsbereich	Referenzmessung	CIGRE-interpoliert	Fehler	Fehler
bar · mm	kV	kV	kV	%
0,0625	0,867	0,701	0,166	23,729
1,015	4,306	4,667	-0,361	-7,730
29,77	63,108	83,861	-20,752	-24,746

Tabelle 6: Messwerte und Fehler für Luft

7.1.4 Kontrollmessungen

Die Kontrollmessungen wurden nach Beendigung der Paschenkurvenmessungen durchgeführt. Ziel ist durch Wiederholen einzelner Messpunkte aus den Anfangsmessungen, Aussagen über die Wiederholgenauigkeit zu treffen und eventuelle Trends zu erkennen. Aus versuchstechnischen Gründen wurden drei Messpunkte nachgemessen. Um statistisch signifikante Veränderungen zu erkennen, kann das nicht ausreichen. Die Aussagen werden somit unter Vorbehalt getroffen.

Bild 7.7 zeigt in Blau die Messwerte aus der Referenzmessung und in Rot die Messwerte der Kontrollmessung. Der Fehlerbalken der Kontrollmessungen ist deutlich länger als jener der Referenzmessungen. Offenbar hat sich ein Parameter verändert, der einen Einfluss auf die Streuung der Durchschlagsspannung ausübt. Denkbar wären Mechanismen, welche die Bildung von Startelektronen und Sekundärelektronen beeinflussen.

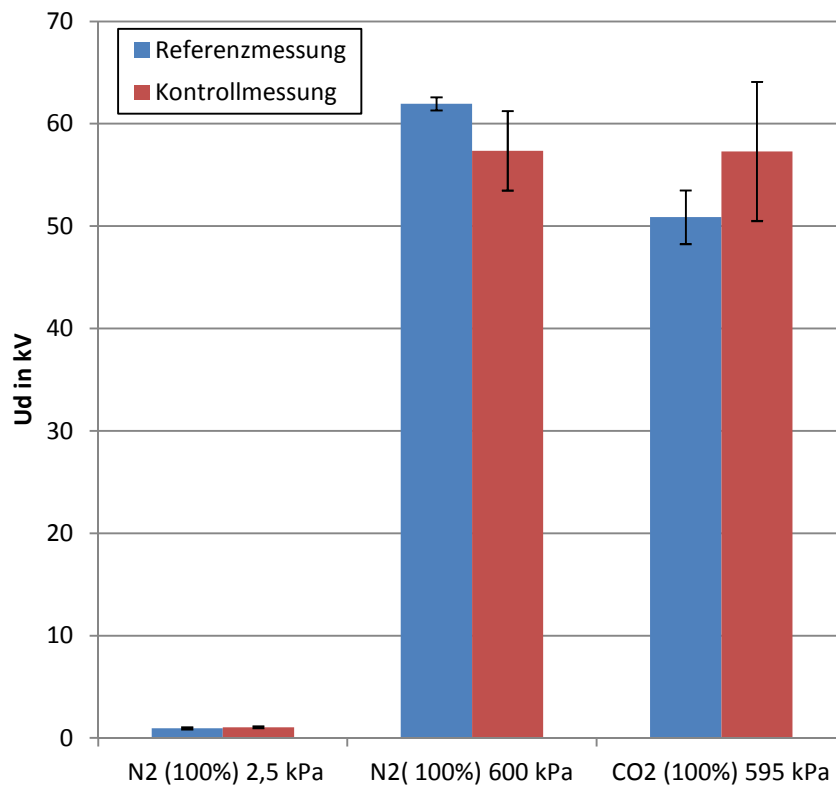


Bild 7.7: Kontrollmessungen absolut

Werden die Kontrollmessungen auf die jeweils dazugehörige Referenzmessung bezogen, ergibt sich Bild 7.8. Es zeigt sich, dass sich die Kontrollmessungen um etwa 10% von ihren Referenzmessungen unterscheiden. Ein Vergleich der Messungen lässt jedoch keinen Trend erkennen. Stickstoff bei 2,5 kPa hat eine Abweichung von etwa +10%, wohingegen Stickstoff bei 600 kPa eine Abweichung von etwa -8% aufweist. Stickstoff bei 600 kPa und Kohlendioxid bei 595 kPa unterscheiden sich auch jeweils um -8% und +12% von ihren Referenzmessungen. Aufgrund dieser drei Kontrollmessungen lässt sich kein Trend erkennen. Es ist jedoch eine schlechte Reproduzierbarkeit der Messungen zu befürchten.

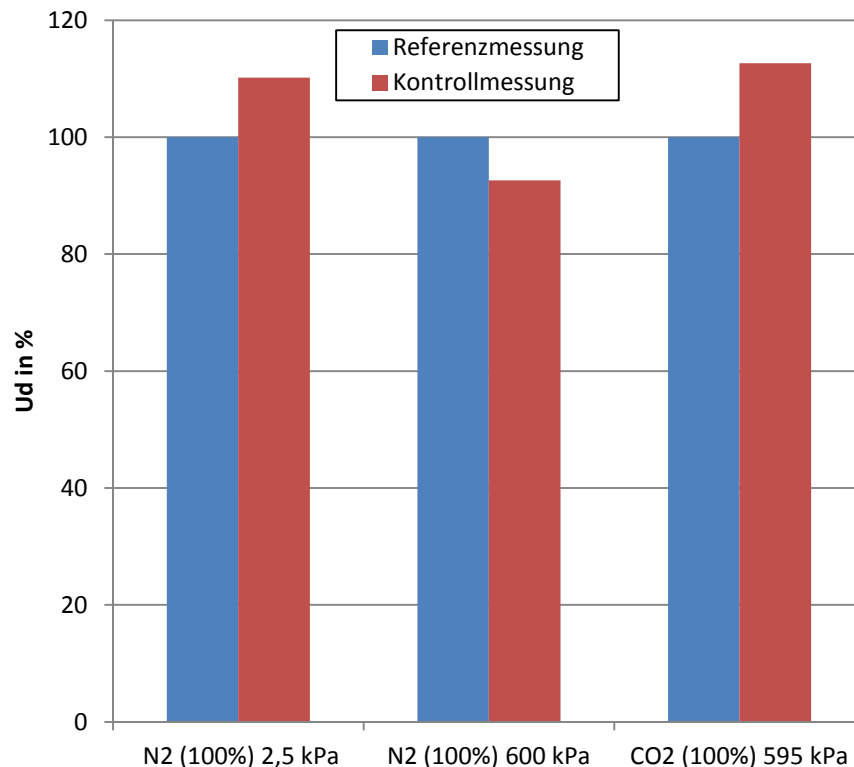


Bild 7.8: Kontrollmessungen relativ

7.2 Paschenkurven für neue Gasgemische

7.2.1 Kurve 1: N₂/CO₂ im Mischverhältnis 80%/20%

Die Messung sämtlicher Paschenkurven erfolgte nach den Beschreibungen aus Abschnitt 6. Als erstes Gasgemisch wurde N₂/CO₂ mit einem Mischverhältnis von 80%/20% vermessen. Man erkennt eine leichte, konvexe Krümmung. Dies kann ein Hinweis auf die Nähe zum Paschenminimum sein. Da sämtliche der vermessenen Gasgemische mindestens eine stark elektronegative Komponente beinhalten, wurden alle Paschenkurven durch die Näherungsformel 4.3 beschrieben. Daher ist die charakteristische Krümmung um das Paschenminimum nicht erkennbar. Die Regressionskurve wurde mit einem iterativen Least-Squares-Verfahren eingepasst.

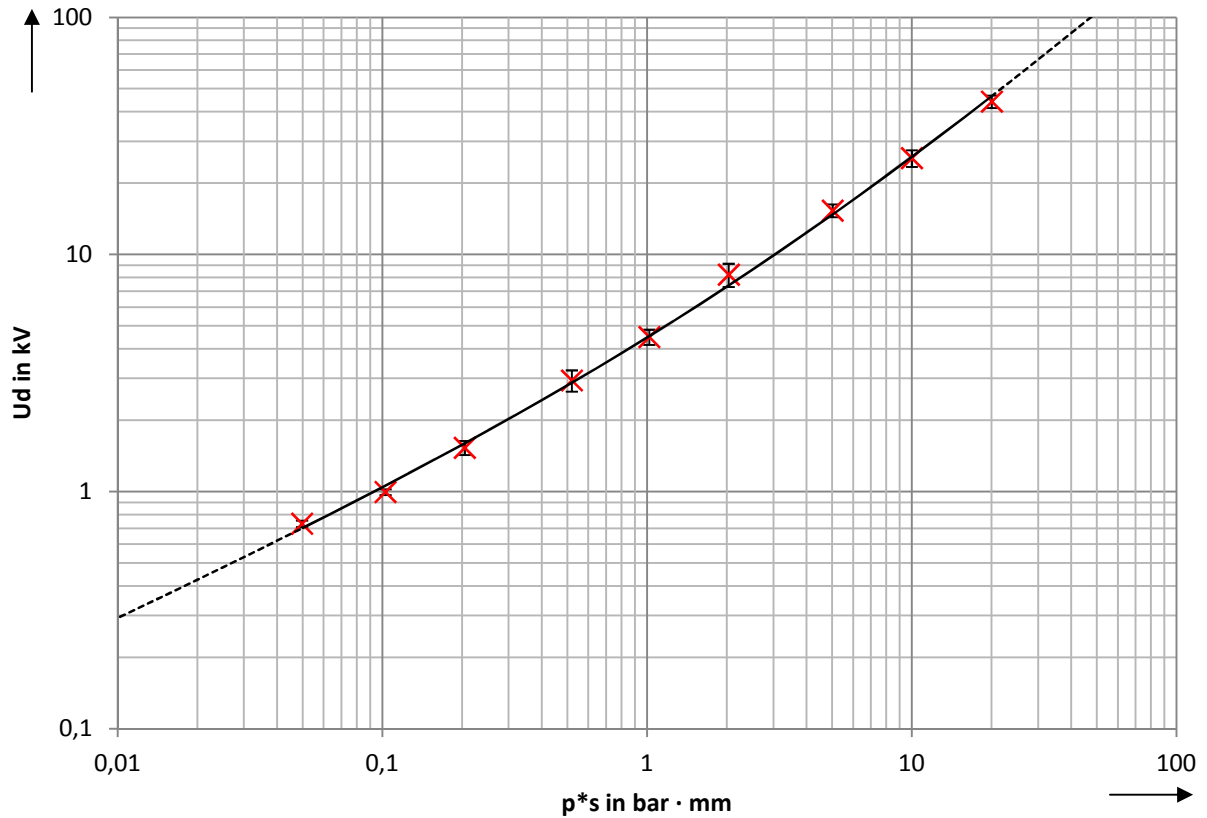


Bild 7.9: Paschenkurve für N₂/CO₂ im Mischverhältnis 80%/20%

7.2.2 Kurve 2: N₂/CO₂ im Mischverhältnis 60%/40%

Als zweite Paschenkurve wurde ein Gemisch aus N₂/CO₂ mit einem Mischverhältnis von 60%/40% vermessen. Auch hier kann eine gut passende Regressionskurve gefunden werden. Bei 1 bar · mm und 2 bar · mm liegt die Durchschlagsspannung leicht über dem erwarteten Wert. Auffallend ist auch der längere Fehlerbalken bei diesen Messpunkten.

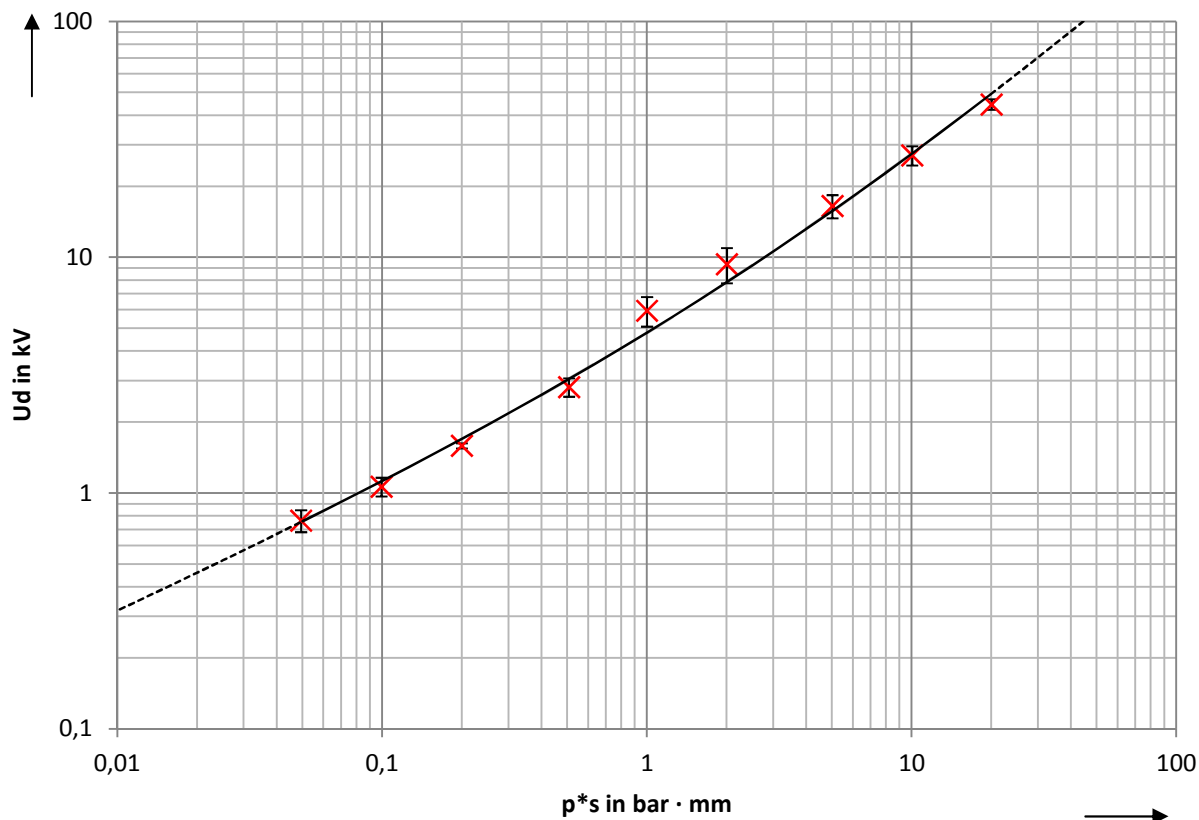


Bild 7.10: Paschenkurve für N₂/CO₂ im Mischverhältnis 60%/40%

7.2.3 Kurve 3: SF₆/N₂/O₂ im Mischverhältnis 90%/8%/2%

Diese Gasmischung ist aus ökologischer Sicht nicht als eine Alternative zu reinem SF₆ zu sehen, wegen des immer noch hohen Treibhauspotentials. Gemische aus Schwefelhexafluorid und Stickstoff zeichnen sich auch durch eine tiefere, mögliche Einsatztemperatur aus, die durch den niedrigeren Kondensationspunkt der Gasmischung erreicht wird [24]. Es zeigt sich auch hier, dass die Messpunkte durch Formel 4.3 gut angenähert werden. Wie bereits beschrieben, wird die Regressionskurve durch ein iteratives Least-Squares-Verfahren an die Messpunkte angepasst. Die äußerst geringe bleibende Abweichung bestätigt die gute Korrelation der Formel in diesem Bereich.

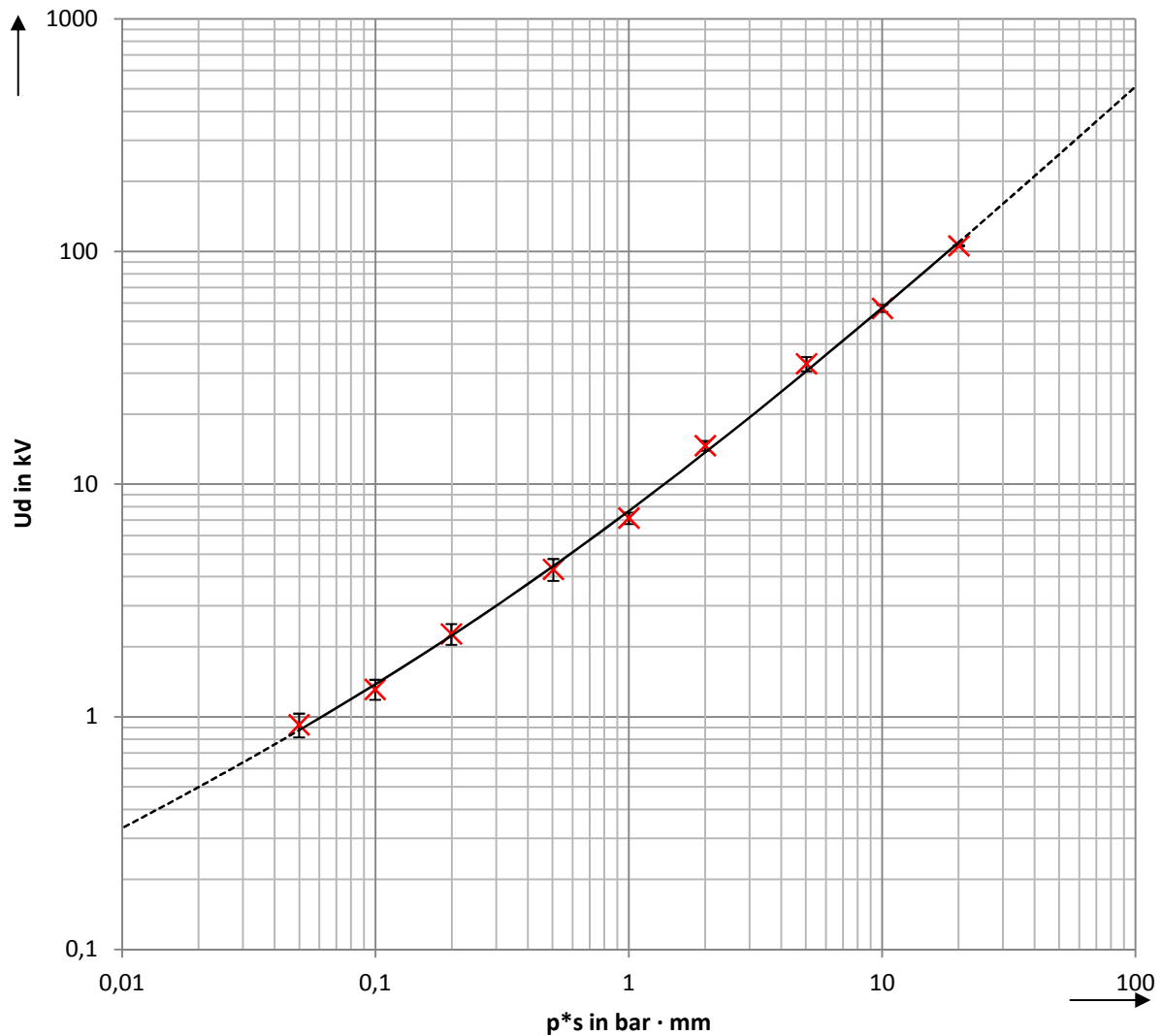


Bild 7.11: Paschenkurve für SF₆/N₂/O₂ im Mischverhältnis 90%/8%/2%

7.2.4 Kurve 4: N₂/SF₆ im Mischverhältnis 80%/20%

Gasmischungen aus Stickstoff mit geringen Anteilen Schwefelhexafluorid gelten in GIL-Systemen als Alternative zu reinem SF₆. Durch eine moderate Druckerhöhung kann dieselbe elektrische Festigkeit wie bei reinem SF₆ erreicht werden. Lediglich die ungünstigen Löscheigenschaften dieser Gasmischungen begrenzen den Einsatz. Die SF₆-Leckrate ist hierbei deutlich reduziert [5]. Zur Messung der Paschenkurve wurde eine fertige Gasmischung (19,69 ± 0,39 Vol.-% SF₆, Rest N₂) der Firma Air Liquide verwendet. Auch für diese Messung trifft die Regressionskurve sehr exakt die Messpunkte. Generell besteht die Messung durch eine geringe Streuung über den gesamten Bereich. Nur bei 5 bar · mm erkennt man einen etwas längeren Fehlerbalken als bei den restlichen Messpunkten.

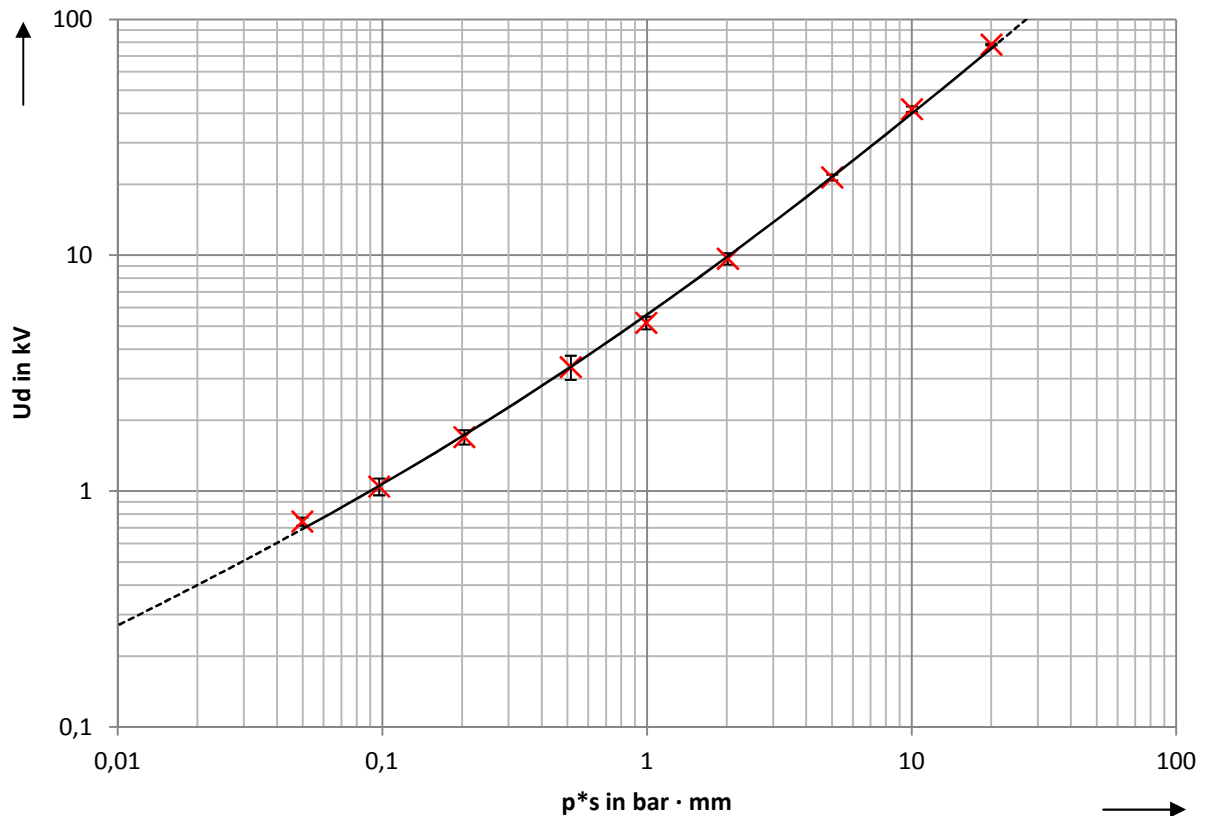


Bild 7.12: Paschenkurve für N₂/SF₆ im Mischverhältnis 80%/20%

7.3 Diskussion

Um die erhaltenen Paschenkurven besser vergleichen zu können, wurden die Regressionskurven in Bild 7.13 eingezeichnet. Zusätzlich sind in Tabelle 7 einige, ausgewählte Messpunkte für die gemessenen Paschenkurven eingetragen. Als durchgezogene Linie ist die interpolierte Kurve eingezeichnet und die extrapolierte Kurve als punktierte Linie. Wie bereits erwähnt, neigen stark elektronegative Gase dazu freie Elektronen anzulagern. Diese stehen dann als Start- oder Sekundärelektronen nicht mehr zur Verfügung. Solche Gase, wie SF₆, CO₂ oder O₂ zeichnen sich generell durch eine erhöhte Durchschlagsspannung aus [4]. Das zeigt sich auch im direkten Vergleich der Paschenkurven. Die Messungen wurden mit größter Sorgfalt durchgeführt und Fehlerquellen so gut wie möglich vermieden. Trotzdem müssen die Resultate kritisch betrachtet werden. Bei den Referenzmessungen fällt auf, dass die 30 bar · mm Messung stets eine geringere Durchschlagsspannung als erwartet aufweist. Eine mögliche Ursache konnte nicht erkannt werden. Die Kontrollmessungen zeigen eine schlechte Reproduzierbarkeit auf. Ein mögliches Problem könnte durch den Messablauf entstehen. Es wurden sämtliche Paschenkurven bei hohen p*s-Werten begonnen und danach bis zu kleinen Werten verringert. Bei hohen p*s-Werten ist trotz der verwendeten Schnellabschaltung der Energieeintrag in das Prüfgefäß am größten. Somit erfahren die Elektro-

den bereits zu Beginn jeder Messung die stärkste Belastung. Schäden durch Funkenerosion bestehen dann während der gesamten Paschenkurvenmessung.

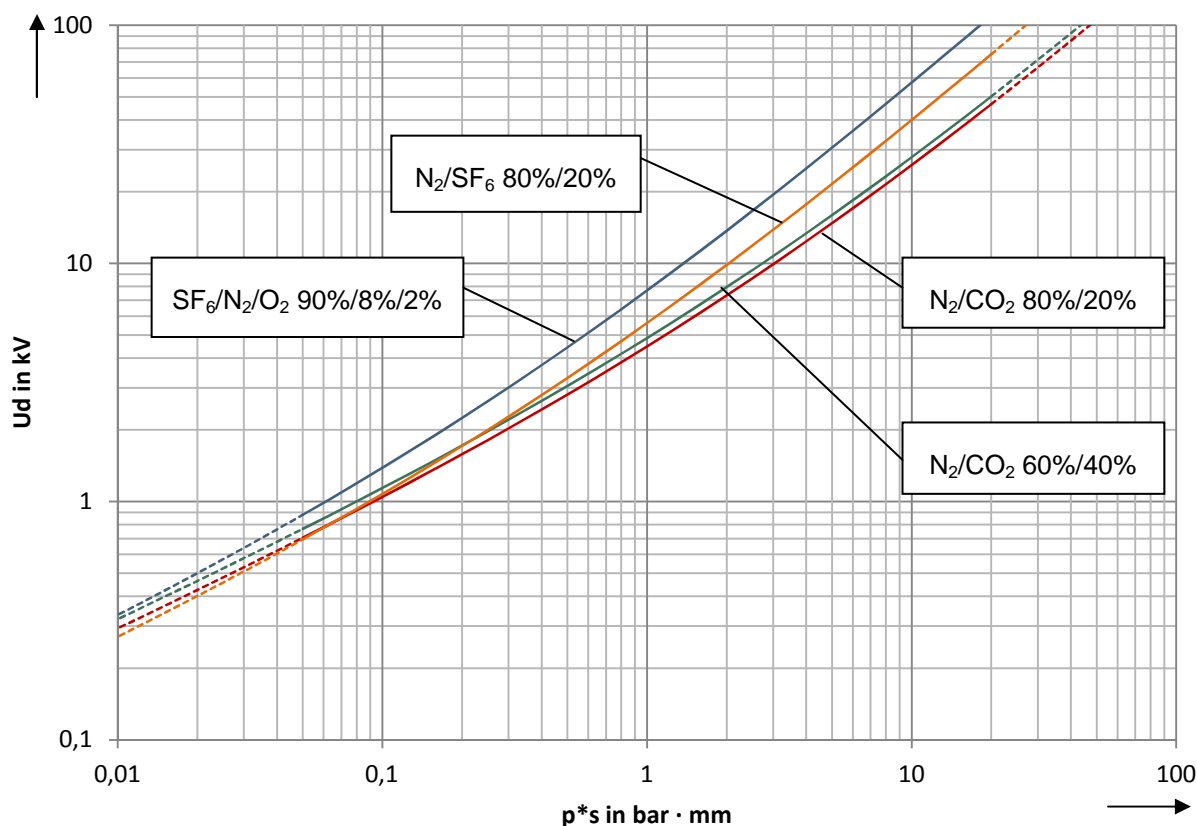


Bild 7.13: Paschenkurven überlagert für verschiedene Gasgemische

Das Prüfgefäß weist eine äußerst geringe, jedoch vorhandene Leckage auf. Bei sehr kleinen Drücken kommt es zum Einströmen von Umgebungsluft in das Prüfgefäß. Es handelt sich nur um kleinste Mengen. Dennoch muss der damit verbundene Druckanstieg und der Eintrag an unerwünschten Fremdgasen bedacht werden.

Trotz aller Einwände ist zu bemerken, dass die erhaltenen Kurven die Erwartungen in Form und Größenordnung erfüllen. Die Messpunkte werden bestens durch Formel 4.3 beschrieben. Punkte entlang der interpolierten Kurve lassen sich daher zuverlässig vorhersagen. Dieser Sachverhalt stützt das Vertrauen in die Messergebnisse.

Bereich	bar · mm	0,1	1	10
N ₂ /CO ₂ 80%/20%	kV	1,0	4,5	25,5
N ₂ /CO ₂ 60%/40%	kV	1,1	5,9	27,0
SF ₆ /N ₂ /O ₂ 90%/8%/2%	kV	1,3	7,2	57,0
N ₂ /SF ₆ 80%/20%	kV	1,0	5,2	41,7

Tabelle 7: Vergleich der Gasgemische für ausgewählte Punkte

8 Berechnung elektrischer Eigenschaften für binäre Gasgemische

Die Messung der elektrischen Eigenschaften von Gasgemischen ist aufwändig. Es kann daher sinnvoll sein, die benötigten Parameter der Gasmischungen aus bekannten Daten zu berechnen. Im folgenden Beispiel wird der druckreduzierte, effektive Ionisierungskoeffizient $\bar{\alpha}/p$ für ein Stickstoff-Kohlendioxid-Gemisch in Abhängigkeit der druckreduzierten Feldstärke E/p und für verschiedene Konzentrationen berechnet. Formel 4.2 beschreibt den effektiven Ionisierungskoeffizienten. Dieser berücksichtigt die intrinsischen Eigenschaften des Dielektrikums. Es gibt keine Einflüsse durch Oberflächeneffekte [5]. Für N_2 und CO_2 lässt sich $\bar{\alpha}/p$ durch Formel 8.1 approximieren [25]. Bei A und B handelt es sich um dieselben Gaskonstanten, die auch in Formel 4.1 Verwendung finden. Für viele Gase sind die Gaskonstanten bereits experimentell ermittelt und können aus entsprechender Literatur entnommen werden. Die Gaskonstanten lassen sich auch durch einen einfachen Durchschlagsversuch durch Variation des $p \cdot s$ -Wertes ermitteln [9, 16]. Somit können sie auch aus einer gemessenen Paschenkurve berechnet werden.

$$\frac{\bar{\alpha}}{p} = A * e^{\left(\frac{B}{E/p}\right)} \quad (8.1)$$

Gas	A	B
	$\frac{1}{mm MPa}$	$\frac{kV}{mm MPa}$
N_2	6600	215
CO_2 $0,2 \leq E/p \leq 0,28$	17650	265,6
CO_2 $0,28 < E/p \leq 100$	5030	151,5

Tabelle 8: Gaskonstanten [25]

Mit den Gaskonstanten aus Tabelle 8 lassen sich nun die druckreduzierten, effektiven Ionisierungskoeffizienten für N_2 und CO_2 in Abhängigkeit von E/p berechnen. Die Konstanten für sehr kleine Werte von E/p bei CO_2 sind ergänzend eingetragen. Dieser Bereich ist jedoch für die Berechnung nicht relevant und findet daher keine Berücksichtigung.

$$\bar{\alpha} = x \bar{\alpha}_{CO_2} \left(\frac{E}{p}\right) + (1 - x) \bar{\alpha}_{N_2} \left(\frac{E}{p}\right) \quad (8.2)$$

$$\frac{\bar{\alpha}}{p} = x 5030 * e^{\left(\frac{-151,5}{E/p}\right)} + (1 - x) 6600 * e^{\left(\frac{-215}{E/p}\right)} \quad (8.3)$$

Für die effektiven Ionisierungskoeffizienten lässt sich nach Formel 8.2 die gewichtete Summe bilden [5]. Für das gewünschte Gasgemisch errechnet sich $\bar{\alpha}/p$ nach Formel 8.3. Der Faktor x gibt den CO₂-Anteil des Gasgemischs an. Durch Variation der Konzentrationen erhält man jene Kurvenschar die in Bild 8.1 zu sehen ist. Da $\bar{\alpha}/p$ sowohl bei N₂ als auch bei CO₂ durch eine exponentielle Funktion angenähert wird, nehmen die Kurven einen ähnlichen Verlauf. Die gewichtete Summenbildung bewirkt, dass die Kurven der Gemische zwischen den Kurven der Reingase liegen.

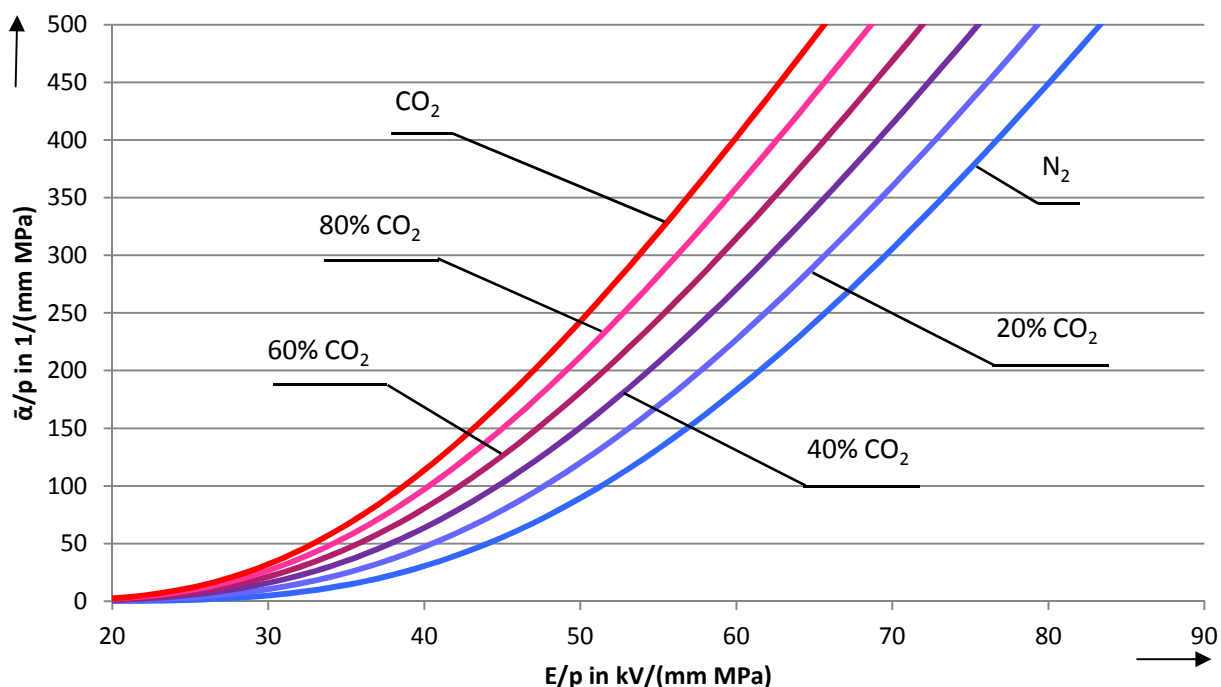


Bild 8.1: Druckreduzierter, effektiver Ionisierungskoeffizient für ein N₂-CO₂-Gemisch

Der effektive Ionisierungskoeffizient ist für das Gasgemisch im gesamten betrachteten Bereich positiv. Bild 8.1 zeigt, dass dies unabhängig vom Mischverhältnis gilt. Ein positiver effektiver Ionisierungskoeffizient ist eine Voraussetzung für Lawinenbildung im Gasgemisch [4]. Die Ergebnisse der Berechnung sollen nun anhand von zwei gemessenen Paschenkurven verglichen werden. Es handelt sich um N₂/CO₂ Mischungen mit einem Verhältnis von 80%/20% und 60%/40%. Vergleicht man die beiden Gasgemische an derselben Feldstärke, so weist das Gasgemisch mit dem höheren CO₂-Anteil einen höheren effektiven Ionisierungskoeffizienten auf. Der effektive Ionisierungskoeffizient gibt an, wie viele freie Ladungsträger je Längeneinheit durch beschleunigte Elektronen neu entstehen, unter Berücksichtigung der Elektronenanlagerung [4]. Somit kann erwartet werden, dass ein Durchschlag wahrscheinlicher wird. In der Paschenkurve dieses Gasgemisches ist also eine niedrigere Durchschlagspannung zu erwarten. Bild 8.1 lässt vermuten, dass das Gasgemisch

mit dem 40% CO₂-Anteil generell eine geringere Durchschlagsspannung aufweist als das Gemisch mit dem 20% CO₂-Anteil. Ein Vergleich der entsprechenden Paschenkurven in Bild 7.13 widerspricht jedoch der Erwartung. Eine mögliche Erklärung findet sich in Bild 8.2, in dem die Messpunkte mit ihrem Streubereich eingetragen sind. Man erkennt, dass sich über den gesamten Versuchsbereich die Streubereiche überlappen. Somit lässt sich die Berechnung anhand der gemessenen Paschenkurven für diese Gasmischungen nicht verifizieren. Tabelle 9 zeigt einen Vergleich der gemessenen Durchschlagsspannungen der Gasmischungen mit den Durchschlagsspannungen der Reingase. Die Paschenkurven von Stickstoff und Kohlendioxid liegen bereits so nah beisammen, dass die Paschenkurven der Gasmischungen kaum unterscheidbar werden. Gasmische aus Stickstoff und Kohlendioxid sind somit wenig geeignet für einen Vergleich mit den berechneten effektiven Ionisierungskoeffizienten.

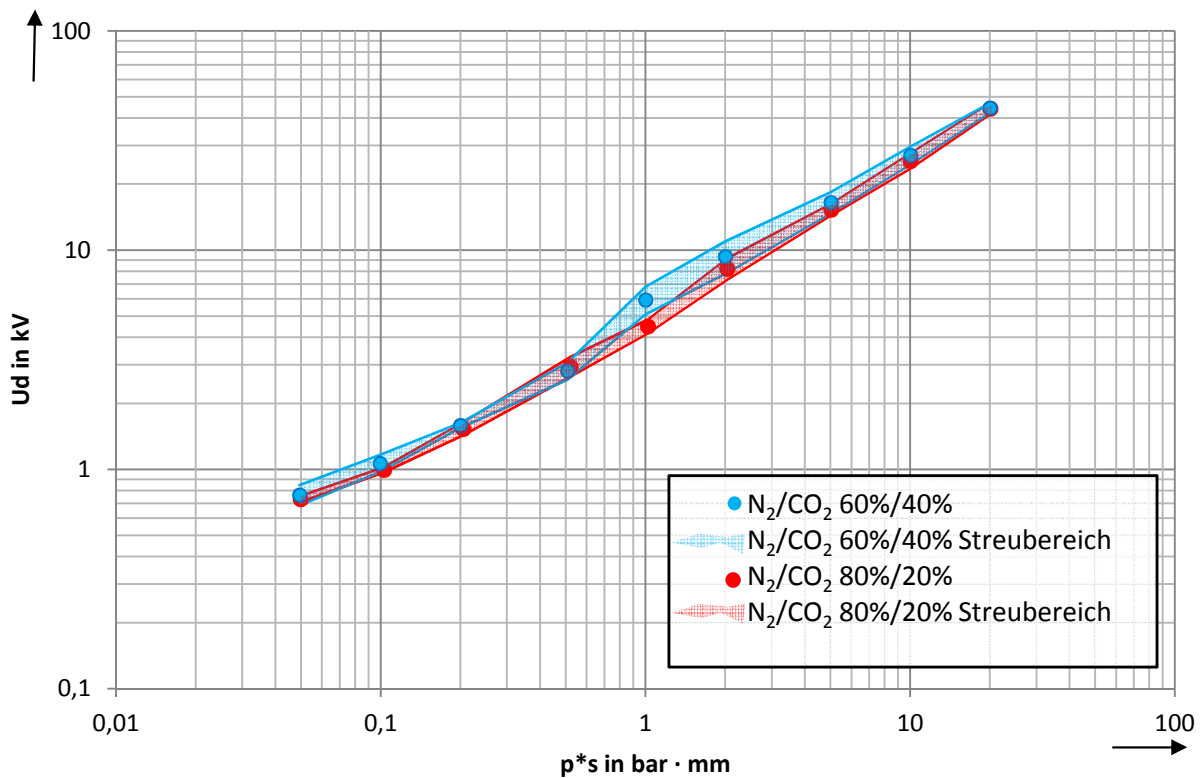


Bild 8.2: Vergleich der gemessenen Paschenkurven für N₂/CO₂ bei 80%/20% und 60%/40%

Messpunkt bar · mm	U _d			
	x = 0 [19]	x = 0,2	x = 0,4	x = 1 [19]
0,1	0,9	1,0	1,1	1,1
1	4,8	4,5	5,9	4,6
10	30,0	25,5	27,0	28,0

Tabelle 9: Vergleich der Durchschlagsspannungen in kV von gemessenen Paschenkurven für verschiedene Mischverhältnisse von N₂/CO₂

9 Zusammenfassung

Aufgrund seiner günstigen Eigenschaften als Isoliergas wird in gekapselten Anlagen Schwefelhexafluorid in Reinform oder in Gasgemischen verwendet. Gelangt es in die Atmosphäre wird es als stärkstes, bekanntes Treibhausgas wirksam. Daher wird nach ökologisch verträglicheren Alternativen gesucht. Als aussichtsvoll gelten Gasgemische. Die vorliegende Masterarbeit hat zum Ziel die Paschenkurven von erfolgversprechenden Gasgemischen zu messen.

Die Gasphysik unterscheidet generell das ideale Gas vom realen Gas. Während in realen Gasen Kraftwirkungen zwischen den Molekülen wirken und jedes Partikel ein reales Volumen aufweist steht mit dem idealen Gas ein vereinfachtes Modell zur Verfügung. Sämtliche gasbezogene Berechnungen in dieser Arbeit wurden mit dem idealen Gasmodell durchgeführt. Die Herstellung der Gasgemische erfolgte durch das manometrisch-statische Partialdruckverfahren. Es werden nacheinander die Gemischanteile entsprechend ihrer Partialdrücke in das Mischgefäß eingefüllt. Eine Homogenisierung findet durch die Brownsche Molekularbewegung statt und wird durch mechanische Umwälzung unterstützt.

Zu einer Gasentladung zwischen zwei Elektroden kommt es, wenn im Gasvolumen durch Ionisationsprozesse genügend freie Ladungsträger gebildet werden, um einen Entladungskanal bilden zu können. Dabei finden parallel mehrere Ionisationsmechanismen statt. Hochenergetische Photonen können neutrale Teilchen entweder direkt ionisieren oder über einen Mehrstufenprozess genug Energie zufügen, bis es zur Photoionisation kommt. Als Stoßionisation bezeichnet man den Prozess, wenn freie Ladungsträger im elektrischen Feld genügend Energie aufgenommen haben und bei einer Kollision weitere Ladungsträger freisetzen. Sehr ähnlich verhält es sich bei der Thermoionisation. Die Energie der stoßenden Teilchen kommt hier jedoch aus der thermischen Bewegung und tritt erst bei sehr hohen Temperaturen nennenswert auf. Treten Elektronen aus Festkörpern aus, so ist die Rede von Oberflächenemission. Bei einem ausreichend starken elektrischen Feld beschleunigen die Startelektronen genügend stark um weitere Elektronen freizusetzen, die nun wiederum als neue Startelektronen zur Verfügung stehen. Es kommt zu einer lawinenartigen Ladungsträgervermehrung. Dies wird beschrieben durch den Generationenmechanismus nach Townsend. Das Paschengesetz besagt, dass die Höhe der Durchschlagsspannung eine Funktion aus dem Produkt des Gasdrucks p und der Schlagweite s ist. Für kleine Werte von $p \cdot s$ sind im Gasvolumen nur wenige ionisierbare Moleküle vorhanden. Es wird eine hohe Spannung benötigt um die Gasstrecke zu ionisieren. Mit steigendem $p \cdot s$ sinkt die Durchschlagsspannung bis das Paschenminimum erreicht ist. Wird $p \cdot s$ weiter erhöht, sinkt die mittlere freie Weglänge, die benötigt wird um genügend Energie für ionisierende Stöße aufzunehmen. Die Durchschlagsspannung steigt wieder an.

Zur Messung der Paschenkurven wurde ein Versuchsaufbau gefunden, der sich an den Versuchen bekannter Publikationen orientiert. Für das elektrische Feld zwischen den Elektroden wurde ein Homogenitätsgrad von $\eta = 0,96$ festgelegt. Die Verwendung von Kugelelektroden mit einem Durchmesser von 75 mm bedingt eine Schlagweite von 5 mm für den geforderten Homogenitätsgrad. Der Versuchsbereich wurde im Rahmen dieser Arbeit zu $p \cdot s = 0,05 \dots 20 \text{ bar} \cdot \text{mm}$ festge-

legt. Dieser Bereich wird von neun Messpunkten zu je 20 Einzelmessungen abgedeckt. Die Versuche werden mit negativer Gleichspannung durchgeführt. Nach einem Durchschlag findet eine automatische Schnellabschaltung statt, um den Energieeintrag in das Messgefäß gering zu halten.

Zur Überprüfung des Versuchsaufbaus wurden Referenzmessungen mit Stickstoff, Kohlendioxid und synthetischer Luft durchgeführt und mit bekannten Paschenkurven verglichen. Es zeigt sich generell eine gute Übereinstimmung im Versuchsbereich um $p \cdot s = 1 \text{ bar} \cdot \text{mm}$. Bei sehr kleinen und großen $\text{bar} \cdot \text{mm}$ -Werten gibt es deutliche Abweichungen mit einem relativen Fehler bis über 20%. Vergleiche der Referenzmessungen mit Kontrollmessungen die abschließend durchgeführt wurden zeigen Abweichungen von etwa 10%.

Für Gasgemische aus N_2/CO_2 mit den Verhältnissen 80%/20% und 60%/40%, $\text{SF}_6/\text{N}_2/\text{O}_2$ mit 90%/8%/2% und N_2/SF_6 mit 80%/20% sind die Paschenkurven gemessen worden. Die N_2/CO_2 Gasmischung mit 20% CO_2 -Anteil hat über den gesamten Versuchsbereich die niedrigste Durchschlagspannung. Für den $p \cdot s$ -Wert von $1 \text{ bar} \cdot \text{mm}$ liegt U_d bei 4,5 kV und für $10 \text{ bar} \cdot \text{mm}$ bei 25,5 kV. Das Gemisch aus N_2/CO_2 mit 40% CO_2 -Anteil weist eine nur unwesentlich höhere Durchschlagspannung auf. Erwartungsgemäß zeigte die Gasmischung mit 90% SF_6 -Anteil die höchste Durchschlagfestigkeit. Für $1 \text{ bar} \cdot \text{mm}$ liegt U_d hier bei 7,2 kV und für $10 \text{ bar} \cdot \text{mm}$ bei 57,0 kV. Auch die Gasmischung mit 20% SF_6 -Anteil zeigt sehr gute Isoliereigenschaften. Bei $1 \text{ bar} \cdot \text{mm}$ erreicht die Durchschlagspannung U_d Werte von 5,2 kV und bei $10 \text{ bar} \cdot \text{mm}$ 41,7 kV. Da bei den genannten Gasgemischen stark elektronegative Komponenten vorkommen, wurden die Regressionskurven durch eine Näherungsformel beschrieben und mit einem iterativen Least-Squares-Verfahren eingepasst. Die Messung der elektrischen Eigenschaften von Gasgemischen ist aufwändig. Es wurde daher exemplarisch der druckreduzierte, effektive Ionisierungskoeffizient einer Gasmischung für verschiedene Mischverhältnisse berechnet. Ein Vergleich mit gemessenen Paschenkurven derselben Gasmischungen konnte nicht durchgeführt werden, da die Paschenkurven zu nah beisammen liegen.

In dieser Masterarbeit konnten erste Schritte zur Messung von Paschenkurven für Gasgemische getan werden. Es handelt sich um Messungen prinzipieller Natur, die vor allem die Schwierigkeiten dieses Vorhabens aufzeigen. Für weiterführende Untersuchungen sollte der Messaufbau optimiert werden. Sowohl betreffend die Reproduzierbarkeit als auch die Versuchsdauer. Eine Analyse der Gasgemische ist auf jeden Fall notwendig, um Unsicherheiten durch die Herstellung der Mischungen auszuschließen. Auch die mathematische Herangehensweise ist vielversprechend und verdient eine weitergehende Untersuchung.

10 Literaturverzeichnis

- [1] International Energy Agency: *WORLD ENERGY OUTLOOK 2013 FACTSHEET*, WEO, 2013.
- [2] H. Koch: *Gasisolierte Übertragungsleitung (GIL) Eine Lösungsalternative für die Energiewende*, Vortrag TU Graz, 2013.
- [3] ABB: *Schaltanlagen Handbuch*, Cornelsen - Scriptor, 2007.
- [4] A. Küchler: *Hochspannungstechnik* (3rd ed.), Springer, 2009.
- [5] CIGRE TF D1.03.10: *N₂/SF₆ mixtures for gas insulated systems*, CIGRE TB 260, 2004.
- [6] D. Imamovic: *Umweltfreundliche Isoliertgase für gasisolierte Leitungen zur Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung*, Dissertation TU Graz, 2011.
- [7] Y. Kieffel, A. Girodet, F. Biquez, P. Ponchon, J. Owens, M. Costello, M. Bulinski, R. Van San, K. Werner: *SF₆ alternative developement for high voltage switchgears*, Cigre Session Paris, Paper-D1-305, 2014.
- [8] A. Tipler, G. Mosca: *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure*, Spektrum, 2009.
- [9] E. Kuffel, W. S. Zaengl, J. Kuffel: *High Voltage Engineering*, Butterworth-Heinemann, 2000.
- [10] W. H. Schön: *Handbuch der reinsten Gase*, Springer, 2005.
- [11] United Nations Economic Commission for Europe (UNECE): *ADR 2013*, United Nations Publication, New York, Geneva, 2013.
- [12] K. Wilde, K. Studtrucker: *Prüfgase - Präzisionsgasgemische zum Kalibrieren von Meßgeräten*, Linde Berichte aus Technik und Wissenschaft 69, 1993.
- [13] R. Lenk, W. Gellert: *Fachlexikon ABC PHYSIK*, Harri Deutsch, Zürich, 1974.
- [14] C. Sumereder: *Skriptum Hochspannungstechnik 1*, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, TU Graz, 2009.
- [15] R. Schrittwieser: *Skriptum Plasmaphysik*, Institut für Ionenphysik, Universität Innsbruck, 2004.
- [16] G. Hilgarth: *Hochspannungstechnik*, Teubner, 1997.

- [17] F. Paschen: *Über die zum Funkenübergang in Luft, Wasserstoff und Kohlensäure bei verschiedenen Drucken erforderliche Potentialdifferenz*, Annalen der Physik, vol. 273, pp. 69-96, 1889.
- [18] O. Zeier: *Durchschlaguntersuchungen in komprimierten Gasen und in flüssiger Kohlensäure*, Annalen der Physik, vol. 14, pp. 415-447, 1932.
- [19] T. W. Dakin, J. Gerhold, Z. Krasucki, G. Luxa, G. Oppermann, J. Vigreux, G. Wind and H. Winkelkemper: *Breakdown of Gases in Uniform Fields*, Cigré Technical Brochure 004, 1977.
- [20] T. W. Dakin, G. Luxa, G. Oppermann, J. Vigreux, G. Wind, H. Winkelkemper: *Breakdown of Gases in Uniform Fields. Paschen Curves for Nitrogen, Air and Sulphur Hexafluoride*, ELECTRA, 1974.
- [21] D. Kind, K. Feser: *Hochspannungs-Versuchstechnik: Mit 12 Laborversuchen*, Vieweg, 1995.
- [22] H. Czichos, M. Hennecke: *Das Ingenieur Wissen*, Springer, 2007.
- [23] U. Kiencke, H. Kronmüller: *Meßtechnik: Systemtheorie Für Elektrotechniker*, 1995.
- [24] T. A. Paul, M. Porus, B. Galletti, A. Kramer: *Performance of a novel SF₆ concentration sensor for gas-insulated electrical apparatus under field conditions*, International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis 2014, Jeju, Korea, 2014.
- [25] N. H. Malik, A. H. Qureshi: *Breakdown Gradients in SF₆-N₂, SF₆-Air and SF₆-CO₂ Mixtures*, IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. EI-15, pp. 413-418, 1980.

11 Anhang

Gerät	Hersteller	Modell	S/N	Inventar.
Oszilloskop	Yokogawa	DL9040		0059629
Schalt- und Regelpult	Messwandler - Bau GmbH Bamberg	SRP 0,5/5	409070	
Vakuumpumpe	Pfeiffer Vacuum GmbH	Duo M20 PK D63 712 A	21259098	
Drucksensor	Pfeiffer Vacuum GmbH	APR 267 50000 mbar	44423543	183890
Drucksensor	Pfeiffer Vacuum GmbH	CMR 262 - 100mbar PTR24511	318109Z 005	
Druck Anzeige	Pfeiffer Vacuum GmbH	TPG 261 PTG28030	44335728	184032
Referenzteiler	Siemens	MR270kV	879 394	
Peak Voltmeter	Siemens	MU 14 AC/DC Peak Voltmeter	878844	
Messshunt	EBG RESISTORS, LLC	1/10.000 500 MOhm : 50 kOhm		0059631
Prüftransformator	BAUR Prüf- und Messtechnik GmbH	PGK 150/5 150 KVDC / 105 KVAC	82 13 03 03 H	
Baukastensystem	Messwandler - Bau GmbH Bamberg			

Tabelle 10: Geräteverzeichnis

Elektroden	Typ		Kugel – Kugel
	Durchmesser \varnothing	mm	75
	Schlagweite d	mm	5
	Material		Edelstahl (V2A)
	Oberfläche		poliert (Korn 1000)
	Homogenitätsgrad η		0,96
	Druckbereich p	kPa	1 - 400
	Versuchsbereich	bar · mm	0,05 - 20
	Messspannung		Rampe DC
	Polarität		negativ

Tabelle 11: Messbedingungen der Paschenkurvenmessungen

bar · mm	0,03	0,13	1,0	30,0
1	0,48	1,12	4,2	62,1
2	0,53	1,05	4,2	62,3
3	0,46	0,89	4,2	61,8
4	0,53	0,89	4,1	61,5
5	0,48	0,89	4,9	62,0
6	0,54	0,89	4,2	62,6
7	0,52	1,10	4,2	62,0
8	0,52	0,92	4,2	62,7
9	0,54	1,00	4,2	62,0
10	0,52	0,89	4,3	61,3
11	0,50	0,98	4,3	61,4
12	0,47	0,89	4,1	62,3
13	0,39	0,89	4,3	61,1
14	0,60	0,89	4,3	61,2
15	0,42	0,98	4,3	61,7
16	0,44	0,91	4,2	61,9
17	0,45	0,89	5,0	62,1
18	0,53	0,88	4,2	60,8
19	0,49	0,89	4,2	62,3
20	0,54	1,22	5,2	63,7
Ud	0,50	0,95	4,3	61,9
s	0,05	0,10	0,3	0,6

Tabelle 12: Referenzmessung für N₂ (100%) in kV

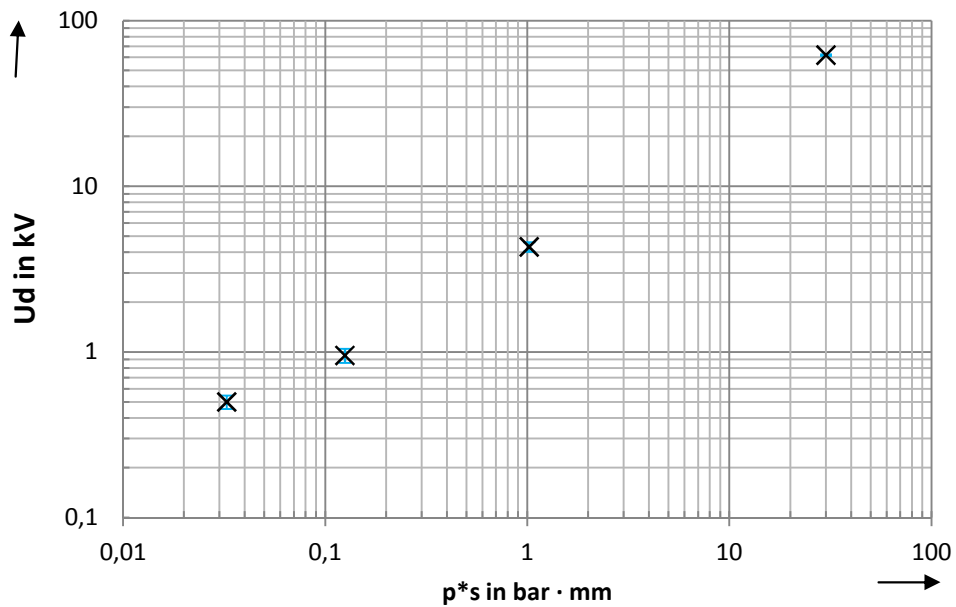


Bild 11.1: Referenzmessung für N₂ (100%)

bar · mm	0,1	1,0	29,7
1	1,26	5,5	48,0
2	0,87	4,8	52,9
3	0,89	4,2	47,2
4	0,89	7,1	51,9
5	1,19	3,8	50,9
6	0,89	4,7	56,1
7	0,87	4,5	51,0
8	0,88	3,9	52,6
9	0,89	4,2	47,8
10	1,21	4,2	47,8
11	0,89	7,5	49,4
12	1,16	4,3	52,5
13	0,88	5,5	49,6
14	0,89	4,9	52,1
15	1,17	4,9	46,3
16	1,07	3,9	54,7
17	0,90	4,2	52,3
18	0,89	5,0	51,3
19	0,89	3,9	52,4
20	0,87	4,6	
Ud	0,97	4,8	50,9
s	0,14	1,0	2,6

Tabelle 13: Referenzmessung für CO₂ (100%) in kV

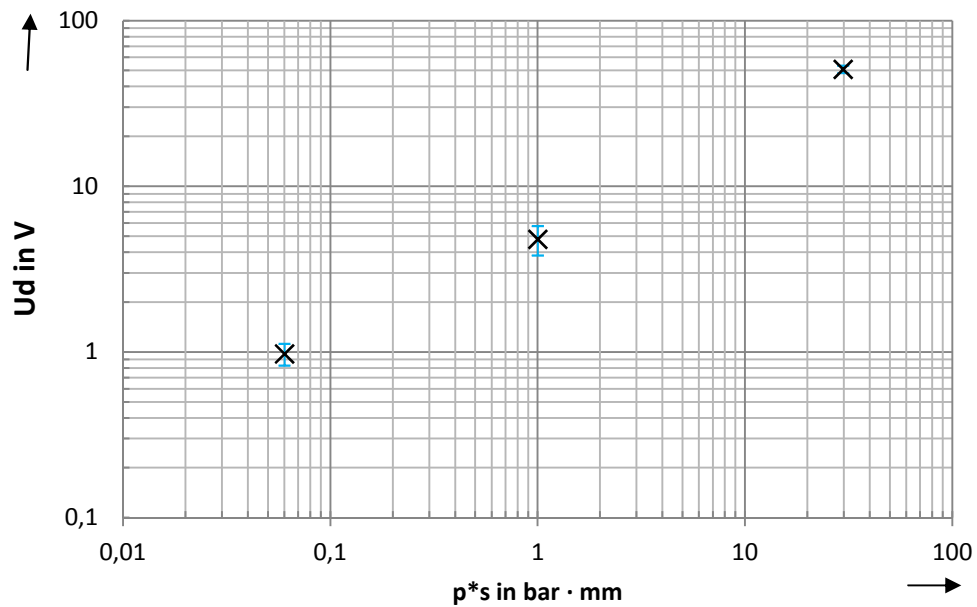


Bild 11.2: Referenzmessung für CO₂ (100%)

bar · mm	0,06	1,0	29,8
1	0,90	4,0	60,4
2	0,88	4,6	64,5
3	0,88	3,7	58,5
4	0,87	4,8	60,3
5	0,88	4,6	66,2
6	0,80	4,3	65,1
7	0,80	4,8	60,5
8	0,89	4,4	61,5
9	0,83	4,0	60,6
10	0,89	4,0	61,2
11	0,84	3,7	61,5
12	0,79	4,4	67,3
13	0,86	4,4	67,3
14	0,90	4,1	59,8
15	0,89	3,6	64,3
16	0,92	4,7	63,8
17	0,89	4,4	68,3
18	0,90	4,4	59,7
19	0,88	4,4	63,5
20	0,85	4,7	66,7
Ud	0,87	4,3	63,1
s	0,04	0,4	3,0

Tabelle 14: Referenzmessung für N₂/O₂ (80%/20%) in kV

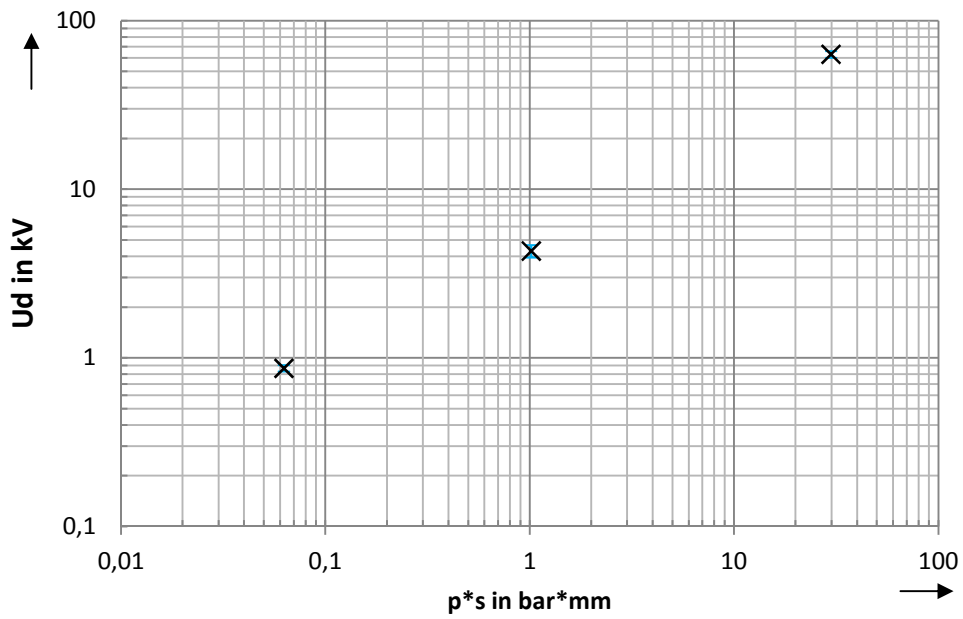


Bild 11.3: Referenzmessung für N₂/O₂ (80%/20%)

	N ₂	N ₂	CO ₂
bar · mm	0,13	30,0	29,8
1	1,31	69,8	46,3
2	1,05	53,6	58,9
3	1,23	56,5	61,2
4	0,95	52,9	47,1
5	1,03	55,2	54,6
6	1,02	54,9	53,6
7	1,01	62,0	61,7
8	1,02	57,0	46,2
9	1,02	61,8	53,8
10	1,04	56,7	56,1
11	1,02	61,2	60,4
12	1,04	56,2	63,4
13	0,97	54,2	50,7
14	1,02	54,3	60,3
15	0,96	59,1	70,0
16	1,23	60,0	61,1
17	1,04	56,6	59,1
18	1,03	58,5	49,1
19	1,01	56,3	59,5
20	1,03	52,6	61,1
Ud	1,05	57,5	56,7
s	0,09	4,1	6,4

Tabelle 15: Kontrollmessungen für N₂ und CO₂ in kV

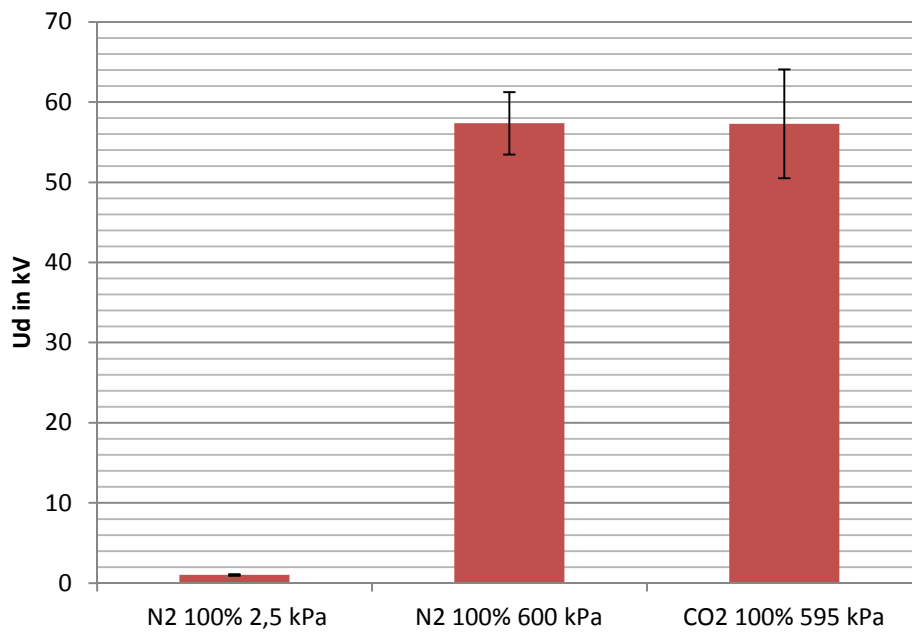


Bild 11.4: Kontrollmessungen

bar·mm	0,05	0,10	0,20	0,52	1,0	2,0	5,0	10,0	20,1
1	0,74	1,02	1,61	2,69	4,4	9,7	16,4	26,7	47,5
2	0,75	0,94	1,59	2,96	4,4	9,1	15,5	25,4	43,1
3	0,74	1,02	1,61	2,67	4,9	9,0	15,5	27,8	40,9
4	0,76	1,00	1,35	3,24	4,7	7,2	16,3	27,6	45,5
5	0,71	0,99	1,61	2,95	4,4	8,1	15,4	27,6	44,9
6	0,70	1,01	1,60	2,92	3,9	10,0	15,4	22,0	38,9
7	0,75	1,01	1,50	2,93	4,1	8,1	16,3	25,0	41,4
8	0,66	1,01	1,54	2,79	4,7	7,2	15,5	24,9	43,0
9	0,74	1,01	1,59	2,78	4,4	7,1	15,6	27,1	42,7
10	0,73	0,96	1,55	3,03	4,1	7,9	15,5	26,0	46,6
11	0,73	0,91	1,31	2,99	4,4	8,5	14,6	25,9	46,9
12	0,74	1,01	1,35	2,73	4,1	8,2	14,5	23,0	45,8
13	0,74	1,01	1,60	3,56	5,4	7,2	13,1	26,0	47,5
14	0,75	0,98	1,60	2,65	4,8	7,3	14,4	21,7	41,4
15	0,76	1,01	1,57	2,71	4,7	9,1	17,3	21,8	41,0
16	0,75	1,02	1,56	2,70	4,1	7,3	14,4	28,8	43,1
17	0,75	1,00	1,59	3,54	4,6	8,1	14,5	24,8	46,2
18	0,72	1,02	1,56	2,57	4,4	7,3	16,2	24,4	42,6
19	0,71	1,01	1,62	2,95	4,7	9,4	14,5	26,7	46,2
20	0,72	1,01	1,31	3,53	4,7	8,6	15,3	26,7	48,3
Ud	0,73	1,00	1,53	2,94	4,5	8,2	15,3	25,5	44,2
s	0,02	0,03	0,11	0,30	0,3	0,9	0,9	2,1	2,7

Tabelle 16: Paschenkurve für N₂/CO₂ (80%/20%) in kV

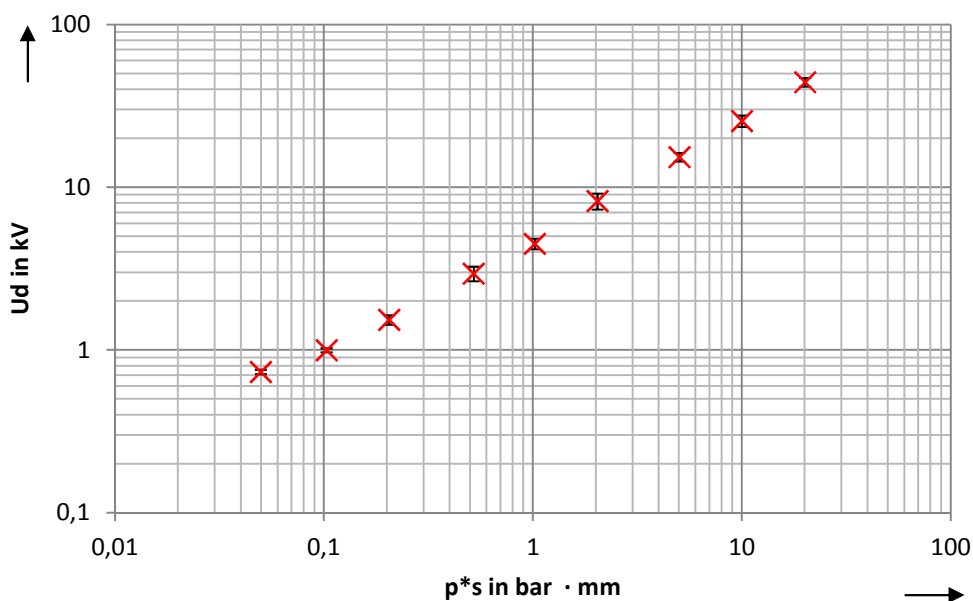


Bild 11.5: Paschenkurve für N₂/CO₂ (80%/20%)

bar·mm	0,05	0,10	0,20	0,51	1,0	2,0	5,0	10,0	20,0
1	0,73	1,14	1,61	2,93	7,0	7,0	15,9	25,1	48,3
2	0,76	1,02	1,61	3,28	6,2	12,6	17,2	27,4	47,5
3	0,75	1,29	1,62	2,74	5,1	8,8	14,9	28,0	43,8
4	0,73	1,03	1,50	2,65	6,1	8,8	15,0	28,0	44,6
5	0,70	1,02	1,60	2,97	6,1	9,6	16,8	27,9	45,9
6	0,76	0,97	1,64	3,00	6,2	7,3	18,6	25,6	41,9
7	0,75	0,99	1,55	3,10	6,9	11,6	17,7	26,2	44,4
8	1,01	1,02	1,48	2,47	6,2	8,7	14,9	24,5	47,1
9	0,69	1,03	1,61	2,70	6,2	8,9	16,6	30,4	46,2
10	0,75	1,03	1,57	2,97	5,2	8,9	13,2	27,6	43,8
11	0,74	0,98	1,63	2,68	6,2	8,9	21,4	28,7	40,1
12	0,69	1,26	1,64	2,96	6,1	10,6	15,7	27,6	43,6
13	0,72	1,04	1,57	2,76	5,3	8,8	16,8	29,3	45,9
14	0,72	1,02	1,59	2,58	5,3	10,2	16,8	29,1	44,4
15	0,95	1,02	1,61	2,71	7,1	10,3	15,0	28,7	40,2
16	0,77	1,03	1,59	2,64	6,2	8,9	15,9	24,7	44,5
17	0,74	1,28	1,60	3,25	4,7	8,6	15,1	24,7	47,1
18	0,73	1,03	1,59	2,44	4,8	7,1	19,8	25,8	44,7
19	0,87	1,07	1,59	3,00	7,4	12,7	16,1	31,9	41,3
20	0,73	1,05	1,59	2,46	4,3	8,7	16,5	26,7	44,5
Ud	0,76	1,07	1,59	2,81	5,9	9,3	16,5	27,4	44,5
s	0,08	0,10	0,04	0,25	0,9	1,6	1,9	2,0	2,3

Tabelle 17: Paschenkurve für N₂/CO₂ (60%/40%) in kV

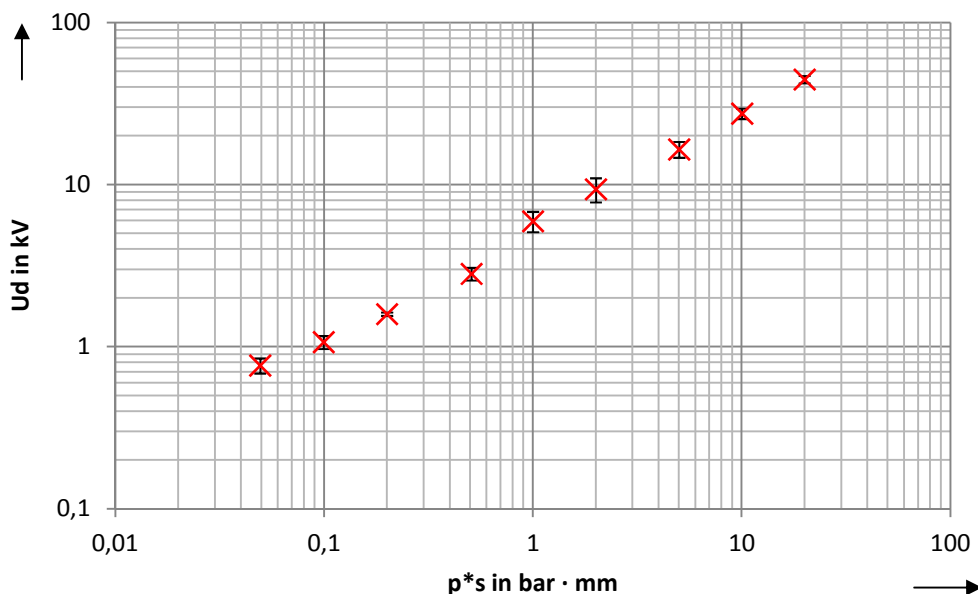


Bild 11.6: Paschenkurve für N₂/CO₂ (60%/40%)

bar·mm	0,05	0,10	0,20	0,50	1,0	2,0	5,0	10,0	20,1
1	0,76	1,22	1,93	4,01	6,9	15,2	27,3	55,7	105,8
2	1,02	1,33	2,15	4,76	7,2	15,4	29,2	58,9	107,1
3	0,94	1,30	2,16	4,24	7,3	13,7	31,0	56,1	106,2
4	0,92	1,26	2,14	4,35	6,4	14,5	34,0	55,0	106,9
5	0,76	1,11	2,70	3,86	7,2	14,5	34,9	58,5	106,2
6	1,03	1,28	2,38	4,40	7,5	14,1	33,4	57,3	105,6
7	0,94	1,61	2,17	3,82	7,0	16,3	33,2	55,7	106,0
8	0,87	1,32	2,19	4,30	7,5	15,2	36,7	55,8	105,4
9	1,02	1,43	2,39	4,06	7,6	15,1	35,6	57,6	105,6
10	0,77	1,30	2,43	5,43	6,3	14,4	34,1	56,1	105,2
11	1,03	1,33	2,71	4,08	6,9	14,4	34,3	56,6	105,0
12	0,94	1,29	2,17	3,88	7,1	15,2	33,2	57,8	105,2
13	0,82	1,27	2,09	4,31	6,6	13,5	30,9	57,9	105,4
14	0,78	1,57	2,47	4,08	7,4	15,4	34,2	54,1	105,8
15	1,04	1,30	2,16	4,58	7,2	13,3	35,4	56,2	105,6
16	1,05	1,03	2,73	5,39	7,7	14,2	34,6	59,3	106,2
17	1,02	1,43	2,18	4,08	7,1	14,5	31,9	57,5	106,0
18	0,99	1,29	2,12	4,66	7,9	14,6	32,3	60,6	105,4
19	0,79	1,29	2,17	3,79	6,9	14,6	32,1	61,1	106,0
20	1,02	1,30	1,99	4,05	7,1	14,5	30,3	53,0	105,8
Ud	0,92	1,31	2,27	4,31	7,2	14,6	32,9	57,0	105,8
s	0,11	0,13	0,23	0,46	0,4	0,7	2,3	2,0	0,5

Tabelle 18: Paschenkurve für SF₆/N₂/O₂ (90%/8%/2%) in kV

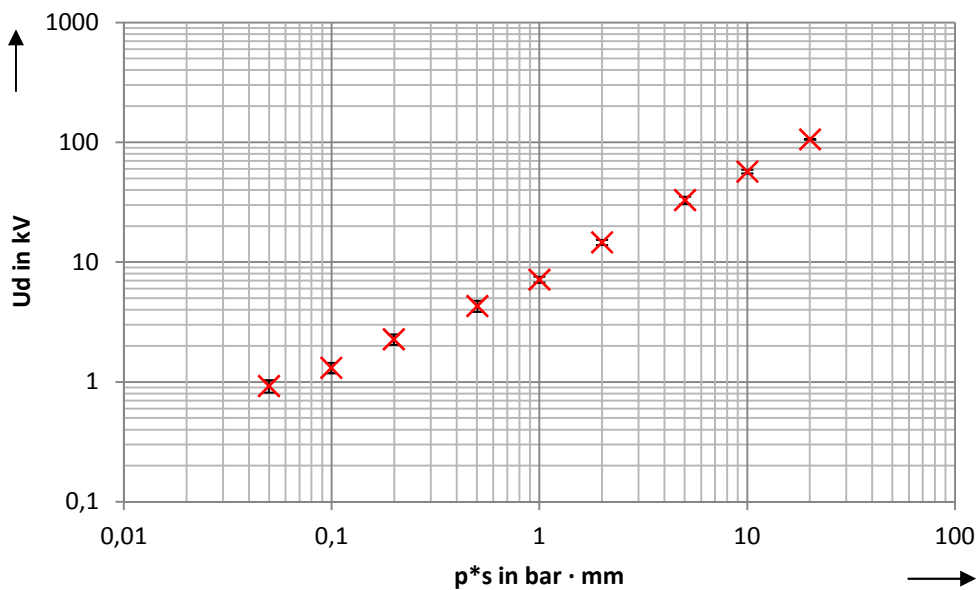


Bild 11.7: Paschenkurve für SF₆/N₂/O₂ (90%/8%/2%)

bar·mm	0,05	0,10	0,20	0,52	1,0	2,0	5,0	10,0	20,0
1	0,77	1,04	1,67	3,16	5,1	9,0	20,5	40,1	78,7
2	0,77	1,05	1,54	3,54	5,2	9,0	21,3	40,5	78,4
3	0,76	1,02	1,61	3,51	5,7	9,7	20,8	43,0	78,7
4	0,77	1,03	1,60	3,25	5,7	9,5	22,0	42,2	78,7
5	0,76	0,90	1,87	3,23	5,4	10,2	22,0	43,0	78,9
6	0,67	1,04	1,62	3,55	4,9	9,8	21,4	40,9	78,5
7	0,72	1,05	1,56	3,23	5,1	9,2	21,7	42,6	78,6
8	0,75	1,05	1,70	3,23	4,9	8,9	21,8	40,5	77,7
9	0,73	0,94	1,58	2,69	5,4	9,8	22,5	42,2	79,2
10	0,77	1,02	1,85	3,54	4,9	9,8	21,5	43,1	79,1
11	0,77	1,25	1,85	3,53	4,9	8,9	20,7	43,6	77,8
12	0,76	1,03	1,84	2,87	4,9	9,8	22,5	40,8	78,3
13	0,69	0,98	1,68	2,72	5,5	9,9	21,8	40,6	78,1
14	0,75	1,27	1,71	3,82	5,5	10,5	21,8	42,0	77,1
15	0,74	1,05	1,60	3,20	4,7	8,9	21,1	41,6	77,0
16	0,77	1,04	1,87	2,97	4,6	9,7	21,0	42,3	78,4
17	0,69	1,12	1,57	3,79	5,4	10,7	21,0	42,0	77,6
18	0,74	1,03	1,61	4,05	5,1	9,7	20,9	39,8	78,1
19	0,75	1,04	1,84	3,25	5,4	10,4	20,7	40,1	78,2
20	0,74	1,02	1,75	4,08	5,2	10,1	20,7	42,4	77,8
Ud	0,74	1,05	1,70	3,36	5,2	9,7	21,4	41,7	78,2
s	0,03	0,09	0,12	0,39	0,3	0,5	0,6	1,2	0,6

Tabelle 19: Paschenkurve für N₂/SF₆ (80%/20%) in kV

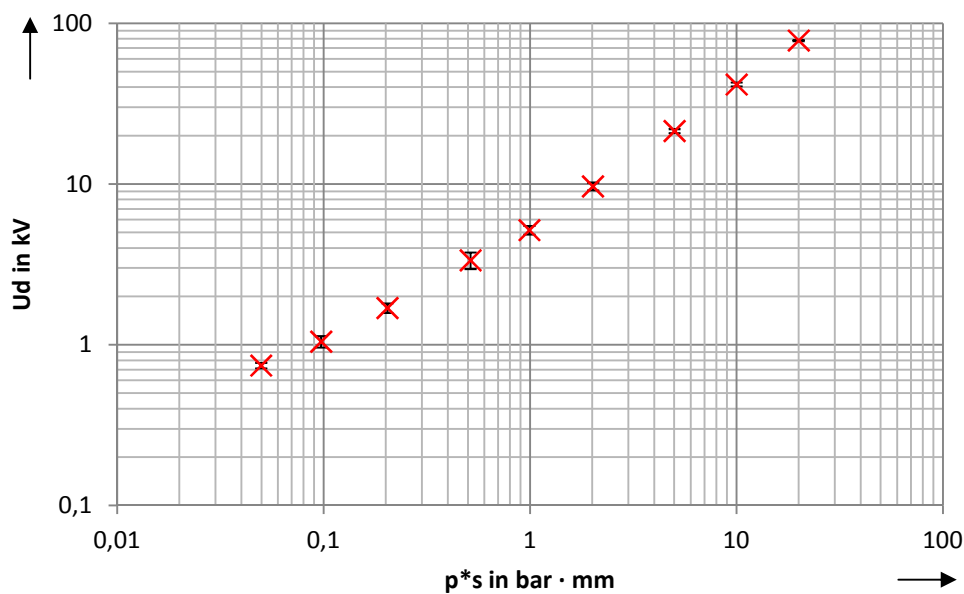


Bild 11.8: Paschenkurve für N₂/SF₆ (80%/20%)