

Praktikum Hochspannungstechnik (S 8855)

Theorie und Versuchsanleitungen

Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme (IEE)

Sommersemester 2021

Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck, Dr.-Ing. Ernst-August Wehrmann,
Christoph Klaas, Nils Kreth

Inhaltsverzeichnis

Sicherheitsvorschriften zum Hochspannungslabor	vii
H1 Erzeugung hoher Gleichspannungen	1
1 Lernziele zu Versuch H1	3
2 Theoretische Grundlagen	4
2.1 Anwendungsbereiche	4
2.2 Erzeugung hoher Gleichspannungen	4
2.3 Gleichrichterschaltungen	5
2.3.1 Einzeigschaltung	5
2.3.2 Verdopplerschaltung nach VILLARD	6
2.3.3 Verdreifacherschaltung nach ZIMMERMANN-WITTKA	8
2.3.4 Verdopplerschaltung nach LIEBENOW-GREINACHER	9
2.3.5 Vervielfacherschaltung nach GREINACHER	10
3 Aufgaben und Hinweise zum Versuchstag	12
3.1 Vorbereitende Aufgaben	13
3.2 Versuchsdurchführung	13
3.3 Versuchsauswertung	13
3.4 Weiterführende Aufgaben	14
Literatur zu Versuch H1	17
H2 Erzeugung von Stoßspannungen	19
1 Lernziele zu Versuch H2	21
2 Theoretische Grundlagen	22
2.1 Definition Stoßspannung	22
2.2 Prüfung mit Stoßspannung	23

2.3	Erzeugung von Stoßspannungen	25
2.3.1	Einstufige Anlage	25
2.3.2	Rechnerischer Verlauf der Stoßspannung	25
2.3.3	Verdoppelung der Stoßspannung	27
2.3.4	Negative Stoßspannung	28
2.3.5	Vervielfacherschaltungen	29
2.4	Stoßspannungsgeneratoren nach VDE	30
2.4.1	Berechnung des Stoßvorganges nach Schaltung a)	31
2.4.2	Vereinfachte Berechnung von Stoßspannungskreisen nach VDE	32
2.4.3	Berechnung der Stoßkreiswerte für gegebene Zeitkennwerte	33
2.4.4	Berechnung der Zeitkennwerte aus den Stoßkreisdaten	33
3	Aufgaben und Hinweise zum Versuchstag	34
3.1	Vorbereitende Aufgaben	34
3.2	Versuchsdurchführung	35
3.3	Versuchsauswertung	36
3.4	Weiterführende Aufgaben	36
	Literatur zu Versuch H2	37
	Anhang zu Versuch H2	39
	H3 Die Schering-Brücke	45
1	Lernziele zu Versuch H3	47
2	Theoretische Grundlagen	48
2.1	Dielektrische Verluste	48
2.1.1	Leitungsverluste	48
2.1.2	Polarisationsverluste	48
2.1.3	Dielektrische Hysterese	50
2.1.4	Verlustleistung	51
2.2	Koronaverluste	51
2.3	Ersatzschaltbild des realen Kondensators	53
2.4	Verlustfaktor-Messbrücke nach Schering	54
2.4.1	Bestimmung von Kapazität und Verlustfaktor mit der Scheringbrücke	56
2.4.2	Messung von Koronaverlusten mit der Reuse	58
2.4.3	Besonderheiten einer optimierten Variante der Schering-Messbrücke	61

3 Aufgaben und Hinweise zum Versuchstag	63
3.1 Vorbereitende Aufgaben	63
3.2 Versuchsdurchführung	63
3.3 Versuchsauswertung	63
3.4 Weiterführende Aufgaben	65
Literatur zu Versuch H3	67
H4 Der Durchschlag in festen und gasförmigen Dielektrika	69
1 Lernziele zu Versuch H4	71
2 Theoretische Grundlagen	72
2.1 Durchschlag in gasförmigen Stoffen	72
2.1.1 Durchschlag in hochverdünnten Gasen	72
2.1.2 Durchschlag in Gasen bei Atmosphärendruck	73
2.1.3 Entstehung des Durchschlags	73
2.1.4 Einfluss von Spannungsform und Dauer	75
2.1.5 Paschen'sches Gesetz	75
2.1.6 Kugelfunkenstrecke	76
2.1.7 Spitze-Platte Funkenstrecke	77
2.2 Durchschlag in festen Stoffen	77
2.2.1 Bestimmung der Durchschlagsfestigkeit von Pressspan und Hartpapier	78
3 Aufgaben und Hinweise zum Versuchstag	80
3.1 Vorbereitende Aufgaben	80
3.1.1 Durchschlag in gasförmigen Stoffen	80
3.1.2 Durchschlag in festen Stoffen	81
3.2 Versuchsdurchführung	81
3.2.1 Durchschlag in gasförmigen Stoffen	81
3.2.2 Durchschlag in festen Stoffen	81
3.3 Versuchsauswertung	82
3.3.1 Durchschlag in gasförmigen Stoffen	82
3.3.2 Durchschlag in festen Stoffen	82
3.4 Weiterführende Aufgaben	82
3.4.1 Durchschlag in gasförmigen Stoffen	82
Literatur zu Versuch H4	83
Anhang zu Versuch H4	85

Zu diesem Skript

Moin!

Dieses hochspannende Skript soll euch auf die Versuch im Praktikum Hochspannungstechnik vorbereiten. Inhalt dieses elektrisierenden Praktikums ist neben den Grundlagen der Hochspannungstechnik insbesondere das wissenschaftliche Arbeiten bei der Planung, Durchführung und Dokumentation von Versuchen. Und natürlich dürfen dabei Knistern, Überschlüge und Blitze nicht fehlen!

Es gliedert sich in vier Teile, die jeweils Lernziele, Theorie und Versuchsbeschreibung für die vier Teilversuche beinhalten. Die Theorie fasst die wichtigsten Aspekte der Hochspannungstechnik für die Anwendung in den Versuchen zusammen. Weiterführende Informationen sind in den Literaturangaben zu finden.

Wenn ihr Verbesserungsvorschläge beziehungsweise Änderungswünsche für dieses Skript habt oder euch Fehler auffallen sollten, schreibt uns bitte eine Mail oder weist uns an den Versuchstagen darauf hin.

Viel Spaß beim Lesen, Lernen und Laborieren wünscht euch

das IEE-Hochspannungsteam

Sicherheitsvorschriften zum Hochspannungslabor

Sicherheitsvorschriften zum Hochspannungslabor

Grundsätzliches

Der Umgang mit hohen Spannungen erfordert vom Bedienungspersonal wegen der Gefährlichkeit von Hochspannung die Beachtung bestimmter Sicherheitsvorschriften.

Für den Bereich des Institutes für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme gelten die nachstehenden Sicherheitsvorschriften, welche die zuständigen VDE-Bestimmungen (0100, 0101, 0104, 0105) ergänzen. Die Nichtbeachtung der nachstehenden Vorschriften für Hochspannungsanlagen bedeutet eine Gefährdung des eigenen Lebens und des Lebens anderer. Ihre genaueste Befolgung wird deshalb zur Pflicht gemacht!

Jeder, der eine Hochspannungsanlage betreten will, muss sich persönlich davon überzeugen, dass alle Versorgungsleitungen unterbrochen sind, was durch die **grüne Warnlampe** über dem Zugang **und** die beiden **grünen Meldelampen** am Schaltpult angezeigt wird. Vor dem Berühren von Hochspannungsbauteilen sind diese zuverlässig zu erden!

Absperrung

Alle Hochspannungsanlagen sind durch zuverlässig geerdete Absperrgitter abzugrenzen und mit Schildern „Hochspannung Vorsicht! Lebensgefahr“ zu versehen. Der Mindestabstand der Gitter von hochspannungsführenden Teilen beträgt:

- bei Wechselspannungen 50 cm je 100 kV
- bei Stoßspannungen 20 cm je 100 kV
- mindestens jedoch 50 cm

Das Durchstecken von leitenden Gegenständen, die nicht innerhalb der Anlage geerdet sind, durch die Maschen der Absperrgitter ist unter allen Umständen verboten!

Verriegelung

Jeder Zugang zu dem abgesperrten Raum ist mit Sicherheitsschaltern zu versehen, die beim Öffnen des Zugangs die Spannung allpolig abschalten. Hat eine Absperrung mehrere Zugänge, so sind die Sicherheitsschalter sämtlicher Zugänge so zu schalten, dass bei Öffnung eines beliebigen Zugangs die Spannungsversorgung unterbrochen wird. Der Schaltzustand einer Anlage muss durch Warnlampen gekennzeichnet werden:

Rote Lampe	Gefahr! Anlage ist „Einschaltbereit“ (nicht mehr gegen unbeabsichtigtes Einschalten gesichert) oder „Im Betrieb“.
Grüne Lampe	Anlage ist „Betriebsbereit“; die Versorgungsstromkreise sind abgeschaltet. Teile der Schaltung können aber noch unter Spannung stehen.
Keine Lampe	Gefahr! Betriebszustand ist unbestimmt. Dies gilt nicht, wenn der Zustand „Außer Betrieb“ (z. B. durch Schilder) gekennzeichnet ist.

Erdung

Alle leitenden Teile der Versuchsanordnung (Funkenstreckengestelle, Transformatorenkessel usw.) oder der sonstigen Geräte im abgegrenzten Raum müssen zuverlässig geerdet werden. Die Erdleitungen sind mit einem Mindestquerschnitt von 6 mm^2 zu verlegen. Auf Erdpotential liegende Stromrückführungen der Hoch- und Niederspannungsstromkreise sind von der Schutz Erde getrennt zu verlegen.

Das Betreten einer Hochspannungsanlage darf erst dann erfolgen, wenn die vorhandenen Transformatoren und Hochspannungskondensatoren nach dem Abschalten der Hochspannung geerdet sind. Diese Erdung ist mit Erdungsstangen, deren Erdverbindung innerhalb der Anlage liegt, vorzunehmen. Alternativ sind auch Erdungsschalter mit sichtbarer Schaltstellung zulässig.

Sind im Versuchsaufbau Kapazitäten (Kondensatoren, Kabel usw.) vorhanden, so ist darauf zu achten, dass diese nach dem Abschalten der Hochspannung (auch bei Wechselspannung) durch geeignete Erdungsvorrichtungen, z. B. Erdungsstangen mit Widerständen (bei Reihenschaltung mehrerer Kapazitäten 2 Erdungsstangen) entladen werden.

Die Erdungsvorrichtungen dürfen erst wieder entfernt werden, wenn sich niemand mehr innerhalb der Absperrung befindet und sind dann so anzubringen, dass sie nach Öffnen der Absperrung den weiteren Zugang in die Hochspannungsanlage zunächst versperren.

Durchführung der Versuche

Werden Arbeiten an einer Anlage von mehreren Personen durchgeführt, so muss allen bekannt sein, wer bei einem bestimmten Versuch Schalthandlungen vornimmt. Vor dem Einschalten von Hochspannungsanlagen ist entweder durch ein oder auch drei kurze Hupsignale oder durch den Ruf „Achtung! Ich schalte ein!“ zu warnen. Dies ist besonders wichtig für lautstarke Versuche, damit nahestehende Personen ihr Gehör schützen können und bei unübersichtlichen, räumlich ausgedehnten Versuchsanlagen. Wenn erforderlich, kann die erfolgte Abschaltung durch einen einmaligen langen Hupton oder durch den Ruf „Ausgeschaltet!“ bekanntgegeben werden. Soll außerhalb der normalen Dienststunden mit Hochspannung gearbeitet werden, so müssen mindestens drei fach- und ortskundige Personen im Institut anwesend sein, die von Beginn und Ende der Versuche zu informieren sind. Beim Hochspannungspraktikum sowie bei Studien- und Diplomarbeiten sind die Hochspannungsanlagen vor dem ersten Einschalten und nach einem Umbau von einem Betreuer zu überprüfen und von diesem einzuschalten.

Explosions- und Feuergefahr

Bei Versuchen mit Öl und anderen leicht brennbaren Stoffen ist wegen der Explosions- und Feuergefahr besondere Vorsicht nötig; z. B. ist das Rauchen zu unterlassen. In jedem Raum, in dem mit derartigen Stoffen gearbeitet wird, müssen Kohlendioxid-Feuerlöscher gebrauchsfertig und griffbereit vorhanden sein (Bedienvorschriften der Löscher beachten!). Leicht brennbare Abfallstoffe, z. B. Papier oder gebrauchte Putzwolle sind stets sofort in Blechkästen unterzubringen.

Sondergenehmigungen

Abweichungen von den obigen Vorschriften sind nur mit schriftlicher Genehmigung zulässig. Solche Genehmigungen werden nur auf begrenzte Zeit erteilt; sie müssen von jeder Person unterschrieben sein, die an der betreffenden Anlage arbeitet.

Verhalten bei Unfällen

Maßnahmen im Fall eines elektrischen Unfalls mit Bewusstlosigkeit:

1. Sofort Anlage allpolig abschalten und mit geeigneten Erdungsvorrichtungen, z. B. Erdungsstangen, erden. Solange dies nicht geschehen ist, darf der Verunglückte auf keinen Fall berührt werden.

2. Bei Bewusstlosigkeit des Verunglückten sind sofort Wiederbelebungsversuche (künstliche Beatmung, gegebenenfalls Herzmassage) durchzuführen, die bis zur Übernahme durch einen Arzt fortzusetzen sind.
3. Anruf des Krankenwagens Tel.: **0-112**
Anruf des Krankenhauses Tel.: **0-7140**
(weitere Angaben auf dem Notfallblatt vor Ort)
mit der Angabe, dass ein elektrischer Unfall mit Bewusstlosigkeit vorliegt.
4. Speziell bei Aussetzen der Herztätigkeit ist allergrößte Eile geboten, den Verunglückten in ein Krankenhaus zu schaffen, da nur maximal 6 - 8 Minuten Zeit bis zum Wiedereinsetzen der Herztätigkeit zur Verfügung stehen. Das Krankenhaus ist deshalb unbedingt telefonisch vor Eintreffen des Patienten über die Unfallart zu informieren, damit dort entsprechende Vorbereitungen getroffen werden können.

Sonstige Unfälle:

Erste Hilfe und Verbandsmaterial: In der Werkstatt: Tel.: 2571

Versuch H1

Erzeugung hoher Gleichspannungen

1 Lernziele zu Versuch H1

Nach dem ersten Versuch des Praktikums Hochspannungstechnik ...

- ... können die Teilnehmenden die Grundlagen von Gleichrichterschaltungen auf höhere Spannungen übertragen, kennen verschiedene Gleichrichterschaltungen zur Erzeugung hoher Gleichspannungen und können geeignete Schaltungen auswählen und anwenden.
- ... können die Teilnehmenden Verläufe gleichgerichteter Spannungen analysieren und interpretieren.
- ... kennen die Teilnehmenden die Grundsätze eines Laborbuchs und können ein Laborbuch korrekt führen.
- ... können die Teilnehmenden komplexere Schaltungen dokumentieren, erklären und interpretieren.
- ... können die Teilnehmenden Messergebnisse beschreiben, analysieren, vergleichen und auf Plausibilität prüfen.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Anwendungsbereiche

Hohe Gleichspannungen werden zur Prüfung von Hochspannungsgeräten benutzt, deren Eigenkapazität bei Prüfung mit Wechselspannung eine zu große Blindleistung erfordert, z. B. Kondensatoren, verlegte Kabel. Auch für grundsätzliche Untersuchungen über die elektrische Festigkeit, die besonders im Hinblick auf die Energieübertragung mit hoher Gleichspannung Bedeutung erhält, sowie für atomphysikalische Versuche wird hohe Gleichspannung benötigt. Weitere Anwendungsgebiete sind:

- Fahrdrachtspannung für elektrische Bahnen
- Speisung von Stoßspannungen
- Rauchgasfilter und Farbspritzanlagen

2.2 Erzeugung hoher Gleichspannungen

Die Erzeugung von hohen Gleichspannungen geschieht meist durch Gleichrichterschaltungen. Bekannt sind aus dem Grundlagenpraktikum Elektrotechnik I & II Einweg- und Brückenschaltungen in ein- und mehrphasigen Systemen, die auch hier eingesetzt werden können. Für sehr hohe Spannungen sind jedoch besondere Spannungs-Vervielfacher-Schaltungen entwickelt worden.

Früher wurden als aktive Elemente in Gleichrichterschaltungen Quecksilberdampf-Stromrichter (für große Leistungen) und Vakuumglühkathodenröhren (für sehr kleine Leistungen) angewendet. Gegebenenfalls sind Steuerungselektroden vorhanden, um variable Stromflussdauern zu ermöglichen. Heute werden überwiegend Halbleiterbauelemente eingesetzt.

2.3 Gleichrichterschaltungen

Schaltungsanordnungen zur Erzeugung hoher Gleichspannungen bestehen aus geeigneten Kombinationen von Gleichrichterventilen und Glättungskondensatoren. In der Hochspannungstechnik kommen als Halbleitergleichrichter in seltenen Fällen Selengleichrichter, in der Regel aber Siliziumgleichrichter zur Anwendung. Durch die Reihenschaltung einer entsprechenden Zahl von Halbleiterelementen lassen sich Sperrspannungen bis etwa 800 kV in einem Modul erreichen.

Die erzeugte Gleichspannung U_d ist nicht unbedingt konstant, sondern variiert zeitlich abhängig von der Art der Schaltung und der Höhe der Belastung; es ergibt sich also $u_d = f(t)$. Als Gleichspannungswert gilt dann der arithmetische Mittelwert:

$$U_d = \frac{1}{T} \int_{t_x}^{t_x+T} u_d(t) dt \quad (1.1)$$

Für die zeitliche Veränderung der Gleichspannung wird z. B. mit der Fourieranalyse der Effektivwert der überlagerten Wechselspannung $U_{\ddot{u}}$ ermittelt, vgl. [1], Kapitel „Oberschwingungen“ S. E2/OB5.

$$U_{\ddot{u}} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots} \quad (1.2)$$

Damit wird die Welligkeit der Gleichspannung definiert zu

$$w = \frac{U_{\ddot{u}}}{U_d} \quad (1.3)$$

2.3.1 Einzeigschaltung

Eine Grundsaltung zur Erzeugung von Gleichspannungen aus Wechselspannungen ist die Einzeigschaltung.

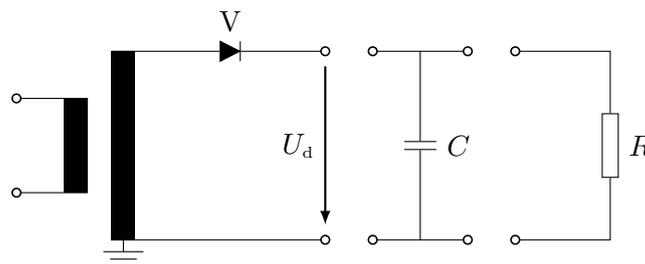


Abbildung 1.1: Einzeigschaltung

Sie liefert (ohne Glättung) eine pulsierende Gleichspannung mit folgendem Verlauf:

Es ist direkt zu erkennen, dass die Welligkeit hier sehr groß ist. Eine Glättung lässt sich z.B. durch Parallelschaltung eines Kondensators C zum Ausgang erreichen (vgl. Abbildung 1.1). Dieser lädt

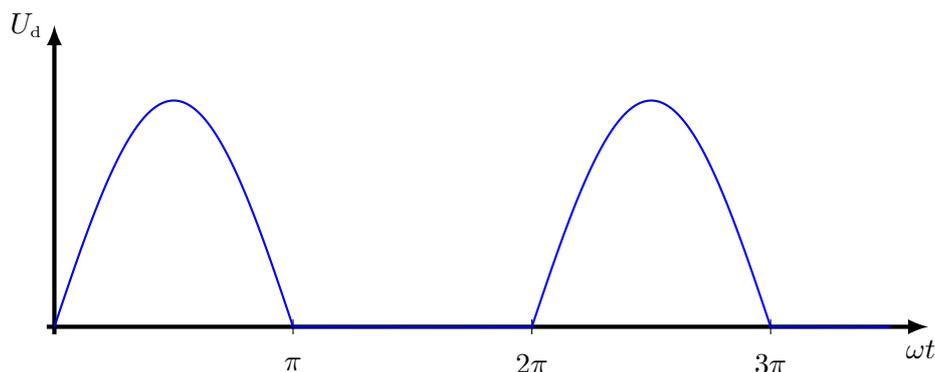


Abbildung 1.2: Verlauf der Gleichspannung bei einer Einzeigschaltung

sich während der positiven Halbschwingung auf den Scheitelwert der Wechselspannung \hat{u} auf und behält im Idealfall die Ladung, falls kein Verbraucher R angeschlossen ist. An C steht dann eine reine Gleichspannung zur Verfügung. Bei Belastung entlädt sich jedoch der Kondensator über R entsprechend einer e -Funktion mit der Zeitkonstanten $T = R \cdot C$, sodass die Spannung am Verbraucher folgenden prinzipiellen Verlauf hat:

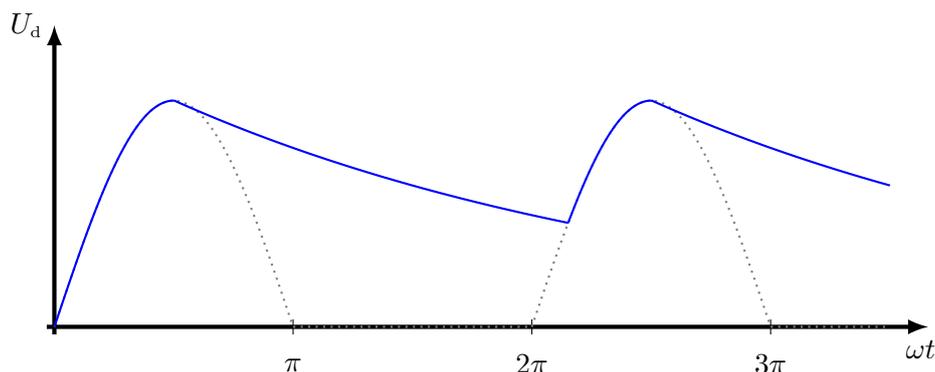


Abbildung 1.3: Verlauf der Gleichspannung bei einer Einzeigschaltung mit Belastung

Die Höhe der Gleichspannung richtet sich nach dem Scheitelwert der Wechselspannung. Diesem sind jedoch beim Bau von Transformatoren Grenzen gesetzt, da die Isolationsfestigkeit entsprechenden technischen Aufwand fordert. Speziell für Prüfanwendungen, die in ihrer Leistung typischerweise begrenzt sind, werden auch Spannungsvervielfacherschaltungen eingesetzt.

2.3.2 Verdopplerschaltung nach VILLARD

Durch besonders geringen Aufwand zeichnet sich die Verdopplerschaltung nach VILLARD aus. Sie besteht wie die Einzeigschaltung aus einem Gleichrichterventil und dem Ladekondensator. Die Ausgangsspannung wird hier jedoch am Ventil abgenommen.

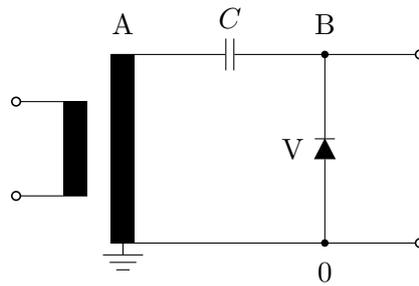


Abbildung 1.4: Verdopplerschaltung nach VILLARD

Sie liefert eine pulsierende Gleichspannung zwischen Null und dem doppelten Scheitelwert der Wechselspannung.

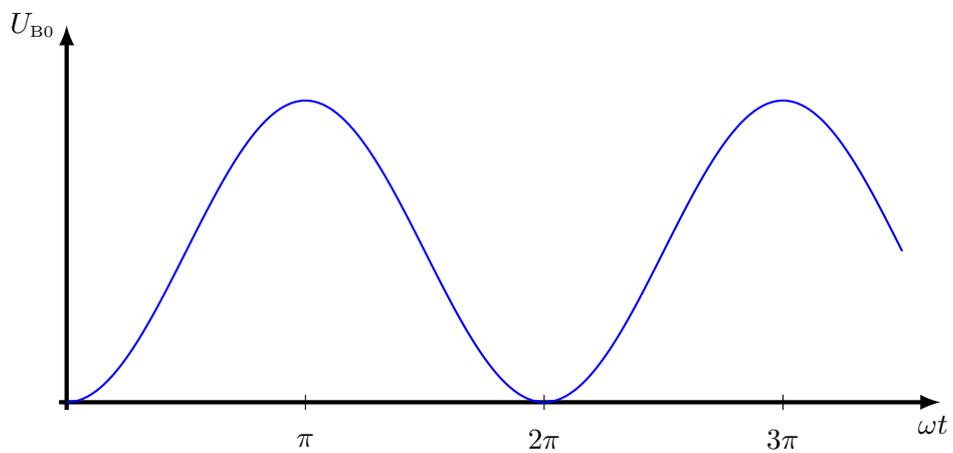


Abbildung 1.5: Verlauf der Gleichspannung bei einer Verdopplerschaltung nach VILLARD

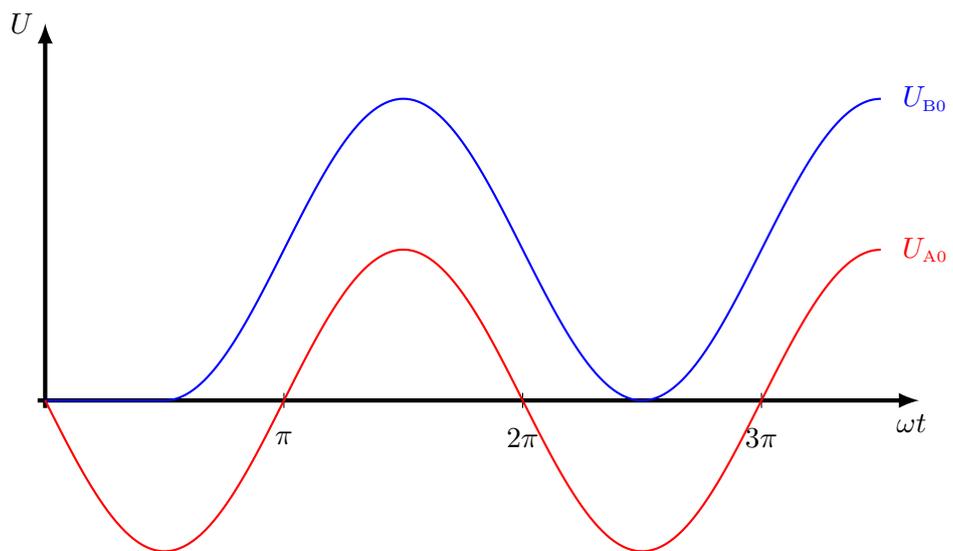


Abbildung 1.6: Verlauf der Spannungen bei einer Verdopplerschaltung nach VILLARD

Während der ersten Hälfte der negativen Halbschwingung von u_{A0} wird der Kondensator über das Ventil aufgeladen, wobei B das Potential 0 hat. Während der zweiten Hälfte der negativen Halbschwingung steigt das Potential A wieder an und nimmt, da V jetzt sperrt, das Potential B mit, bis $A = 0$ und $B = \hat{u}$ erreicht. Danach steigt A weiter bis \hat{u} und B bis auf $2\hat{u}$. Danach schwingt die Gleichspannung wie die Wechselspannung nur um den Scheitelwert der Wechselspannung $+\hat{u}$ verschoben. Der Effektivwert der überlagerten Wechselspannung $U_{\hat{u}}$ ist also genau so groß wie der Effektivwert der Wechselspannung U_{A0} .

2.3.3 Verdreifacherschaltung nach ZIMMERMANN-WITTKA

Ähnlich sind die Verhältnisse bei der Verdreifacherschaltung nach ZIMMERMANN und WITTKA, bei der die Ausgangsspannung zwischen dem einfachen und dem dreifachen Scheitelwert der Wechselspannung pulsiert. Im Prinzip besteht die Schaltung aus der Reihenschaltung einer Einzeigschaltung mit Glättungskondensator (oben) und einer Verdopplerschaltung nach VILLARD (unten). Da im Hochspannungslabor des Instituts für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme (IEE) die Hochspannungswicklungen der Transformatoren einseitig geerdet sind, kann diese Schaltung nicht sinnvoll benutzt werden, weil auch die Spannungsmessung immer gegen Erde erfolgt (vgl. Abbildung 1.13). Die Ausgangsspannung U_{B0} könnte also nicht direkt gemessen werden.

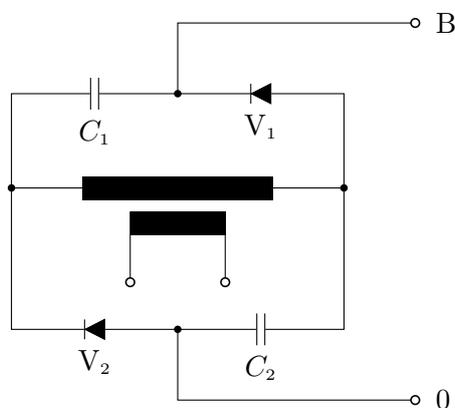


Abbildung 1.7: Verdreifacherschaltung nach ZIMMERMANN-WITTKA

Der Spannungsverlauf ergibt sich damit bei dieser Schaltung folgendermaßen:

Auch bei dieser Schaltung ist der Effektivwert der überlagerten Wechselspannung $U_{\hat{u}}$ genauso groß wie der Effektivwert der Wechselspannung U_{A0} . Die Gleichspannung der beiden letzteren Schaltungen besitzt also eine sehr große Welligkeit, was sie für viele Anwendungen ungeeignet macht.

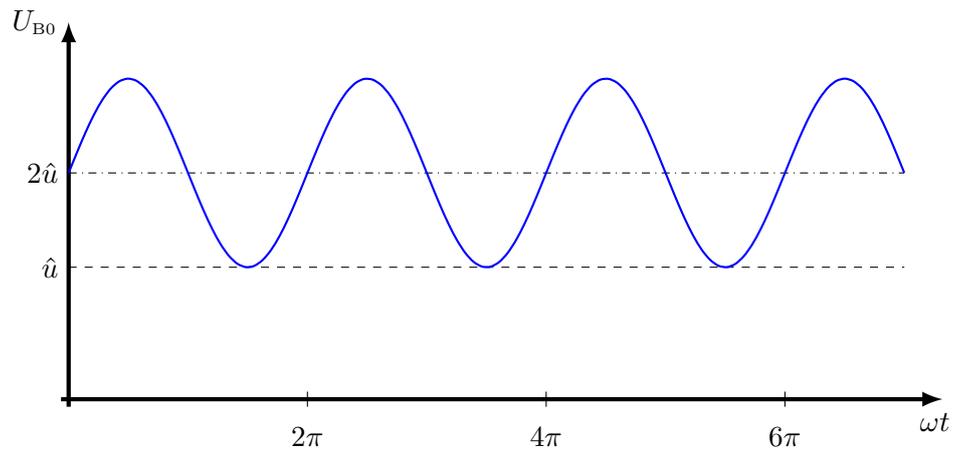


Abbildung 1.8: Verlauf der Gleichspannung bei einer Verdreifacherschaltung nach ZIMMERMANN-WITTKA

Nachfolgend werden Schaltungen vorgestellt, die außer einer Spannungsvervielfachung noch eine Glättung der Gleichspannung beinhalten.

2.3.4 Verdopplerschaltung nach LIEBENOW-GREINACHER

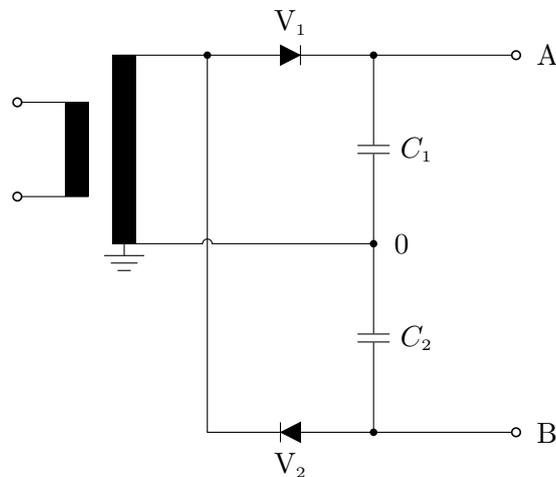


Abbildung 1.9: Verdopplerschaltung nach LIEBENOW-GREINACHER

In der Verdopplerschaltung nach LIEBENOW-GREINACHER lädt das Ventil V_1 den Kondensator C_1 während der positiven Halbschwingung auf \hat{u} auf, das Ventil V_2 lädt den Kondensator C_2 während der negativen Halbschwingung auf $-\hat{u}$ auf. Gegenüber dem Bezugspunkt 0 ergibt sich eine symmetrische Spannung von $\pm\hat{u}$, bzw. an AB eine (ohne Belastung konstante) Spannung von $2\hat{u}$.

Spannungsverlauf bei der Schaltung nach Liebenow-Greinacher:

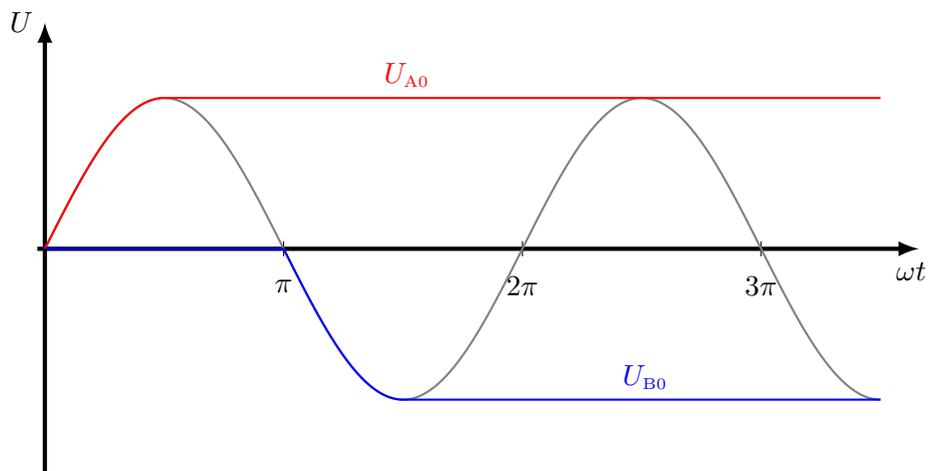


Abbildung 1.10: Verlauf der Gleichspannung bei einer Verdopplerschaltung nach LIEBENOW-GREINACHER

Diese Schaltung hat jedoch genau wie die nach Zimmermann-Wittka das Problem, dass sie im Praktikum nicht sinnvoll benutzt werden kann, weil auch hier die symmetrisch zum Erdpotenzial liegende Ausgangsspannung U_{AB} nicht direkt gemessen werden kann.

2.3.5 Vervielfacherschaltung nach GREINACHER

Als Grundstufe für die Spannungsvervielfacherschaltung mit $u_d > \hat{u}$ findet die Spannungsverdopplerschaltung mit Schubkondensator Verwendung. Der Schubkondensator C_s hat seinen Namen daher, dass durch ihn der gesamte Verbraucherstrom fließen (geschoben werden) muss. Diese Schaltung kann man auch als Kombination einer VILLARD-Schaltung mit nachfolgender Einzweigschaltung mit Glättungskondensator verstehen.

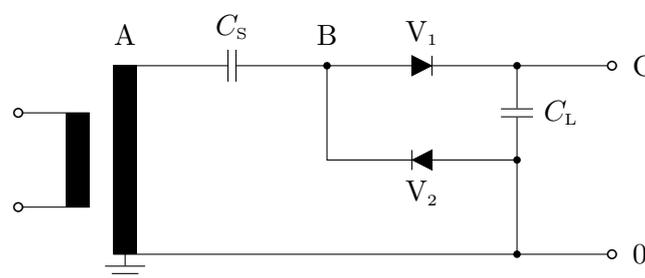


Abbildung 1.11: Vervielfacherschaltung nach GREINACHER

Durch Kaskadenschaltung mehrerer Grundstufen erhält man die Spannungsvervielfacherschaltung nach GREINACHER (hier zweistufig):

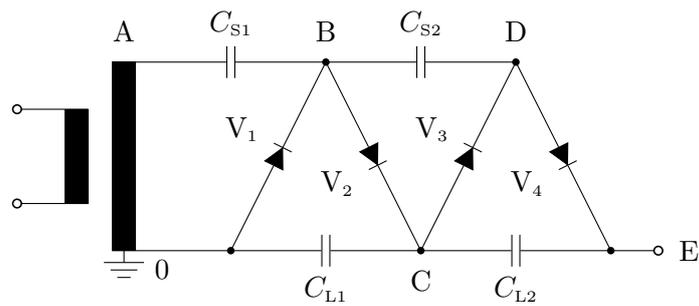


Abbildung 1.12: Vervielfacherschaltung nach GREINACHER (zweistufig)

3 Aufgaben und Hinweise zum Versuchstag

Im Hochspannungslabor des Instituts für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme (IEE) lassen sich sinnvoll nur Schaltungen aufbauen und vermessen, deren Ausgangsspannung auf Erdpotenzial bezogen wird. Das ist, wie oben beschrieben, bei den Schaltungen nach Zimmermann-Wittka und Liebenow-Greinacher nicht der Fall. Dabei ist zu berücksichtigen, dass ein Pol des speisenden Hochspannungstransformators immer zwangsweise auf Erdpotenzial liegt.

Bauen Sie alle Versuchsschaltungen nach folgendem allgemeinem Schaltbild auf:

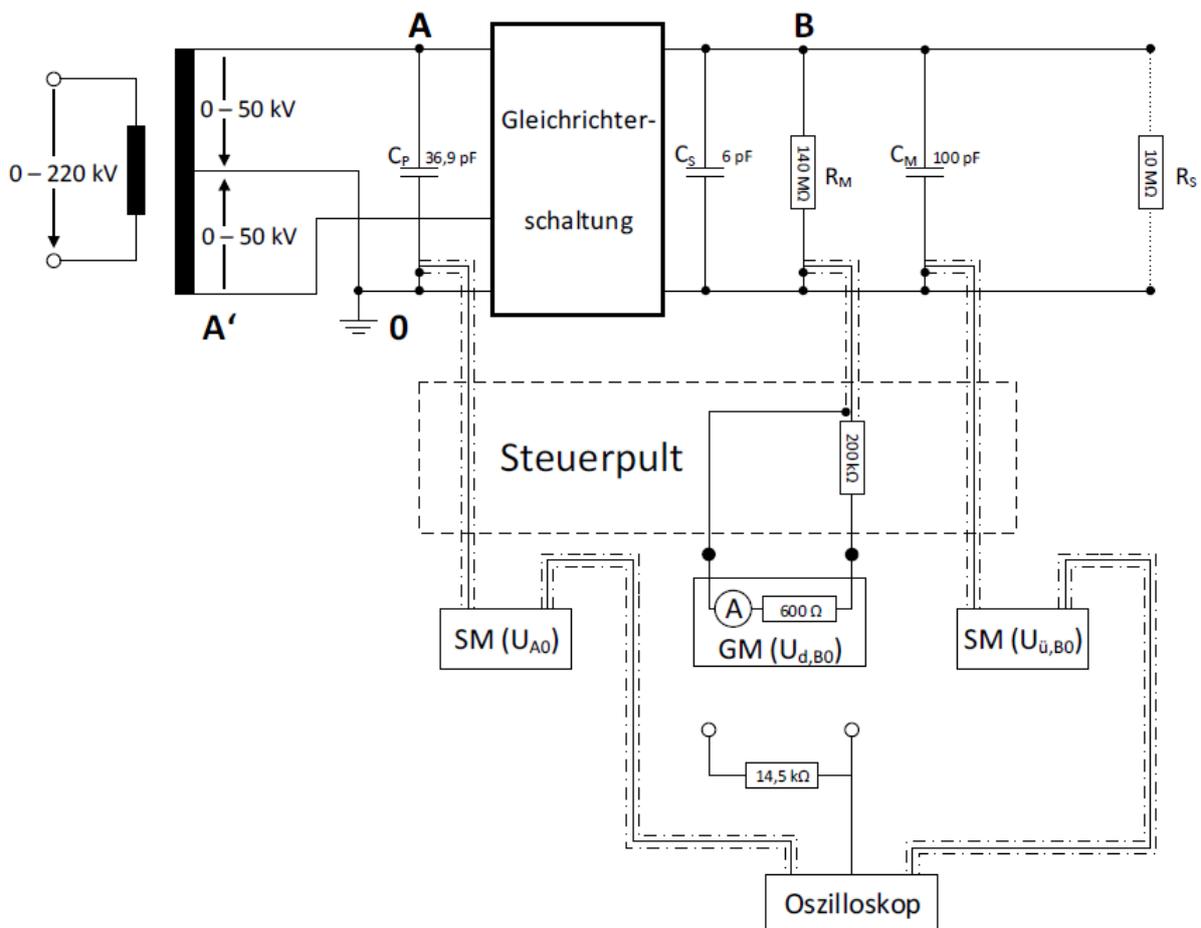


Abbildung 1.13: Allgemeine Mess- und Versuchsschaltung

3.1 Vorbereitende Aufgaben

1. Berechnen Sie die Spannung für den Fall, dass im Belastungswiderstand $R_S = 10 \text{ M}\Omega$ die maximal zulässige Leistung von $P = 60 \text{ W}$ umgesetzt werden soll.
2. Die verwendeten „Scheitelspannungsmessgeräte“ zur Messung der Transformatorwechselspannung und der der Gleichspannung überlagerten Wechselspannung werden über kapazitive Spannungsteiler mit der Hochspannungsschaltung verbunden. Machen Sie sich mit dem Messprinzip der Scheitelspannungsmessgeräte (SM 615, Betriebsanleitung im Stud.IP) vertraut. Es ist jedoch nicht erforderlich die interne Schaltung des Messgerätes vollständig zu verstehen.

Sie sollten wissen, wie ein kapazitiver Spannungsteiler funktioniert und in der Lage sein, einen kapazitiven Spannungsteiler zu berechnen.

3.2 Versuchsdurchführung

Bauen Sie die folgenden Gleichrichterschaltungen in Übereinstimmung mit der in Abbildung 1.13 dargestellten allgemeinen Mess- und Versuchsschaltung auf:

1. Einzweigschaltung
2. Mittelpunktschaltung
3. Verdopplerschaltung nach VILLARD
4. Grundstufe der GREINACHER-Kaskade

Mit jeder Schaltung sind die folgenden Versuche durchzuführen:

1. Messen und protokollieren Sie die Wechselspannung U_{A0} , die Gleichspannung U_{B0} und deren überlagerte Wechselspannung $U_{\ddot{u}}$ ohne Belastungswiderstand.
2. Ergänzen Sie den Belastungswiderstand R_S ($10 \text{ M}\Omega$, 60 W , **nicht überlasten!**) in der Versuchsschaltung und führen Sie die Messung analog zu Punkt 1 durch. Protokollieren Sie die Messwerte.
3. Oszillographieren Sie einen Einschaltvorgang ohne Belastungswiderstand mit einem Speicheroszilloskop. Speichern Sie sowohl das Oszillogramm als auch die vom Oszilloskop aufgenommenen Zeitreihen zur späteren Verwendung auf einem USB-Stick.

3.3 Versuchsauswertung

Für diesen Versuch ist ein sogenanntes Laborbuch anzufertigen. In diesem wird die Planung, Durchführung und Auswertung von Versuchen dokumentiert. Da es bei wissenschaftlichen Ent-

deckungen der Zuerkennung dient, gelten feste Regelungen, wie ein Laborbuch zu führen ist. Diese werden in der Regel von der Forschungseinrichtung vorgegeben, es gelten folgende Grundsätze:

- Ein Laborbuch darf nachträglich nicht geändert werden. Deshalb muss eine fest gebundene Kladde verwendet werden, in der die Experimente in chronologischer Reihenfolge auf den durchnummerierten Seiten mit dokumentenechtem Stift (z.B. Kugelschreiber) dokumentiert werden.
- In einem Laborbuch muss das gesamte Experiment auch mit eventuellen Fehlern notiert werden. Fehler sind nur durchzustreichen und nicht unkenntlich zu machen, da sie später helfen, gegebenenfalls Änderungen am Versuchsaufbau oder der -durchführung nachzuvollziehen.
- Wenn ein Laborbuch voll ist und/oder das Projekt abgeschlossen ist, ist das Laborbuch für nachfolgende Projekte zu archivieren. Deshalb ist es auch notwendig, die Dokumentation so zu führen, dass Dritte später die Aufzeichnungen nutzen können.

Detaillierte Ausführungen der TU Clausthal sind auf den Seiten des [Forschungsdatenmanagements](#) zu finden. Weitere Vorgaben anderer Universitäten und Forschungseinrichtungen können beispielsweise bei [2], [3] und [4] abgerufen werden.

Die Dokumentation und Auswertung des Versuchs H1 soll im elektronischen Laborbuch der TU Clausthal durchgeführt werden. Registrieren Sie sich dafür beim [eLabFTW](#) mit Ihrem RZ-Account im Team *Hochspannungstechnik* (aus dem Netz der TU oder per VPN). Ihr Konto wird dann vom Admin validiert, dies kann bis zu einem Werktag dauern. Dabei werden Sie dem Laborbuch Ihrer Gruppe zugeordnet. Weiterführende Informationen zum [eLabFTW](#) können auf den Seiten des [Forschungsdatenmanagements](#) abgerufen werden.

Das Laborbuch soll am Ende folgende Punkte beinhalten:

- durchgeführte Versuche
- 3D-Ersatzschaltbilder der Versuche
- Oszilloskopbilder und -daten
- Beobachtungen während des Versuchs
- beobachtete Potenzialverläufe
- kurze Auswertung der Beobachtungen

3.4 Weiterführende Aufgaben

1. Ermitteln Sie die Sperrspannungen der Ventile bezogen auf die Scheitelspannung \hat{u} für jede der untersuchten Schaltungen.

2. Berechnen Sie die Potentialverläufe (Eckwerte) der ersten 3 Netzperioden für die GREIN-ACHER-Grundstufe.

Literatur zu Versuch H1

- [1] H.-P. Beck, *Arbeitsblätter zur Vorlesung Grundlagen der Elektrotechnik und Elektrotechnik für Ingenieure*, Clausthal-Zellerfeld: IEE / TU Clausthal, 2011.
- [2] Technische Universität Bergakademie Freiberg. “Das Laborjournal - Zur Dokumentation der Experimente und Ergebnisse.” (2011), Adresse: <https://tu-freiberg.de/fakult2/aoch/agsi/das-laborjournal>. (letzter Zugriff: 15.06.2020).
- [3] Universität Kassel. “Merkblatt Laborbuch.” (2014), Adresse: http://www.uni-kassel.de/einrichtungen/fileadmin/datas/einrichtungen/scl/Fachbezogene_Hochschuldidaktik/140220_MerkblattLaborbuch.pdf\part{https://tu-freiberg.de/fakult2/aoch/agsi/das-laborjournal}. (letzter Zugriff: 15.06.2020).
- [4] Max Planck Digital Library. “Elektronische Laborbücher in der Max-Planck-Gesellschaft.” (2016), Adresse: https://www.mpg.de/10988930/_jb_2016. (letzter Zugriff: 15.06.2020).
- [5] A. Küchler, “Prüfen, Messen, Diagnose,” in *Hochspannungstechnik: Grundlagen - Technologie - Anwendungen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017, S. 359–502, ISBN: 978-3-662-54700-7. DOI: 10.1007/978-3-662-54700-7_6. Adresse: https://doi.org/10.1007/978-3-662-54700-7_6.
- [6] E. Marx, “Versuche,” in *Hochspannungs-Praktikum*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1952, S. 45–203, ISBN: 978-3-662-21997-3. DOI: 10.1007/978-3-662-21997-3_4. Adresse: https://doi.org/10.1007/978-3-662-21997-3_4.
- [7] M. Beyer, W. Boeck, K. Möller und W. Zaengl, “Spannungs- und Stromquellen,” in *Hochspannungstechnik: Theoretische und praktische Grundlagen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1986, S. 230–279, ISBN: 978-3-642-61633-4. DOI: 10.1007/978-3-642-61633-4_10. Adresse: https://doi.org/10.1007/978-3-642-61633-4_10.
- [8] A. Roth, “Hochspannungsanlagen für Gleichstrom,” in *Hochspannungstechnik*. Vienna: Springer Vienna, 1959, S. 655–706, ISBN: 978-3-7091-3903-5. DOI: 10.1007/978-3-7091-3903-5_13. Adresse: https://doi.org/10.1007/978-3-7091-3903-5_13.
- [9] G. Hilgarth, “Erzeugung hoher Spannungen,” in *Hochspannungstechnik*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1997, S. 147–163, ISBN: 978-3-322-86788-9. DOI: 10.1007/978-3-322-86788-9_6. Adresse: https://doi.org/10.1007/978-3-322-86788-9_6.

Versuch H2

Erzeugung von Stoßspannungen

1 Lernziele zu Versuch H2

Nach dem zweiten Versuch des Praktikums Hochspannungstechnik . . .

- . . . kennen die Teilnehmenden die Grundlagen von Stoßspannungen, können Schaltungen zur Erzeugung dieser aufbauen und Stoßspannungsversuche an Prüflingen durchführen.
- . . . können die Teilnehmenden Stoßkennlinien interpretieren und aus Messungen erstellen.
- . . . kennen die Teilnehmenden die Grundlagen des Forschungsdatenmanagements und können Daten nachvollziehbar, eindeutig und strukturiert speichern und archivieren.
- . . . können die Teilnehmenden Daten aufbereiten und sinnvoll visualisieren.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Definition Stoßspannung

Eine Stoßspannung ist nach VDE 0432 eine einzelne, kurze Zeit bestehende Spannung einheitlicher Polarität, die ohne wesentliche Schwingungen rasch auf einen Maximalwert ansteigt und dann abklingt (vgl. Abbildung 2.1).

Wichtige Parameter des zeitlichen Verlaufes sind:

- die Polarität
- der Scheitelwert U_m
- die Stirnzeit T_s , die sich aus der Geraden durch den 30%- und 90%-Punkt der Anstiegsflanke (Stirn) ergibt
- die Rückenhalbwertszeit T_r
- und gegebenenfalls die Zeit bis zum Durchschlag (Verzugszeit) $T_{üz}$

Diese Form von Spannungsverläufen kann durch Blitzeinschlag als Blitzstoßspannung an allen elektrischen Anlagen im Freien auftreten (Freileitungen, Kabeleinspeisungen, Transformatoren, Schaltanlagen, ...) oder durch Schaltvorgänge als Schaltstoßspannung an allen elektrischen Betriebsmitteln auftreten. Stoßspannungen belasten die Bauelemente stärker als die gewöhnlichen sinusförmigen Netzspannungen durch hohe Scheitelwerte, die jedoch nur kurze Zeit anstehen. Es ist deshalb notwendig, im Labor Untersuchungen über die Auswirkungen von Stoßspannungen auf Anlagenteilen durchzuführen. Man unterscheidet also einerseits zwischen Blitzstoßspannungen (T_r bis ca. $50 \mu\text{s}$) und Schaltstoßspannungen ($T_r > 100 \mu\text{s}$) und andererseits zwischen drei Stoßspannungsformen:

- **volle Stoßspannung**, falls kein Durchschlag eintritt und der Rücken exponentiell abfällt
- **abgeschnittener Stoßspannung**, gekennzeichnet durch einen plötzlichen Spannungszusammenbruch nach der Verzugszeit $T_{üz}$, hervorgerufen durch einen Durchschlag oder Überschlag des Prüfobjektes oder durch eine zusätzliche Abschneideeinrichtung
- **Keilstoßspannung**, die auftritt, wenn der Durchschlag an der Stirn so früh erfolgt, dass die Energie des Stoßkondensators die Spannung noch linear ansteigen lässt.

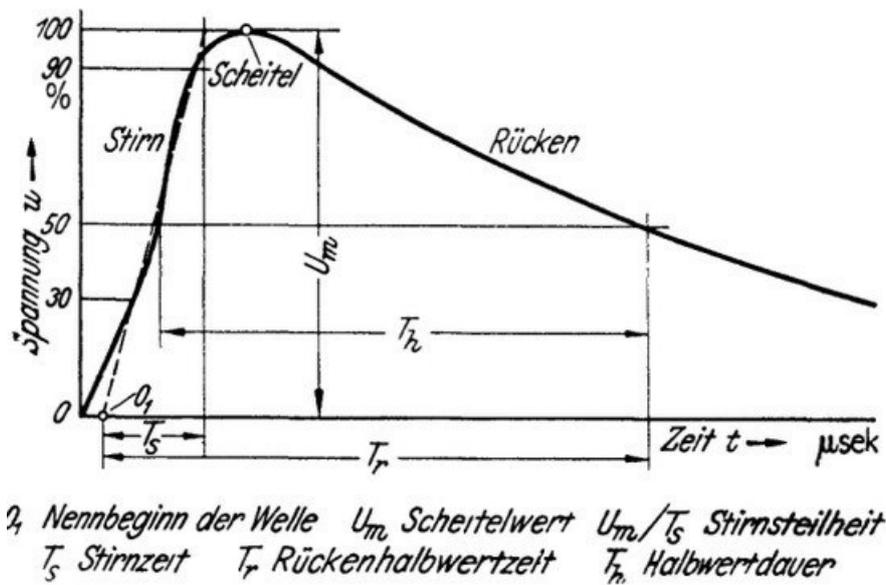


Abbildung 2.1: Stoßspannung nach VDE

Untersuchungen werden mit genormten Stoßspannungen vorgenommen, bei Blitzstoß zum Beispiel 1,2/50, d. h. $T_s = 1 \mu\text{s}$, $T_r = 50 \mu\text{s}$. Ohne hier auf die genauen Mechanismen weiter einzugehen, sollen noch kurz die Begriffe Durchschlag und Überschlag erläutert werden:

Durchschlag ein Funke oder Lichtbogen durch ein festes, flüssiges oder gasförmiges Isoliermedium. Ein fester Isolierstoff wird dabei typischerweise irreversibel zerstört, ein gasförmiger nicht. Bei Flüssigkeiten entstehen möglicherweise schädliche Zersetzungsprodukte.

Überschlag eine Entladung an der Grenzschicht zwischen einem festen und einem gasförmigen Isolierstoff, zum Beispiel an der Oberfläche eines (Porzellan-)Isolators einer Freileitung. Dabei kann der feste Isolierstoff die Entladung unbeschädigt überstehen.

2.2 Prüfung mit Stoßspannung

Als Einzel-Durchschlags-Stoßspannung U_d gilt der Höchstwert der beim Versuch am Prüfling auftretenden Stoßspannung. Bei Rückenüberschlägen ist es der Höchstwert des vorausgegangenen Scheitelwertes, bei Stirnüberschlägen der im Augenblick des Überschlages auftretende Spitzenwert.

Im Allgemeinen werden bei Stoßspannungsprüfungen mehrere Stoßversuche am Prüfling (deren Ergebnisse einer statistischen Streuung unterliegen) nach bestimmten Vorschriften hinsichtlich

der Anzahl und der zeitlichen Folge der Versuche durchgeführt. Aus solchen Versuchsreihen können folgende Werte ermittelt werden:

Stehstoßspannung die höchste vom Prüfling noch gehaltene Stoßspannung

50%-Durchschlag-Stoßspannung die Hälfte aller Versuche führen zum Durchschlag

100%-Durchschlag-Stoßspannung bei allen Versuchen wird gerade noch ein Durchschlag erzielt

Die sich mit der Beanspruchungszeit ändernden Isolationseigenschaften einer Anordnung werden durch die Stoßkennlinie dargestellt. Die Stoßkennlinie eines Prüflings zeigt die Abhängigkeit der Einzel-Durchschlag-Stoßspannung von der Zeit bis zum Durchschlag (siehe Abbildung 2.2). Bei der Aufnahme der Stoßkennlinie wird lediglich der Scheitelwert verändert, Polarität, Stirnzeit und Rückenhalbwertzeit bleiben dabei unverändert. Die Zeit bis zum Durchschlag t_d wird mit Hilfe eines Kathodenstrahloszillographen oder eines Zählers und eines Stoßspannungsteilers gemessen.

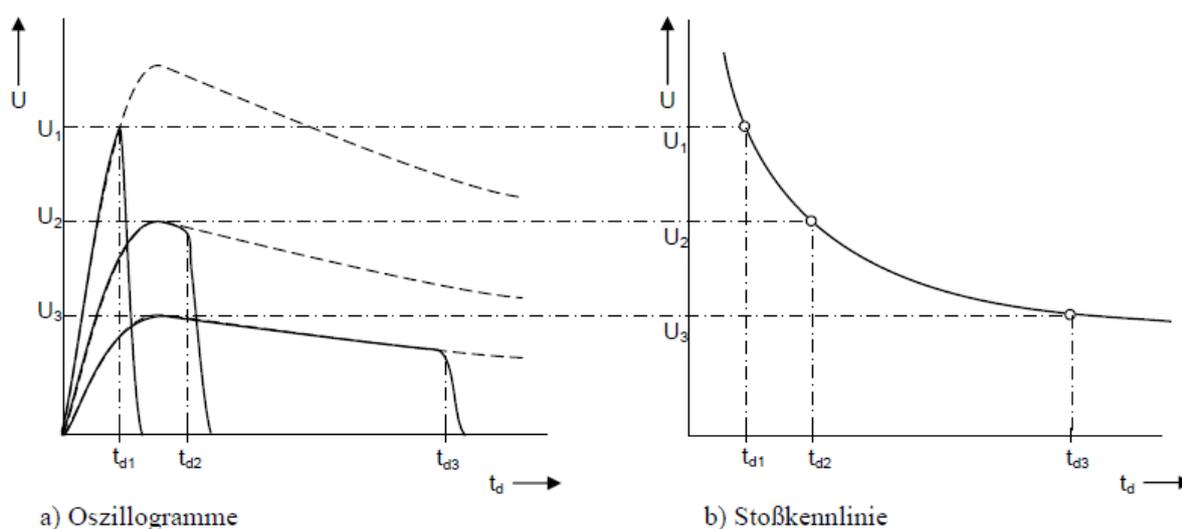


Abbildung 2.2: Aufnahme einer Stoßkennlinie

2.3 Erzeugung von Stoßspannungen

2.3.1 Einstufige Anlage

Die Erzeugung von Stoßspannungen erfolgt durch Umladung eines geladenen Kondensators C_S auf einen ungeladenen C_B und gleichzeitiger Entladung beider Kondensatoren. Prinzipiell kann dazu die Schaltung aus Abbildung 2.3 verwendet werden:

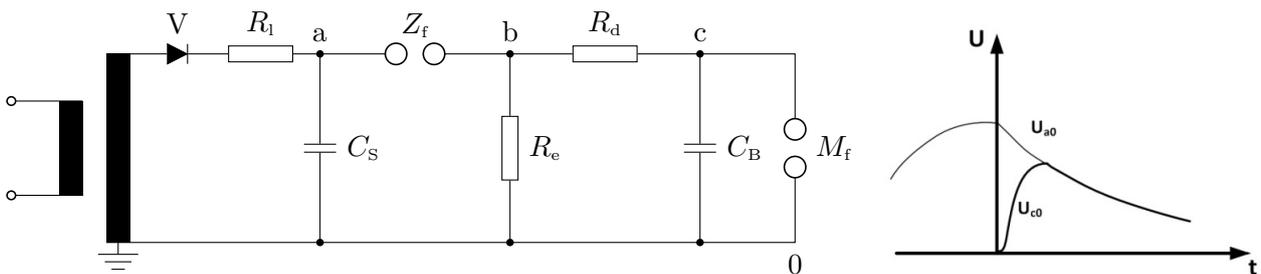


Abbildung 2.3: Ersatzschaltbild einer einstufigen Anlage zur Erzeugung von Stoßspannungen

Zunächst seien die Kondensatoren C_S und C_B entladen, so dass die Potentiale $a = b = c = 0$ sind. Der Stoßkondensator C_S lädt sich über das Ventil V und den Ladewiderstand R_l auf, bis die Zündfunkenstrecke Z_f bei einer bestimmten Spannung u_{ab} zündet und somit a und b auf ein gemeinsames Potential zwingt. Punkt b wird also schlagartig positiv, und C_B wird über R_d aufgeladen. Gleichzeitig entladen sich die Kondensatoren C_S und C_B , die praktisch parallel liegen über R_e . Meist gilt $R_d \ll R_e$. Das Potential an c steigt zunächst gemäß einer e -Funktion mit der (kleinen) Zeitkonstanten $T_S = R_d \cdot C_B$. Wenn a , b und c auf gleichem Potential liegen, beim Maximalwert der Stoßspannung an C_B , wird sich die (größere) Abfallzeitkonstante einstellen zu $T_T = R_e \cdot (C_S + C_B)$, wobei hier die Vereinfachung gemacht wurde, dass $R_d \ll R_e$ und deshalb vernachlässigbar ist. Weiterhin gilt: $C_B \ll C_S$.

Durch eine entsprechende Dimensionierung der Bauelemente lässt sich die Stirnzeit und die Rückenhalbwertszeit beliebig einstellen.

Bei fehlendem Dämpfungswiderstand R_d entsteht durch die immer vorhandenen Schaltungsinduktivitäten an C_B ein mehr oder weniger ausgeprägtes Überschwingen.

2.3.2 Rechnerischer Verlauf der Stoßspannung

Exakte Aussagen über den Verlauf der Stoßspannung an C_B (U_{c0} in Abbildung 2.3 entspricht U_B in Abbildung 2.4) erhält man durch Betrachtung der Spannungsverhältnisse in den zwei Maschen der Zweispeicher-Stoßschaltung.

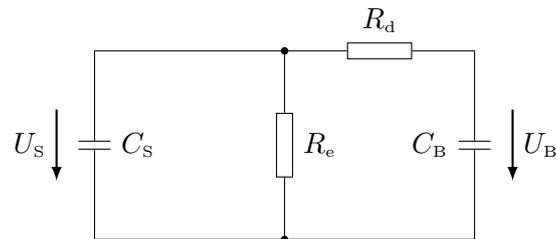


Abbildung 2.4: Ersatzschaltbild einer Zweispeicher-Stoßschaltung

Man erhält eine Differentialgleichung folgender Form:

$$\frac{d^2 u_C}{dt^2} + A \cdot \frac{du_C}{dt} + B \cdot u_C = 0 \quad (2.1)$$

Mit den Randbedingungen $u_S(t=0) = \hat{u}$ und $u_C(t=0) = 0$ ergibt sich die allgemeine Lösung

$$u = k_u \cdot \left(e^{\frac{-t}{T_1}} - e^{\frac{-t}{T_2}} \right) \quad (2.2)$$

als Überlagerung von zwei Exponentialfunktionen.

Da die Auswertung der Lösung in der Praxis etwas kompliziert ist, gibt es nach VDE eine vereinfachte Berechnung der Kenndaten.

Für eine einfache Stoßspannungsanlage gelten dann folgende Formeln:

$$R_d \cdot C_B = T_s \cdot \frac{\xi}{\eta} \quad (2.3)$$

$$R_e \cdot C_S = T_r \cdot \vartheta \cdot \eta \quad (2.4)$$

$$R \text{ in } \Omega; \quad C \text{ in } \mu\text{F}; \quad T \text{ in } \mu\text{s}$$

Für eine 1/50 Normstoßspannung kann $\xi = 0,385$ und $\vartheta = 1,425$ angenommen werden. η gibt den Ausnutzungsgrad der Anlage an:

$$\eta = \frac{U_{B,\max}}{U_{S,\max}} \quad (2.5)$$

also das Verhältnis des Stoßspannungsmaximums an C_B zur Ladespannung U_S an C_S . Der Ausnutzungsgrad η lässt sich Abbildung 2.5 entnehmen.

Eine Übertragung der Formeln auf mehrstufige Anlagen kann sinngemäß erfolgen.

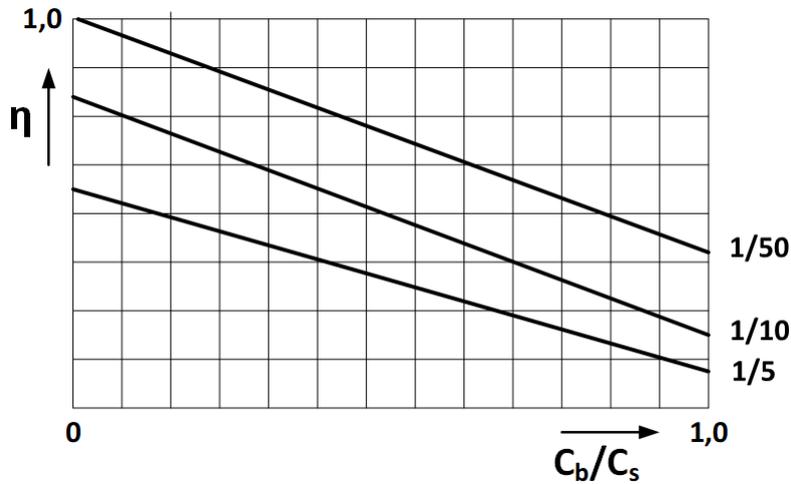


Abbildung 2.5: Ausnutzungsgrad der Schaltung in Abhängigkeit vom Verhältnis der verwendeten Kondensatoren

2.3.3 Verdoppelung der Stoßspannung

Eine Erhöhung der Stoßspannung erzielt man z. B. durch Ausnutzung auch der negativen Halbschwingung (vgl. Verdopplerschaltung nach LIEBENOW-GREINACHER, Abbildung 1.9).

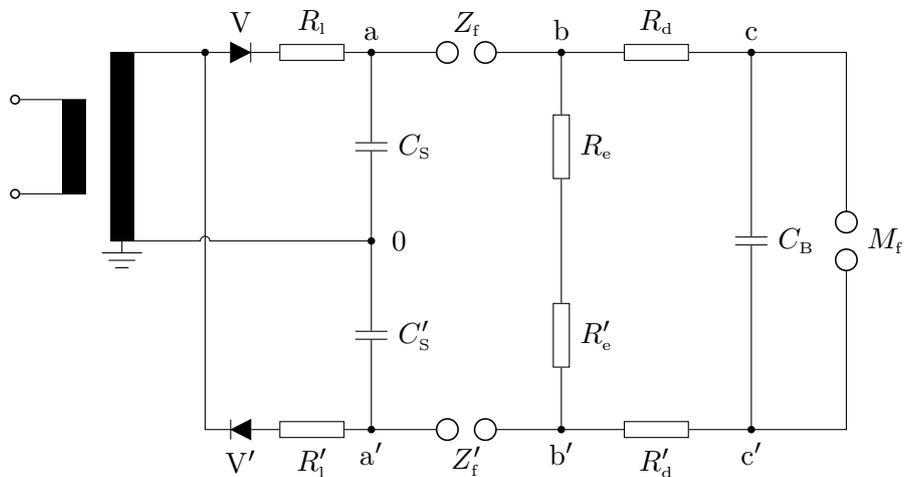


Abbildung 2.6: Schaltung zur Verdoppelung der Stoßspannung

Diese Schaltung bedeutet praktisch eine Verdopplung der Schaltung aus Abbildung 2.3. Die Ventile V_1 und V_2 laden die Kondensatoren C_S und C'_S mit entgegengesetzter Polarität auf, sodass zwischen a und a' eine Spannung von maximal $2\hat{u}$ auftritt, die bei gleichzeitigem Ansprechen der Zündfunkenstrecken Z_f auch an C_B (Prüfling) bzw. an der Messfunkenstrecke M_f erscheint. Da der Zweig hinter den Zündfunkenstrecken nicht geerdet ist, müssen zwangsläufig immer beide Zündfunkenstrecken gleichzeitig ansprechen.

Der Spannungsverlauf an M_f hat sich gegenüber dem der einstufigen Schaltung betragsmäßig verdoppelt. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Potentiale hierbei nicht mehr gegen Erde bezogen sind, sondern zu dieser symmetrisch liegen.

2.3.4 Negative Stoßspannung

Mit einfachen Mitteln (Vertauschen von C_s und Z_f gegenüber Abbildung 2.3) lassen sich auch negative Stoßspannungen erzeugen, siehe Abbildung 2.7.

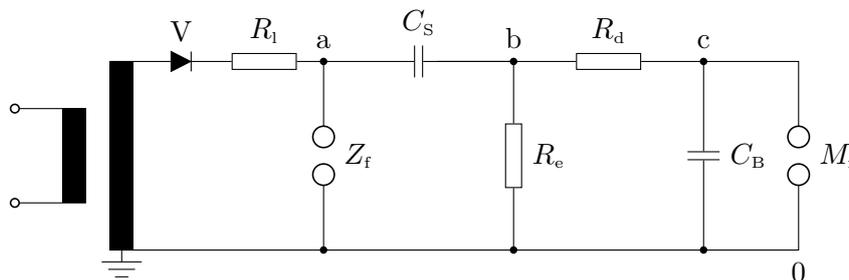


Abbildung 2.7: Ersatzschaltbild einer negativen Stoßspannungsschaltung

Der Kondensator C_s lädt sich über das Ventil V , R_1 und R_e auf, so dass das Potential a gegenüber b und c , die annähernd Erdpotential 0 haben, steigt. Bei einem bestimmten Wert zündet die Zündfunkenstrecke Z_f und legt a auf Erdpotential. Das Potential b und damit auch das von c werden ins Negative gezwungen, da ja die Potentialdifferenz von a zu b zunächst bestehen bleibt. Durch Verdopplung der Anordnung lassen sich wieder Stoßspannungen mit doppeltem Betrag erzielen.

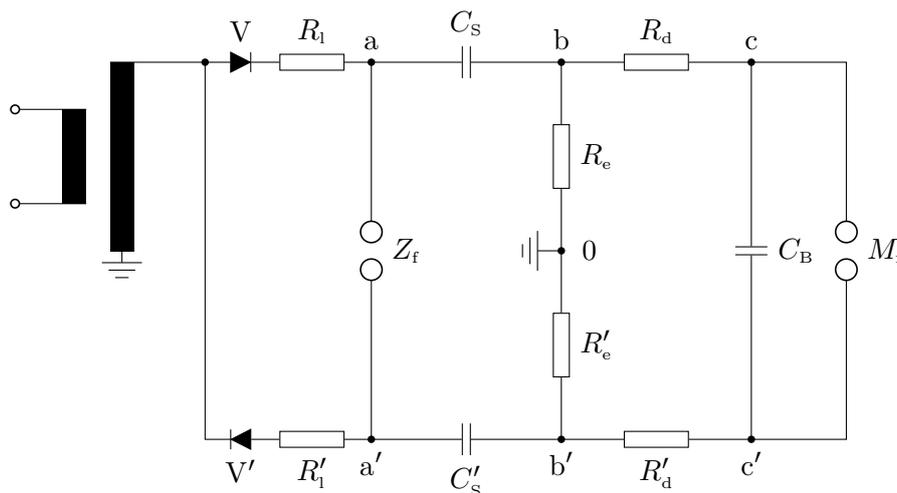


Abbildung 2.8: Ersatzschaltbild für eine negative Verdopplerschaltung

Diese Schaltung aus Abbildung 2.8 weist gegenüber der nach Abbildung 2.6 den Vorteil von nur einer Zündfunkenstrecke auf. Diese Schaltung ist im Praktikum nicht verwendbar, da die Stoßspannung nicht gegen Erdpotenzial gemessen werden kann (vgl. einige Gleichrichterschaltungen in Versuch I).

Eine negative Stoßspannung lässt sich natürlich auch erzeugen, indem in Abbildung 2.3 oder Abbildung 2.6 jeweils das oder die Ventil(e) umgedreht werden.

2.3.5 Vervielfacherschaltungen

Um noch höhere Stoßspannungen zu erzeugen, verwendet man Vervielfacherschaltung, z. B. nach MARX (siehe Abbildung 2.9)

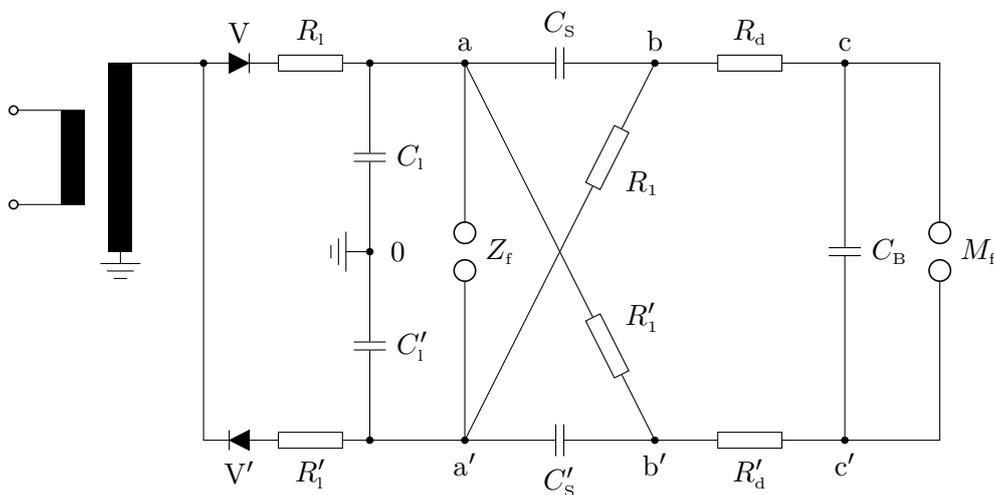


Abbildung 2.9: Ersatzschaltbild der MARX'schen Vervielfacherschaltung

Ihr Prinzip beruht auf der parallelen Aufladung der Stoßkondensatoren C_s und C'_s und deren Reihenschaltung bei Entladung. Diese Grundschaltung lässt sich zu einer Kaskadenschaltung erweitern, wobei extrem hohe Stoßspannungen erzeugt werden können. In Abbildung 2.10 ist das Ersatzschaltbild einer solchen Kaskadenschaltung dargestellt. Die eingebaute Trennfunkstrecke T_f soll eine vorherige Gleichspannungsbelastung vom Prüfling fernhalten.

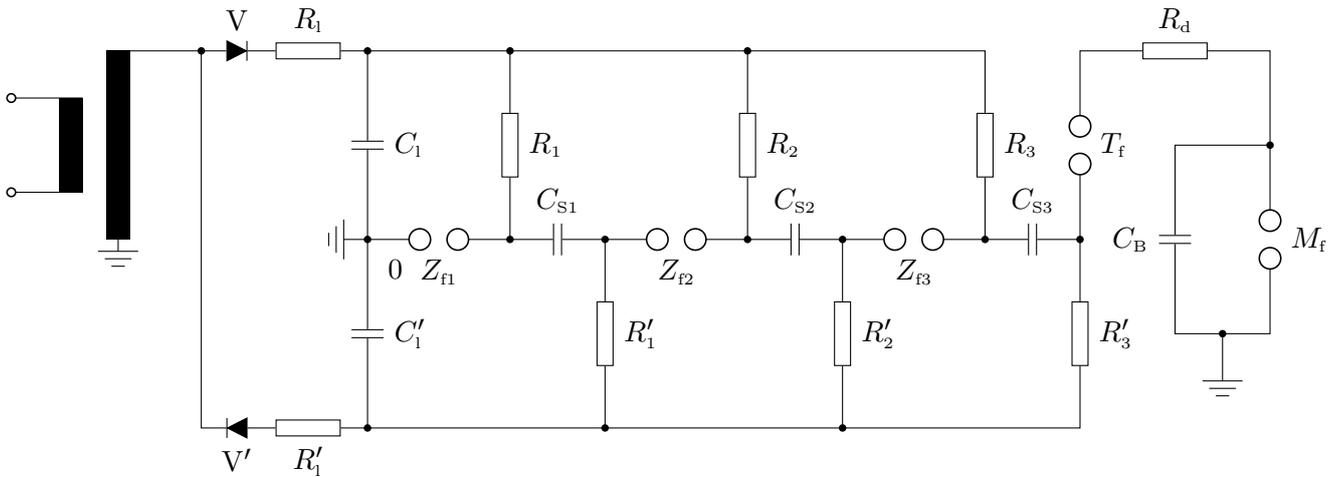
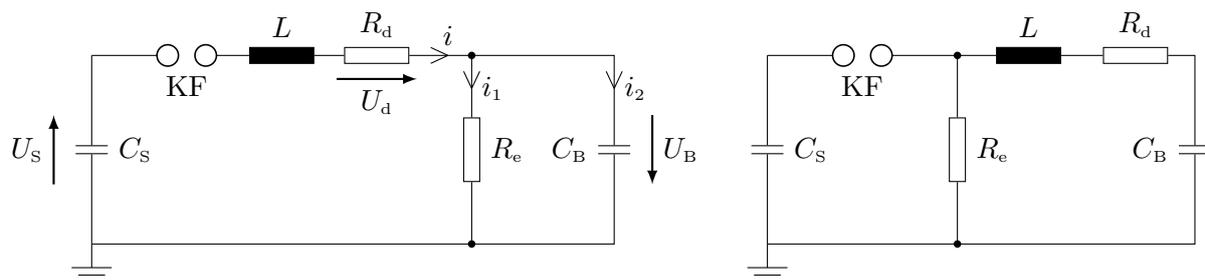


Abbildung 2.10: Ersatzschaltbild einer Kaskadenschaltung

2.4 Stoßspannungsgeneratoren nach VDE



C_S : Stoßkapazität
 C_B : Belastungskapazität
 L : Stoßkreisinduktivität

R_d : Dämpfungswiderstand
 R_e : Entladungswiderstand
KF : Schaltfunkenstrecke

Abbildung 2.11: Ersatzschaltbilder von Stoßspannungsgeneratoren nach VDE 0433, Schaltung a) (l.) und Schaltung b) (r.)

C_S ist bei Vervielfacherschaltungen (z.B. nach MARX) die Reihenschaltung sämtlicher parallel aufgeladener Stoßkondensatoren.

C_B umfasst die Prüflingskapazität, evtl. vorhandene Zusatzkapazitäten und die Kapazität von Leitungen und Messeinrichtungen. Im Praktikum ist hier nur die Kapazität des Spannungsteilers vorhanden (Ausnahme: Test eines Isolierstützers).

L wird durch die vom Stoßspannungskreis umfasste Stromschleife einschließlich der Eigeninduktivität des Generators gebildet. Um sie so gering wie möglich zu halten, sollte der Stoßspan-

nungskreis räumlich gedrängt aufgebaut werden.

2.4.1 Berechnung des Stoßvorganges nach Schaltung a)

Die Induktivität L wird vernachlässigt.

$$-u_S = u_d + u_B = i \cdot R_d + u_B \quad (2.6)$$

Daraus folgt:

$$-u_S = \left(\frac{u_B}{R_e} + C_B \cdot \frac{du_B}{dt} \right) \cdot R_d + u_B \quad (2.7)$$

Mit $i = i_1 + i_2$ folgt:

$$C_S \cdot \frac{du_S}{dt} = \frac{u_B}{R_e} + C_B \cdot \frac{du_B}{dt} \quad (2.8)$$

Gleichung 2.7 mit $C_S \cdot \frac{du_S}{dt}$ erweitert ergibt:

$$-C_S \cdot \frac{du_S}{dt} = C_S \cdot \frac{R_d}{R_e} \cdot \frac{du_B}{dt} + R_d \cdot C_S \cdot C_B \cdot \frac{d^2 u_B}{dt^2} + C_S \cdot \frac{du_B}{dt} \quad (2.9)$$

Gleichsetzen von Gleichung 2.8 und Gleichung 2.9 ergibt die Differentialgleichung:

$$\frac{d^2 u_B}{dt^2} \cdot (C_S \cdot C_B \cdot R_d \cdot R_e) + \frac{du_B}{dt} \cdot (C_S \cdot R_d + C_S \cdot R_e + C_B \cdot R_e) + u_B = 0 \quad (2.10)$$

Die allgemeine Lösung der Differentialgleichung lautet:

$$u_B = K_1 \cdot e^{n_1 \cdot t} + K_2 \cdot e^{n_2 \cdot t} \quad (2.11)$$

Die Konstanten n_1 und n_2 lassen sich aus der charakteristischen Gleichung wie folgt berechnen:

$$n_{1,2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{C_S \cdot (R_d + R_e) + C_B \cdot R_e}{C_S \cdot C_B \cdot R_d \cdot R_e} \pm \sqrt{\left[\frac{C_S \cdot (R_d + R_e) + C_B \cdot R_e}{C_S \cdot C_B \cdot R_d \cdot R_e} \right]^2 - \frac{1}{C_S \cdot C_B \cdot R_d \cdot R_e}} \quad (2.12)$$

Da $u_B(t=0) = 0$, folgt $K_1 = -K_2$. Damit folgt aus Gleichung 2.11:

$$u_B = K \cdot (e^{n_1 \cdot t} - e^{n_2 \cdot t}) \quad (2.13)$$

Mit $u_S(t=0) = -u_0$ (Spannung vor dem Zünden) folgt aus Gleichung 2.7:

$$-u_S = \left(1 + \frac{R_d}{R_e} \right) \cdot K \cdot (e^{n_1 \cdot t} - e^{n_2 \cdot t}) + C_B \cdot R_d \cdot K \cdot (n_1 \cdot e^{n_1 \cdot t} - n_2 \cdot e^{n_2 \cdot t}) \quad (2.14)$$

Daraus folgt durch Einsetzen von $t = 0$:

$$K = \frac{U_0}{C_B \cdot R_d \cdot (n_1 - n_2)} = \frac{U_0}{A} \quad \text{mit } A = C_B \cdot R_d \cdot (n_1 - n_2) \quad (2.15)$$

Damit ergibt sich die Lösung der Differentialgleichung zu:

$$u_B = \frac{U_0}{A} \cdot (e^{n_1 \cdot t} - e^{n_2 \cdot t}) \quad (2.16)$$

Berechnung von T_s und $U_{B,\max}$ (unter Vernachlässigung von L):

$$\frac{du_B}{dt} = 0 = \frac{U_0}{A} \cdot (n_1 \cdot e^{n_1 \cdot T_s} - n_2 \cdot e^{n_2 \cdot T_s}) \quad (2.17)$$

Damit ergibt sich:

$$T_s = \frac{\ln\left(\frac{n_1}{n_2}\right)}{n_2 - n_1} = \frac{\ln a}{n_2 - n_1} \quad \text{mit } a = \frac{n_1}{n_2} \quad (2.18)$$

durch Einsetzen in Gleichung 2.16 folgt:

$$U_{B,\max} = \frac{U_0}{A} \cdot \left(a^{\frac{1}{1-a}} - a^{\frac{1}{1-a}} \right) = \frac{U_0}{A} \cdot d \quad \text{mit } d = a^{\frac{1}{1-a}} - a^{\frac{1}{1-a}} \quad (2.19)$$

Der **Ausnutzungsgrad** η gibt das Verhältnis des Stoßspannungsscheitelwertes zur Ladespannung des Stoßkondensators an:

$$\eta = \frac{U_{B,\max}}{U_0} = \frac{d}{A} = \frac{e^{\frac{n_1}{n_2 - n_1} \cdot \ln\left(\frac{n_1}{n_2}\right)} - e^{\frac{n_2}{n_2 - n_1} \cdot \ln\left(\frac{n_1}{n_2}\right)}}{C_B \cdot R_d \cdot (n_1 - n_2)} \quad (2.20)$$

Die **Stoßenergie** berechnet sich zu:

$$W_s = \frac{1}{2} \cdot C_s \cdot U_0^2 \quad (2.21)$$

2.4.2 Vereinfachte Berechnung von Stoßspannungskreisen nach VDE

Die Induktivität L kann vernachlässigt werden, wenn gilt:

$$\frac{L}{R_e} \leq 0,1 \cdot T_s \quad (2.22)$$

Um Hochfrequenzschwingungen zu vermeiden sollte gelten:

$$R_d > 2 \cdot \sqrt{L \cdot \frac{C_B + C_s}{C_B \cdot C_s}} \quad (2.23)$$

Unter diesen Voraussetzungen ist es möglich, die Stoßkreisdaten für die Schaltungen a) und b) und für eine Kombination beider (bei mehrstufigen Schaltungen R_d teilweise vor und teilweise hinter R_e angeordnet) einfach zu ermitteln.

Genormte Blitzstoßspannungsformen liegen bei

$$T_s/T_r = 1,2/5; \quad \mathbf{1,2/50}; \quad 1,2/200 \quad \text{in } \mu\text{s}$$

vor. Bevorzugt werden die Formen 1,2/50 bei Blitzstoß und 250/2500 bei Schaltstoß.

2.4.3 Berechnung der Stoßkreiswerte für gegebene Zeitkennwerte

Die Zeitkonstanten $R_d \cdot C_B$ und $R_e \cdot C_S$ sowie der Ausnutzungsgrad η hängen nur von Form der Stoßspannung (T_s/T_r) und vom Verhältnis C_B/C_S ab. Im beiliegenden Anhang zu Versuch H2 sind diese Funktionen für $T_s/T_r = 1,2/50$ und $T_s/T_r = 1,2/5$ dargestellt.

2.4.4 Berechnung der Zeitkennwerte aus den Stoßkreisdaten

Die angegebenen Formeln gelten umso genauer, je kleiner das Verhältnis T_s/T_r wird (für 1,2/50 und 1,2/200 ausreichend).

Tabelle 2.1: Formeln für die Berechnung der Zeitkennwerte aus Stoßkreisdaten

	Schaltung a)	Schaltung b)
T_s	$\frac{2}{b} \cdot \frac{R_d \cdot R_e}{R_d + R_e} \cdot \frac{C_B \cdot C_S}{C_B + C_S}$	$\frac{2}{b} \cdot R_d \cdot \frac{C_B \cdot C_S}{C_B + C_S}$
T_r	$\frac{1}{a} \cdot (R_d + R_e) \cdot (C_B + C_S)$	$\frac{1}{a} \cdot R_e \cdot (C_B + C_S)$
η	$\frac{R_e}{R_d + R_e} \cdot \frac{C_S}{C_B + C_S}$	$\frac{C_S}{C_B + C_S}$

Die Konstanten $1/a$ und $2/b$ ergeben sich für verschiedene T_s/T_r -Verhältnisse wie folgt:

Tabelle 2.2: Verschiede T_s/T_r -Verhältnisse für bestimmte Konstellationen

T_s/T_r	1,2/5	1,2/50	1,2/200
$1/a$	1,44	0,73	0,7
$2/b$	1,49	2,96	3,15

3 Aufgaben und Hinweise zum Versuchstag

3.1 Vorbereitende Aufgaben

1. Ermitteln Sie mit Hilfe der Diagramme im Anhang zu den in den Abbildungen 2.12 und 2.13 dargestellten Stoßspannungsgeneratoren in ein- und zweistufiger Ausführung (jeweils in Schaltung b)) die Werte für R_d und R_e für Blitzstoßspannungen mit $T_s/T_r = 1,2/5$ und $T_s/T_r = 1,2/50$.
2. Das verwendete „Stoßspannungsmessgerät“ zur Messung des Scheitelwertes der auftretenden Stoßspannungen wird über kapazitive Spannungsteiler mit der Hochspannungsschaltung verbunden. Machen Sie sich mit dem Messprinzip des Stoßspannungsmessgeräts (StM 613/615, Betriebsanleitung im Stud.IP) vertraut. Es ist jedoch nicht erforderlich die interne Schaltung des Messgerätes vollständig zu verstehen.

Sie sollten wissen, wie ein kapazitiver Spannungsteiler funktioniert und in der Lage sein, einen kapazitiven Spannungsteiler zu berechnen.

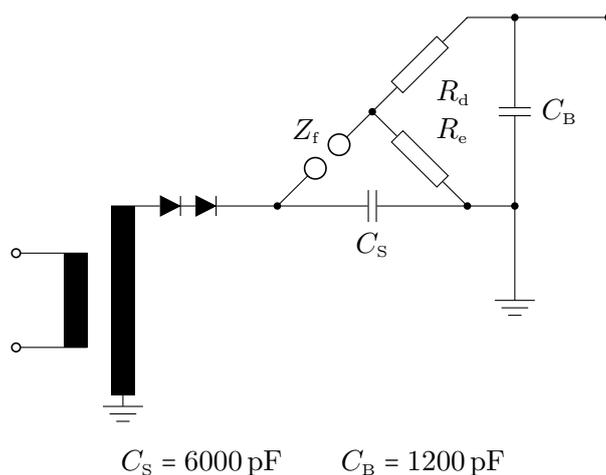


Abbildung 2.12: Grundstufe eines Stoßspannungsgenerators

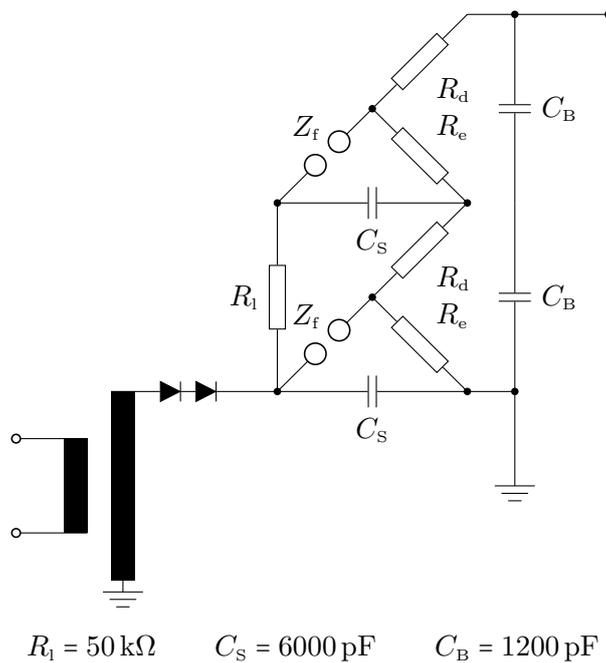


Abbildung 2.13: Zweistufige Kaskadenschaltung eines Stoßspannungsgenerators

3.2 Versuchsdurchführung

Bauen Sie die folgenden Schaltungen zur Erzeugung von Stoßspannungen gemäß Abbildung 2.12 bzw. 2.13 so auf, dass die Transformatorspannung, die Gleichspannung an C_s und die Stoßspannung an C_B gemessen werden können. Zusätzlich soll die Stoßspannung oszillographiert werden.

1. Grundstufe, 1,2/5, Schaltung b)
2. Grundstufe, 1,2/50, Schaltung a)
3. Grundstufe, 1,2/50, Schaltung b)
4. Zweistufige Kaskadenschaltung, 1,2/50, Schaltung b)

Nehmen Sie mit jeder Schaltung zehn Stoßspannungswerte (über den gesamten möglichen Bereich) auf und oszillographieren Sie den Verlauf der Stoßspannung. Zusätzlich ist für jede Schaltung bei einem Wert die Stoßspannung mit einer Kugelfunkenstrecke zu bestimmen (50%-Überschlagswert).

Prüfen Sie mit der zweistufigen Kaskadenschaltung, 1,2/50, Schaltung b), die Stoßspannungsfestigkeit eines Isolierstützers aus Porzellan der Reihe 10.

3.3 Versuchsauswertung

Forschungsdaten, wie in unserem Fall die Ergebnisse aus den Experimenten, sind die Grundlage des wissenschaftlichen Arbeitens. Um Zeit zu sparen, sollten diese häufig aus vielen Zahlen bestehenden Daten direkt nach der Durchführung eines Versuchs in einer nachvollziehbaren Struktur dokumentiert und gesichert werden. Dies spart bei der späteren Bearbeitung und Nutzung Zeit und vermeidet Fehler. Wie beim Laborbuch gilt auch hier, dass die Entstehung und ggf. Veränderungen der Daten nachvollzogen werden müssen, insbesondere bei der kollaborativen Zusammenarbeit mit anderen Wissenschaftler.

Viele Forschungsinstitute schreiben den Umgang mit Forschungsdaten in Richt- oder Leitlinien mehr oder weniger genau vor. Auch die TU Clausthal besitzt seit Dezember 2019 eine [Forschungsdaten-Leitlinie](#). Auch andere Universitäten und Institute haben eigene Richtlinien erstellt oder haben sich zusammengeschlossen und bündeln ihr Datenmanagement beispielsweise auf der Seite [forschungsdaten.info](#). Diese stellt viele Tipps und Informationen zum Umgang mit Forschungsdaten zur Verfügung und dient zum Austausch diverser Daten verschiedener Wissenschaftsbereiche.

Die Dokumentation und Auswertung des Versuchs H2 soll ebenfalls im [eLabFTW](#) stattfinden. Ein besonderes Augenmerk wird bei diesem Versuch die Datenaufbereitung sein. Die aufgenommenen Spannungsverläufe der Stoßspannungen sind sowohl in ihrer Rohform als auch in aufbereiteter Form im [eLabFTW](#) abzuspeichern. Die Aufbereitung beinhaltet folgende Punkte:

- Daten nachvollziehbar beschreiben (Metadaten, Struktur, ...)
- Bereinigung der Daten (Rauschen, falsche Messwerte, ...)
- Visualisierung der aufbereiteten Daten
- Speicherung/Archivierung der Daten im [eLabFTW](#)

3.4 Weiterführende Aufgaben

1. Von jeder Schaltung ist ein räumliches Aufbaus Schaltbild anzufertigen und zu jedem aufgenommenen Messpunkt sowohl der Ausnutzungsgrad als auch die Stoßenergie zu bestimmen und mit Rechnung sowie als Tabelle im Laborbuch zu hinterlegen.
2. Berechnen Sie mit den im Versuch verwendeten Werten für R_d und R_e sowie C_B und C_S für die Grundstufe, 1,2/50, nach Schaltung a) und nach Schaltung b) die Größen T_S , T_r und η und vergleichen Sie diese mit Ihren Messungen bzw. den aufgenommenen Oszillogrammen.

Literatur zu Versuch H2

- [5] A. KÜchler, “Prüfen, Messen, Diagnose,” in *Hochspannungstechnik: Grundlagen - Technologie - Anwendungen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017, S. 359–502, ISBN: 978-3-662-54700-7. DOI: [10.1007/978-3-662-54700-7_6](https://doi.org/10.1007/978-3-662-54700-7_6). Adresse: https://doi.org/10.1007/978-3-662-54700-7_6.
- [10] DIN EN 60060-1; VDE 0432-1:2011-10, *Hochspannungs-Prüftechnik - Teil 1: Allgemeine Begriffe und Prüfbedingungen (IEC 60060-1:2010)*; Deutsche Fassung EN 60060-1:2010, Norm, gültig.
- [11] E. Gockenbach, *Versuchskript Hochspannungstechnik - Versuch 8S: Erzeugung von Stoßspannungen und Aufnahme von Stoßkennlinien*, Hannover: Lehrstuhl Hochspannungstechnik, 2013.
- [12] DIN EN 60052:2003-06; VDE 0432-9:2003-06, *Spannungsmessungen mit Standard-Luftfunkenstrecken (IEC 60052:2002)*; Deutsche Fassung EN 60052:2002, Norm, gültig.
- [13] M. Wellauer, “Überspannungen,” in *Einführung in die Hochspannungstechnik*. Basel: Birkhäuser Basel, 1954, S. 136–246, ISBN: 978-3-0348-6824-2. DOI: [10.1007/978-3-0348-6824-2_8](https://doi.org/10.1007/978-3-0348-6824-2_8). Adresse: https://doi.org/10.1007/978-3-0348-6824-2_8.
- [14] E. Flegler, “Stoßspannungen,” in *Einführung in die Hochspannungstechnik*. Karlsruhe: Verlag G. Braun, 1964, S. 176–181.
- [15] M. Beyer, W. Boeck, K. Möller und W. Zaengl, “Hochspannungsmeßtechnik,” in *Hochspannungstechnik: Theoretische und praktische Grundlagen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1986, S. 280–345, ISBN: 978-3-642-61633-4. DOI: [10.1007/978-3-642-61633-4_11](https://doi.org/10.1007/978-3-642-61633-4_11). Adresse: https://doi.org/10.1007/978-3-642-61633-4_11.

Anhang zu Versuch H2

Stoßspannungen

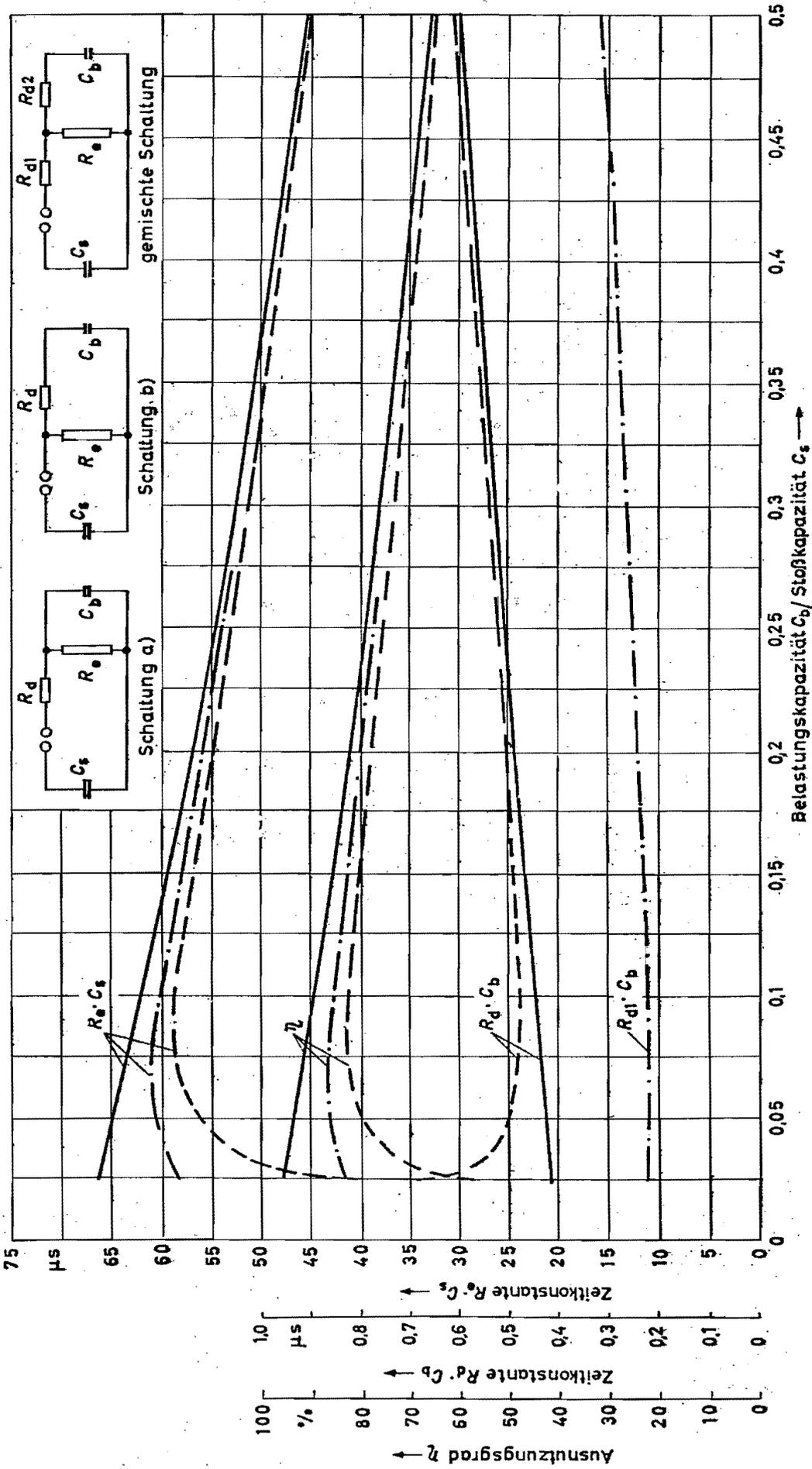


Bild 1. $R_d \cdot C_b$ und $R_o \cdot C_s$ sowie η abhängig von C_b/C_s für die Stoßspannung 1,2/50

- Schaltung a)
- Schaltung b)
- · - · - gemischte Schaltung für $R_{d1} = R_{d2}$

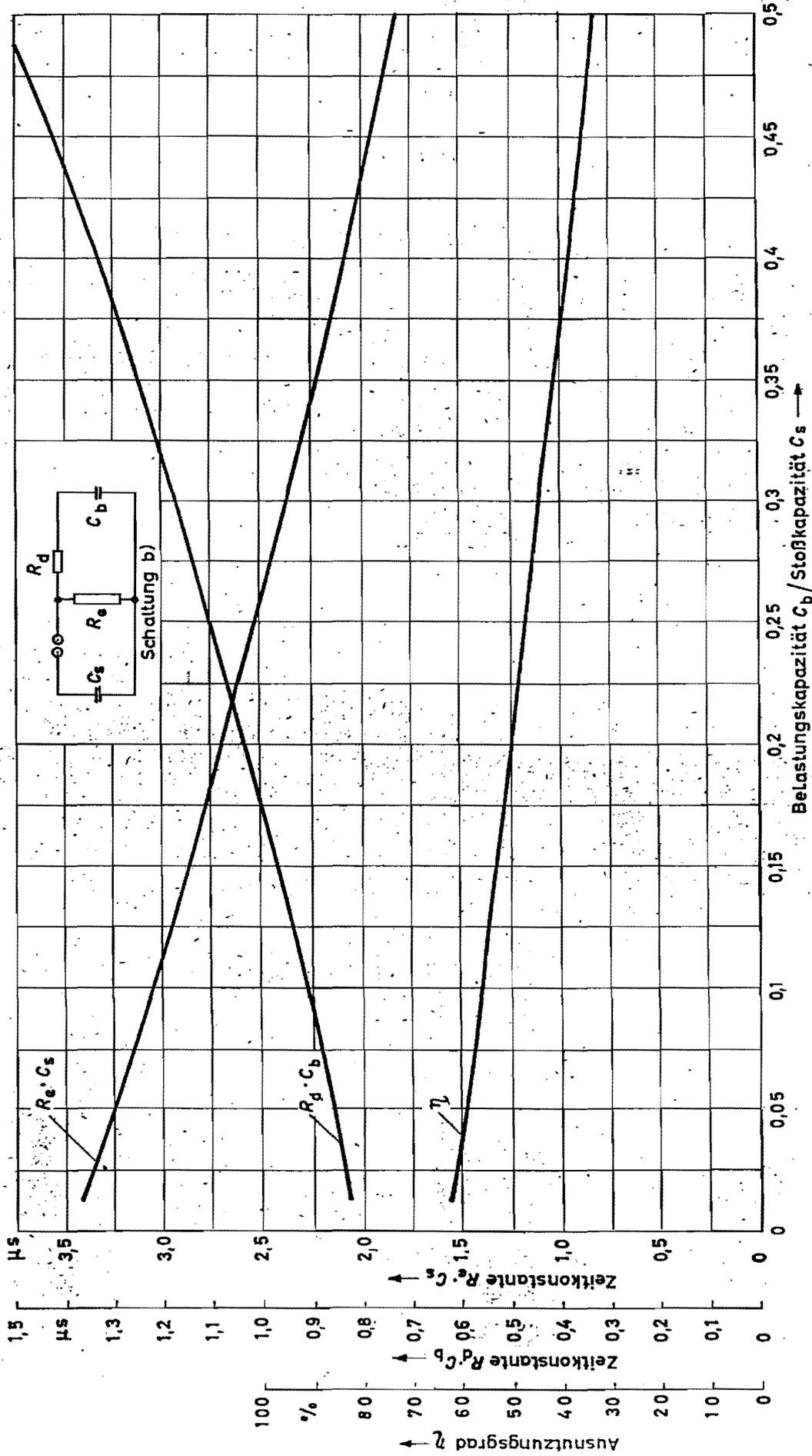


Bild 2. $R_d \cdot C_b$ und $R_e \cdot C_s$ sowie η abhängig von C_b/C_s für die Stoßspannung 1,2/5

**Scheitelwerte der Durchschlagspannung (U_{50} -Werte bei Stoßspannungsprüfungen)
in kV für betriebsfrequente Wechselspannungen, volle Blitzstoßspannungen und Schaltstoßspannungen mit negativer Polarität und Gleichspannungen beider Polaritäten**

Schlagweite in cm	Kugeldurchmesser in cm											
	2	5	6,25	10	12,5	15	25	50	75	100	150	200
0,05	2,8											
0,10	4,7											
0,15	6,4											
0,20	8,0	8,0										
0,25	9,6	9,6										
0,30	11,2	11,2										
0,40	14,4	14,3	14,2									
0,50	17,4	17,4	17,2	16,8	16,8	16,8						
0,60	20,4	20,4	20,2	19,9	19,9	19,9						
0,70	23,2	23,4	23,2	23,0	23,0	23,0						
0,80	25,8	25,3	26,2	26,0	26,0	26,0						
0,90	28,3	29,2	29,1	28,9	28,9	28,9						
1,0	30,7	32,0	31,9	31,7	31,7	31,7	31,7					
1,2	(35,1)	37,6	37,5	37,4	37,4	37,4	37,4					
1,4	(38,5)	42,9	42,9	42,9	42,9	42,9	42,9					
1,5	(40,0)	45,5	45,5	45,5	45,5	45,5	45,5					
1,6		48,1	48,1	48,1	48,1	48,1	48,1					
1,8		53,0	53,5	53,5	53,5	53,5	53,5					
2,0		57,5	58,5	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0			
2,2		61,5	63,0	64,5	64,5	64,5	64,5	64,5	64,5			
2,4		65,5	67,5	69,5	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0			
2,6		(69,0)	72,0	74,5	75,0	75,5	75,5	75,5	75,5			
2,8		(72,5)	76,0	79,5	80,0	80,5	81,0	81,0	81,0			
3,0		(75,5)	79,5	84,0	85,0	85,5	86,0	86,0	86,0	86,0		
3,5		(82,5)	(87,5)	95,0	97,0	98,0	99,0	99,0	99,0	99,0		
4,0		(88,5)	(95,0)	105	108	110	112	112	112	112		
4,5			(101)	115	119	122	125	125	125	125		
5,0			(107)	123	129	133	137	138	138	138	138	
5,5				(131)	138	143	149	151	151	151	151	
6,0				(138)	146	152	161	164	164	164	164	
6,5				(144)	(154)	161	173	177	177	177	177	
7,0				(150)	(161)	169	184	189	190	190	190	
7,5				(155)	(168)	177	195	202	203	203	203	
8,0					(174)	(185)	206	214	215	215	215	
9,0					(185)	(198)	226	239	240	241	241	
10					(195)	(209)	244	263	265	266	266	266
11						(219)	261	286	290	292	292	292
12						(229)	275	309	315	318	318	318
13							(289)	331	339	342	342	342
14							(302)	353	363	366	366	366
15							(314)	373	387	390	390	390

**Scheitelwerte der Durchschlagspannung (U_{50} -Werte bei Stoßspannungsprüfungen)
in kV für volle Blitzstoßspannungen und Schaltstoßspannungen mit positiver Polarität**

Schlagweite in cm	Kugeldurchmesser in cm											
	2	5	6,25	10	12,5	15	25	50	75	100	150	200
0,05												
0,10												
0,15												
0,20												
0,25												
0,30	11,2	11,2										
0,40	14,4	14,3	14,2									
0,50	17,4	17,4	17,2	16,8	16,8	16,8						
0,60	20,4	20,4	20,2	19,9	19,9	19,9						
0,70	23,2	23,4	23,2	23,0	23,0	23,0						
0,80	25,8	26,3	26,2	26,0	26,0	26,0						
0,90	28,3	29,2	29,1	28,9	28,9	28,9						
1,0	30,7	32,0	31,9	31,7	31,7	31,7	31,7					
1,2	(35,1)	37,8	37,6	37,4	37,4	37,4	37,4					
1,4	(38,5)	43,3	43,2	42,9	42,9	42,9	42,9					
1,5	(40,0)	46,2	45,9	45,5	45,5	45,5	45,5					
1,6		49,0	48,6	48,1	48,1	48,1	48,1					
1,8		54,5	54,0	53,5	53,5	53,5	53,5					
2,0		59,5	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0			
2,2		64,0	64,0	64,5	64,5	64,5	64,5	64,5	64,5			
2,4		69,0	69,0	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0			
2,6		(73,0)	73,5	75,5	75,5	75,5	75,5	75,5	75,5			
2,8		(77,0)	78,0	80,5	80,5	80,5	81,0	81,0	81,0			
3,0		(81,0)	82,0	85,5	85,5	85,5	86,0	86,0	86,0	86,0		
3,5		(90,0)	(91,5)	97,5	98,0	98,5	99,0	99,0	99,0	99,0		
4,0		(97,5)	(101)	109	110	111	112	112	112	112		
4,5			(108)	120	122	124	125	125	125	125		
5,0			(115)	130	134	136	138	138	138	138	138	
5,5				(139)	145	147	151	151	151	151	151	
6,0				(148)	155	158	163	164	164	164	164	
6,5				(156)	(164)	168	175	177	177	177	177	
7,0				(163)	(173)	178	187	189	190	190	190	
7,5				(170)	(181)	187	199	202	203	203	203	
8,0					(189)	(196)	211	214	215	215	215	
9,0					(203)	(212)	233	239	240	241	241	
10					(215)	(226)	254	263	265	266	266	266
11						(238)	273	287	290	292	292	292
12						(249)	291	311	315	318	318	318
13							(308)	334	339	342	342	342
14							(323)	357	363	366	366	366
15							(337)	380	387	390	390	390

Versuch H3

Die Schering-Brücke

1 Lernziele zu Versuch H3

Nach dem dritten Versuch des Praktikums Hochspannungstechnik ...

- ... kennen die Teilnehmenden die verschiedenen in der Hochspannungstechnik auftretenden Verluste, ihren Einfluss und wie sie minimiert werden können.
- ... kennen die Teilnehmenden das Grundprinzip und die Funktionsweise der Schering-Messbrücke und können mit ihr Kapazitäten bestimmen.
- ... können die Teilnehmenden über eine Reuse die Koronaverluste eines beliebigen Leiters messen, berechnen und mit Angaben aus der Literatur vergleichen.
- ... können die Teilnehmenden ein nachvollziehbares und präzises Protokoll verfassen.

2 Theoretische Grundlagen

Dieser Versuch ist in mehrere Teile gegliedert. Zunächst erfolgt eine Einführung in die Theorie, den Aufbau und die Handhabung der Schering-Messbrücke. Danach werden Verluste und Kapazitäten von verschiedenen Proben mit Hilfe der Schering-Messbrücke vermessen. In einem weiteren Versuchsteil werden in einer Modellanordnung (Reuse) die sogenannten Koronaverluste von Freileitungsseilen in Abhängigkeit von der Spannung untersucht.

2.1 Dielektrische Verluste

Das Dielektrikum eines Kondensators besteht aus einem Nichtleiter, der aber nur selten als ideal bezeichnet werden kann. In ihm entstehen bei einer angelegten Spannung Verluste. Man unterscheidet zwischen Leitungsverlusten, Polarisationsverlusten und dielektrischer Hysterese.

2.1.1 Leitungsverluste

Bei den Leitungsverlusten handelt es sich um den Effekt, dass jeder Isolator noch eine geringe Leitfähigkeit besitzt. Hierbei kommt die Elektronenleitung infrage, das heißt im Isolator existieren freie Elektronen, die z. B. durch kosmische Strahlung oder Wärmeschwingungen aus dem Atomverband herausgerissen wurden. Sehr viel größer ist allerdings der Anteil, den Ionen zur Leitfähigkeit beitragen. Ionenleitung wird verursacht durch Fremdeinschlüsse (Feuchtigkeit, Katalysatoren), die unter Einwirkung des elektrischen Feldes dissoziieren. Die Ionenbewegung führt durch Reibung zur Wärmeentwicklung und somit zu Wirkverlusten. Die Ionenleitung nimmt stark mit der Temperatur zu, da dann die Viskosität des Stoffes abnimmt.

2.1.2 Polarisationsverluste

Während Leitungsverluste gleichermaßen bei Wechsel- und Gleichspannung auftreten, existieren Polarisationsverluste nur bei Wechselspannung. Ihr Anteil an der Verlustbilanz ist erheblich größer, als jener der Leitungsverluste (ca. 40. . . 4000-fach). Fallen die Schwerpunkte der positiven und negativen elektrischen Ladungen in den Molekülen oder Atomen nicht zusammen, so liegt

ein Dipol vor. Dieser wird sich in Feldrichtung ausrichten (Polarisation), wobei zur Überwindung der Reibung Energie erforderlich ist. Bei einem angelegten Wechselfeld wird also fortwährend Energie benötigt. Bei sehr niederfrequenten Wechselfeldern ist dieser Wert unbedeutend, ebenso für sehr hohe Frequenzen, bei denen je nach Art und Höhe der Frequenz keine Polarisation mehr stattfindet.

Man unterscheidet nun je nach Aufbau der Stoffe verschiedene Arten von Polarisation:

Deformationspolarisation Unter Einwirkung eines elektrischen Feldes wird die Elektronenhülle in Bezug zum Atomkern verschoben, welches einer Polarisierung entspricht. Diese Verschiebungen bedürfen nur sehr geringer Energien und sind auch noch bei höchsten Frequenzen existent.

Gitterpolarisation Bei Stoffen, in denen sich negative und positive Ionen abwechselnd gegenüberstehen, ergibt sich unter dem Einfluss des Feldes eine Verschiebung der Ionen gegeneinander. Auch diese Verschiebungen folgen noch höchsten Frequenzen und ihr Energiebedarf ist äußerst gering.

Dipol- oder Orientierungspolarisation Nach DEBYE sind in den meisten Isolierstoffen schon von Natur aus polarisierte Moleküle bzw. -gruppen vorhanden, die sich unter Einwirkung eines elektrischen Feldes ausrichten. Die Frequenzabhängigkeit ist stark mit der Temperatur verknüpft. Bei hohen Temperaturen ist die Wärmeeigenbewegung der Moleküle so groß, dass sie diese Ausrichtung nicht zulässt, bei Temperaturen gegen 0 K sind die Moleküle bewegungsunfähig.

Wie sich die verschiedenen Verlustarten in Abhängigkeit von der Temperatur entwickeln, zeigt Abbildung 3.1, welche den Verlauf für Öl darstellt. Bei Kunstharzen verlagert sich das Maximum der Dipolverluste zu höheren Temperaturen.

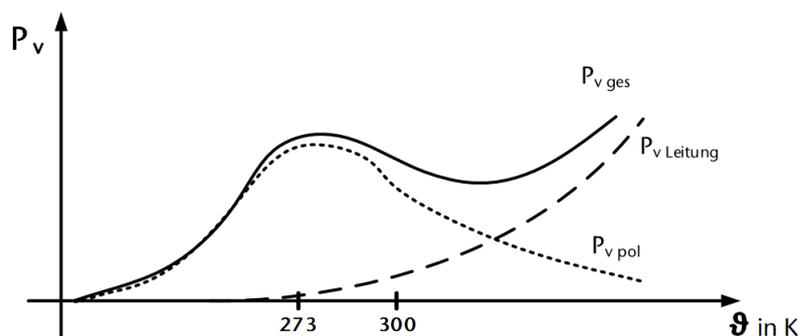


Abbildung 3.1: Verlustarten in Abhängigkeit von der Temperatur

In Abbildung 3.2 ist qualitativ die Abhängigkeit der Dipolverluste von der Frequenz dargestellt.

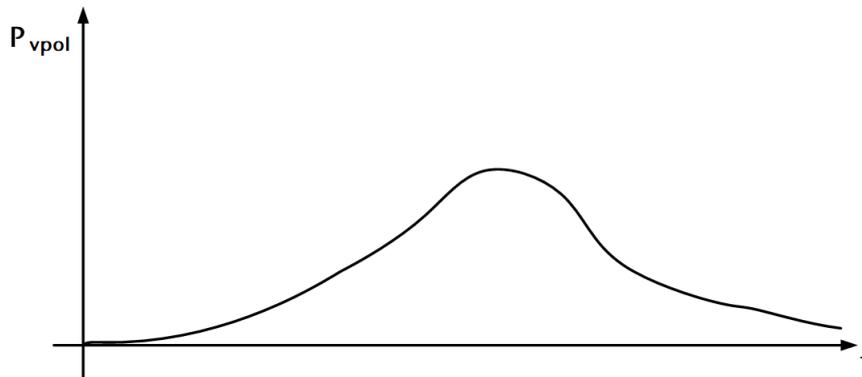


Abbildung 3.2: Abhängigkeit der Dipolverluste von der Frequenz

2.1.3 Dielektrische Hysteresis

Untersuchungen haben gezeigt, dass sich bei angelegter Gleichspannung im Dielektrikum eines Kondensators die Spannung nicht gleichmäßig verteilt, sondern dass sich Ionen zu Ladungswolken zusammenballen, die sich in ihrer Beweglichkeit von elektrolytischen Ionen unterscheiden. Nach BÖNING vollzieht sich die Spannungsverteilung stufenweise. Erst nach längerer Zeit stellt sich eine gleichmäßige Verteilung ein. Bei Einwirkung eines Wechselfeldes äußert sich die dielektrische Hysteresis durch Erwärmung des Dielektrikums und durch eine Phasenverschiebung des Stromes gegenüber der Spannung um weniger als 90° . Es existiert also neben der Blindkomponente auch eine Wirkkomponente.

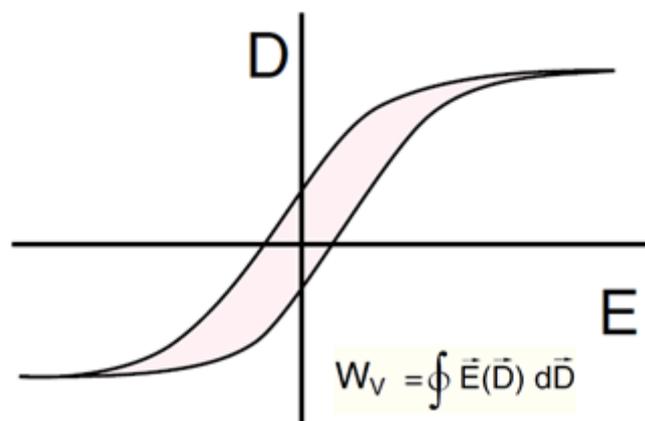


Abbildung 3.3: Dielektrische Hystereseschleife

2.1.4 Verlustleistung

Die Auswirkung der Gesamtverluste erkennt man zunächst an einem Temperaturanstieg, welcher wiederum eingeht in die Verlustbilanz. Es wird sich normalerweise ein stationärer Endzustand einstellen. Da aber $P_w = \frac{U^2}{R}$, kann sich bei einer Widerstandsverminderung durch Temperaturerhöhung die Verlustleistung und damit auch wieder die Temperatur auf unzulässige Werte erhöhen, wobei durch die Wechselwirkung zwischen Temperatur und Widerstand eine Aufschaukelung stattfinden kann, die mit einem Wärmedurchschlag endet.

2.2 Koronaverluste

Überschreitet die elektrische Feldstärke an der Oberfläche eines Leiters in Luft (oder einem anderen gasförmigen Isolierstoff) einen kritischen Grenzwert, der (bei Luft) etwa bei $21 \dots 30 \frac{\text{kV}}{\text{cm}}$ liegt, so tritt eine Glimmentladung auf (siehe auch Versuch H4). Dabei wird der Leiter von einer bläulich schimmernden Hülle überzogen, die man Korona nennt, und man hört ein leises Zischen.

Normalerweise hat diese Glimmzone nur eine geringe Ausdehnung. Da aber die Bildung freier Ladungsträger und der Ladungstransport in der Glimmzone einen elektrischen Leistungsaufwand verlangen, muss man die zu erwartenden Koronaverluste beim Bau von Hochspannungsfreileitungen in die Berechnung der Wirtschaftlichkeit mit einbeziehen. Bei sehr hohen Spannungen ($>150 \text{ kV}$) und ungünstigen klimatischen Verhältnissen machen diese Verluste die Verwendung von Spezialeisen wie beispielsweise Bündelleiter oder früher auch Hohlseile notwendig.

Die Vorausberechnung der Verluste ist dabei sehr schwierig. Es gibt zwar verschiedene empirisch gefundene Ansätze (z.B. von Peek, Ryan, Whitehead); sie gelten aber nur für einen streng zylindrischen Leiter mit ungestörtem zylindrischem Feld. Tatsächlich stellt ein Freileitungsseil aber keinen zylindrischen Leiter dar, da die Oberflächenfeldstärke durch Oberflächenverletzungen, Fremdkörperniederschläge, Alterung des Seils, Regentropfen, Schnee und Reifbelag stark erhöht wird. Diesen Witterungseinfluss auf die Koronaverluste eines 400 kV -Seils zeigt Abbildung 3.4 sehr deutlich.

Gute, anschauliche und auf die Praxis übertragbare Ergebnisse gewinnt man, indem man das zu berechnende Seil in einen Zylinder großen Durchmessers (Reuse) einfasst und diese Anordnung als unbekannte Kapazität betrachtet. Deren Verlustfaktor lässt sich dann mit Hilfe der Schering-Brücke leicht bestimmen. Ergibt sich dabei aus der Messung, dass die Übertragungsverluste oder speziell die Koronaverluste des Seils bei gegebenem Durchmesser und erforderlicher Übertragungsspannung zu hoch liegen, müsste man den Leiterdurchmesser so weit vergrößern, dass die Verluste den gewünschten Wert nicht überschreiten.

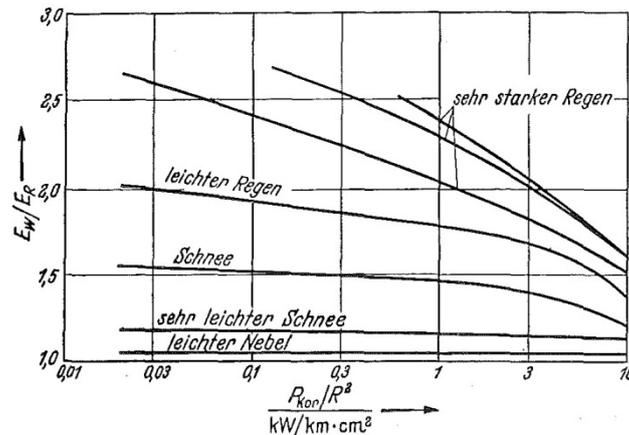
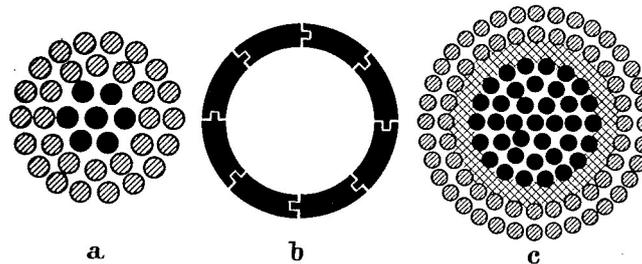


Abbildung 3.4: Einfluss von Niederschlägen auf die für die Korona maßgebende Feldstärke [16]

Der dafür erforderliche Durchmesser liegt aber oft so hoch, dass eine wirtschaftliche Stromdichte nicht mehr gegeben ist. Um einen großen Durchmesser mit kleinem Leiterquerschnitt zu erhalten, greift man deshalb zu Konstruktionen wie in Abbildung 3.5:



1. Cu-Hohlseile mit längsverzapften Profilen (b) - werden in der Praxis nicht eingesetzt
2. Stahl-Aluminium-Seile (a), die auch mit Isoliereinlagen aufgefüttert sein können (c)

Abbildung 3.5: Verschiedene Leiterquerschnitte von Kabeln [16]

Eine wirksame und heute bei Leiterspannungen ab 220 kV häufig benutzte Methode zur Reduzierung der Oberflächenfeldstärke auf maximal $17,5 \frac{kV}{cm}$ besteht in der Verwendung von Bündelleitern (vgl. Abbildung 3.6). Dabei wird die Oberflächenfeldstärke auf die eines vergleichbaren runden Leiterseils mit einem Ersatzradius r_{ers} beschränkt. Die Abstände der Einzelleiter liegen typischerweise bei ca. 40 cm. Daraus ergibt sich beispielsweise für ein Viererbündel (380 kV-Freileitung) ein Ersatzradius von 17,7 cm [23]. Alternativ müsste also ein Einzelleiter einen Durchmesser von ca. 35 cm besitzen, um die Oberflächenfeldstärke von $17,5 \frac{kV}{cm}$ nicht zu überschreiten. Dies wäre jedoch aus Witterungsgesichtspunkten (Windlast, Eisansatz, ...) nicht realisierbar.

Bei Gleichspannung setzen die Koronaverluste etwa bei der gleichen Spannung ein wie bei der

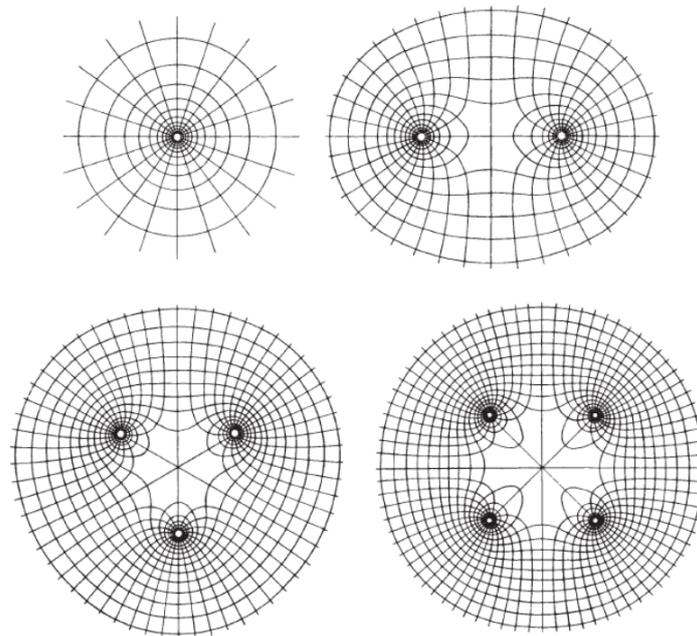


Abbildung 3.6: Felddiagramme von Bündelleitern [23]

Wechselspannung, bezogen auf die Amplitude, steigen aber bei der Anordnung Leiter gegen Erde langsamer an. Bei bipolarer Anordnung (Leiter gegen Leiter), wenn beide Leiter glimmen, wird durch die von beiden Leitern erzeugten Raumladungen der Glimmstrom merklich vergrößert.

Es gibt inzwischen auch (Zweier-)Bündelleiter-Anwendungen bei 110 kV, die nicht der Verminderung der Oberflächenfeldstärke dienen, sondern durch den damit verbundenen größeren Leiterquerschnitt der Erhöhung der Strombelastung.

2.3 Ersatzschaltbild des realen Kondensators

Bei einem idealen Kondensator eilt der Strom der Spannung um 90° voraus. Diesem Ideal kommt der Pressgaskondensator (Isoliermedien: z. B. Luft, Stickstoff, Schwefelhexafluorid: SF_6 , ...) sehr nahe. Kondensatoren mit einem festen Dielektrikum weisen dagegen die obengenannten Verluste und damit eine Wirkleistungsaufnahme auf, die eine Phasenverschiebung von $\varphi < 90^\circ$ bewirken. Die Differenz des Phasenwinkels φ zu 90° wird als Verlustwinkel δ bezeichnet, $\tan \delta$ ist der Verlustfaktor. Dies wird im Zeigerbild (Abbildung 3.7) verdeutlicht.

Aus der Geometrie ergibt sich $\tan \delta = \frac{I_W}{I_C}$.

Für kleine Verlustwinkel $\delta < 1^\circ$ wird $\delta \approx \tan \delta \approx \cos \varphi$. Angegeben wird der Verlustfaktor häufig in ‰, z. B. $\tan \delta = 0,001 = 1 \text{ ‰}$. Für gebräuchliche Isolierstoffe liegt $\tan \delta$ in der Größenordnung

$1 \cdot 10^{-2} \dots 1 \cdot 10^{-4}$.

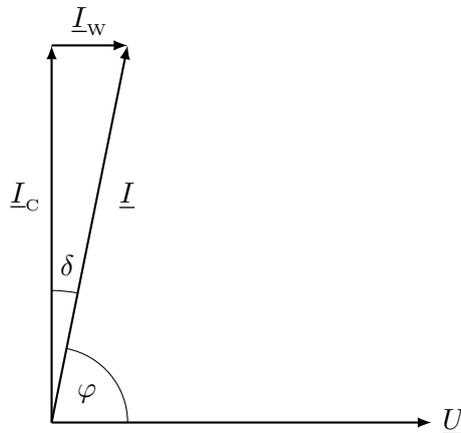


Abbildung 3.7: Zeigerdiagramm eines realen Kondensators

Aus der Zeigerdarstellung erhält man für eine feste Frequenz zwei folgende völlig äquivalente Ersatzschaltbilder (Abbildung 3.8):

Aus diesem Zusammenhang folgt, dass für kleine δ gilt: $\cos^2 \delta \approx 1 \rightarrow C \approx K$; bei größeren Verlustwinkeln ist das zugehörige Ersatzschaltbild anzugeben.

Die Verlustleistung eines Kondensators lässt sich nun über das Parallel-Ersatzschaltbild folgendermaßen angeben:

$$P_V = U \cdot I_W \quad \text{mit} \quad \tan \delta = \frac{I_W}{I_C} \quad \text{und} \quad I_W = I_C \cdot \tan \delta \quad \text{folgt}$$

$$P_V = U \cdot I_C \cdot \tan \delta \quad \text{mit} \quad I_C = U \cdot \omega \cdot C \quad \text{folgt daraus}$$

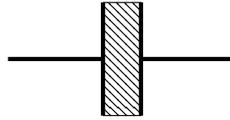
$$P_V = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \tan \delta$$

woraus sich die quadratische Abhängigkeit der Verlustleistung, d.h. der Wärmeentwicklung, von der Spannung ergibt.

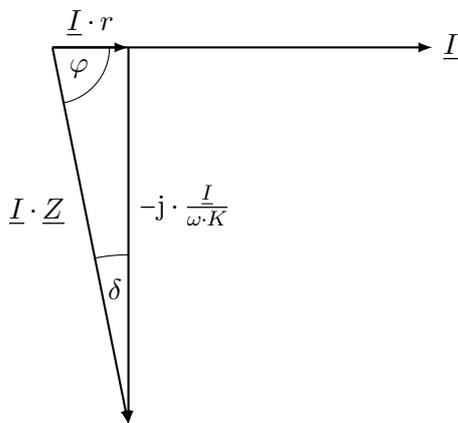
2.4 Verlustfaktor-Messbrücke nach Schering

Die Schering-Brücke ist eine Wechselstrombrücke mit komplexen Zweigen. Sie ermöglicht den Nullabgleich in der Brückendiagonalen nach Betrag und Phase.

Für Verlustfaktoren $\tan \delta < 1$ geht man von der Reihenersatzschaltung aus. Damit ergibt sich für die Brücke folgendes Prinzipschaltbild:



Reihenschaltung



$$\tan \delta = r \cdot \omega \cdot K$$

$$\underline{Z} = r - j \cdot \frac{1}{\omega \cdot K}$$

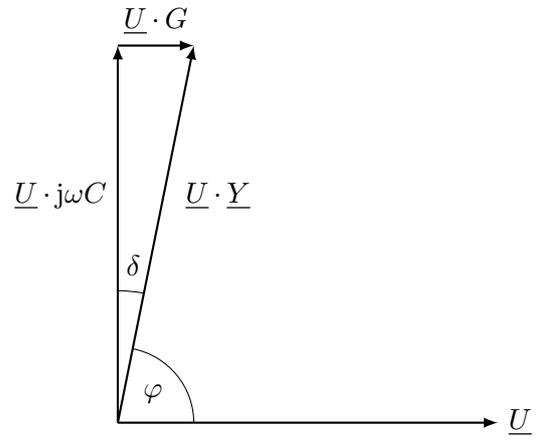
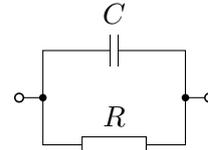
$$\underline{Z} = Z \cdot \cos \varphi - j \cdot Z \cdot \sin \varphi$$

$$\underline{Z} = Z \cdot \sin \delta - j \cdot Z \cdot \cos \delta$$

$$r = Z \cdot \sin \delta$$

$$\frac{1}{\omega \cdot K} = Z \cdot \cos \delta$$

Parallelschaltung



$$\tan \delta = \frac{1}{R \cdot \omega \cdot C}$$

$$\underline{Y} = \frac{1}{R} + j \cdot \omega \cdot C$$

$$\underline{Y} = Y \cdot \cos \varphi + j \cdot Y \cdot \sin \varphi$$

$$\underline{Y} = Y \cdot \sin \delta + j \cdot Y \cdot \cos \delta$$

$$\frac{1}{R} = Y \cdot \sin \delta$$

$$\omega \cdot C = Y \cdot \cos \delta$$

$$\underline{Z} \cdot \underline{Y} = 1 \quad ; \quad Z \cdot Y = 1$$

$$\sin^2 \delta = \frac{r}{R} \quad ; \quad \cos^2 \delta = \frac{C}{K}$$

Abbildung 3.8: Kondensator mit verlustbehaftetem Isolierstoff

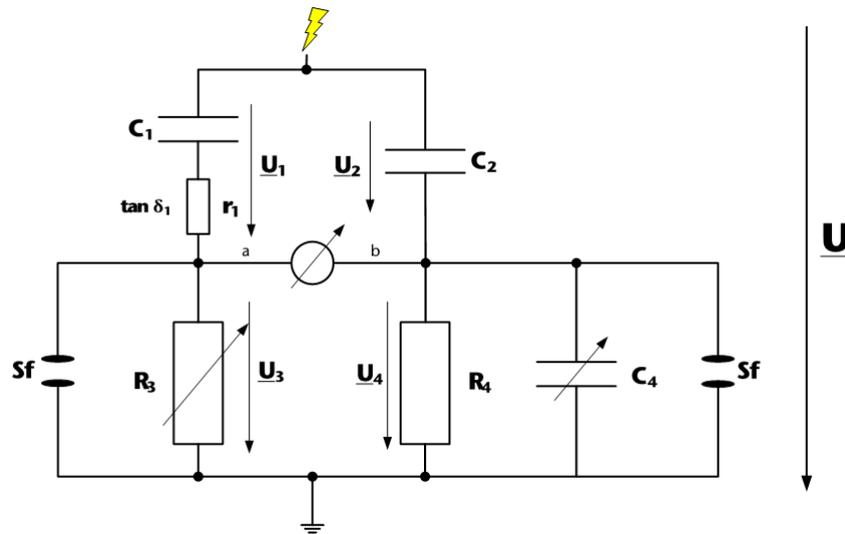


Abbildung 3.9: Prinzipschaltbild der Messbrücke

- K_1 (in der Abbildung C_1) in Reihe zu r_1 stellt die verlustbehaftete Kapazität dar,
- C_2 ist ein Vergleichsnormale, typischerweise ein Pressgaskondensator mit $\tan \delta \approx 0$,
- R_3 ermöglicht den Betragsabgleich,
- C_4 dient dem Phasenabgleich und gibt parallel zu R_4 dem Zweig 4 den zum Abgleich notwendigen negativen Phasenwinkel,
- S_f sind Schutzfunkenstrecken, die bei Überschlügen am Messobjekt Überspannungen an den unteren Brückenzweigen kurzschließen.

2.4.1 Bestimmung von Kapazität und Verlustfaktor mit der Scheringbrücke

Zur Bestimmung der unbekanntenen Kapazität K_1 und ihres $\tan \delta$ sind folgende Berechnungen notwendig

$$\begin{aligned} \underline{U}_2 - \underline{U}_{ab} - \underline{U}_1 &= 0 && \text{Kirchhoff II, gilt allgemein} \\ \underline{U}_{ab} &= 0 && \text{gilt bei abgeglicherer Brücke} \\ \text{daraus folgt} &&& \underline{U}_1 = \underline{U}_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{U} \cdot \frac{r_1 + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot K_1}}{R_3 + r_1 + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot K_1}} && | \cdot j \cdot \omega \cdot K_1 && (3.1) \\ &= \underline{U} \cdot \frac{r_1 \cdot j \cdot \omega \cdot K_1 + 1}{(r_1 + R_3) \cdot j \cdot \omega \cdot K_1 + 1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \underline{U}_2 &= \underline{U} \cdot \frac{\frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_2}}{\frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_2} + \frac{R_4 \cdot \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_4}}{R_4 + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_4}}} & | \cdot j \cdot \omega \cdot C_2 & \quad (3.2) \\
 &= \underline{U} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_4 \cdot \frac{C_2}{C_4}}{R_4 + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_4}}} & | \cdot j \cdot \omega \cdot C_4 & \\
 &= \underline{U} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_4 \cdot C_2 \cdot j \cdot \omega}{R_4 \cdot C_4 \cdot j \cdot \omega + 1}} & | R_4 \cdot C_4 \cdot j \cdot \omega + 1 & \\
 &= \underline{U} \cdot \frac{R_4 \cdot C_4 \cdot j \cdot \omega + 1}{R_4 \cdot C_4 \cdot j \cdot \omega + 1 + R_4 \cdot C_2 \cdot j \cdot \omega} \\
 &= \underline{U} \cdot \frac{R_4 \cdot C_4 \cdot j \cdot \omega + 1}{R_4 \cdot (C_2 + C_4) \cdot j \cdot \omega + 1}
 \end{aligned}$$

Gleichsetzen von Gleichung 3.1 und Gleichung 3.2:

$$\begin{aligned}
 \underline{U}_1 &= \underline{U}_2 \\
 \frac{r_1 \cdot j \cdot \omega \cdot K_1 + 1}{(r_1 + R_3) \cdot j \cdot \omega \cdot K_1 + 1} &= \frac{R_4 \cdot C_4 \cdot j \cdot \omega + 1}{R_4 \cdot (C_2 + C_4) \cdot j \cdot \omega + 1} \\
 (r_1 \cdot K_1 \cdot j \cdot \omega + 1) \cdot [R_4 \cdot (C_2 + C_4) \cdot j \cdot \omega + 1] &= (R_4 \cdot C_4 \cdot j \cdot \omega + 1) \cdot (r_1 + R_3) \cdot K_1 \cdot j \cdot \omega
 \end{aligned}$$

Auflösen und trennen von Imaginär- und Realteil:

Realteil:

$$\begin{aligned}
 -\omega^2 \cdot r_1 \cdot K_1 \cdot R_4 \cdot (C_2 + C_4) &= -\omega^2 \cdot R_4 \cdot C_4 \cdot K_1 \cdot (r_1 + R_3) \\
 \text{für } \omega \neq 0 \text{ folgt: } & r_1 = R_3 \cdot \frac{C_4}{C_2}
 \end{aligned}$$

Imaginärteil:

$$\begin{aligned}
 j \cdot \omega \cdot (r_1 \cdot K_1 + R_4 \cdot C_4 + R_4 \cdot C_2) &= j \cdot \omega \cdot (R_4 \cdot C_4 + r_1 \cdot K_1 + R_3 \cdot C_4) \\
 \text{für } \omega \neq 0 \text{ wird } & K_1 = C_2 \cdot \frac{R_4}{R_3} \\
 \text{dann folgt } & \tan \delta = \omega \cdot r_1 \cdot K_1 = \omega \cdot R_4 \cdot C_4
 \end{aligned}$$

Bei abgeglicherer Brücke gilt also:

$$r_1 = R_3 \cdot \frac{C_4}{C_2} \quad K_1 = C_2 \cdot \frac{R_4}{R_3} \quad \tan \delta = \omega \cdot R_4 \cdot C_4$$

Wählt man $R_4 = \frac{1000}{\pi} \approx 318,3 \Omega$, so ergibt sich bei 50 Hz ein $\tan \delta$ von $C_4 \cdot 1 \cdot 10^5 \frac{V}{As}$

Aus der Größenordnung der Widerstände im unteren Brückenteil ergibt sich ein wichtiger Vorteil dieser Brückenschaltung. Da sie im Gegensatz zu den kleinen (hochohmigen) Kapazitäten in den

oberen Zweigen sehr niederohmig sind, ergeben sich an den Messpunkten nur geringe Spannungen gegen Erde, was für die Bedienung von Vorteil ist.

Die im Versuch verwendete Messbrücke besitzt außerdem noch Hilfszweige, die es ermöglichen, die Eingangsempfindlichkeit zu verändern und den variablen Kondensator C_4 durch eine feste Kapazität in Kombination mit einem Drehwiderstand zu ersetzen.

Der Abgleich der Brücke wird kontrolliert durch einen oszillografischen Nullindikator. Dadurch ist jederzeit die Möglichkeit gegeben, Betrags- und Phasenabgleich zu verfolgen. Es wird die Veränderung einer Lissajous-Figur beobachtet, die entsteht, wenn an die horizontalen (X) und an die vertikalen (Y) Ablenkplatten sinusförmige Wechselfspannungen angelegt werden, nämlich $k \cdot \underline{U}$ und \underline{U}_{ab} mit $k \ll 1$.

Es ergibt sich dann je nach Phasenlage allgemein eine Ellipse. Bei 90° Phasenverschiebung und gleichen Spannungsbeträgen bildet sich ein Kreis. Bei 0° entsteht eine Gerade, deren Y-Komponente bei vollständigem Brückenabgleich auch noch verschwindet (horizontale Gerade entspricht abgeglicherer Brücke). Falls die Spannung am Prüfobjekt von Interesse ist, muss man berücksichtigen, dass hochspannungsseitig gegen Erdpotential gemessen wird. Es ist gegebenenfalls das sehr geringe Potential, auf dem der Fußpunkt des Prüflings liegt, vom Messwert zu subtrahieren.

2.4.2 Messung von Koronaverlusten mit der Reuse

Bei der Messung der Koronaverluste mit der Scheringbrücke wird die Reuse als K_1 in die Brücke eingesetzt und bei verschiedenen Spannungen der Verlustfaktor aus C_2, R_3, R_4 und C_4 bestimmt. Dabei treten im Vergleich zum normalen Betrieb folgende Abweichungen auf:

1. Nach Überschreiten der kritischen Spannung wächst $\tan \delta = \omega \cdot R_4 \cdot C_4$ stark an. Deshalb ist es möglich, dass die Kapazität C_4 zum Abgleich (in der Schaltung nach Abbildung 3.9) nicht mehr ausreicht und zweckmäßig vergrößert werden muss (Austausch, Parallelschalten anderer Kondensatoren etc.)
2. Bei sehr hohen Verlusten der Reusenordnung ergeben sich zwischen K_1 und C_1 , je nachdem welches Ersatzschaltbild (Abbildung 3.8) gewählt wird, große Unterschiede, wie auch an der Beziehung $C_1 = \frac{K_1}{1 + \tan^2 \delta_1}$ zu sehen ist.

Um diese Schwierigkeit zu umgehen, spricht man nur von einem Scheinwiderstand Z_1 mit einem Verlustwinkel $\delta_1 = 90^\circ - \varphi_1$. Dann ergibt sich (mit $U_1 \approx U$) die in der Reuse verbrauchte Leistung zu:

$$P = U \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 = \frac{U^2}{Z_1} \cdot \cos \varphi_1 = \frac{U^2}{Z_1} \cdot \frac{\tan \delta_1}{\sqrt{1 + \tan^2 \delta_1}}$$

Bei Nullabgleich ergibt sich Z_1 aus:

$$\frac{Z_1}{Z_3} = \frac{Z_2}{Z_4} \quad \Rightarrow \quad Z_1 = \frac{Z_2}{Z_4} \cdot Z_3$$

Mit $Z_2 = \frac{1}{\omega \cdot C_2}$ und $Z_3 = R_3$ sowie

$$\frac{1}{Z_4} = j \cdot \omega \cdot C_4 + \frac{1}{R_4} = \frac{1}{R_4} \cdot (1 + j \cdot \omega \cdot R_4 \cdot C_4) = \frac{1}{R_4} \cdot (1 + j \cdot \tan \delta_1)$$

folgt für die Beträge:

$$\begin{aligned} \frac{1}{Z_4} &= \frac{1}{R_4} \cdot \sqrt{(1 + \tan^2 \delta_1)} \\ Z_1 &= \frac{1}{\omega \cdot C_2} \cdot \frac{R_3}{R_4} \cdot \sqrt{(1 + \tan^2 \delta_1)} \\ \Rightarrow P &= U^2 \cdot \frac{R_4}{R_3} \cdot \omega \cdot C_2 \cdot \frac{\tan \delta_1}{1 + \tan^2 \delta_1} \end{aligned}$$

Im Allgemeinen berechnet man \sqrt{P} und trägt dann $\sqrt{\frac{P}{\text{km}}}$ als Funktion von U (Effektivwert) auf. Es ergeben sich dann etwa folgende Kurven, welche in Abbildung 3.10 dargestellt sind.

Der Bereich nach Überschreiten der kritischen Spannung ist etwa linear, was dem Peek'schen Ansatz entspricht. Im Gegensatz zu Abbildung 3.4 ist hier auch der untere Bereich der Verluste berücksichtigt.

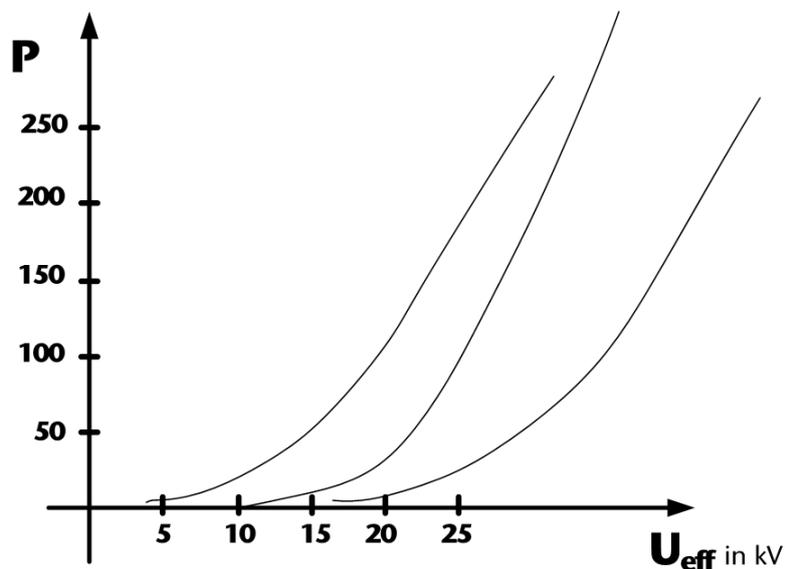


Abbildung 3.10: Abhängigkeit der Wurzel der Leistung von der Spannung

Die hier verwendete Schering-Brücke ist fest verdrahtet und gestattet es nicht, die Werte für R_3, R_4, C_4 direkt abzulesen. Man erhält hier direkt das K der Reihenschaltung oder den C -Wert der Parallelschaltung und den zugehörigen Verlustwinkel δ_1 . Außerdem erfolgt die Bereichserweiterung bei hohen Verlusten einfach durch Umschalten vom Reihen- auf das Parallelersatzschaltbild. Bei gegebener Spannung ergibt sich die Verlustleistung zu:

1) Reihenschaltung

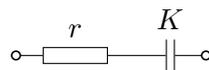


Abbildung 3.11: Ersatzschaltbild der Reihenschaltung

$$\begin{aligned}
 P &= U \cdot I \cdot \cos \varphi_1 \\
 P &= \frac{U^2}{Z_1} = \frac{\tan \delta_1}{\sqrt{1 + \tan^2 \delta_1}} \\
 \underline{Z}_1 &= \frac{\tan \delta_1}{\omega \cdot K} - j \cdot \frac{1}{\omega \cdot K} \\
 \text{Mit } \underline{Z}_1 &= \frac{1}{j \cdot \omega \cdot K} + r \quad \text{und} \quad \tan \delta_1 = r \cdot \omega \cdot K \\
 Z_1 = |\underline{Z}_1| &= \frac{1}{\omega \cdot K} \cdot \sqrt{1 + \tan^2 \delta_1} \\
 \Rightarrow P &= U^2 \cdot \omega \cdot K \cdot \frac{\tan \delta_1}{1 + \tan^2 \delta_1} \tag{3.3}
 \end{aligned}$$

2) Parallelschaltung

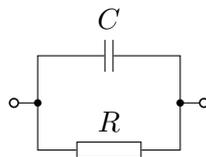


Abbildung 3.12: Ersatzschaltbild der Parallelschaltung

$$P = \frac{U^2}{Z_1} = \frac{\tan \delta_1}{\sqrt{1 + \tan^2 \delta_1}}$$

$$\frac{1}{Z_1} = \frac{1}{R} + j \cdot \omega \cdot C$$

mit $\tan \delta_1 = \frac{1}{R \cdot \omega \cdot C} \Rightarrow R = \frac{1}{\tan \delta_1 \cdot \omega \cdot C}$

$$\frac{1}{Z_1} = \tan \delta_1 \cdot \omega \cdot C + j \cdot \omega \cdot C$$
$$\frac{1}{Z_1} = \omega \cdot C \cdot \sqrt{1 + \tan^2 \delta_1}$$
$$Z_1 = \frac{1}{\omega \cdot C} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \delta_1}}$$
$$\Rightarrow P = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \tan \delta_1 \quad (3.4)$$

Die Formeln 3.3 und 3.4 lassen sich durch die Beziehung

$$\frac{C}{K} = \frac{1}{1 + \tan^2 \delta_1}$$

ineinander umrechnen.

2.4.3 Besonderheiten einer optimierten Variante der Schering-Messbrücke

Im Versuch wird die Universal-Verlustfaktor-Messbrücke für Hochspannung und 50 Hz mit Wendepotentiometern **HSWB/H/U nach H. Schering und F. W. Rutloh** eingesetzt (Abbildung 3.13).

Die Standard-Ausführung der Verlustfaktor-Messbrücke nach H. Schering [17], [18] (Abbildung 3.9) besteht aus der Kapazität des Prüflings K_1 mit dem zu messenden Verlustfaktor $\tan \delta_1$, dem verlustfreien Vergleichskondensator C_2 (im Versuch 36,9 pF), einem festen Widerstand R_4 (z. B. $\frac{1000}{\pi} \Omega$), eine regelbare Kapazität C_2 (z. B. 1...1000 nF) und einem regelbaren Widerstand R_3 (z. B. 0...1000 Ω).



Abbildung 3.13: Vorderansicht der Schering-Messbrücke (l.) mit Nullindikator (r.) beim Versuchsaufbau

3 Aufgaben und Hinweise zum Versuchstag

3.1 Vorbereitende Aufgaben

1. Bestimmen Sie allgemein die Kapazität eines Plattenkondensators mit Plattengröße A und Abstand d für den theoretischen Fall, dass die Dielektrizitätskonstante linear von ε_1 an der ersten Platte auf ε_2 an der zweiten Platte anwächst.
2. Auf Basis der Grundschialtung in Abbildung 3.9 wurde die im Versuch eingesetzte Brückenschaltung für eine komfortablere Bedienung nennenswert modifiziert (vgl. Abschnitt 2.4.3). Der Aufbau und die Funktion der Messbrücke sind im Detail der Beschreibung im Stud.IP zu entnehmen.

Die Bedienung der Abgleichelemente und die spezielle Form der Bestimmung von Kapazität und Verlustfaktor werden bei der Versuchsdurchführung als bekannt vorausgesetzt.

3.2 Versuchsdurchführung

1. Bauen Sie zur Durchführung der Versuche zunächst die Versuchsschialtung nach dem Schaltbild in Abbildung 3.14 auf.
2. Bestimmen Sie mit Hilfe der Schering-Brücke die Kapazität C und die zugehörigen Verlustwinkel $\tan \delta$ für verschiedene vom Betreuer vorgegebene Kabelisolationen und Hochspannungskondensatoren.
3. Mit der Laborreuse sind die Koronaverluste verschiedener Leiter in Abhängigkeit von der Spannung zu bestimmen. Dabei soll die Spannung von etwa 5 kV an in 1 kV-Schritten gesteigert werden, bis die einsetzenden Überschläge die Messungen verzerren. Für die Versuche stehen runde Leiter verschiedener Durchmesser sowie ein Drahtseil zur Verfügung. Notieren Sie sich auch die Länge des jeweils verwendeten Leiters.

3.3 Versuchsauswertung

Für diesen Versuch soll ein vollständiges Versuchsprotokoll erstellt werden. Grundsätzlich entspricht ein Protokoll in seinem Aufbau einer wissenschaftlichen Arbeit/ Publikation. Hier sei

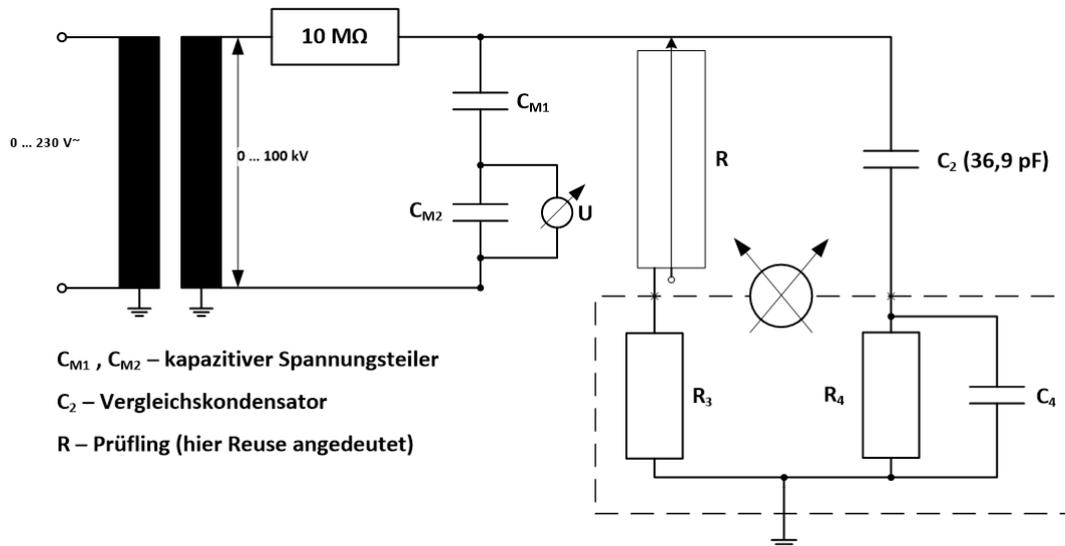


Abbildung 3.14: Schaltbild für den Versuchsaufbau

deshalb auf den Leitfaden für studentische Arbeiten des IEE verwiesen. Folgende Struktur sollte ein Protokoll in seinen Grundzügen aufweisen (Überschriften können abweichen):

1. Titelblatt
2. Inhaltsverzeichnis
3. Abkürzungs- und Symbolverzeichnis
4. Einleitung
5. Materialien und Methoden
6. Ergebnisse und Diskussion
7. Zusammenfassung
8. Anhang
9. Literatur

Die *Einleitung* sollte kurz und präzise die untersuchte Fragestellung bzw. Problematik wiedergeben und in einen Gesamtkontext einordnen. Der Abschnitt *Materialien und Methoden* beinhaltet alle Angaben zum Versuch, sodass dieser nachvollzogen und ggf. auch erneut durchgeführt werden kann. Hier reicht ein „Kochrezept“, eine Erklärung der verwendeten Methoden sowie eine Begründung für ihre Wahl ist nicht erforderlich. Besonders hervorgehoben sollten Abweichungen von der Versuchsplanung.

Hauptteil eines Protokolls ist der Abschnitt *Ergebnisse und Diskussion*: Anhand von Tabellen und Abbildungen in Verbindung mit erklärenden Texten werden die Ergebnisse übersichtlich und nachvollziehbar dargestellt, Besonderheiten oder Abweichungen sind hervorzuheben. Bei der Auswertung sollten die Ergebnisse beispielsweise mit Gleichungen oder Abbildungen nachvoll-

ziehbar verarbeitet werden. Dabei ist es hilfreich, Zwischenergebnisse anzugeben, Rechnungen detailliert an einem Messwert vorzustellen und bei wiederholter Berechnung die Ergebnisse dann in Tabellenform zusammenzufassen. Die Darstellung der Ergebnisse sowie ihre Auswertung und die anschließende Diskussion müssen dabei nicht unbedingt voneinander getrennt werden; teilweise ist es sinnvoll, die einzelne Ergebnisse direkt zu bewerten. Bei der Diskussion sind die Ergebnisse kritisch zu interpretieren und anhand von erwarteten Ergebnissen aus der Literatur zu bewerten. In einer abschließenden Diskussion aller Ergebnisse sollte die Fragestellung der Einleitung wieder aufgegriffen und beantwortet werden.

Die *Zusammenfassung* sollte für sich alleine gelesen verständlich sein. Hier werden die Fragestellung, die wesentlichen Ergebnisse und die Hauptargumente der Diskussion übersichtlich und präzise dargestellt.

In Ihrem Protokoll sollen Sie folgende Punkte bearbeiten:

1. Vergleichen Sie die Messergebnisse zu den Hochspannungskondensatoren und Kabelisolationen mit den gegebenen Kapazitätswerten (Kondensatoren) sowie der Literatur zu entnehmenden Materialdaten (Kabel) und diskutieren Sie ggf. auftretende Abweichungen.
2. Rechnen Sie die mit der Laborreue für verschiedene Leiter aufgenommenen Messwerte auf 1 km um und stellen Sie die Ergebnisse in einem Diagramm (vgl. Abbildung 3.10) dar.
3. Vergleichen Sie die Verluste der mit der Laborreue vermessenen Leiter und diskutieren Sie die Ergebnisse.

3.4 Weiterführende Aufgaben

Erläutern Sie die besonderen Eigenschaften des verwendeten Vergleichskondensators C_2 .

Literatur zu Versuch H3

- [16] G. Lesch, “Dielektrische Festigkeit,” in *Lehrbuch der Hochspannungstechnik*, E. Baumann, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1959, S. 129–331, ISBN: 978-3-642-50199-9. DOI: [10.1007/978-3-642-50199-9_3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-50199-9_3). Adresse: https://doi.org/10.1007/978-3-642-50199-9_3.
- [17] H. Schering, “Brücke für Verlustmessungen,” *Zeitschr. f. Instrum.*, Jg. 40, S. 98–99, 1920.
- [18] A. Semm, “Verlustmessungen hei Hochspannung,” S. 30–34, 1921.
- [19] W. Geyger, “Eine technische Wechselstrombrücke zur Messung von Kapazitäten, Induktivitäten und kleinen Phasenwinkeln,” *Archiv für Elektrotechnik*, Jg. 17, Nr. 2, S. 201–207, 1926. DOI: [10.1007/BF01656050](https://doi.org/10.1007/BF01656050). Adresse: <https://doi.org/10.1007/BF01656050>.
- [20] F. W. Ruthloh, “Konvergenz von Meßbrücken zur Messung des Verlustfaktors von Kondensatoren,” S. 596–599, 1965.
- [21] W. Geyger, “Kapazitäts- und Verlustfaktor-Meßbrücken mit Schleifdraht-Abgleich,” *tm - Technisches Messen*, Jg. 97-108, Nr. JG, S. 105 –108, 1939. DOI: <https://doi.org/10.1524/teme.1939.97108.jg.105>. Adresse: <https://www.degruyter.com/view/journals/teme/97-108/JG/article-p105.xml>.
- [22] F. W. Ruthloh, “Verlustfaktor-Meßbrücke mit Schleifwendel-Abgleich und linearer Verlustwinkel-Skala,” S. 798–800, 1962.
- [23] D. Oeding und B. R. Oswald, “Freileitungen,” in *Elektrische Kraftwerke und Netze*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016, S. 259–323, ISBN: 978-3-662-52703-0. DOI: [10.1007/978-3-662-52703-0_9](https://doi.org/10.1007/978-3-662-52703-0_9). Adresse: https://doi.org/10.1007/978-3-662-52703-0_9.

Versuch H4

Der Durchschlag in festen und gasförmigen Dielektrika

1 Lernziele zu Versuch H4

Nach dem vierten Versuch des Praktikums Hochspannungstechnik ...

- ... können die Teilnehmenden die grundlegenden Effekte bei Durchschlägen in gasförmigen und festen Stoffen erklären und erkennen.
- ... können die Teilnehmenden Durchschlagsvorgänge in Abhängigkeit der Spannung, des Abstands und der Umgebungsbedingungen (Temperatur, Druck, ...) abschätzen.
- ... können die Teilnehmenden einen Versuch auf Grundlage einer Fragestellung planen, aufbauen, durchführen und auswerten.

2 Theoretische Grundlagen

Bei der Auslegung von elektrischen Anlagen und der Auswahl der verwendeten Werkstoffe ist die Durchschlagsfestigkeit eine entscheidende Größe, ähnlich wie im Maschinenbau die mechanische Zerreißfestigkeit. Sie unterliegt auch ähnlichen statistischen Schwankungen. Die Messung der Durchschlagsfestigkeit dient zur Bestimmung derjenigen Spannung bzw. Feldstärke, bei der das Dielektrikum durchbrochen wird und die angelegte Spannung zusammenbricht. Der dabei entstehende Lichtbogen erzeugt ein Plasma, wodurch der molekulare Aufbau der Isolierstoffe an der Durchschlagstelle zerstört wird. Diese Zerstörung ist bei festen Isolierstoffen in den meisten Fällen dauerhaft. Bei gasförmigen (und auch bei flüssigen) Isolierstoffen regeneriert sich das Medium nach Ende des Durch- oder Überschlages relativ kurzfristig, sodass die ursprüngliche elektrische Festigkeit normalerweise wieder hergestellt ist.

2.1 Durchschlag in gasförmigen Stoffen

Bei Isoliergasen wirken je nach Dichte (Druck und Temperatur), elektrischer Feldstärke und Feldgeometrie unterschiedliche Entladungsmechanismen, die im Folgenden kurz (nicht wirklich umfassend) erläutert werden.

2.1.1 Durchschlag in hochverdünnten Gasen

Das ideale Dielektrikum wäre der vollkommen leere Raum, wenn er sich tatsächlich realisieren ließe. In Wirklichkeit existieren auch im Hochvakuum von 10...6 mbar immer noch ca. 1010 Gasmoleküle pro cm^3 . Immerhin erreicht man dabei Feldstärken bis zu $1 \frac{\text{MV}}{\text{cm}}$, ohne dass ein elektrischer Durchbruch eintritt. Diesem Durchbruch liegt folgender Mechanismus zugrunde: Elektronen der Metallelektrode (Kathode), die in ihrer Bewegung zufällig über die Oberfläche hinauschieen, werden bei genügend großer Feldstärke aus der Kathode gelöst und zur Anode hin abgesaugt. Dazu sind aus theoretischen Überlegungen Feldstärken von 10...30 $\frac{\text{MV}}{\text{cm}}$ erforderlich. Der Grund dafür, dass der Durchbruch schon bei deutlich kleinerer Feldstärke auftritt, liegt in der mikroskopischen Rauigkeit der Metalloberflächen, an deren Spitzen die erforderliche Feldstärke erreicht wird.

2.1.2 Durchschlag in Gasen bei Atmosphärendruck

Der Mechanismus des Durchschlags durch einen gaserfüllten Raum bei Atmosphärendruck ist viel komplizierter als im Hochvakuum. Den Unterschied erkennt man schon daran, dass zum Beispiel zum Durchbruch von Luft nur Feldstärken von etwa $30 \frac{\text{kV}}{\text{cm}}$ nötig sind. Hier sind am Ladungstransport nicht nur Elektronen beteiligt, sondern vor allem Ionen, die dadurch entstehen, dass einem neutralen Atom durch äußere Einflüsse entweder überschüssige Elektronen zugeführt werden, oder die Zahl seiner Elektronen vermindert wird. Diesen Vorgang nennt man *Ionisation*.

Die nötige Energie zum Abtrennen von Elektronen erhält ein Atom oder Molekül durch Teilchen- oder Wellenstrahlen, das heißt durch Stoß von (massebehafteten) Teilchen, zum Beispiel Ionen oder Elektronen oder auch durch (ionisierende) elektromagnetische Strahlung.

In jedem gasförmigen Raum entsteht durch natürliche ionisierende Strahlung pro Zeiteinheit eine gewisse Menge Ionen und es kombinieren schon vorhandene Ionen wieder zu neutralen Molekülen, sodass im Mittel eine bestimmte Menge ionisierter Teilchen existiert. Dabei bleibt die Gesamtladung konstant.

Ist ein elektrisches Feld vorhanden, so erfahren die geladenen Teilchen die Kraft $\vec{F} = Q \cdot \vec{E}$ und werden beschleunigt. Ist das Feld hinreichend stark und die freie Weglänge zur Beschleunigung groß genug, so erhalten diese freien Ladungsträger so viel Energie, dass sie beim Auftreffen auf ein neutrales Atom oder Molekül Elektronen aus dem Verband lösen können und so die Zahl der freien Ladungsträger vermehren. Diese Erscheinung nennt man *Stoßionisation*.

2.1.3 Entstehung des Durchschlags

Legt man an zwei parallele Platten mit rund auslaufenden Kanten (annähernd homogenes Feld) in Luft eine Gleichspannung, die kontinuierlich von 0 ansteigt, so ergibt sich für $I = f(U)$ die in Abbildung 4.1 dargestellte Abhängigkeit.

Zunächst folgt der Strom etwa proportional der Spannung (ohmsches Verhalten), bis er einer Sättigung bei (a) zustrebt. Dann steigt der Strom trotz weiterer Spannungserhöhung eine gewisse Spanne nicht mehr an (a – b). Bei b steigt die Stromkurve wieder an, $\frac{dI}{dU}$ wird größer, bis es bei (c) zu einem Durchschlag kommt. Man folgert daraus:

Schon bei kleinen Spannungen werden Ladungsträger durch das Dielektrikum transportiert. Es fließt ein kaum messbarer Strom. Der Einfluss dieses Ladungstransportes ist so klein, dass man noch von einem elektrostatischen Feld spricht. Proportional zur Spannung steigt der Strom, bis er sich bei (a) einer Sättigungsgrenze nähert. Dann wandern praktisch alle pro Zeiteinheit entstehenden Ladungsträger, ohne vorher zu rekombinieren, bis zu den Elektroden und geben dort

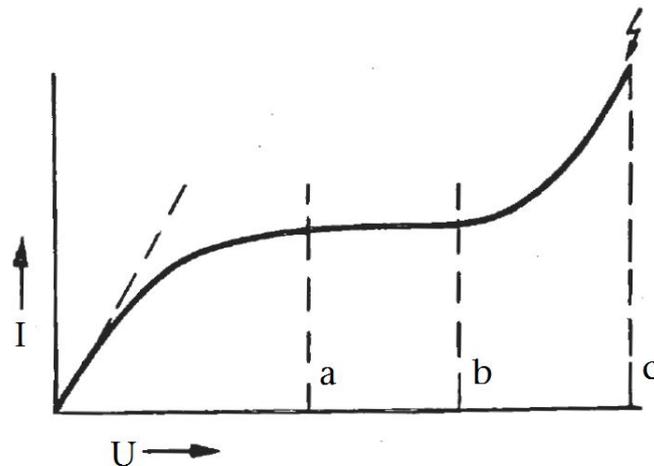


Abbildung 4.1: Der elektrische Strom durch ein Gas, $I = f(U)$ bis zum Durchschlag

ihre Ladung ab. Auch bei weiterer Spannungssteigerung kann der Strom wegen der begrenzten Anzahl der verfügbaren Ladungsträger zunächst nicht größer werden. Das ist in der Kurve als Strecke (a – b) zu erkennen.

Steigt die Spannung weiter, so erhalten die Ionen und freien Elektronen eine genügend große Geschwindigkeit und Energie, dass sie beim Stoß auf ein neutrales Molekül dieses ionisieren können. Nach dem Stoßvorgang sind mindestens zwei neue Ladungsträger vorhanden, nämlich ein weiteres Elektron und ein positives Ion. Diese führen zunächst nur zu einem Anwachsen des Stromflusses und es herrscht noch *stabiles* Gleichgewicht zwischen erzeugten und an den Elektroden abgegebenen Ladungen. Der Strom müsste sofort verschwinden, wenn die Ionisation durch fremde Strahlungsquellen aufgehoben wird. Man spricht daher von *unselbstständiger Entladung*.

Bei noch höherer Spannung ionisieren auch die durch Stoß entstandenen Elektronen und Ionen ihrerseits und vermehren die Zahl der Ladungsträger. Außerdem treffen die positiven Ionen mit so viel Energie auf die Kathode auf, dass sie aus ihr Elektronen herausschlagen. Auch diese vermehren wieder die Zahl der freien Ladungsträger im Luftraum. Bei einer bestimmten Spannung (c) kann die Entfernung der freien Ladungsträger aus dem Feldraum nicht mehr mit ihrer Vermehrung Schritt halten (labiles Gleichgewicht). Die Zahl der Ladungsträger schwillt lawinenartig über alle Maßen an und macht die Luftstrecke zu einem guten Leiter (Plasma). Es kommt entweder zu einem kurzen Funken oder einem stehenden Lichtbogen je nach Leistung der Spannungsquelle. Beim Überschreiten des labilen Gleichgewichtszustandes könnten die freien Ionisationsquellen entfallen; der Vorgang erzeugt selbst die Ladungen, die zum Durchschlag führen. Man spricht daher von einer *selbständigen Entladung*.

2.1.4 Einfluss von Spannungsform und Dauer

Legt man an die gleiche Elektrodenanordnung eine Wechselspannung von genügend hoher Frequenz, so ändern sich die Verhältnisse. Die dauernde Umpolung bewirkt, dass sich die Erscheinungen, die die Durchschlagspannung herabsetzen, nicht mehr vollkommen ausbilden können. Die Durchschlagspannung steigt also mit der Frequenz. Bei sehr hohen Frequenzen können die Ladungsträger dauernd im Feldraum pendeln und erreichen nie die Elektroden.

Es kommt nicht sofort zum Durchschlag. Durch die Bewegung entsteht eine Verlustleistung, die in Wärme umgesetzt wird. Bei wachsender Temperatur erniedrigt sich aber die Zündspannung. Wenn die Grenzfrequenz also gerade überschritten ist, und die Spannung steht einige Zeit an, so kann es doch noch zu einem Überschlag kommen. Die Zeit, die vom Anlegen der Spannung bis zum Durchschlag verstreicht, nennt man *Verzugszeit*.

Der gleiche Effekt tritt bei Prüfungen mit *Stoßspannungen* auf. Ist die Zeit, in der die Spannung ansteht, zu kurz, um den Vorgang der Stoßionisation auszulösen, so erreicht man viel höhere Werte der Durchschlagspannung als bei Prüfung mit Gleichspannung. Maßgeblich für die Durchschlagspannung bei technischen Frequenzen ist der *Scheitelwert* der Spannung, die angelegt wird, da die maximale Beschleunigung der Teilchen von der Spannungsspitze abhängt.

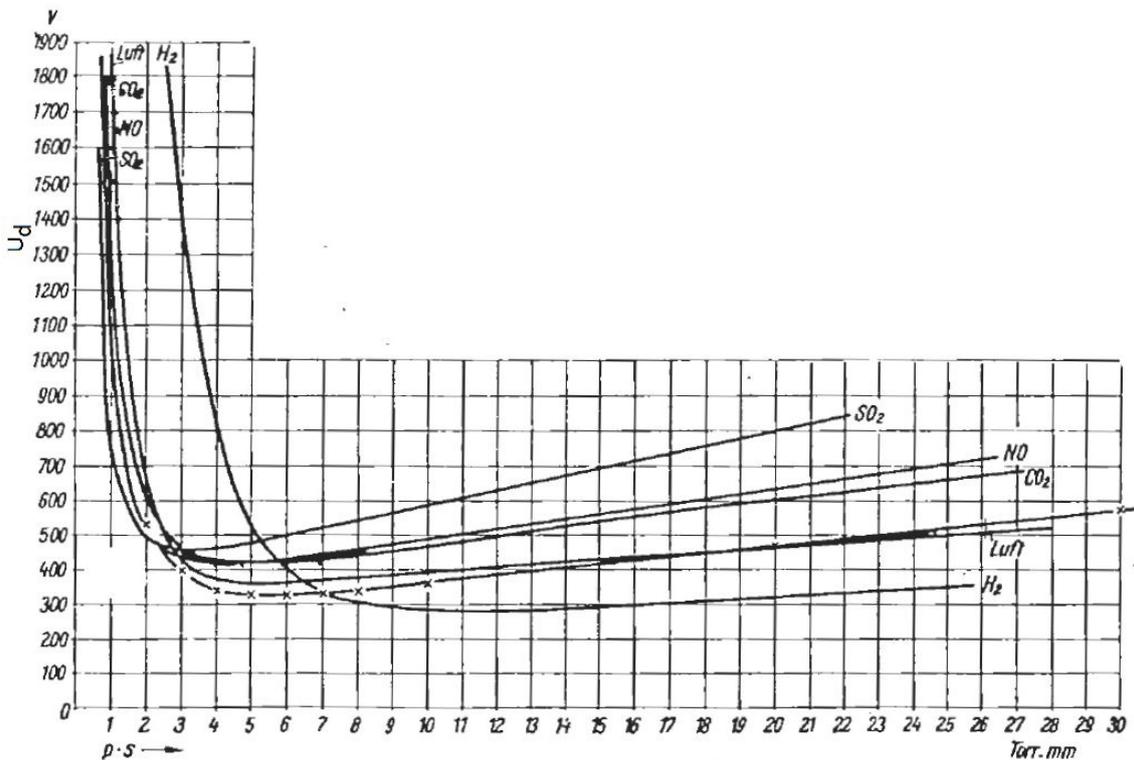
2.1.5 Paschen' sches Gesetz

Ein Elektron erhält die kinetische Energie, die es zur Stoßionisation befähigt, durch die Geschwindigkeit, auf die es im elektrischen Feld beschleunigt wird. Dazu muss es jedoch eine freie Strecke zwischen den Gasmolekülen durchlaufen. Diese freie Wegstrecke wird aber mit zunehmendem Druck wegen der höheren Gasdichte kürzer. Es folgt daraus, dass die Feldstärke höher werden muss, um den Ladungsträgern auf der freien Wegstrecke die gleiche Energie zuzuführen. Andererseits muss bei konstantem Druck die Gesamtspannung umso höher sein, je größer die Schlagweite (Elektrodenabstand) ist. Diesen Zusammenhang hat **Paschen** in dem nach ihm benannten Gesetz folgender Maßen zusammengefasst:

$$U_d = f(p \cdot s)$$

Die zu Grunde liegende (hier nicht weiter betrachtete) Funktion hat sich für kleine Werte des Produktes ausgezeichnet bewährt. Die bei höheren Drücken auftretenden Abweichungen resultieren aus den komplexen Vorgängen bei den Entladungen.

Wie aus Abbildung 4.2 ersichtlich, ist die Durchschlagspannung bei hochverdünnten Gasen sehr hoch. Mit wachsendem Druck fällt die Durchschlagspannung steil ab und nähert sich einer Minimumspannung bei ca. 3...10 Torr·mm (bei Luft etwa 5...6 Torr·mm). Technisch ist diese



Das Gesetz von Paschen, $U_d = f(p \cdot s)$, bei verschiedenen Gasen
(p [Torr], s [mm]) (Schumann)

Abbildung 4.2: Das Gesetz von Paschen bei verschiedenen Gasen (1 Torr = 1,332 mbar)

Minimumspannung deshalb interessant, weil darunter ein reiner Gasdurchbruch nicht aufrecht erhalten werden kann, das heißt bei kurzzeitiger Spannungsüberschreitung kann zwar ein Durchbruch erfolgen, er erlischt bei Spannungssenkung aber wieder sofort. Mit wachsendem Wert des Produktes $p \cdot s$ steigt die Durchschlagspannung danach wieder langsam an.

2.1.6 Kugelfunkenstrecke

Wird die Schlagweite in einer Kugelfunkenstrecke nicht größer als der Radius der Kugel, so ist die Feldstärke längs der Mittelachse, auf der die höchste Feldstärke entsteht, nahezu konstant. Die Entladung führt bei Überschreiten der Durchbruchfeldstärke praktisch ohne Verzugszeit zum Durchschlag.

Da die Durchbruchspannung somit eine feste Funktion des Abstandes und des Kugelradius ist und die Messwerte bei sauberen Kugeln nur wenig streuen, lässt sich die Kugelfunkenstrecke zur Messung von Scheitelwerten hoher Spannungen verwenden. Die Durchbruchspannungen für verschiedene Radien und Abstände sind in Eichkurven festgelegt (siehe Anhang zu Versuch H4).

Die gemessenen Werte brauchen also bei herrschendem Druck p und Temperatur ϑ nur noch auf Normalbedingungen $p_0 = 1013,25 \text{ hPa}$ und $\vartheta_0 = 20 \text{ °C}$ umgerechnet werden.

$$U'_d = U_d \cdot \frac{\vartheta_0}{\vartheta} \cdot \frac{p}{p_0} = U_d \cdot \frac{(273 + 20) \cdot p}{(273 + \vartheta) \cdot p_0} = U_d \cdot k_0 \quad \text{mit } \vartheta \text{ in } \text{°C}$$

$$p_0 = 101325 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 101325 \text{ Pa} = 1013,25 \text{ hPa} = 1,01325 \text{ bar} = 760 \text{ Torr (alte Einheit)}$$

U'_d : gemessene Durchbruchspannung (p, ϑ)

U_d : Durchbruchspannung bei Normalbedingungen (p_0, ϑ_0)

2.1.7 Spitze-Platte Funkenstrecke

Bei stark inhomogenem Feld, zum Beispiel bei kleinen Zylindern, Kugeln oder Spitzen die einer Plattenelektrode gegenüber stehen, wird an der Spitze die kritische Feldstärke schon bei viel kleineren Spannungen erreicht als an der Platte. Dann sind im Bereich der hohen Feldstärke die Zündbedingungen schon gegeben und führen zu einer Entladung. Sie lässt sich (besonders bei Spitze-Platte) als ruhiges bläuliches *Glimmen* beobachten. Wird die Spannung noch weiter gesteigert, so erfüllen weitere Teilstrecken die Zündbedingungen und es brennen aus bevorzugten Punkten pinselartige hellere und längere Leuchtbahnen hervor. Man spricht von *Büschelentladungen*. Aus diesen entwickelt sich schließlich bei weiterer Spannungserhöhung der volle Durchschlag als Funke oder Lichtbogen. Die Höhe der Durchbruchspannung hängt dabei auch von der Zeit ab, während der die Spannung ansteht, insbesondere aber vom Krümmungsradius der Spitze und von der Polarität der Anordnung.

Ähnliche Erscheinungen kann man auch überall dort beobachten, wo durch Spitzen, Kanten oder Ecken die kritische Feldstärke lokal überschritten wird. Auch Verunreinigungen der Elektroden wirken wie Spitzen, indem sie sich in Richtung der Feldlinien aufstellen und so die Feldkonzentration erhöhen.

2.2 Durchschlag in festen Stoffen

In allen elektrischen Anlagen kommt den Isolierstoffen große praktische Bedeutung zu. Neben festen Isolierstoffen, wie zum Beispiel Polyvinylchlorid (PVC), Polyethylen (PE), Pressspan und Hartpapier werden auch häufig flüssige Isolierstoffe verwendet (insbesondere Öl in Kabeln, Transformatoren, Wandlern und Kondensatoren) weil die Flüssigkeit neben der Spannungsisolierung auch zur Kühlung genutzt werden kann. Dabei ist zu beachten, dass der Durchschlag

bei Kombination von Isolierstoffen immer dort zuerst auftritt, wo zuerst die Durchbruchfeldstärke erreicht wird. Die relativen Dielektrizitätskonstanten der Isolierstoffe liegen in folgender Größenordnung:

- Öl $2 - 2,5$
- Pressspan, ölgetränkt $4 - 5$

Daher ist in Anlagen, in denen Öl mit festen Isolierstoffen als sogenanntes geschichtetes Dielektrikum kombiniert ist, auf die Spannungsfestigkeit der Transformatorenöle besonders zu achten, weil dort die höheren Feldstärken auftreten. Flüssige Isolierstoffe werden in diesem Praktikum nicht behandelt.

2.2.1 Bestimmung der Durchschlagsfestigkeit von Pressspan und Hartpapier

Bei der Bestimmung der Durchschlagsfestigkeit von festen Isolierstoffen spielen mehrere Faktoren eine Rolle wie zum Beispiel

- Materialart und -stärke
- Feuchtigkeitsgrad
- Temperatur
- Reinheitsgrad

Die Feldstärke, bei der die Kräfte auf vorhandene Ladungsträger so groß werden, dass sie zur Zerstörung des molekularen Gefüges führen, berechnet sich theoretisch zu etwa $1 \cdot 10^8 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$. Dieser Wert wird aber in der Realität erheblich unterschritten. Man spricht bei festen Isolierstoffen im Wesentlichen von zwei Arten des Durchschlags:

Ionisationsdurchschlag Hier geht man davon aus, dass die Isolierstoffe von feinsten Kanälchen durchzogen sind, in denen sich bewegliche Ladungsträger (sogenannte Gleit- und Haftionen) befinden, sei es durch gelöste Flüssigkeiten oder Gase, die bei Erreichen einer spezifischen Höchstfeldstärke schlagartig ihre Positionen verlassen und zu den Elektroden wandern. Dabei zerreißen sie praktisch den Stoff und leiten so einen rein elektrischen Durchschlag ein. [24]

Wärmelektrischer Durchschlag Ein Wärmedurchschlag liegt dann vor, wenn die angelegte Spannung nicht ausreicht, um bei gegebener Temperatur des Prüflings den Durchschlag augenblicklich herbeizuführen. Die elektrische Festigkeit sinkt bei festen Isolierstoffen mit steigender Temperatur. Da durch die dielektrischen Verluste die Temperatur steigt, kann sich folgender Prozess entwickeln: Ist die entstehende Wärmemenge größer als die abgeführte, so ergibt sich

eine Temperatursteigerung, mit der im Allgemeinen auch eine Erhöhung der Verluste verbunden ist, wodurch sich der Leistungsumsatz weiter steigert, bis die Durchschlagsfestigkeit den kritischen Wert unterschreitet. Wenn die Durchschlagsfestigkeit auf den Wert der angelegten Spannung abgesunken ist, tritt der elektrische Durchschlag ein.

Diese Vorgänge spielen sich je nach der Höhe der anstehenden Spannung mehr oder weniger schnell ab. Beide Formen des Durchschlags können sich auch überlagern.

Beide Theorien erklären auch, warum die Durchschlagsfestigkeit bei Anlegen von Wechselspannung kleiner ist, als bei Prüfung mit Gleichspannung. Das elektrische Wechselfeld steigert einerseits die Beweglichkeit der Gleitonen, welche die vorhandenen Kanäle durch ihr Schwingen erweitern und so den Isolationsdurchschlag begünstigen. Andererseits erhöht die schwingende Bewegung der molekularen Dipole die Temperatur des Prüflings und damit die elektrischen Verluste und begünstigt so den wärmeelektrischen Durchschlag.

Die genauen Prüfbestimmungen für Hartpapier finden sich in VDE 0318 und die für Pressspan in VDE 0315. Die dort vorgeschriebenen Verfahren erfordern aber einen beträchtlichen Zeitaufwand, unter anderem für das Tränken in Öl und das anschließende Trocknen, sodass wir im Rahmen des Praktikums von der genauen Einhaltung dieser Vorschriften absehen müssen.

3 Aufgaben und Hinweise zum Versuchstag

3.1 Vorbereitende Aufgaben

Bevor Versuche durchgeführt werden können, müssen diese vorbereitet werden. Ausgehend von einer zu untersuchenden Fragestellung beinhaltet die Planung folgende Punkte:

1. benötigte Materialien und Ressourcen
2. Planung des Aufbaus des Versuchs
3. Planung der Durchführung des Versuchs
4. Abschätzung von einzustellenden Werten und zu erwarteten Werten
5. Abschätzung möglicher Probleme und Risiken sowie möglicher Lösungen
6. Vorbereitung von Messwerttabellen o.ä.

Bereiten Sie bis zum Versuchstag folgende Versuche im elektronischen Laborbuch vor.

3.1.1 Durchschlag in gasförmigen Stoffen

In diesem Versuch soll die Durchschlagsspannung in gasförmigen Stoffen an einer Funkenstrecke untersucht werden. Dafür sollen zuerst an einer Spitze-Platte Funkenstrecke bei folgenden Bedingungen die auftretenden Effekte sowie die notwendigen Spannungen in Abhängigkeit des Abstands untersucht werden:

1. Wechselspannung
2. Gleichspannung (positive Spitze) mit und ohne Schirm
3. Gleichspannung (negative Spitze) mit und ohne Schirm

Der Schirm (Papier) ist dabei zwischen der Spitze und der Platte anzubringen. Überlegen Sie sich auch, wo Sie welche Größe messen müssen. Außerdem ist vor dem Gleichrichten ein Schutzwiderstand mit $10\text{ M}\Omega$ einzubauen.

Anschließend ist die Abhängigkeit der Durchschlagsspannung abhängig vom Abstand an einer Kugelfunkenstrecke zu untersuchen. Der Aufbau ist so zu wählen, dass die obere Kugel der

Funkenstrecke positiv ist. Die gemessenen Werte sind im Anschluss an den Versuch auf Normbedingungen umzurechnen.

3.1.2 Durchschlag in festen Stoffen

Mit einer Zylinder-Platte-Messstrecke ist die Durchschlagspannung von Hartpapier (0,5 mm) und Pressspan (0,5 mm) bei Wechselfspannung (Schutzwiderstand 10 M Ω) zu bestimmen. Dabei ist der Durchschlagsaugenblick mit einem Oszillographen zu beobachten. Beachten Sie, dass auch bei gleichem Material unterschiedlich hohe Durchschlagspannungen zu erwarten sind. Desweiteren verändert sich die Durchschlagfestigkeit des Materials, je länger eine hohe Spannung anliegt.

Dieser Effekt soll für Hartpapier näher untersucht werden. Dafür ist die Zeit bis zum Durchschlag in Abhängigkeit der anliegenden Spannung zu untersuchen. Schätzen Sie vorab die Dauer des Versuchs ab, wenn es bei 90 % der Durchschlagspannung 1 min und bei 80 % der Durchschlagspannung 8 min bis zum Durchschlag dauert.

3.2 Versuchsdurchführung

3.2.1 Durchschlag in gasförmigen Stoffen

Erklären Sie Ihre Planungen vorab den Betreuern. Erst mit deren Zustimmung können die Versuche durchgeführt werden.

1. Bauen Sie die Versuchsschaltungen gemäß Ihrer Planungen auf.
2. Führen Sie die von Ihnen geplanten Versuche durch und vergleichen Sie diese mit Ihren Erwartungen.
3. Sollten Sie Abweichungen feststellen, überlegen Sie, ob ein Fehler im Aufbau vorliegt.

Alle Ergebnisse und ggf. Änderungen sind im Laborbuch festzuhalten.

3.2.2 Durchschlag in festen Stoffen

Erklären Sie Ihre Planungen vorab den Betreuern. Erst mit deren Zustimmung können die Versuche durchgeführt werden.

1. Bauen Sie die Versuchsschaltungen gemäß Ihrer Planungen auf.
2. Führen Sie die von Ihnen geplanten Versuche durch und vergleichen Sie diese mit Ihren Erwartungen.
3. Sollten Sie Abweichungen feststellen, überlegen Sie, ob ein Fehler im Aufbau vorliegt.

Alle Ergebnisse und ggf. Änderungen sind im Laborbuch festzuhalten.

3.3 Versuchsauswertung

3.3.1 Durchschlag in gasförmigen Stoffen

Tragen Sie sowohl die gemessene Spannung an der Kugelfunkenstrecke als auch die Durchschlagspannung umgerechnet auf Normbedingungen in ein Diagramm abhängig vom Abstand ein. Beschreiben und erklären Sie die Abweichungen.

3.3.2 Durchschlag in festen Stoffen

Tragen Sie für das Hartpapier die Zeit bis zum Durchschlag in ein Diagramm über die anliegende Durchschlagspannung auf. Bestimmen Sie eine Fit-Funktion und berechnen Sie die Zeit bis zum Durchschlag bei einer Spannung von 20 % der Durchschlagspannung.

3.4 Weiterführende Aufgaben

3.4.1 Durchschlag in gasförmigen Stoffen

1. Warum liegt die Durchschlagspannung bei einseitig geerdeter Kugelfunkenstrecke tiefer als bei völlig ungeerdeter Strecke?
2. Inwiefern wird bei den Pressgaskondensatoren das Gesetz von Paschen genutzt?
3. Welche Geschwindigkeit erhält ein Elektron in einem homogenen Feld von $10 \frac{\text{kV}}{\text{cm}}$ auf einer Strecke von $1 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$?

Elektronenmasse: $m_e = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$; Elementarladung: $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Literatur zu Versuch H4

- [24] P. Böning, *Kleines Lehrbuch der elektrischen Festigkeit*. Karlsruhe: Verlag G. Braun, 1955.
- [25] A. Küchler, “Elektrische Festigkeit,” in *Hochspannungstechnik: Grundlagen - Technologie - Anwendungen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017, S. 141–268, ISBN: 978-3-662-54700-7. DOI: [10.1007/978-3-662-54700-7_3](https://doi.org/10.1007/978-3-662-54700-7_3). Adresse: https://doi.org/10.1007/978-3-662-54700-7_3.
- [26] —, “Isolierstoffe,” in *Hochspannungstechnik: Grundlagen - Technologie - Anwendungen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017, S. 301–358, ISBN: 978-3-662-54700-7. DOI: [10.1007/978-3-662-54700-7_5](https://doi.org/10.1007/978-3-662-54700-7_5). Adresse: https://doi.org/10.1007/978-3-662-54700-7_5.
- [27] G. Hilgarth, “Gasförmige Isolierstoffe,” in *Hochspannungstechnik*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1997, S. 66–110, ISBN: 978-3-322-86788-9. DOI: [10.1007/978-3-322-86788-9_2](https://doi.org/10.1007/978-3-322-86788-9_2). Adresse: https://doi.org/10.1007/978-3-322-86788-9_2.
- [28] —, “Feste Isolierstoffe,” in *Hochspannungstechnik*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1997, S. 111–127, ISBN: 978-3-322-86788-9. DOI: [10.1007/978-3-322-86788-9_3](https://doi.org/10.1007/978-3-322-86788-9_3). Adresse: https://doi.org/10.1007/978-3-322-86788-9_3.
- [29] M. Beyer, W. Boeck, K. Möller und W. Zaengl, “Gasförmige Isolierstoffe,” in *Hochspannungstechnik: Theoretische und praktische Grundlagen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1986, S. 81–144, ISBN: 978-3-642-61633-4. DOI: [10.1007/978-3-642-61633-4_8](https://doi.org/10.1007/978-3-642-61633-4_8). Adresse: https://doi.org/10.1007/978-3-642-61633-4_8.
- [30] —, “Flüssige und feste Isolierstoffe,” in *Hochspannungstechnik: Theoretische und praktische Grundlagen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1986, S. 145–225, ISBN: 978-3-642-61633-4. DOI: [10.1007/978-3-642-61633-4_9](https://doi.org/10.1007/978-3-642-61633-4_9). Adresse: https://doi.org/10.1007/978-3-642-61633-4_9.
- [31] A. Roth, “Die festen Isolierstoffe der Hochspannungstechnik,” in *Hochspannungstechnik*. Vienna: Springer Vienna, 1959, S. 43–151, ISBN: 978-3-7091-3903-5. DOI: [10.1007/978-3-7091-3903-5_2](https://doi.org/10.1007/978-3-7091-3903-5_2). Adresse: https://doi.org/10.1007/978-3-7091-3903-5_2.

Anhang zu Versuch H4

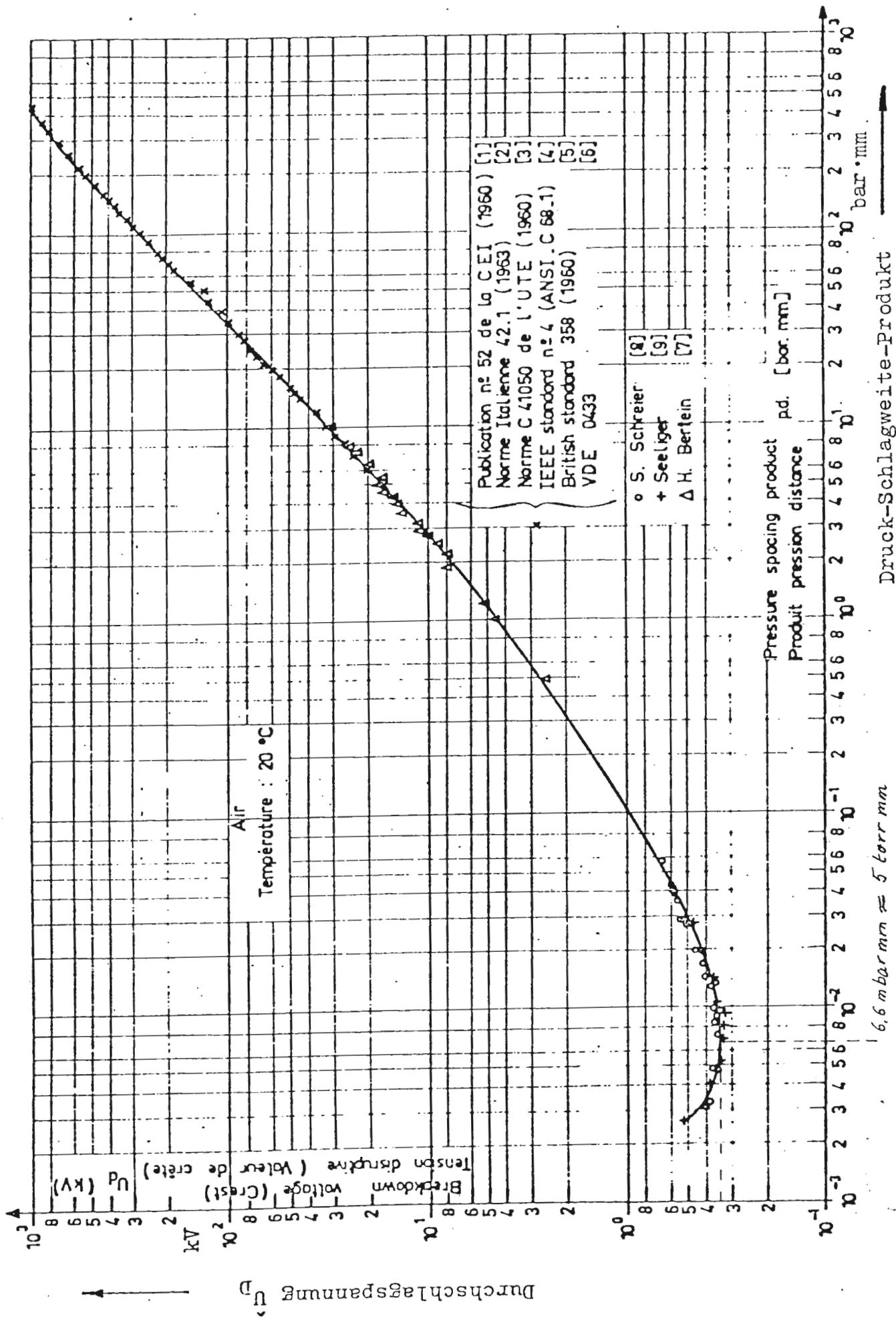


Bild 1: Abhängigkeit der Durchschlagsspannung \hat{U}_D von dem Produkt aus Druck p und Schlagweite d für Luft bei 20 °C (Paschenkurve) $1 \text{ torr} = 1,333 \text{ mbar}$

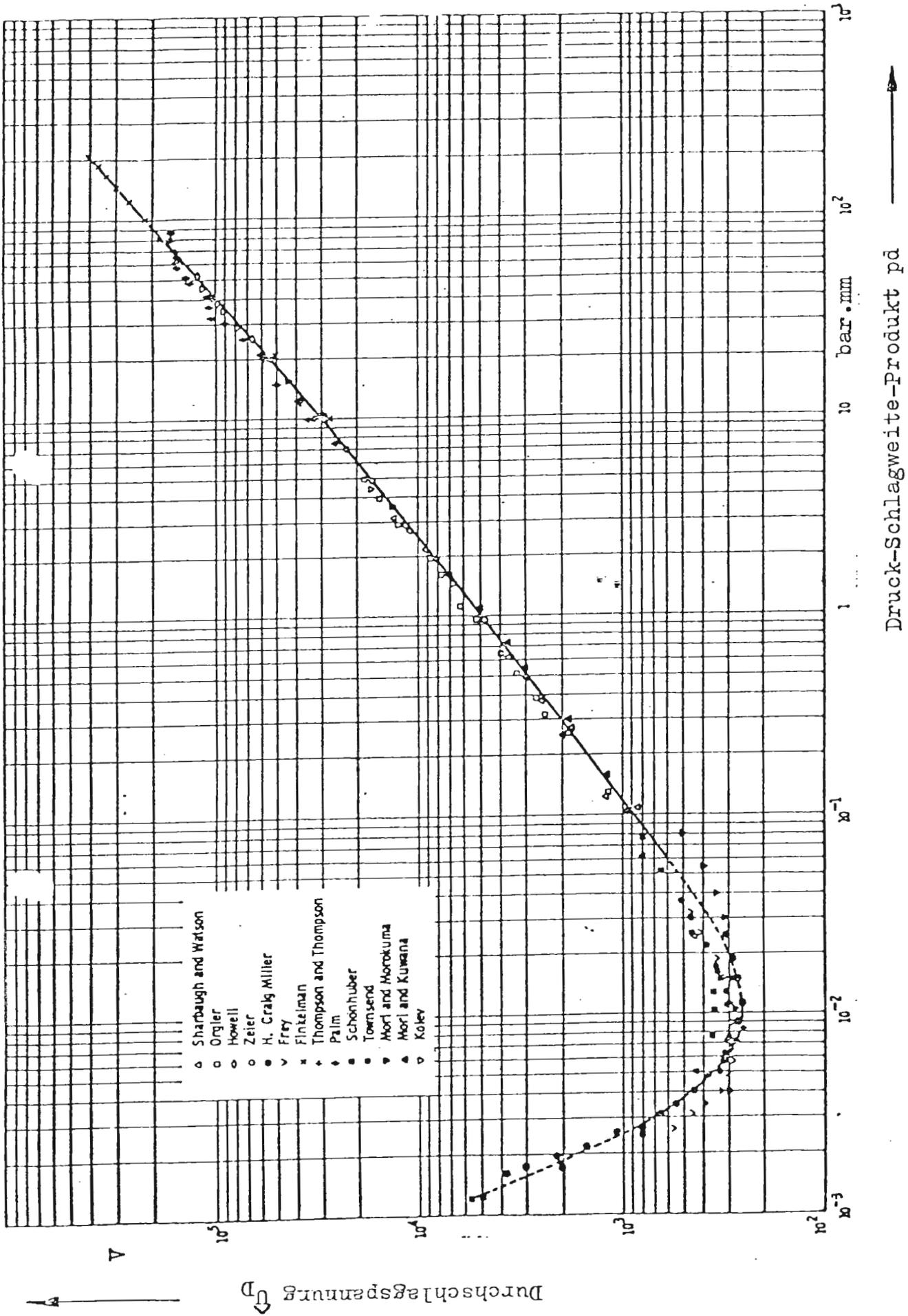
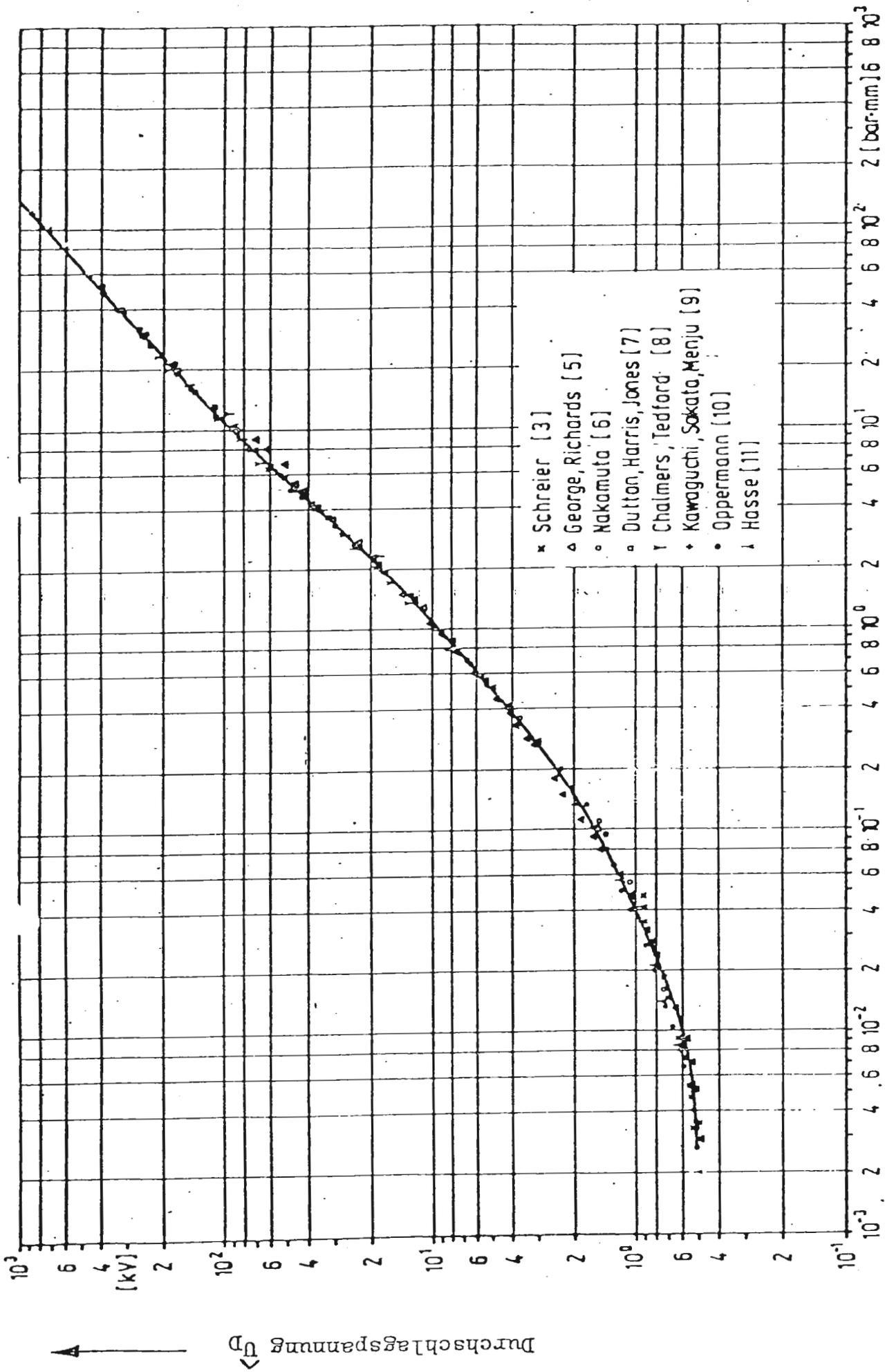


Bild 2: Abhängigkeit der Durchschlagspannung $\hat{\sigma}_D$ von dem Produkt aus Druck p und Schlagweite d für Stickstoff bei 25 °C (Paschenkurve)



Druck-Schlagweite-Produkt $p \cdot d$

Bild 3: Abhängigkeit der Durchschlagsspannung \hat{U}_D von dem Produkt aus Druck p und Schlagweite d für SF₆ bei 25 °C (Paschenkurve)

Eigenschaftswerte verschiedener fester Isolierstoffe

	rel. Dielektrizitätskonstante ϵ_r	Verlustfaktor bei 50 Hz $\tan \delta$ $\times 10^{-4}$	Durchschlagfestigkeit E_d kV/cm	spez. Durchgangswiderstand ρ $\Omega \cdot \text{cm}$	maximale Anwendungstemperatur T_{max} $^{\circ}\text{C}$
Keramische Isolierstoffe					
Porzellan	5,0-6,5	170-320	250-380	$10^{11}-10^{12}$	>1000
Steatit	5,5-6,5	10-40	200-450	$10^{11}-10^{12}$	>1000
Glas	4-5	6-45	250-420	$10^{13}-10^{14}$	230
Glimmer	6,5-8,0	4-50	400	$10^{15}-10^{17}$	500-600
Hartpapiere					
Platten	5-6,5	300-1500	180-250	10^{10}	120
Rohre	4	200-400	200-250	10^{10}	120
Weichpapier (Ölpapier)	3,6	20-40	300	10^{16}	60
Thermoplaste					
Plexiglas	3-3,6	200-700	500	10^{15}	60-80
Polystyrol	2,5-2,6	1-3	500	$10^{17}-10^{18}$	65
Polyvinylchlorid (PVC)	5,3	500-1000	200-500	10^{14}	70
Polyäthylen (PE)	2,3	1-4	300-400	10^{17}	70
Polytetrafluoräthylen (PTFE)	2	1-3	200-350	10^{17}	280
Duroplaste (Gießharze)					
ungemagert	3,5	30-80	120-200	10^{15}	100-120
gemagert	4	60-200	120-200	10^{15}	100-120

Alle elektrischen Werte gelten bei Raumtemperatur; E_d und ϵ_r bei 50 Hz

Die Höhe A des Durchschlagpunktes P über dem geerdeten Boden soll zwischen $7 \cdot D$ und $9 \cdot D$ für kleine Kugeldurchmesser und zwischen $3 \cdot D$ und $4 \cdot D$ für große Kugeldurchmesser liegen. Die genaue Abstufung kann der Norm entnommen werden [142], [143].

Der strombegrenzende Vorwiderstand R_V wirkt auch als Schutz gegen transiente Überspannungen, z.B. infolge von Entladungen an anderen Stellen des Prüfkreises. Er ist so zu dimensionieren, dass die Spannung über der Kapazität der Kugelfunkenstrecke nicht nennenswert herabgesetzt wird. Ihre Kapazität kann mehrere 10 pF betragen.

Anmerkung: Die Vorwiderstandswerte sollen für betriebsfrequente Wechselspannung und für Gleichspannung zwischen 0,1 MΩ und 1 MΩ liegen. Bei höheren Frequenzen und bei Stoßspannungen müssen kleinere Widerstände gewählt werden. Für die Bedämpfung von Schwingungen in Stoßkreisen sind i.d.R. einige 100 Ω ausreichend, sie sollen 500 Ω (und 30 μH) nicht übersteigen.

Der besondere Vorteil der Kugelfunkenstrecke liegt in ihrer einfachen und universellen Anwendbarkeit. Sie eignet sich für die Bestimmung von **Scheitelwerten** bei **Gleichspannung**, **Wechselspannung**, sowie **Schalt** - und

Tabelle 6.3.1-1: Scheitelwerte der 50 %-Durchschlagspannung von einpolig geerdeten Kugelfunkenstrecken in kV für verschiedene Kugeldurchmesser D und Schlagweiten d bei Gleich-, Wechsel- und negativer Stoßspannung (linke Spalte) sowie positiver Stoßspannung (rechte Spalte) unter atmosphärischen Normalbedingungen ($T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $p = 1013 \text{ mbar} = 1013 \text{ hPa} = 760 \text{ Torr}$).

Die Stoßspannungswerte gelten für Rückenzeiten größer oder gleich $50 \text{ } \mu\text{s}$, der Polaritätseffekt bei positiver Stoßspannung ist durch kursive Zahlen gekennzeichnet (vgl. Anmerkung im Text). Die fett gedruckten Zahlen entsprechen etwa den Werten des homogenen Feldes und gelten auch für größere Kugeldurchmesser D . Die Messunsicherheiten werden bei Wechsel- und Stoßspannung für $d < D/2$ mit $\pm 3 \%$ und bei Gleichspannung für $d < 0,8 \cdot D/2$ mit $\pm 5 \%$ angenommen, die in Klammern gesetzten Werte weisen größere, ungeklärte Streuungen auf.

d cm	$D = 5 \text{ cm}$		$D = 10 \text{ cm}$		$D = 15 \text{ cm}$		$D = 25 \text{ cm}$		$D = 50 \text{ cm}$		$D = 75 \text{ cm}$		$D = 100 \text{ cm}$		d cm					
	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim							
0,5	17,4	17,4	16,8	16,8											0,5					
1	32,0	32,0	31,7	31,7											1					
1,5	45,5	46,2	45,5	45,5											1,5					
Bereich mit nahezu homogenem Feld																				
2	57,5	59,5	59,0	59,0											2					
2,4	65,5	69,0	69,5	70,0	70,0	70,0									2,4					
3	(75,5)	(81,0)	84,0	85,5	85,5	85,5	86,0	86,0							3					
$\hat{U}_{d50(0)}$ kV																				
4	(88,5)	(97,5)	105	109	110	111	112	112							4					
5			123	130	133	136	137	138	138	138					5					
6			(138)	(148)	152	158	161	163	164	164					6					
7			(150)	(163)	169	178	184	187	189	189	190	190			7					
8					(185)	(196)	206	211	214	214	215	215			8					
9					(198)	(212)	226	233	239	239	240	240	241	241	9					
10							244	254	263	263	265	265	266	266	10					
12					(209)	(226)	275	291	309	311	315	315	318	318	12					
14					(229)	(249)	(302)	(323)	353	357	363	363	366	366	14					
16	Bereich mit erheblichen Streuungen und extern beeinflusstem Feld							(326)	(350)	392	402	410	411	414	414	16				
18								(347)	(374)	429	442	453	458	462	462	18				
20								(366)	(395)	460	480	492	505	510	510	20				
24										515	540	565	585	595	600	24				
30												(585)	(620)	665	695	710	725	30		
40												(670)	(715)	(800)	(835)	875	900	40		
50	Ausführlichere Tabellen finden sich in den einschlägigen Normen [142], [143]											(895)	(940)	1010	1040	50				
60																(970)	(1020)	(1110)	(1150)	60
70																		(1200)	(1240)	70