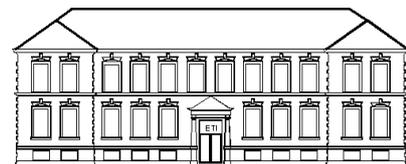


Energietechnisches Praktikum



Transiente Vorgänge in der Hochspannungstechnik



ETI

Stand: 11.10.2017

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Begriffe.....	4
2.1	Begriffserklärungen zur Blitzstoßspannung.....	4
2.1.1	Allgemeine Begriffe.....	4
2.1.2	Begriffe für abgeschnittene Stoßspannungen.....	6
2.2	Genormte Blitzstoßspannung.....	6
2.2.1	Behandlung von Überschwingungen nach DIN EN 60060-1:2011-10	7
2.3	Schaltstoßspannungen.....	8
3	Schaltungstechnische Grundlagen.....	10
3.1	Erzeugung von Stoßspannung.....	10
3.2	Berechnung der Stoßschaltung.....	12
3.3	Vervielfacherschaltung nach Marx	13
4	Der Stoßdurchschlag.....	15
4.1	Stoßkennlinien	15
4.2	Zeitlicher Entladungsaufbau beim Stoßdurchschlag	16
4.3	Das Spannungs-Zeit-Flächenkriterium (Flächen-zeitgesetz).....	17
5	Grundlagen von Wanderwellenvorgängen	20
6	Messung von Stoßspannungen.....	24
6.1	Messung mit dem Speicheroszilloskop	24
6.2	Ankopplung des Oszilloskops an den Teiler.....	25
6.3	Elektromagnetische Verträglichkeit	27
7	Literatur.....	30
8	Fragen.....	31
1	Stoßspannungen.....	32
1.1	Erzeugung einer 1,2/50-Stoßspannung.....	33
1.2	Erzeugung von Stoßspannungen unterschiedlicher Steilheit.....	35
1.3	Stoßkennlinien	36
2	Wanderwellen auf Leitungen.....	39

1 Einleitung

Die Rentabilität elektrischer Anlagen steigt mit dem Grad ihrer Verfügbarkeit. Im Hinblick auf geringe Ausfallzeiten genügt es daher nicht, die Isolation elektrischer Anlagen nur für die Nennspannung auszulegen, da gelegentlich kurzzeitig wesentlich höhere Spannungen auftreten können, die dann zur Zerstörung des Betriebsmittels führen würden. Diese Überspannungen haben verschiedenen Ursprung:

- **Innere Überspannungen** bzw. **Schaltüberspannungen** entstehen durch Schalthandlungen in der Anlage selbst.
- **Äußere Überspannungen** oder auch **atmosphärische Überspannungen** entstehen durch atmosphärische Entladungen (Blitzschlag).
- Unter (very) **Fast Transients** versteht man (sehr) schnell veränderliche Ausgleichsvorgänge in gasisolierten Schaltanlagen, die durch Überschläge und Schaltvorgänge ausgelöst werden.

Bei der Beschreibung solcher schnellveränderlicher Vorgänge sind die Bedingungen für eine quasistationäre Betrachtungsweise der Feldverhältnisse nicht mehr erfüllt. Rasche Spannungs- und Stromänderungen breiten sich auf Leitungen als leitungsgebundene Wanderwellen aus. Durch Reflexionsstellen kommt es im Zuge der Wellenausbreitung zu einer Vielzahl von Spannungsüberlagerungen und Ausgleichsvorgängen. Dies führt wiederum zu transienten Beanspruchungen der Isolation der betroffenen Betriebsmittel.

Im Allgemeinen ist es nicht möglich, die Isolation einer Anlage so auszuführen, dass sie allen äußeren Überspannungen standhält. Diese müssen dann mit Hilfe von Überspannungsableitern wie Varistoren oder Schutzfunkenstrecken auf ein zulässiges Maß begrenzt werden.

Um die Isolation von Betriebsmitteln auf ihre Widerstandsfähigkeit gegenüber transienten Überspannungen zu überprüfen, werden vor der Erstinbetriebnahme im Rahmen von Stück- oder Typprüfungen der Betriebsmittel im Labor unter anderem Stoßspannungsprüfungen vorgenommen.

2 Begriffe

In den aktuellen Ausgaben der Normen der Hochspannungs-Prüftechnik

- DIN EN 60060-1 / VDE 0432-1 2011:10
Allgemeine Festlegungen und Prüfbedingungen
- DIN EN 60060-2 / VDE 0432-2 2011:10
Messsysteme

sind unter anderem die Anforderungen an für Prüfzwecke gültige Stoßspannungen festgelegt und Einrichtungen zur normgerechten Messung von Stoßspannungen beschrieben. Im Folgenden werden daraus die wichtigsten Begriffe und Bestimmungsgrößen angegeben.

Es sei darauf hingewiesen, dass obenstehende Normen für die Stirnzeit die Abkürzung T_1 und für die Rückenhalbwertszeit die Bezeichnung T_2 verwenden. Im Rahmen des Praktikumsversuchs werden jedoch für Blitzstoßspannungen die eingängigeren Bezeichnungen T_s und T_r aus früheren Ausgaben beibehalten.

2.1 Begriffserklärungen zur Blitzstoßspannung

2.1.1 Allgemeine Begriffe

Eine **Stoßspannung** ist eine aperiodische, transiente Spannung einheitlicher Polarität, die ohne wesentliche Schwingungen rasch auf einen Höchstwert ansteigt und dann langsam auf Null abfällt. Sie wird durch ihren Scheitelwert, ihre Polarität und ihre Zeitkennwerte (Stirnzeit, Rückenhalbwertszeit und bei abgeschnittenen Stoßspannungen die Zeit bis zum Abschneiden) gekennzeichnet.

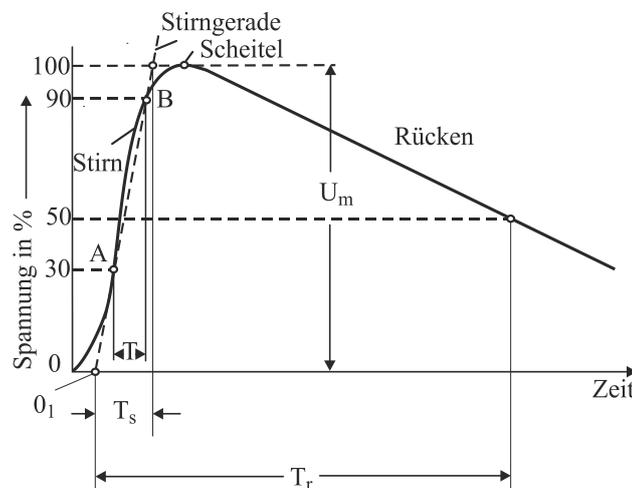


Bild 2.1: Volle Stoßspannung; 0_1 = Beginn der Stoßspannung; T_s = Stirnzeit; U_m = Scheitelwert, T_r = Rückenhalbwertszeit

Unter einer **vollen Stoßspannung** versteht man eine Stoßspannung, bei der der gewünschte Spannungsscheitelwert erreicht wird, siehe Bild 2.1. Ob nach dem Scheitel ein Durch- oder Überschlag auftritt spielt keine Rolle.

Eine **abgeschnittene Stoßspannung** ist eine Stoßspannung, die plötzlich zusammenbricht. Der Spannungszusammenbruch kann im Rücken, im Scheitel oder in der Stirn erfolgen. Das Abschneiden kann mit einer äußeren Abschneidefunkenstrecke bewerkstelligt werden oder durch eine Entladung in der inneren bzw. äußeren Isolation eines Prüflings auftreten (Bild 2.2).

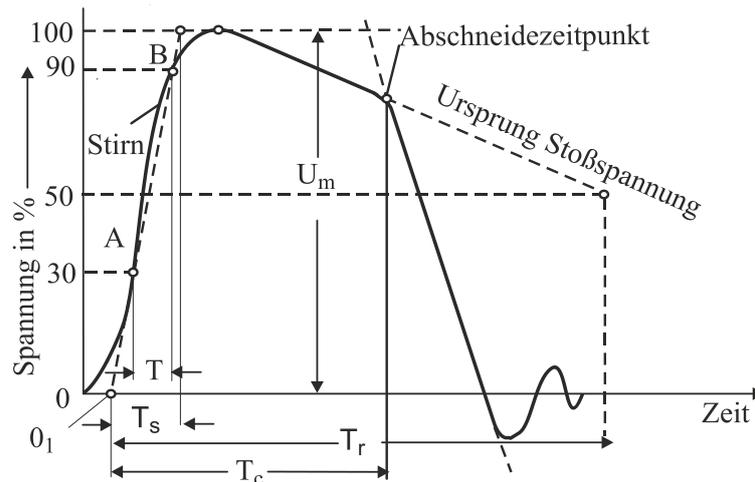


Bild 2.2: Abgeschnittene Stoßspannung; T_c = Zeit bis zum Abschneiden bzw. Durchschlag

Bei Blitzstoßspannungen ohne überlagerte Schwingungen gilt der Scheitelwert, der Höchstwert der vollen oder abgeschnittenen Stoßspannung, als **Betrag der Prüfspannung** U_m . Bei auftretenden Oszillationen und Überschwingen wird der Wert der Prüf-Blitzstoßspannung gemäß Kapitel 2.2.1 bestimmt.

Die **Stirn** einer Stoßspannung ist ihr ansteigender Teil.

Die **Stirnzeit** T_s ist die mit 1,67 multiplizierte Zeitspanne T , in der die Stoßspannung vom 0,3-fachen auf den 0,9-fachen Betrag ihres Scheitelwertes ansteigt (siehe die Punkte A und B im Bild 2.1). Enthält der Stirnverlauf überlagerte Schwingungen, so sind die Punkte A und B mit Hilfe einer Mittelkurve, die durch die Schwingung gelegt wird, zu bestimmen.

Als **Stoßbeginn** 0_1 einer Stoßspannung gilt derjenige Punkt auf der Zeitachse, der um $0,5 T$ vor dem zu Punkt A gehörenden Zeitpunkt liegt. In Diagrammen mit linearem Zeitmaßstab kann dieser Punkt ermittelt werden, indem man eine Gerade durch die Punkte A und B mit der Zeitachse schneidet.

Der **Rücken** einer Stoßspannung ist der auf den Scheitelwert folgende, abfallende Teil.

Die **Rückenhalfwertzeit** T_r einer vollen Stoßspannung ist die Zeitspanne vom Beginn 0_1 der Stoßspannung bis zu demjenigen Zeitpunkt, bei dem die Spannung im Rücken auf die Hälfte des Scheitelwertes gesunken ist. Zur Kennzeichnung einer im Rücken abgeschnittenen Stoßspannung gehört auch die Rückenhalfwertzeit der Ursprungs-Stoßspannung.

2.1.2 Begriffe für abgeschnittene Stoßspannungen

Der **Abschneidezeitpunkt** einer Stoßspannung ist der Zeitpunkt, bei dem der rasche Spannungszusammenbruch, der das Abschneiden charakterisiert, erstmals auftritt.

Die **Abschneidezeit** T_c bis zum Abschneiden einer Stoßspannung ist die Zeitspanne vom Beginn der Stoßspannung 0_1 bis zum Abschneidezeitpunkt.

Eine **Keilstoßspannung** ist eine Stoßspannung, die mit nahezu konstanter Steilheit ansteigt, bis sie durch die Abschneidefunkenstrecke bzw. einen Durchschlag in der Stirn abgeschnitten wird (Bild 2.3). Die Spannungsform ist definiert durch ihren Scheitelwert U , die Stirnzeit T_c sowie die virtuelle Steilheit

$$S = \frac{U}{T_c} \quad [S] = \frac{\text{kV}}{\mu\text{s}}$$

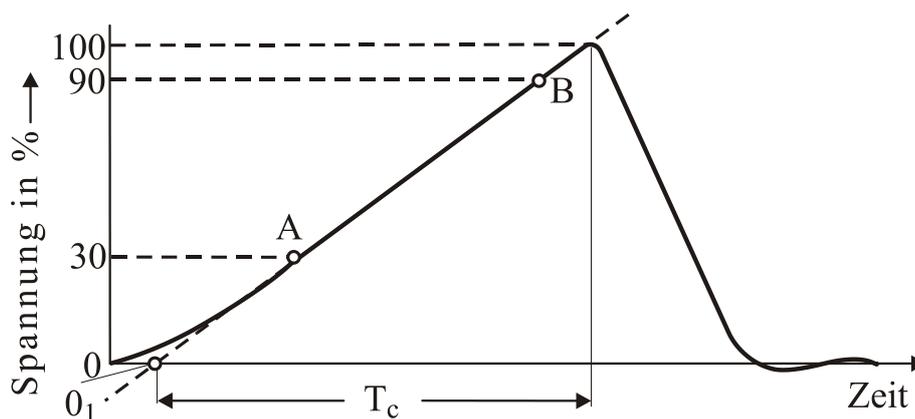


Bild 2.3: Keilstoßspannung

2.2 Genormte Blitzstoßspannung

Die genormte Blitzstoßspannung ist eine vollständige Stoßspannung mit einer Stirnzeit von $1,2 \mu\text{s}$ und einer Rückenhalfwertzeit von $50 \mu\text{s}$. Sie wird als *1,2/50-Stoßspannung* bezeichnet.

Gemäß den genannten Normen sind bei der Durchführung von Stoßspannungsprüfungen folgende Abweichungen zwischen den geforderten Werten und der tatsächlichen Höhe und dem tatsächlichen Verlauf der Stoßspannung am Prüfling erlaubt, sofern durch das technische Komitee für das entsprechende Betriebsmittel keine anderen Festlegungen getroffen wurden:

- Scheitelwert $\pm 3 \%$
- Stirnzeit $\pm 30 \%$
- Rückenhalbwertzeit $\pm 20 \%$
- rel. Überschwinger $+ 10 \%$

Wie in Bild 2.4 dargestellt können bei der Erzeugung der 1,2/50-Stoßspannung Oszillationen und Überschwingungen im Scheitel des Impulses auftreten.

2.2.1 Behandlung von Überschwingungen nach DIN EN 60060-1:2011-10

Die Bestimmung des Scheitelwerts und der Zeitparameter bei Blitzstoßspannung wurde in der aktuellen Fassung der relevanten Norm DIN EN 60060-1:2011-10 überarbeitet. Speziell bei auftretenden Überschwingungen ergeben sich völlig andere Werte im Vergleich zur DIN IEC 60060-1:1994. Folgende Vorgehensweise wird in der aktuellen Norm zur Bestimmung der Stoß-Parameter empfohlen:

- Recorded Curve - Erfassung der Stoßkurve mit einem A/D-Wandler (Anforderungen an die Hardware siehe IEC 61083-1)
- Base Curve - Ermittlung der ideellen überschwingungsfreien Stoßkurve mittels „Curve-Fit“ Algorithmen gemäß der Funktion $u_d(t) = U \left(e^{-\frac{t-t_d}{\tau_1}} - e^{-\frac{t-t_d}{\tau_2}} \right)$
- Residual Curve - Abweichung zwischen Recorded und Base Curve
- Test Voltage Function - Frequenzabhängige Filter-Funktion, $K(f) = \frac{1}{1+2,2 \cdot f^2}$
- Filtered Residual - Mit $K(f)$ gefilterte Residual Curve
- Test Voltage Curve - Base Curve + Filtered Residual
- Überschwinger, β - Amplitude (Recorded Curve) – Amplitude (Base Curve)
- rel. Überschwinger, β' - Verhältnis β / U_t
- Stoßparameter - Bestimmung von T_1 , T_2 und U_t an Test Voltage Curve

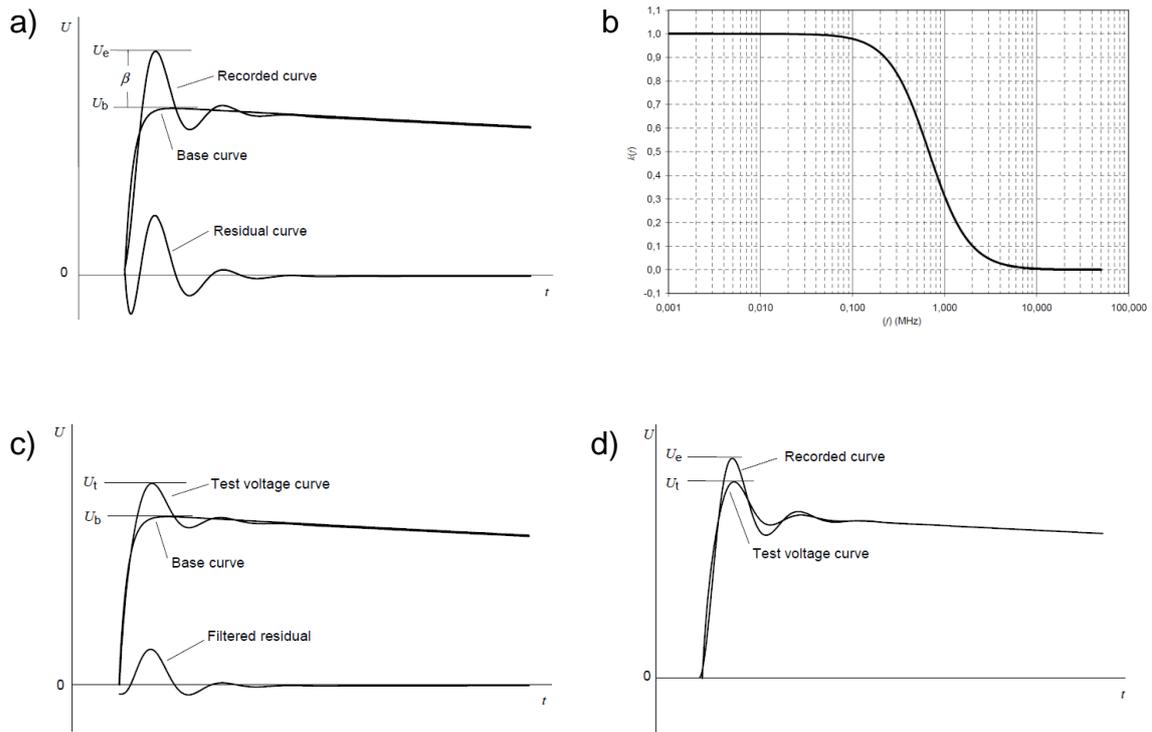


Bild 2.4: Überschwingungsbehandlung nach DIN EN 60060-1:2011-10

- Zerlegung der erfassten Recorded Curve
- Test Voltage Function, $K(f)$
- Zusammensetzung der Test Voltage Curve
- Vergleich zwischen erfasster und gefilterter Kurve

2.3 Schaltstoßspannungen

Die Unterscheidung zwischen Blitz- und Schaltstoßspannungen erfolgt auf der Grundlage der Stirnzeit. Stoßspannungen mit Stirnzeiten bis zu $20 \mu\text{s}$ werden als Blitzstoßspannungen, Stoßspannungen mit längeren Stirnzeiten werden als **Schaltstoßspannungen** bezeichnet. Allgemein werden Schaltstoßspannungen ebenfalls durch die wesentlich längere Gesamtdauer gegenüber Blitzstoßspannungen charakterisiert.

Der **Scheitelwert** entspricht dem Maximalwert der Spannung.

Die **Scheitelzeit** T_p wird wie folgt ermittelt:

- $T_p = K T_{AB}$
- $K = 2,42 - 3,08 \cdot 10^{-3} T_{AB} + 1,51 \cdot 10^{-4} T_2$ mit $[T_{AB}] = [T_d] = \mu\text{s}$

Die **Rückenthalbwertzeit** T_2 der Schaltstoßspannung ist der Zeitraum zwischen dem tatsächlichen Beginn und dem Moment, in dem die Spannung zum ersten Mal auf den halben Scheitelwert abgesunken ist.

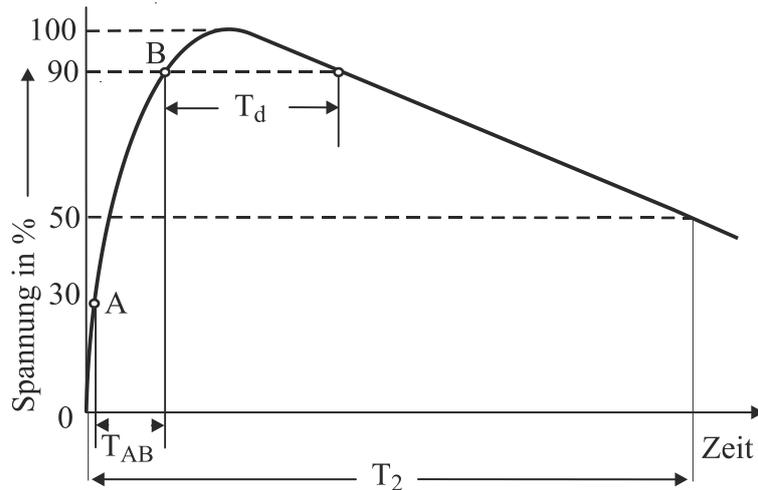


Bild 2.5: Kurvenverlauf einer Schaltstoßspannung

Die **Scheiteldauer (90 %)** T_d ist der Zeitraum, in dem die Impulsspannung 90 % ihres Scheitelwertes übersteigt.

Die DIN IEC 60060-1 weist als genormte Schaltstoßspannung eine Stoßspannung mit einer Scheitelzeit T_p von $250 \mu\text{s} \pm 20 \%$ und einer Rückenhalbwertzeit T_r von $2500 \mu\text{s} \pm 60 \%$ als **250/2500-Stoßspannung** aus. Der tatsächliche Scheitelwert darf um 3 % abweichen.

3 Schaltungstechnische Grundlagen

3.1 Erzeugung von Stoßspannung

Stoßspannungen werden im Allgemeinen mit Stoßspannungsgeneratoren erzeugt, die nach einer der beiden Grundschaltungen (Bild 3.1 und Bild 3.2) aufgebaut sind.

Die Stoßspannung, welcher der Prüfling ausgesetzt werden soll, wird erzeugt, indem aus einem vorher auf entsprechend hohe Gleichspannung aufgeladenen Kondensator mit ausreichender Kapazität Ladung auf den Prüfling übertragen wird. Das dazu verwendete Schaltorgan ist eine Funkenstrecke. Sobald die Spannung des **Stoßkondensators** C_S die Ansprechspannung der Funkenstrecke erreicht hat, bzw. bei Verwendung einer getriggerten **Funkenstrecke** F der Triggerimpuls anliegt, schlägt diese über und verbindet den Stoßkondensator mit der **Belastungskapazität** C_B und dem **Prüfling** P . Dabei wird die auf die Spannung U_0 aufgeladene Stoßkapazität C_S auf die aus dem **Entladewiderstand** R_e , dem **Dämpfungswiderstand** R_d sowie der Belastungskapazität und dem Prüfling bestehende Anordnung geschaltet.

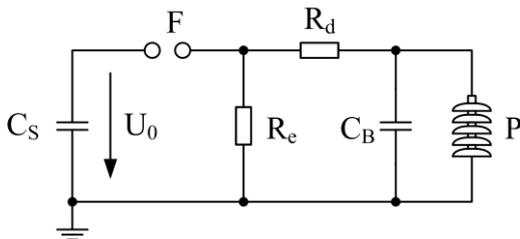


Bild 3.1: Grundschaltung a)

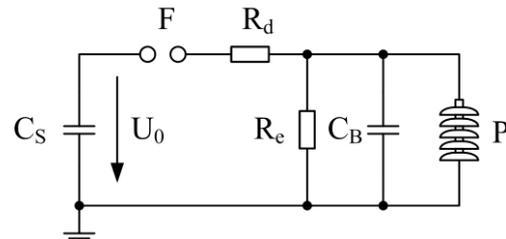


Bild 3.2: Grundschaltung b)

Unter der Voraussetzung, dass die Belastungskapazität C_B klein gegenüber der Stoßkapazität C_S ist, errechnet sich der Spannungsverlauf an C_B für die Schaltung nach Bild 3.1 zu:

$$u(t) = \frac{U_0}{R_d C_B} \frac{\tau_r \tau_s}{\tau_r - \tau_s} \left[e^{-\frac{t}{\tau_r}} - e^{-\frac{t}{\tau_s}} \right].$$

Unter der Voraussetzung $R_d C_B \ll R_e C_S$ gilt für die Rückzeitkonstante der Stoßspannung

$$\tau_r = R_e \cdot (C_B + C_S)$$

und für die Stirnzeitkonstante

$$\tau_s \approx R_d \cdot \frac{C_B \cdot C_S}{(C_B + C_S)}.$$

Als Rechenwert für C_B gilt genau genommen die Summe aus der Eigenkapazität des Prüflings und dem Wert des verwendeten Belastungskondensators. Die Belastungskapazität in den Grundschaltungen im Bild 3.1 und Bild 3.2. enthält den Wert der Prüflingskapazität.

Ist die Kapazität des Belastungskondensators allerdings um ein fünffaches bis zehnfaches größer als die maximal in Frage kommende Prüflingskapazität, so wird die Form der Stoßspannung nur unwesentlich von der Eigenkapazität des Prüflings beeinflusst. Die Prüflingskapazität kann somit vernachlässigt werden.

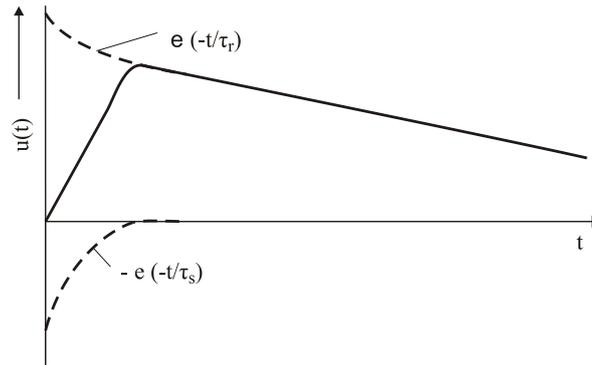


Bild 3.3: Kurvenverlauf einer Stoßspannung als Superposition zweier Exponentialfunktionen

Der zeitliche Verlauf von $u(t)$ zeigt, dass die Stirn im Wesentlichen von τ_s und der Rücken von τ_r bestimmt wird.

Die Stoßkreisinduktivität L wird durch die vom Stoßspannungskreis umfasste Stromschleife gebildet. Dazu gehört auch die Eigeninduktivität des Generators. Durch diese unvermeidbaren Induktivitäten können beim Blitzstoß Eigenschwingungen auftreten. Mit dem Dämpfungswiderstand R_d werden diese Schwingungen gedämpft. Es soll gelten:

$$R_d \geq 2 \cdot \sqrt{L \cdot \frac{C_B + C_S}{C_B \cdot C_S}}.$$

Gleichzeitig beeinflusst R_d den Verlauf und die Dauer der Wellenstirn. Man kann daher R_d nicht beliebig groß wählen und muss somit beim Aufbau von Stoßschaltungen für kurze Stirnzeiten die Induktivitäten im Entladekreis möglichst klein halten.

Mit dem Entladewiderstand R_e wird die Rückenhalbwertzeit T_r eingestellt.

Den **Ausnutzungsgrad** η einer Stoßschaltung definiert man als das Verhältnis von Scheitelwert U_m der Stoßspannung am Prüfling zur Ladespannung U_0 der Stoßkapazität C_s

$$\eta = \frac{U_m}{U_0}.$$

Die Höhe der Stoßspannung wird in erster Linie von der Ladespannung U_0 an C_s im Schalt Augenblick (Ansprechspannung der Schaltfunkenstrecke F) und dem Größenverhältnis von Stoßkapazität zur Summe aus Belastungs- und Prüflingskapazität bestimmt.

3.2 Berechnung der Stoßschaltung

Im folgenden Abschnitt wird die Abhängigkeit der Stirn- und Rückenhalbwertzeit sowie des Ausnutzungsgrads von den im Stoßzweig verwendeten Kapazitäten und Widerständen beschrieben. Diese Näherungsformeln lassen sich anschaulich mit den in den verschiedenen Phasen der Stoßspannung wirksamen Zeitkonstanten erklären. Da Stoßspannungen nicht durch die Stirn- bzw. Rückenzeitkonstanten, sondern durch die Stirnzeit T_s und die Rückenhalbwertzeit T_r gekennzeichnet werden, müssen die Gleichungen für die verschiedenen Stoßspannungen (1,2/5-, 1,2/50-, oder 1,2/200-Stoßspannung) noch unterschiedliche Korrekturfaktoren enthalten. Für die genormte 1,2/50-Stoßspannung ergeben sich z.B. folgende Gleichungen:

Für die Schaltung in Bild 3.1 gilt:

$$T_s \approx 2,96 \cdot R_d \cdot \frac{C_B \cdot C_S}{C_B + C_S} \approx 2,96 \cdot \tau_S$$

$$T_r \approx 0,73 \cdot R_e \cdot (C_B + C_S) \approx 0,73 \cdot \tau_r$$

$$\eta \approx \frac{C_S}{C_B + C_S}$$

Für die Schaltung in Bild 3.2 gilt:

$$T_s \approx 2,96 \cdot \frac{R_d \cdot R_e}{R_d + R_e} \cdot \frac{C_B \cdot C_S}{C_B + C_S}$$

$$T_r \approx 0,73 \cdot (R_d + R_e) \cdot (C_B + C_S)$$

$$\eta \approx \frac{R_e}{R_d + R_e} \cdot \frac{C_S}{C_B + C_S}$$

Dieses Berechnungsverfahren ist umso genauer, je kleiner T_s/T_r ist. Bei der 1,2/50-Stoßspannung sind die Abweichungen praktisch zu vernachlässigen.

3.3 Vervielfacherschaltung nach Marx

Zur Erzeugung von Stoßspannungen mit Scheitelwerten größer als 300 kV werden ausnahmslos mehrstufige Stoßspannungsgeneratoren eingesetzt, wie sie 1923 durch Erwin Otto Marx (1893-1980) erstmals eingesetzt wurden. Das Prinzip der Schaltung beruht darauf, dass mehrere Stoßkondensatoren zunächst parallel auf die Ladespannung U_L aufgeladen werden und dann durch Schaltfunkenstrecken in Reihe geschaltet werden. Dadurch entsteht an der hochspannungsseitigen Klemme des Stoßspannungsgenerators kurzzeitig ein Spannungsimpuls, der dem n -fachen Wert der Ladungsspannung entspricht.

Die Stoßkondensatoren C_S werden von dem Hochspannungstransformator und dem Gleichrichter über die Entkopplungswiderstände R_l und die n Dämpfungs- und Entladewiderstände (R_d' , R_e') auf die Spannung U_L aufgeladen. Damit alle Stoßkondensatoren auf die gleiche Ladespannung aufgeladen werden, muss der Vorwiderstand $R_v \gg R_l$ sein, bzw. die Aufladung muss langsam gegenüber der Ladezeitkonstante $\tau \sim R_l C_S$ der einzelnen Stufen sein. Die Ladewiderstände R_l sind notwendig um nach dem Durchzünden der Schaltfunkenstrecke die einzelnen Stufen zu entkoppeln. Vereinfacht ausgedrückt müssen die Ladewiderstände R_l so dimensioniert sein, dass sie während der Ladeperiode quasi einen Kurzschluss darstellen, und nach dem Durchzünden der Schaltfunkenstrecke einen Leerlauf. Aus letzterer Forderung folgt unter Berücksichtigung der Zeitkonstanten für die Schaltstoßspannung ein Mindestwert für R_l als Dimensionierungskriterium. Die Aufladung muss dennoch so erfolgen, dass auch die n -te Stufe noch auf die volle Ladespannung aufgeladen wird.

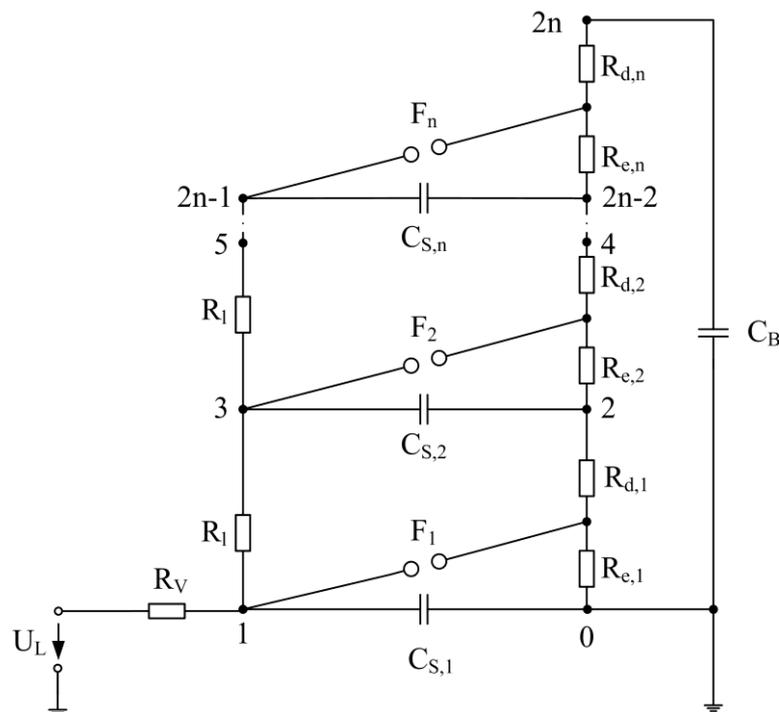


Bild 3.4: Ersatzschaltbild eines Stoßgenerators

Nachdem alle Stoßkondensatoren auf den gewünschten Wert aufgeladen sind, wird die unterste Schaltfunkenstrecke F_1 getriggert. An den übrigen Schaltfunkenstrecken entsteht durch transiente Ausgleichsvorgänge kurzzeitig eine Überspannung, sodass alle Schaltfunkenstrecken praktisch gleichzeitig durchschalten. Das Potential am Knoten 2, das vorher auf Null war, wird nun angehoben auf das Potential des Knoten 1 ($= U_0$). Damit liegt nun der Knoten 3 auf dem Potential $2 U_L$, etc. An der hochspannungsseitigen Klemme entsteht folglich das Potential $n U_L$. Die externe Belastungskapazität wird über die Dämpfungswiderstände R_d aufgeladen. Gleichzeitig beginnt schon die Entladung der einzelnen Stufen über R_e .

Dabei gilt für die Berechnung eines n-stufigen Marxgenerator:

$$R_d = n * R'_d$$

$$R_e = n * R'_e$$

4 Der Stoßdurchschlag

4.1 Stoßkennlinien

Neben der Prüfung der Stoßspannungsfestigkeit von Betriebsmitteln werden Stoßspannungsgeneratoren unter anderem zur Untersuchung des Ansprechverhaltens gasisolierter Schutzfunkenstrecken eingesetzt. Dazu wird anstelle des Prüflings die zu untersuchende Elektrodenanordnung geschaltet. Durch Variation der Dämpfungswiderstände oder durch Verändern der Höhe der Ladespannung werden Stoßspannungen unterschiedlicher Steilheit erzeugt.

Ist die dynamische Durchschlagspannung U_d der Schutzfunkenstrecke kleiner als der Scheitelwert der anliegenden Stoßspannung, so erfolgt der Durchschlag in der Stirn der Stoßspannung, und zwar dann, wenn der Wert der Bezugsspannung U_b , der beim homogenen Feld gleich der statischen Ansprechspannung $U_{d,stat}$ ist, überschritten wurde. Der Stoßdurchschlag wird durch das Wertepaar (U_d, t_d) charakterisiert. Werden mehrere Wertepaare einer Elektrodenanordnung bei verschiedenen Steilheiten aufgenommen und im Diagramm dargestellt, erhält man die sogenannte Stoßkennlinie dieser speziellen Elektrodengeometrie. Da die Durchschlagszeit und folglich auch die Durchschlagsspannung statistischer Streuung unterworfen ist, führt die Auswertung wiederholter Messungen trotz konstanter Steilheit auf ein Stoßkennlinienband, Bild 4.1.

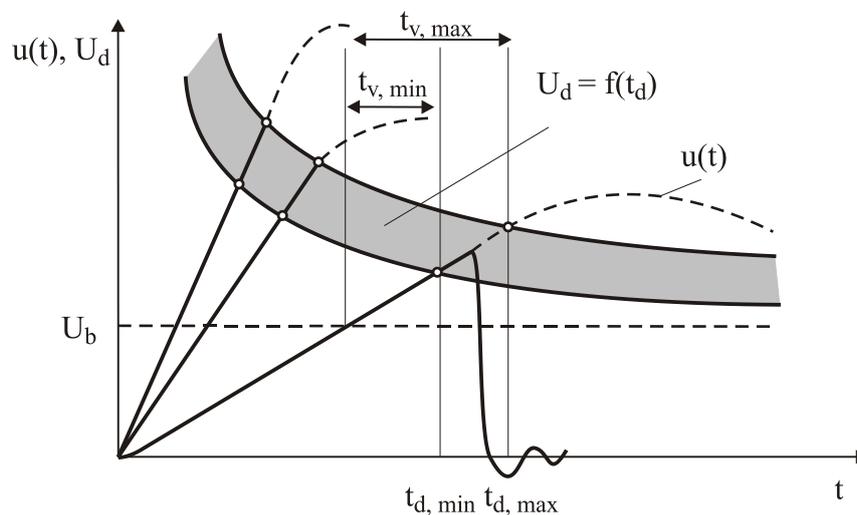


Bild 4.1: Entstehung und Verlauf von Stoßkennlinien

Das Stoßkennlinienband macht eine Aussage darüber, welche minimalen und maximalen Durchschlagzeiten bei einer bestimmten Spannungsform zu erwarten sind. Der unteren Grenzkurve des Stoßkennlinienbands ist der Wert der Durchschlagswahrscheinlichkeit von 0 %, der oberen einer Wahrscheinlichkeit von 100 % zugeordnet. Da die Ermittlung dieser Kennlinien in der Praxis nur schwer

möglich ist, wird aus einer ausreichenden Anzahl von Durchschlagversuchen die Mittelwert-Kennlinie gebildet und mittels Häufigkeitsverteilung die Kennlinien abgeschätzt, die der 5%- und 95%-Durchschlagwahrscheinlichkeit zugeordnet sind.

4.2 Zeitlicher Entladungsaufbau beim Stoßdurchschlag

Wird eine gasisolierte Elektrodenanordnung mit einer Stoßspannung beansprucht, so vergeht zwischen dem Erreichen einer Bezugsspannung U_b zum Zeitpunkt t_0 und dem Beginn des Ladungsträgerlawinenaufbaus die **statistische Streuzeit** t_s (Bild 4.2). t_s ist die Zeitspanne zwischen dem Erreichen der Bezugsspannung und dem Zeitpunkt, zu dem durch Sekundäreffekte, wie z.B. natürliche Radioaktivität, UV-Bestrahlung oder bei stark inhomogenen Feldern durch Feldemission an der Kathode ein lawinenwirksamer Anfangsladungsträger erzeugt wird. Dieser Vorgang unterliegt Ereignissen statistischer Natur. Die Streuzeit nimmt mit der Größe des elektrisch hoch beanspruchten Gasvolumens ab, da die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Startelektrons zunimmt; bei Schlagweiten über 1 mm ist t_s in Luft mit einigen 10 ns bereits sehr gering.

Als **Lawinenaufbauzeit** t_A bezeichnet man den Zeitabschnitt vom Beginn der Entstehung der Primärlawine bis zum Beginn der Hauptentladung. Das Ende der Aufbauzeit wird durch den beginnenden Spannungszusammenbruch über den Elektroden gekennzeichnet. Die Lawinenaufbauzeit ist von der Geschwindigkeit des Entladungsaufbaus und somit vom Mechanismus der Durchschlagentwicklung abhängig.

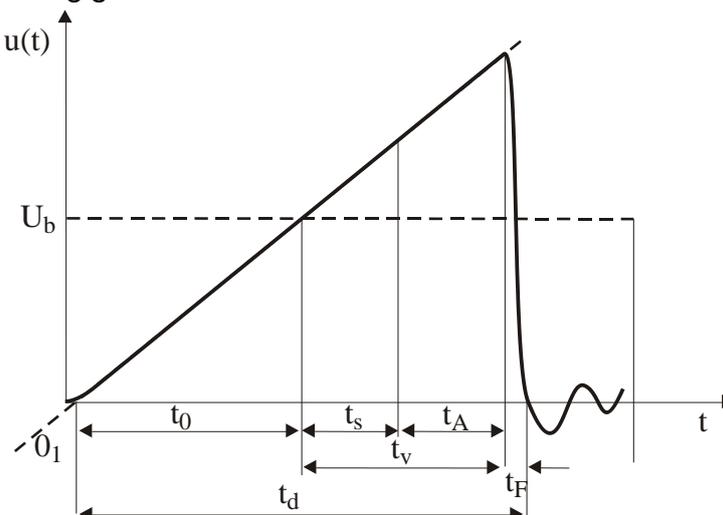


Bild 4.2: Zünd- und Entladeverzug beim Stoßdurchschlag

Für kleine pd -Werte liegt die Lawinenaufbauzeit beim Generationendurchschlag nach Townsend im Bereich von $10 \mu\text{s}$ (z.B. Leuchtstoffröhre), beim Kanalmechanismus, von dem man in der Praxis meist ausgehen kann, verkürzt

sich diese auf Werte im Bereich von 100 ns. Die Vorgänge, die für die verschiedenen Entladungsmechanismen charakteristisch sind, werden im Umdruck zum Versuch „**Dielektrische Festigkeit von Isolierstoffen**“ beschrieben.

Als **Funkenaufbauzeit** t_F bezeichnet man die Zeitspanne, die zur Ausbildung eines leitfähigen niederohmigen Plasmakanals (ionisiertes Gas, welches zu einem großen Teil freie Ladungsträger besitzt) benötigt wird, der die gesamte Elektrodendistanz überbrückt.

Der Durchschlag kann nur dann erfolgen, wenn die beanspruchende Spannung länger als die **Entladeverzugszeit** t_V über der Bezugsspannung U_b liegt.

Die **Durchzündzeit** t_d ist die Summe aus der Zeitspanne t_0 (vom fiktiven Stoßbeginn O_1 bis zum Erreichen der Bezugsspannung), der Entladeverzugszeit t_V und der Funkenaufbauzeit t_F .

$$t_d = t_0 + t_V + t_F = t_0 + t_S + t_A + t_F$$

Messtechnisch lässt sich der Übergang von der Streuzeit zur Aufbauzeit anhand eines Einzelversuchs nicht bestimmen. Bei einer ausreichend großen Anzahl von Messungen bei konstanter Spannungssteilheit und unveränderter Elektrodengeometrie kann davon ausgegangen werden, dass die kleinste gemessene Entladeverzugszeit t_V mit hoher Wahrscheinlichkeit der reinen Aufbauzeit entspricht. Im Stoßkennlinienband liegt der Wert dieser Verzugszeit auf der Stoßkennlinie mit einer Durchschlagwahrscheinlichkeit von 0 %.

4.3 Das Spannungs-Zeit-Flächenkriterium (Flächenzeitgesetz)

Die Aufbauzeit für den Streamer (Entladungskanal bei raumladungsbeschwerter Entladung), wie sie bei großen pd -Werten auftreten, ist aufgrund der Komplexität des physikalischen Vorganges schwer zu erfassen. Am besten hat sich bislang das Spannungs-Zeit-Flächenkriterium nach Kind bewährt. Große pd -Werte sind bei den üblichen Geometrien in der Hochspannungstechnik die Regel. Beim Streamer Durchschlag in Luft ab Schlagweiten von 5 mm wird, abgesehen von Isolationsvolumina mit erhöhter statistischer Streuzeit, die Entladeverzugszeit fast ausschließlich durch die Streameraufbauzeit bestimmt

Das Flächenzeitgesetz beruht auf einfachen physikalischen Modellvorstellungen. Bis zur Bezugsspannung $u(t)=U_b$ tritt im Feldraum keine Streamerentwicklung auf. Wird diese Spannung überschritten, so sollen im gesamten Feldraum die

Bedingungen für die Ausbreitung des Streamers erfüllt sein. Weiterhin wird die Streamergeschwindigkeit $v(x,t)$ als proportional zur Feldstärkeerhöhung über die Bezugfeldstärke angenommen.

$$v(x,t) = K [E(x,t) - E_b(x)] \quad u(t) > U_b \quad E(x,t) > E_b$$

Die Feldstärke $E(x,t)$ kann als Produkt aus der zeitabhängigen Spannung $u(t)$ und einer Geometriefunktion dargestellt werden:

$$E(x,t) = u(t) \cdot g(x) \quad ; \quad E_b(x) = U_b \cdot g(x)$$

Für die Streamergeschwindigkeit ergibt sich dann

$$v(x,t) = K \cdot g(x) \cdot [u(t) - U_b]$$

mit $v(x,t) \cdot dt = dx$ liefert die Integration

$$\int_0^s \frac{1}{K} \cdot \frac{dx}{g(x)} = \int_{t_0+t_s}^{t_0+t_A+t_s} [u(t) - U_b] dt$$

Auf der linken Seite steht ein geometrieabhängiger und zeitlich konstanter Ausdruck, auf der rechten Seite ein reines Zeitintegral. Für Anordnungen, bei denen die statistische Streuzeit und die Funkenaufbauzeit vernachlässigbar sind, gilt dann das **Flächenzeitgesetz**:

$$\int_{t_0}^{t_{d,\min}} [u(t) - U_b] dt = A$$

Es besagt, dass die in Bild 4.3 dargestellte Spannungszeitfläche A zwischen einer Bezugsspannung U_b und der Aufbauzeitkennlinie für eine bestimmte Anordnung konstant bleibt.

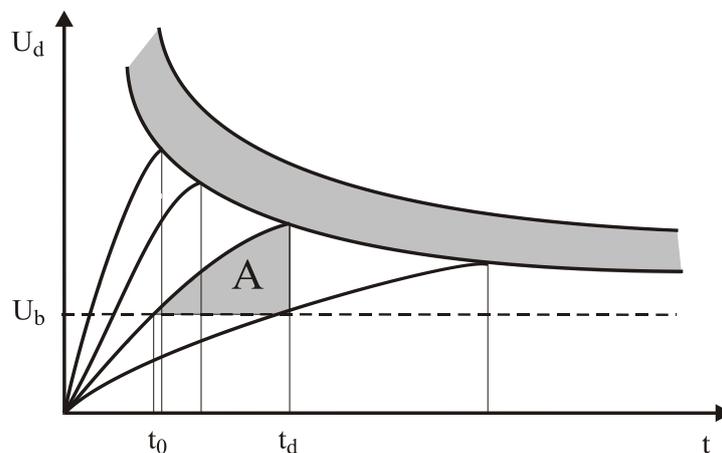


Bild 4.3: Spannungs-Zeit-Flächenkriterium

Bei Anordnungen im homogenem Feld ist die Bezugsspannung U_b gleich der statischen Durchschlagsspannung $U_{b,stat}$. Sofern die Bezugsspannung bekannt ist, erlaubt das Flächenzeitgesetz die Berechnung der Stoßkennlinie einer Elektrodenanordnung aus wenigen Messpunkten. Auch kann aus mehreren Wertepaaren (U_d, t_d) auf die statische Durchbruchspannung geschlossen werden. Bei Unterschreitung der Spannung U_b stoppt das Streamerwachstum. Hat der Streamer zu diesem Zeitpunkt die Gegenelektrode noch nicht erreicht, so kommt es nicht zum Durchschlag.

5 Grundlagen von Wanderwellenvorgängen

Für die elektromagnetischen Erscheinungen auf Leitungen ist ihre verteilte Natur und räumliche Ausdehnung maßgebend. Ströme und Spannungen auf der Leitung sind Funktionen der Zeit t und des Ortes x .

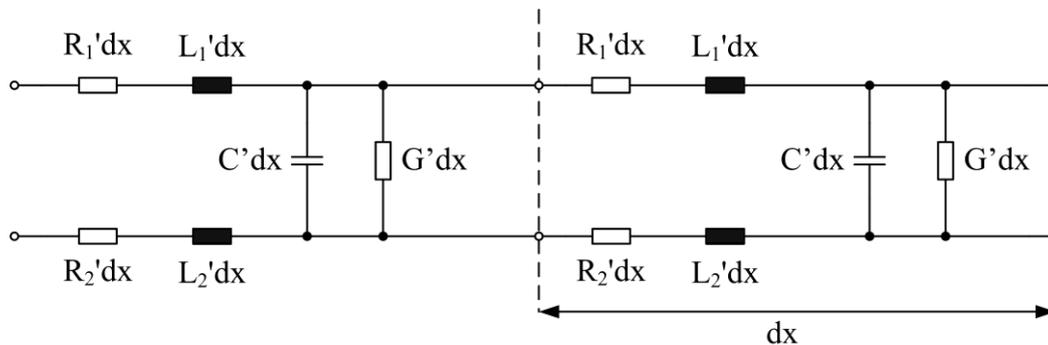


Bild 5.1: Ersatzschaltung einer elektrischen Leitung

Betrachtet man auf der Leitung einen genügend kurzen Abschnitt der Länge dx , so haben die beiden Ströme im Hin- und Rückleiter zu einem bestimmten Zeitpunkt den gleichen Wert. Ebenso hat die Spannung zwischen den Leitern einen bestimmten Wert. Mit dem Strom ist ein magnetisches, mit der Spannung ein elektrisches Feld verknüpft. Dem Leitungsabschnitt dx kann also eine Induktivität dL und eine Kapazität dC zugeordnet werden. Bezogen auf einen kurzen Abschnitt der Länge dx erhält man hieraus den Induktivitätsbelag L' bzw. den Kapazitätsbelag C' . Entsprechend erhält man durch Berücksichtigung des ohmschen Widerstandes der Leitungsdrähte und der dielektrischen Verluste den Widerstandsbelag R' und den Ableitungsbelag G' . Bei einem Leiter der Länge l sind die Beläge wie folgt definiert:

Induktivitätsbelag:	$L' = \frac{dL}{dx}$	mit $L = L' \cdot l$	Längsbeläge
Widerstandsbelag:	$R' = \frac{dR}{dx}$	mit $R = R' \cdot l$	
Kapazitätsbelag:	$C' = \frac{dC}{dx}$	mit $C = C' \cdot l$	Querbeläge
Ableitungsbelag:	$G' = \frac{dG}{dx}$	mit $G = G' \cdot l$	

Tab. 5.1: Verteilte Parameter der elektrischen Leitung

Sind die Leitungsbeläge L' , R' , C' und G' längs der Leitung konstant, nennt man eine solche Leitung homogen. Da die Leitungsbeläge die elektrischen

Eigenschaften einer Leitung vollständig definieren, nennt man diese auch Leitungskonstanten. R' und G' sind bei einer verlustlosen Leitung vernachlässigbar.

Ausgehend von der Ersatzschaltung eines Leitungselements können die Leitungsgleichungen für das Prinzipschaltbild einer Leitung aufgestellt werden:

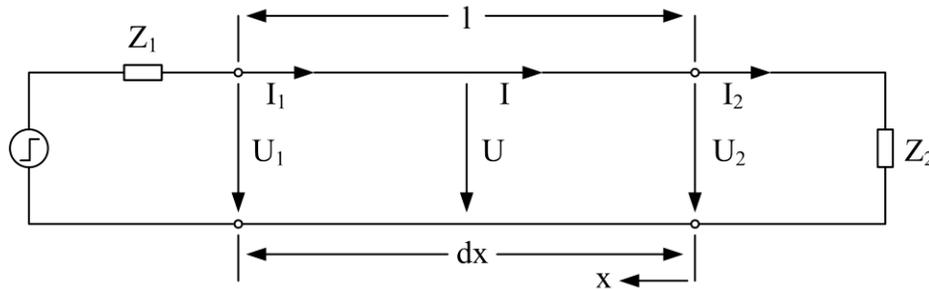


Bild 5.2: Prinzipschaltbild einer Leitung

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cdot \cosh(\underline{\gamma}l) + \underline{I}_2 \underline{Z}_L \cdot \sinh(\underline{\gamma}l)$$

$$\underline{I}_1 = \left(\frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_L} \right) \cdot \sinh(\underline{\gamma}l) + \underline{I}_2 \cdot \cosh(\underline{\gamma}l)$$

$$\underline{\gamma} = \sqrt{(R' + j\omega L') \cdot (G' + j\omega C')} = \alpha + j\beta$$

γ = Ausbreitungskonstante

α = Dämpfungskonstante

β = Phasenkonstante

Die Herleitung dieser Gleichungen kann in weiterführender Literatur nachgelesen werden. Der Wellenwiderstand einer Leitung ergibt sich zu

$$\underline{Z}_L = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}}$$

Die Spannung \underline{U} an einer Stelle der Leitung kann als Überlagerung einer in positiver und in negativer x-Richtung laufender Spannungswelle dargestellt werden. Entsprechendes gilt für den Strom. Unter Berücksichtigung der Richtung des Stromzählpfeils ist der Quotient aus Spannungs- und Stromamplitude für die Hin- und Rücklaufende Welle jeweils gleich dem Wellenwiderstand \underline{Z}_L . Ändert sich der Wellenwiderstand im Verlauf einer Leitung (z.B. von \underline{Z}_{L1} auf \underline{Z}_{L2}) oder wird die Leitung mit einem vom Wellenwiderstand der Leitung unterschiedlichen Widerstand (z.B. \underline{Z}_{L2}) abgeschlossen, so wird die sich ausbreitende Wanderwelle zum einen Teil reflektiert und zum anderen Teil gebrochen (siehe Bild 5.3). Das

Verhältnis der Wellenamplituden der reflektierten und der ankommenden Spannungswellen nennt man **Reflexionsfaktor** r . Das Verhältnis der Wellenamplituden der gebrochenen und der ankommenden Spannungswellen wird als **Brechungsfaktor** b bezeichnet. Diese Faktoren berechnen sich nach

$$r = \frac{Z_{L2} - Z_{L1}}{Z_{L2} + Z_{L1}}$$

$$b = 1 + r.$$

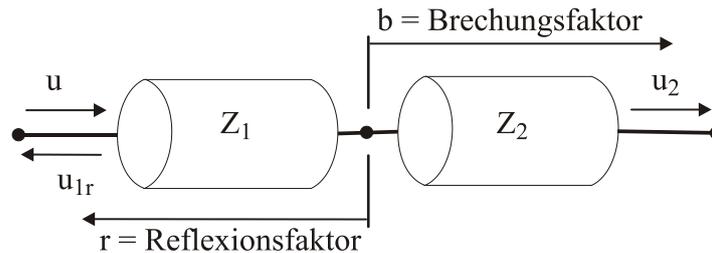


Bild 5.3: Leitungen mit unterschiedlichem Wellenwiderstand

Der Reflexionsfaktor ist eine komplexe Größe, dessen Betrag maximal 1 werden kann. Bei reellen Abschlusswiderständen und verlustfreier Leitung wird auch der Reflexionsfaktor reell.

Z_2	0	Z_L	∞
r	-1	0	+1

Tab. 5.2: Reflexionsfaktoren für Wellenwiderstände

Bei Leerlauf am Leitungsende gilt: $I_2 = 0$, bei Kurzschluss am Leitungsende gilt: $U_2 = 0$.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Welle auf einer verlustlosen Leitung berechnet sich nach

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{L' \cdot C'}}.$$

Für den Fall eines verlustlosen Koaxialkabels gilt:

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \mu_r \varepsilon_0 \varepsilon_r}} = \frac{c_0}{\sqrt{\mu_r \varepsilon_r}} \quad \text{mit} \quad c_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}.$$

Diese ist mit für $\mu_r=1$ ausschließlich von der relativen Dielektrizitätszahl ϵ_r abhängig und kann maximal Lichtgeschwindigkeit ($c_0 = 3 \cdot 10^8$ m/s) betragen. Spannungs- und Stromänderungen pflanzen sich auf Leitungen daher mit endlicher Geschwindigkeit fort und werden erst nach einer bestimmten Zeit entlang der Leitung wirksam.

Die Laufzeit einer Leitung der Länge l ergibt sich somit zu

$$\tau = \frac{l}{v}$$

Für die Wellenlänge auf der Leitung gilt:

$$\lambda = \frac{v_p}{f} = \frac{\omega}{\beta f} = \frac{2\pi}{\beta} \quad \text{oder} \quad \beta \cdot l = 2\pi \cdot \frac{l}{\lambda} \quad \text{bzw.} \quad \lambda = \frac{1}{f \sqrt{\mu_r \mu_0 \epsilon_r \epsilon_0}}$$

Eine Leitung mit gewisser geometrischer Länge stellt in der Energietechnik eine elektrisch kurze Leitung dar, sofern bei Betriebsfrequenz von einer ortsunabhängigen Spannung ($\underline{U}(x) \approx \text{const}$, bzw. $\Delta U \leq 0,5\%$) ausgegangen werden kann. Eine Leitung die nicht als elektrisch kurz gilt, ist elektrisch lang.

Nimmt man nun eine verlustfreie Leitung an und vernachlässigt den Einfluss des Laststroms am Ende der Leitung, so führt die genannte Forderung auf die Bedingung

$$\frac{\underline{U}(l)}{\underline{U}_1} = \cosh(j\beta l) = \frac{1}{2} (e^{j\beta l} + e^{-j\beta l}) = \frac{1}{2} [\cos(\beta l) + j \cdot \sin(\beta l) + \cos(-\beta l) + j \cdot \sin(-\beta l)] = \cos\left(2\pi \frac{l}{\lambda}\right)$$

$$\Rightarrow \frac{l}{\lambda} = \frac{1}{2\pi} \cdot \cos^{-1}(0,995) \approx \frac{1}{60}$$

Freileitungen:

$$\lambda = \frac{v_p}{f} \approx \frac{c_0}{f} = \frac{300.000 \frac{\text{km}}{\text{s}}}{50 \frac{1}{\text{s}}} = 6000 \text{ km} \Rightarrow \frac{l}{60} = 100 \text{ km}$$

Kabel ($\epsilon_r = 4$):

$$\lambda = \frac{v_p}{f} \approx \frac{c_0}{2f} = \frac{150.000 \frac{\text{km}}{\text{s}}}{50 \frac{1}{\text{s}}} = 3000 \text{ km} \Rightarrow \frac{l}{60} = 50 \text{ km}$$

Somit hat eine elektrisch kurze Leitung bei einer Frequenz von 50 Hz die Länge von 100 km, wenn es sich um eine Freileitung handelt, oder 50 km, sofern man ein Kabel mit $\epsilon_r = 4$ betrachtet.

6 Messung von Stoßspannungen

6.1 Messung mit dem Speicheroszilloskop

Der Anschluss des Oszilloskops an den Hochspannungskreis geschieht mittels eines Spannungsteilers. An diesen werden folgende Anforderungen gestellt:

- Die abgegriffene Teilspannung muss stets der Gesamtspannung verhältnismäßig sein.
- Der Teiler muss frequenz-, spannungs- und polaritätsunabhängig sein. Das Teilerverhältnis muss außerdem unabhängig von äußeren Einflüssen (z.B. Temperaturänderungen) sein.
- Die Rückwirkung des Teilers auf die zu messenden Vorgänge muss vernachlässigbar oder berechenbar sein.

Für die Messung von Stoßspannungen können prinzipiell folgende Teiler bzw. Messverfahren verwendet werden:

- Gedämpft kapazitiver Teiler
- Ohmsch-kapazitiv gemischter Teiler
- Messung mit der Kugelfunkenstrecke

Diese werden beim Versuch zur Erzeugung und Messung hoher Gleich- und Wechselspannungen näher erklärt. Da man zur Messung von Stoßspannungen bevorzugt auf gedämpft kapazitive Spannungsteiler zurückgreift, wird dieser im Rahmen dieses Versuchs genauer vorgestellt.

Bei gedämpft kapazitiven Teilern wird durch das Einfügen von (räumlich verteilten) Dämpfungswiderständen die Leitung, die der Teiler selbst darstellt, bewusst verlustbehaftet aufgebaut um dadurch das Entstehen von Wanderwellen weitgehend zu unterdrücken (Bild 6.1).

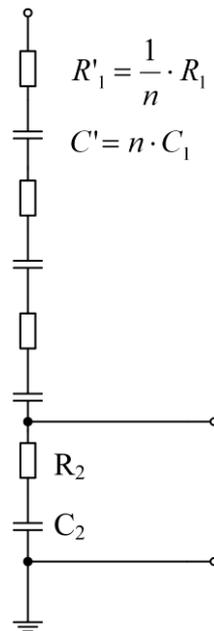


Bild 6.1: Gedämpft kapazitiver Spannungsteiler

Für sehr hohe Frequenzen verhält sich der Teiler quasi wie ein rein ohmscher Spannungsteiler, da die Kapazitäten dann eine kleine Impedanz besitzen.

Für ein frequenzunabhängiges Teilverhältnis muss deshalb

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} = \frac{1}{ü}$$

und damit

$$R_1 C_1 = R_2 C_2 = R'_1 C'_1$$

erfüllt sein.

6.2 Ankopplung des Oszilloskops an den Teiler

Das Oszilloskop wird über ein Koaxialkabel an den gedämpft kapazitiven Spannungsteiler angeschlossen (Bild 6.2). Das Messkabel wird am Oszilloskop nicht mit dem Wellenwiderstand ($Z = 50 \Omega$) abgeschlossen, weil sonst C_2 über den Abschlusswiderstand Z zu rasch entladen würde. Hingegen wird das Kabel am Teiler mit einem Serienwiderstand $R = Z - R_2$ angeschlossen, was bewirkt, dass nur die halbe Spannung, die an C_2 abfällt, in das Messkabel gelangt ($R_2 < Z$).

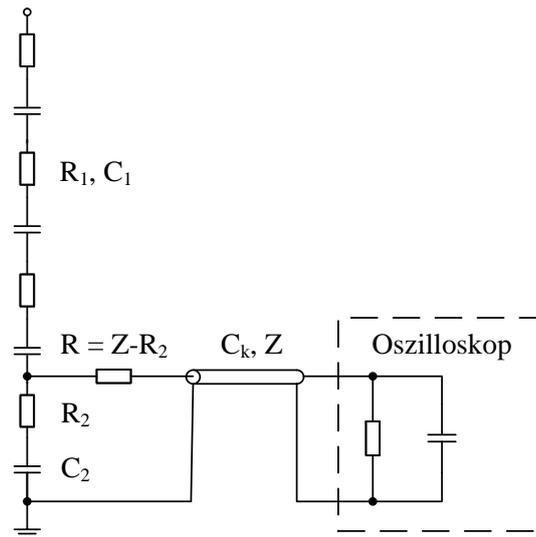


Bild 6.2: Ankopplung des Oszillographen an den kapazitiven Spannungsteiler

Wegen des quasi offenen Endes am Oszilloskop (Eingangsimpedanz $1\text{ M}\Omega$, 20 pF) tritt durch Reflexion eine Spannungsverdopplung auf, sodass am Oszilloskop wieder dieselbe Spannung wie an C_2 anliegt. Die reflektierte Welle läuft im Messkabel zum Teiler zurück und wird jetzt im Widerstand $R = (Z - R_2) + R_2$ vollständig absorbiert (C_2 wirkt dabei für hohe Frequenzen wie ein Kurzschluss). Bei falscher Anpassung von R kommt es zu überlagerten Schwingungsprozessen.

Ist die Impedanz der Quelle des zu messenden Signals niederohmig und das Oszilloskop hochohmig abgeschlossen wird ein Puls nach der doppelten Leitungslaufzeit mit umgedrehtem Vorzeichen am Messeingang des Oszilloskops ankommen. Eine erneut zurücklaufende Welle führt ebenfalls zu einer Vorzeichenumkehr. Damit liegt das Signal vom Zeitpunkt $t = 0$ aus gerechnet nach der vierfachen Signallaufzeit wieder mit der veralteten Information (und ggf. mit beobachtbarer Dispersion) am Oszilloskop an. Um Fehlinterpretationen zu vermeiden ist ein guter Leitungsabschluss daher sehr wichtig.

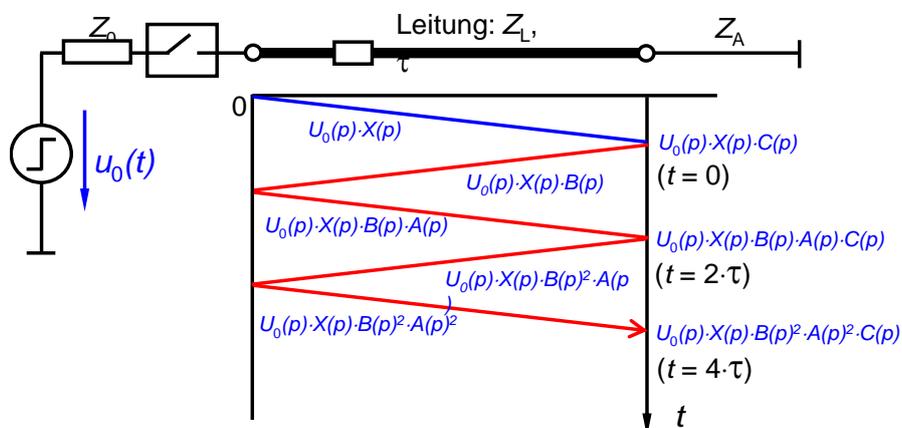


Bild 6.3: Wanderwellenfahrrplan bei Fehlanpassung am Oszilloskop

6.3 Elektromagnetische Verträglichkeit

Bei der erstmaligen Inbetriebnahme einer Messeinrichtung zum Aufzeichnen von Stoßspannungen oder Stoßströmen wird man auf dem Bildschirm eines Oszilloskops eine Darstellung gemäß Bild 6.3. erhalten.

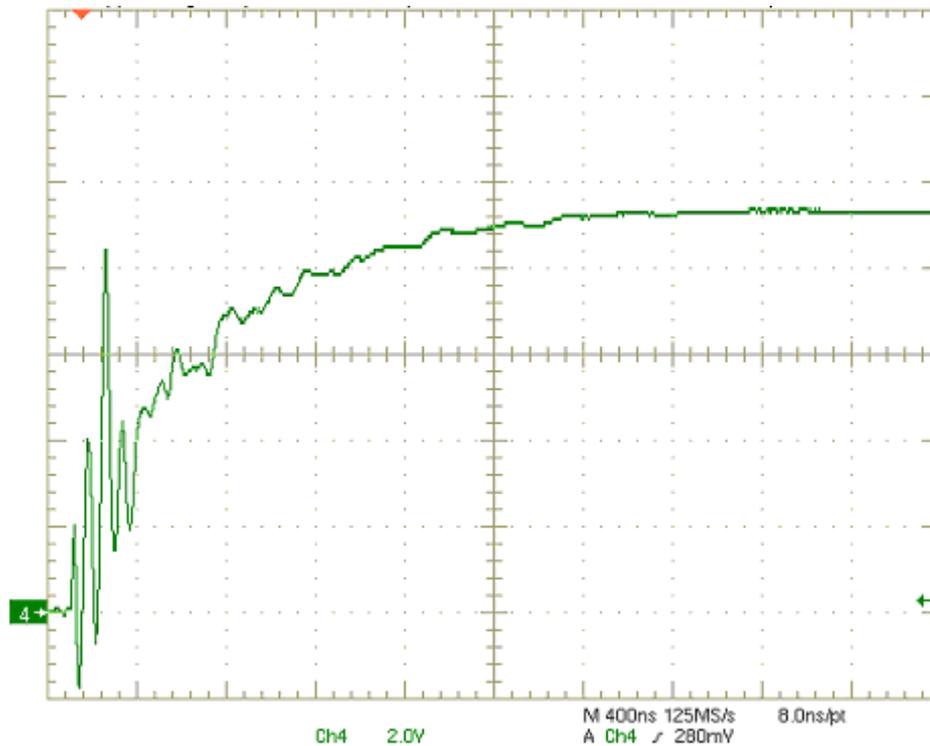


Bild 6.4: Stoßspannungsverlauf mit überlagerter Störung

In den allermeisten Fällen entspricht diese Wiedergabe nicht dem tatsächlichen zeitlichen Verlauf des zu erfassenden Vorgangs. Dem eigentlichen Messsignal sind Störspannungen überlagert, die auf verschiedenen Wegen das Ablenkssystem erreichen.

Die Ursachen der Störspannungen liegen in Potentialanhebungen und dem Vorhandensein der mit den schnell sich ändernden Spannungen und Strömen verknüpften elektromagnetischen Felder, insbesondere der beim Aufbeziehungsweise Entladen von Streukapazitäten entstehenden Streufeldänderungen.

Für das Zustandekommen der obigen verzerrten Darstellung gibt es folgende Möglichkeiten:

- Die elektromagnetischen Felder durchdringen das unvollkommen abschirmende Gehäuse des Elektronenstrahloszilloskops und rufen direkt im

Vertikalteil Störspannungen hervor. Diese Schwierigkeit kann durch ein in einem abgeschirmten Raum befindliches Oszilloskop beseitigt werden. Je nach Feldstärke und Frequenz genügt auch oft ein einseitig offener Blechkasten. Der Einfluss der Störfeldstärke wird weiter verringert, wenn die Entfernung zwischen Elektronenstrahloszilloskop und Stoßkreis vergrößert wird.

- Quasistationäre magnetische und elektrische Felder durchdringen die unvollkommene Abschirmung des Messkabels. Elektrische Felder greifen bei geringer Geflechtdichte auf den Innenleiter durch und influenzieren unmittelbar auf ihm eine Störspannung. Magnetfelder erzeugen zu beiden Seiten des Innenleiters zwei gleichgroße, gegenphasige Spannungen, die sich gegenseitig aufheben. Aufgrund immer vorhandener leichter Exzentrizitäten (Abweichungen von der Mitte) des Innenleiters verbleibt eine Restspannung. Beide Störspannungen können jedoch im Allgemeinen gegen die durch Kabelmantelströme verursachten Störspannungen vernachlässigt werden.
- Das Oszilloskop fängt die Störspannung als leitungsgebundene Störung (< 30 MHz) über seine Stromversorgung ein. Dies wird dadurch verhindert, dass man die Netzleitung mit einem Durchführungsfilter für Funkentstörung verriegelt. Die Filter bestehen im Allgemeinen aus kapazitiven Quergliedern und einem induktiven Längsglied in π -Schaltung. Manchmal genügt es, die Netzleitung um einen Ferritkern zu wickeln oder über die Netzzuleitung einen flexiblen leitfähigen Schlauch zu schieben, der mit der Abschirmwand beziehungsweise mit dem Gehäuse des Elektronenstrahloszilloskops gut leitend verbunden wird.
- Kabelmantel- und Gehäuseströme, bedingt durch Potentialdifferenzen in den Erdleitungen, verursachen Spannungsabfälle, die über den Kopplungswiderstand Störspannungen erzeugen. Wenn ein von einer äußeren Spannungsquelle hervorgerufener Störstrom über einen Kabelmantel oder -schirm fließt, so verursacht er an der inneren Oberfläche des Mantels einen Spannungsabfall, der sich als Störspannung in dem vom Kabelmantel geschirmten Leitungssystem bemerkbar macht. Je kleiner der Kopplungswiderstand eines Koaxialkabels ist, desto besser ist seine Schirmwirkung und desto kleiner die erzeugte Störspannung. Mitunter

benutzt man zur Verringerung des Kopplungswiderstands doppelt oder dreifach geschirmte Leitungen oder Flexwellkabel, deren Außenleiter aus einem gewellten, nahtlos verschweißten Metallmantel besteht. In gleicher Weise wie an den Kopplungswiderständen von Kabeln bewirken die Kabelmantelströme auch an den Übergangswiderständen lösbarer koaxialer Steckverbindungen sowie an Gehäusetrennfugen und Chassisteilen (Gehäuseströme) zusätzliche Störspannungen. Ein Kabelmantelstrom, der durch den mit Masse verbundenen Kragen der Eingangsbuchse eines Oszilloskops in das Gehäuse eintritt und dieses durch die Erdkapazität und den Schutzleiter wieder verlässt, erzeugt längs des Chassis Spannungsabfälle, die galvanisch dem Nutzsignal überlagert werden, teilweise aber auch durch kapazitive Kopplung auf den Abschwächer und das Gitter der Eingangsröhre gelangen.

7 Literatur

- Badent, R. Hochspannungstechnik II, Skriptum und Vorlesung, IEH, Karlsruher Institut für Technologie
- Leibfried, T. Elektroenergiesysteme, Skriptum und Vorlesung, IEH, Karlsruher Institut für Technologie
- Küchler, A. Hochspannungstechnik; 2. Auflage; 2004; Springer-Verlag Berlin
- DIN e.V. DIN EN 60060-1 / VDE 0432-1: 2011-10 Hochspannungs-Prüftechnik Teil 1: Allgemeine Festlegungen und Prüfbedingungen; VDE-Verlag GmbH
- DIN e.V. DIN EN 60060-2 / VDE 0432-2: 2011-10; Hochspannungs-Prüftechnik Teil 2: Messsysteme; VDE-Verlag GmbH
- Schwab, A.J. Hochspannungsmesstechnik; 2. Auflage; 1981; Springer-Verlag Berlin
- Kind, D. Die Aufbaufläche bei Stoßbeanspruchung technischer Elektrodenanordnungen in Luft; Dissertation; 1957; TH München
- Küpfmüller, K. Theoretische Elektrotechnik; 18. Auflage; 2008; Springer-Verlag Berlin;
- Meinke, H., Gundlach F. Taschenbuch der Hochfrequenztechnik; 5. Auflage; 1992; Springer-Verlag Berlin

8 Fragen

1. Warum nimmt man Stoßspannungsprüfungen vor?
2. Durch welche Werte wird eine Blitzstoßspannung gekennzeichnet?
3. Warum wählt man die Belastungskapazität C_B in einer Stoßschaltung möglichst groß? Welchen Nachteil nimmt man dabei in Kauf?
4. Nach welchem Prinzip werden sehr hohe Stoßspannungen wirtschaftlich erzeugt? Wie erzeugt man Stoßspannungen bis 300 kV?
5. Erklären Sie das Flächenzeitgesetz!
6. Wie entstehen Wanderwellen und wie kann man sie messen?
7. Zeichnen Sie ein Ersatzschaltbild einer elektrischen Leitung! Wie berechnet man den Wellenwiderstand und die Ausbreitungsgeschwindigkeit auf der Leitung?
8. Eine Stoßspannung soll mit einem Oszilloskop gemessen werden: Welchen Anforderungen muss der Spannungsteiler genügen? Wie erfolgt die Ankopplung an das Oszilloskop?

Protokoll zum Energietechnischen Praktikum

Versuch "Transientenbehandlung"

Transiente Vorgänge in der Hochspannungstechnik

Gruppe: Namen:

Datum:

Schwarz umrandete Aufgabenteile sind **vor** Versuchsbeginn zu beantworten!

1 Stoßspannungen

Zur Durchführung des Versuchs soll ein vierstufiger Marxgenerator verwendet werden (vergleiche Bild 3.4). Jede einzelne Stufe verfügt dabei über eine Stoßkapazität C'_S von $1\mu\text{F}$. Dämpfungs- und Entladewiderstände können aus den jeweils verfügbaren Widerständen frei gewählt werden.

Zur Versuchsdurchführung stehen folgende Widerstände zur Verfügung:

R_d	R_e
22 Ω	66 Ω
30 Ω	3,4 k Ω
43 Ω	
2 k Ω	
5 k Ω	
7,4 k Ω	

Die Kurvenform der erzeugten Stoßspannung wird mittels eines Breitband-Spannungsteilers ($\ddot{u} = 5000$) und einem Digitalspeicheroszilloskop gemessen.

1.1 Erzeugung einer 1,2/50-Stoßspannung

Wie groß müssen in einer vierstufigen Marxschaltung die Widerstände R'_d und R'_e gewählt werden, wenn $C_S = 250 \text{ nF}$ und $C_B = 3 \text{ nF}$ gegeben sind?

$R'_d =$
$R'_e =$

Wie groß ist der Ausnutzungsgrad η der Schaltung?

$\eta =$

Wählen Sie aus den verfügbaren Widerständen die Werte zur Erzeugung einer 1,2/50-Stoßspannung unter Berücksichtigung der genormten Toleranzen für Stirn- und Rückenzeiten!

$R'_d =$
$R'_e =$

Welche prozentualen Abweichungen der Stirn- und Rückenzeiten von den geforderten Werten sind zu erwarten?

$T_s =$
$T_r =$

$\Delta T_s (\%) =$
$\Delta T_r (\%) =$

Bauen Sie die vierstufige Marxschaltung unter Verwendung der ermittelten Widerstände R'_d und R'_e auf.

Bestimmen Sie durch Messung die Stirn- und Rückenzeit und den Scheitelwert der Stoßspannung bei einer Ladespannung von $U' = 25 \text{ kV}$ (pro Stufe).

$$U_m =$$

$$T =$$

$$T_s =$$

$$T_r =$$

Welcher Ausnutzungsgrad ergibt sich hierbei?

$$\eta =$$

Wie groß sind die Abweichungen zwischen den gemessenen, den abgeschätzten und den vorgegebenen Werten für T_s und T_r ? Wie groß ist die Abweichung zwischen dem gemessenen und dem abgeschätzten Wert für η ? Erklären Sie in Stichworten: Wodurch kommen diese Abweichungen zustande? Werden die Toleranzen verletzt?

1.2 Erzeugung von Stoßspannungen unterschiedlicher Steilheit

Ermitteln Sie durch Messung die Stirnzeiten verschiedener Stoßspannungsformen und vergleichen Sie die gemessenen mit den berechneten Werten. Verwenden Sie zur Berechnung der Stirnzeiten die für 1,2/50-Stoßspannungen gebräuchliche Abschätzung.

$$U = 25 \text{ kV}$$

$$R'_e = 66 \Omega$$

Formel zur Abschätzung der Stirnzeit:

$T_s =$

	Berechnet	Gemessen
$R'_d = 22 \Omega$	$T_s =$	$T_s =$
$R'_d = 43 \Omega$	$T_s =$	$T_s =$
$R'_d = 2 \text{ k}\Omega$	$T_s =$	$T_s =$

1.3 Stoßkennlinien

Ermitteln Sie für eine gegebene Schlagweite und Atmosphärendruck die Stoßkennlinie der Schutzfunkenstrecke mit homogenem Feld durch Aufschalten von Stoßspannungen unterschiedlicher Steilheit bei konstanter Ladespannung $U' = 25 \text{ kV}$ (pro Stufe). Wählen Sie den Entladewiderstand zu $R'_e = 66 \Omega$.

Nehmen Sie bei einer Spannungsform jeweils drei Wertepaare U_D, t_d im zeitlichen Abstand von mindestens 15 s auf.

$$R'_d = 43 \Omega$$

$$R'_d = 2 \text{ k}\Omega$$

Nr.	$t_d (ns)$	$U_d (kV)$
1		
2		
3		
\bar{x}		

Nr.	$t_d (ns)$	$U_d (kV)$
1		
2		
3		
\bar{x}		

Schätzen Sie den Wert der statischen Durchbruchspannung $U_{d,stat}$ mit Hilfe des Flächenzeitgesetzes rechnerisch ab. Nähern Sie hierzu jeweils den Verlauf der Spannung bis zum Abschneiden durch eine Gerade an. Stellen Sie zuerst die Gleichungen $u_1(t)$ und $u_2(t)$ für den zeitlichen Verlauf dieser Stoßspannungen mit den konstanten Steigungen S_1 und S_2 auf. Setzen Sie diese dann mit Hilfe des Flächen-Zeit-Gesetzes gleich und lösen Sie die resultierende Gleichung nach der Bezugsspannung U_b auf, welche in diesem Fall gleich der statischen Durchbruchspannung U_{stat} ist. Beachten Sie die unterschiedlichen Zeiten t_0 und t_d der beiden Spannungen.

Herleitung:

$$u_1(t)=$$

$$u_2(t)=$$

$$U_{\text{stat}}=$$

Setzen Sie nun Ihre gemessenen Wertepaare für die mittlere Durchschlagspannung U_d und die Steigung S in die Gleichung für U_{stat} ein.

$$S_1 =$$

$$S_2 =$$

$$U_{\text{stat}} \text{ für } u_1(t) \text{ und } u_2(t): U_{\text{stat}} =$$

2 Wanderwellen auf Leitungen

Ein 500 m langes Energiekabel verbindet eine Ortsnetzstation mit einem Umspannwerk. Auf dem Kabel wird ein Fehler (Fehlerort x) vermutet. Zur Ortung des Fehlers wird das Kabel auf beiden Seiten freigelegt, sodass die offenen Enden vorliegen. Mit Hilfe eines Prüftransformators wird an einem der Enden Hochspannung angelegt, sodass sich der Fehler in Form von Teilentladungsimpulsen bemerkbar macht. Über eine Ankoppeleinheit wird das Fehlersignal ausgekoppelt und kann mit dem Oszilloskop ausgewertet werden. Das Signal breitet sich auf dem Kabel mit einer Geschwindigkeit von $v \approx 200 \text{ m}/\mu\text{s}$ aus.

Finden Sie mit Hilfe des Oszilloskops heraus, wie lange die Wegstrecke bis zum Fehlerort x , gemessen vom Kabelanfang (0 m), ist. Schließen Sie hierzu das Oszilloskop an den Kabelanfang (0m) oder das Kabelende (500m) an.

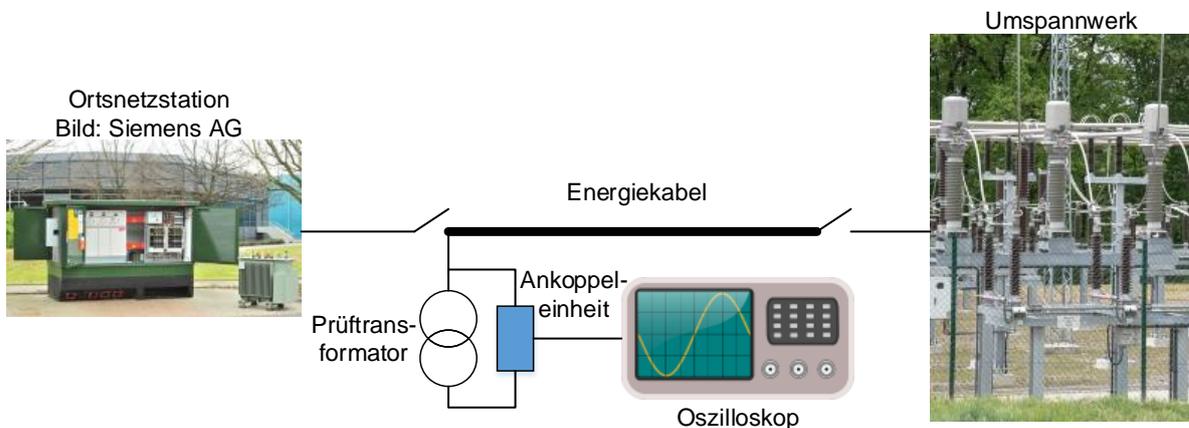
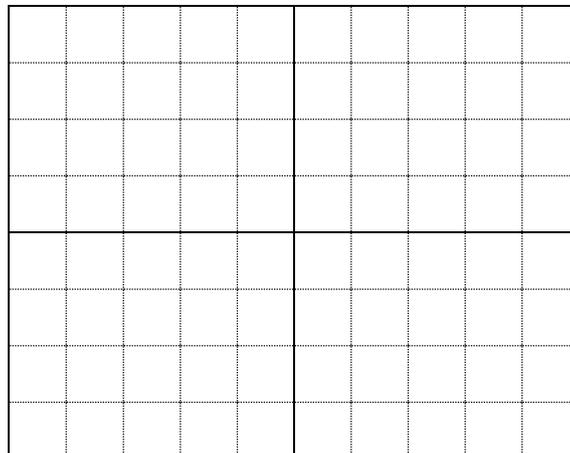


Bild 2.1: Ortung von Teilentladungen in einem Energiekabel

Zeichnen Sie zunächst das Oszillogramm auf und markieren Sie die Punkte, an denen Sie den zeitlichen Abstand bestimmen.



Messen Sie hieraus den zeitlichen Abstand Δt zwischen den beiden Impulsen:

$\Delta t =$

Beschreiben Sie Δt in Abhängigkeit von der Ausbreitungsgeschwindigkeit v und der Kabellänge l und dem Fehlerort x :

$\Delta t(l, x, v) =$

Berechnen Sie hieraus die Wegstrecke

$x =$