


Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel Fakultät Elektrotechnik Institut für Elektrische Anlagen und Automatisierungstechnik Labor für Elektrische Festigkeit Laborleiter: Prof. Dr.-Ing. Martin Könemund Versuchsbetreuung: Dipl.-Ing. Gerald Hiller	
Versuch-Nr. 4: <b>Statistische Untersuchungen mit Blitzstoßspannung</b>	Testat:
Versuchsdatum:                      Abgabedatum:	
Ausgearbeitet von:	
Mitarbeiter:	

### Aufgabenstellung

In diesem Versuch soll die Durchschlagswahrscheinlichkeit einer Spitze-Platten-Anordnung untersucht werden, wobei im ersten Teil nur eine Spitze eingesetzt werden soll und im zweiten Teil dreizehn parallele Spitzen mit gleicher Schlagweite. Die experimentell gefundenen Werte sind mit den errechneten Werten zu vergleichen.

### Beschreibung der Anlage

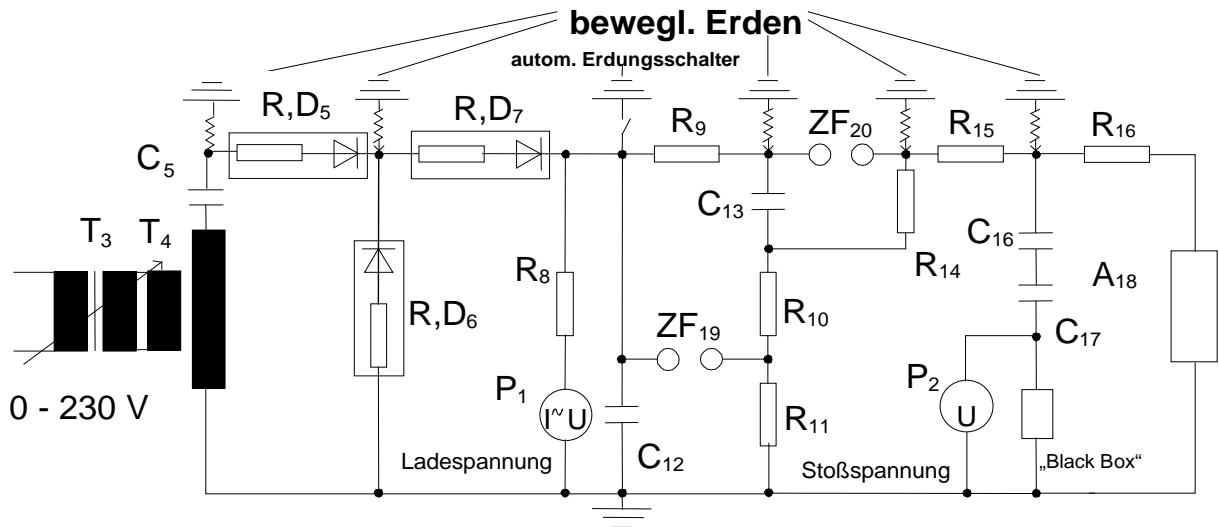


Bild 1: Schaltbild der Stoßspannungsanlage in Raum L 019

Zunächst wird die Wechselspannung mit einer Greinacher-Verdoppelungsschaltung gleichgerichtet. Die Wirkungsweise einer solchen Schaltung ist in Versuch-Nr. 2 bereits beschrieben.

Im Anschluss an die Greinacher-Verdoppelungsschaltung folgt eine zweistufige Stoßanlage. Unter einer Stoßspannung versteht man eine nur sehr kurzzeitig anstehende Hochspannung, wie sie in Netzen der elektrischen Energieversorgung entweder durch äußere atmosphärische Einflüsse (äußere Überspannung, Blitzstoßspannung) oder durch Schaltvorgänge (innere Überspannung, Schaltstoß-

spannung) gelegentlich auftritt. Da solche Stoßspannungen die Betriebsspannung weit überschreiten können, führen sie gegebenenfalls zu Durch- oder Überschlägen in bzw. an Betriebsmitteln und somit zu einer Beeinträchtigung der elektrischen Energieversorgung. Man ist deshalb bestrebt, solche Stoßspannungen in Hochspannungslaboratorien nachzubilden, um betriebssichere Anlagenteile entwickeln und prüfen zu können.

### Kenngrößen für Stoßspannungen

Als Stoßspannung bezeichnet man in der Hochspannungstechnik einen unipolaren Spannungsimpuls, dessen zeitlicher Verlauf und Dauer von der Art der Erzeugung abhängen. Bei den Stoßspannungen kann man drei Typen unterscheiden:

- Rechteck-Stoßspannung
- Keil-Stoßspannung
- doppel-exponentielle Stoßspannung (durch zwei e-Funktionen darzustellen)

Doppel-exponentielle Stoßspannungen werden zur Nachbildung der Beanspruchung bei äußeren (durch Blitzeinschläge verursachte) und bei inneren (durch Schaltvorgänge ausgelöste) Überspannungen benutzt. Folglich werden diese Stoßspannungen in Blitz- und Schaltstoßspannungen unterteilt. Die unterschiedlichen zeitlichen Verläufe sind genormt (VDE 0432 Teil 2) und durch bestimmte Zeitparameter für Stirn und Rücken festgelegt. Da bei Blitzstoßspannungen der wirkliche Verlauf der Stirn infolge der kurzen Dauer nur schwer messtechnisch zu erfassen ist, wird als Hilfskonstruktion die durch die Punkte A und B gehende Stirngerade zur Kennzeichnung der Stirn eingeführt. Eine typische Blitzstoßspannung ist eine Stoßspannung der Form  $1,2/50 \mu\text{s}$ , d. h.  $T_S = 1,2 \mu\text{s}$  und  $T_R = 50 \mu\text{s}$ . Schaltstoßspannungen weisen ungefähr die gleiche Form wie Blitzstoßspannungen auf, sind jedoch von wesentlich längerer Dauer. Eine typische Schaltstoßspannung für Prüfzwecke hat die Form  $250/2500 \mu\text{s}$ . Dabei ist  $T_{CR}$  (time to crest) die Scheitelzeit und  $T_R$  die Rückenhalbwertszeit. Häufig wird zur Kennzeichnung der Dauer der Schaltstoßspannung auch die Scheiteldauer  $T_D$  angegeben, die Zeit, während der der Augenblickswert der Spannung über  $0,9 \cdot \hat{U}$  liegt. Für Prüfungen mit Schaltstoßspannungen werden auch Impulse mit schwingendem Verlauf angewendet.

### Erzeugung von Stoßspannungen

Doppel-exponentielle Blitz- und Schaltstoßspannungen werden mit der gleichen Grundschaltung erzeugt, wobei lediglich die Werte der Schaltelemente geändert werden. Die beiden wichtigsten als „Schaltung a“ und „Schaltung b“ bezeichneten Grundschaltungen sind in Bild 2 dargestellt.

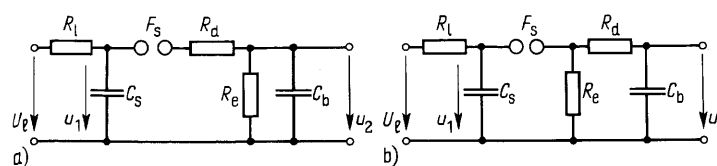


Bild 2: Grundschaltungen einstufiger Stoßspannungsgeneratoren

Der Stoßkondensator  $C_s$  wird über einen hochohmigen Ladewiderstand auf die Gleichspannung  $U_0$  aufgeladen und durch Zünden der Schaltfunkenstrecke  $F$  entladen. Die gewünschte Stoßspannung  $u(t)$  tritt am Belastungskondensator  $C_b$  auf. Eine kurze Stirnzeit erfordert eine rasche Aufladung von  $C_b$  auf den Scheitelwert  $\hat{U}$  und der lange Rücken eine langsame Entladung, was durch  $R_e \gg R_d$  ( $R_e$ : Entlade-widerstand,  $R_d$ : Dämpfungswiderstand) erreicht wird. Die Aufladezeitkonstante von  $C_b$ , durch die die Stirnzeit bestimmt ist, ist dann näherungsweise  $R_d \cdot C_b$ . Der Rücken der Stoßspannung ist durch die Entladung der beiden Kondensatoren bestimmt. Der Scheitelwert der Stoßspannung ist durch die Aufteilung der anfangs vorhandenen Ladung  $U_0 \cdot C_s$  auf  $C_s$  und  $C_b$  gegeben. Für den Ausnutzungsgrad  $\eta$  ergibt sich:

$$\eta = \frac{\hat{U}}{U_0} < \frac{C_s}{C_s + C_b} \quad (1)$$

Da im allgemeinen  $\hat{U}$  bei gegebener Ladespannung möglichst hoch sein soll, wird man  $C_s \gg C_b$  wählen. Damit erfolgt das Abklingen der Stoßspannung im Rücken näherungsweise mit der Zeitkonstanten  $C_s \cdot R_e$ .

Eine weitere wichtige Kenngröße des Stoßspannungsgenerators ist die Stoßenergie, sie ergibt sich aus

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

Sehr hohe Stoßspannungen werden üblicherweise mit einer von E. Marx angegebenen Vervielfachungsschaltung nach Bild 3 erzeugt. Dabei werden mehrere gleiche Stoßkondensatoren in Parallelschaltung aufgeladen und in Reihenschaltung entladen, wodurch eine entsprechend vervielfachte Summenladespannung wirksam wird.

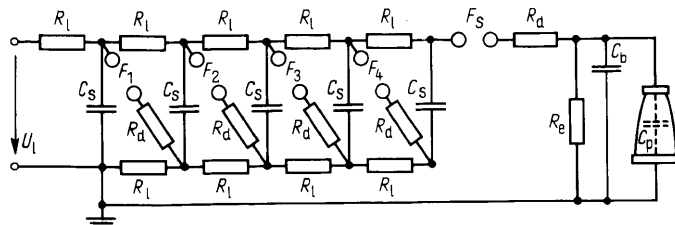


Bild 3: Fünfstufiger Stoßspannungsgenerator nach Marx

Die Stoßkondensatoren  $C_s$  werden über hochohmige Ladewiderstände  $R_l$  in Parallelschaltung auf die Stufenladespannung  $U_0$  aufgeladen. Beim Durchzünden aller Schaltfunkenstrecken  $F$  werden die Stoßkondensatoren  $C_s$  in Reihe geschaltet, so daß  $C_b$  über die Reihenschaltung aller Dämpfungswiderstände  $R_d$  aufgeladen wird. Die Entladung aller Kondensatoren erfolgt über die Widerstände  $R_e$  und  $R_d$ . Eine  $n$ -stufige Schaltung kann auf das einstufige Ersatzschaltbild nach „Schaltung b“ zurückgeführt werden:

$$U_0 = n \cdot U_0' \quad (3), \quad R_d = n \cdot R_d' \quad (4)$$

$$C_s = (1/n) \cdot C_s' \quad (5), \quad R_e = n \cdot R_e' \quad (6)$$

Diese Umrechnung gilt auch für mehrstufige Stoßgeneratoren nach „Schaltung a“.

## Triggerung der Funkenstrecke

Die als Dreielektroden-Funkenstrecke ausgeführte Zündfunkenstrecke ZF wird über einen Lichtwellenleiter ausgelöst. Hierzu befindet sich ein Lichtimpulssendegerät am Bedienpult des Versuchsstandes, mit dem ein Triggersignal mittels faseroptischer Übertragung einem Empfänger zugeführt wird. Der optische Empfänger und die Hochspannungszündimpulserzeugung befinden sich in der mit einer Zündkerze versehenen Kugelelektrode. Mit Hilfe des Zündgerätes wird an der Zündkerze ein Spannungsimpuls von ca. 8 kV erzeugt, der einen Durchschlag von der Zündkerze zur Kugelelektrode verursacht. Dieser Durchschlag leitet so den Durchbruch der Zündfunkenstrecke ein. Die Erzeugung der Spannungsimpulse erfolgt durch Unterbrechung des Primärstromkreises eines Transformators (Prinzip: Kfz-Zündung). Dabei werden die beiden Kondensatoren  $C_{12}$  und  $C_{13}$  auf die Gleichspannung, die nach der Verdoppelungsschaltung anliegt, aufgeladen. Ist dies geschehen, so wird die Zündfunkenstrecke  $ZF_{19}$  durch einen Triggerimpuls gezündet, woraus sich dann eine Reihenschaltung der beiden Kondensatoren ergibt. Die Spannung der beiden Kondensatoren addiert sich und liegt somit über der Durchschlagsspannung der Zündfunkenstrecke  $ZF_{20}$ . Dadurch wird der Prüfling jetzt mit der Stoßspannung beaufschlagt.

## Kalibrierung

Bei diesem Versuch wird die Anlage auch mit einer Kugelfunkenstrecke kalibriert, aber es wird keine Beziehung zwischen Unter- und Oberspannung, sondern zwischen Lade- und Stoßspannung hergestellt. Dazu wird die Ladespannung solange erhöht, bis die Kugelfunkenstrecke bei der Hälfte aller Stöße durchschlägt. Zu dieser Ladespannung notiert man die zugehörige Stoßspannung, die aus VDE 0433 zu ermitteln ist und korrigiert sie mit dem Luftdichtekorrekurfaktor. Trägt man diese Wertepaare in eine Grafik ein, so kann man daraus den Ausnutzungsfaktor  $\eta$  nach folgender Gleichung (7) ermitteln:

$$\hat{U} = 2 \cdot \eta \cdot U_L \quad (7)$$

Der Faktor „2“ ergibt sich daraus, daß es sich um eine zweistufige Stoßanlage handelt.

Die Ladegleichspannung wird durch den Stromfluss durch einen hochohmigen Widerstand  $R_8$  ermittelt, wobei der gemessene Strom in eine Spannung umgesetzt wird. Die Stoßspannung wird mittels eines kapazitiven Spannungsteilers gemessen, der sich aus den Kondensatoren  $C_{16}$ ,  $C_{17}$  und dem Messkondensator in der „Black Box“ zusammensetzt.

Zusätzlich wird nach VDE 0433 der Wert der Stoßspannung entsprechend der eingestellten Schlagweite bestimmt. So erhält man zu jedem Ladespannungsmesswert zwei Stoßspannungswerte, einen Messwert und einen Tabellenwert. Mit diesen Werten zeichnet man dann die Kalibrierungsgerade.

## Durchführung des Versuchs

Zunächst wird eine Spitze gegen die Platte eingesetzt. Dann werden 20 Stöße auf die Anordnung gegeben und die Durchschläge gezählt. Dabei stellt man zuerst solch eine Spannung ein, bei der die Anordnung bei 20 Stößen noch nicht durchschlägt ( $U_{d0}$ ). Anschließend erhöht man die Spannung, bis ein Durchschlag bei jedem Stoß erfolgt ( $U_{d100}$ ). Dasselbe Messverfahren wendet man bei dreizehn parallelen Spitzen

an. Die gemessenen Werte sind mit den nach der Weibull-Verteilung berechneten Werte zu vergleichen. Dabei ist wie folgt vorzugehen:

Es ist zunächst die Verteilung für eine Spitze gegen Platte mit der Weibull-Verteilung nachzubilden. Von dieser Funktion ausgehend erfolgt dann der Rückschluss auf die Verteilung mit dreizehn parallelen Spitzen. Die so ermittelte Kurve ist mit den Messwerten zu vergleichen und zu kommentieren.

### Bestimmung der Vergleichswerte mit der Weibull-Verteilung

Bei Hochspannungsversuchen lassen sich experimentell ermittelte Verteilungen mit der Weibull-Verteilung gut nachbilden, weil mit den drei Parametern  $U_{d0}$ ,  $U_{d63}$  und  $k$  eine gute Anpassung an die wirklichen Verhältnisse gut möglich ist.

$$F(U) = 1 - e^{-\left(\frac{U - U_{d0}}{U_{d63} - U_{d0}}\right)^k} \quad (8)$$

Hierbei ist  $U_{d0}$  die Spannung, bei der die Verteilungskurve den Funktionswert  $F(U) = 0$  annimmt bzw. bei der kein Durchschlag mehr auftritt. Für  $U = U_{d63}$  ergibt sich  $F(U) = 0,63$ .  $U_{d63}$  ist also die Spannung, bei der eine Durchschlagswahrscheinlichkeit von 63 % besteht. Mit der Exponentialkonstante  $k$  kann schließlich die Steilheit der Verteilungskurve verändert und somit dem wirklichen Verlauf angeglichen werden.

Werden mehrere Prüflinge mit jeweils der gleichen Verteilungsfunktion  $F(U)$  parallel betrieben, dann ergibt sich eine neue Verteilungsfunktion für die Gesamtanordnung, wobei die Durchschlagsspannungen zu kleineren Werten hin verlagert werden. In der Praxis kann dies z. B. bei den Isolatoren von Sammelschienen und Freileitungen der Fall sein.

Die Wahrscheinlichkeit, mit der ein einzelner Isolator nicht durchschlägt soll mit  $W = 1 - F(U)$  bezeichnet werden. Bei mehreren parallelen Prüfanordnungen multiplizieren sich diese Wahrscheinlichkeiten, und es ergibt sich bei  $m$  Anordnungen die Gesamtwahrscheinlichkeit

$$W_m = W_1 \cdot W_2 \cdot W_3 \cdot \dots \cdot W_m = [1 - F(U)]^m \quad (9)$$

Nach einigen Umrechnungen ergibt sich für die Durchschlagswahrscheinlichkeit folgende Gleichung (11):

$$F(U)_m = 1 - e^{-m \cdot \left(\frac{U - U_{d0}}{U_{d63} - U_{d0}}\right)^k} \quad (10)$$

In Gleichung (10) sind die Spannungen  $U_{d0}$ ,  $U_{d63}$  und die Exponentialkonstante  $k$  Parameter, die für die Verteilungsfunktion des einzelnen Prüflings gelten. Da nach Gleichung (10) gleiche Exponenten zu gleichen Funktionswerten  $F(U)_m$  führen, leuchtet ein, dass mit größer werdender Anzahl  $m$  gleiche Werte  $F(U)$  bei immer kleineren Spannungen  $U$  erreicht werden. Damit sich die Verteilungsfunktion für  $m$  parallele Prüflinge zu kleineren Spannungen hin verschieben kann, muss  $U_{d0}$  von

vorn herein klein genug, am besten mit  $U_{d0} = 0$  vorgegeben werden, weil bei Spannungen  $U < U_{d0}$  endliche Funktionswerte nicht auftreten können.

## 7. Auswertung

Die rechnerische Auswertung geschieht in folgenden Schritten:

1. Nachbildung der Durchschlagsverteilung für einen Stab mit der Weibull-Verteilung:  
Durch die in 6.2 ermittelten Punkte ist eine Kurve zu zeichnen. Die Werte, die zur Berechnung der Verteilungsfunktion nach Gl.2 fehlen, sind dieser Kurve zu entnehmen. Das fehlende Wertepaar für die Bestimmung des Exponentialfaktors ist dabei im unteren Teil der Kurve mit  $F(U) = 0,2..0,3$  zu suchen. Die Verteilungsfunktion nach Weibull ist dann in das gleiche Diagramm einzuzeichnen.
2. Neue Berechnung der Weibull-Verteilung für  $U_{d0} = 0$  V:  
Diese Funktion ist ebenfalls in das Diagramm einzuzeichnen. Der hierfür neu berechnete Exponentialfaktor ist für die folgende Hochrechnung nötig.
3. Hochrechnung der Weibull-Verteilung auf 13 parallele Stäbe:  
In der in 2. gefundenen Weibull-Funktion wird jetzt  $m = 13$  eingesetzt, um die Verteilungsfunktion für 13 parallele Anordnungen zu erhalten. Die ermittelte Funktion ist in das Diagramm einzutragen und hinsichtlich des  $U_{d50}$  -Wertes mit der gemessenen Verteilung und der Verteilung für  $m = 1$  zu vergleichen.

Diskutieren Sie die Ergebnisse und überlegen Sie, wie sich die Genauigkeit des Experimentes erhöhen ließe.