

# Hochspannungstechnik

Thomas Betz

Hochschule Darmstadt  
University of Applied Sciences  
Fachbereich EIT



## **Prof. Dr.-Ing. Thomas Betz**



Professor für Hochspannungstechnik und elektrische Anlagen im Fachbereich „Elektrotechnik und Informationstechnik“ der Hochschule Darmstadt.

Schwerpunkte in Lehre und Forschung:

- Hochspannungstechnik
- Feldtheorie: Theorie und Praxis
- Teilentladungs- und UHF-Messtechnik
- Sicherheitsaspekte in der Hochspannungstechnik
- Erzeugung und Anwendung höchster Feldstärken

## Inhaltsverzeichnis

<b>Einleitung</b>	<b>I</b>
<b>Lernziele</b>	<b>III</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>V</b>
<b>1 Einführung in die Hochspannungstechnik</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation zum Einsatz hoher und von zunehmend höheren Spannungen .....	1
1.2 Anwendungsbeispiele von Hochspannungsgeräten und -bauteilen .....	4
1.3 Überblick über die verschiedenen Spannungsarten und -formen .....	6
<b>2. Elektrische Felder</b>	<b>11</b>
2.1 Die Wirkungen des elektrischen Feldes .....	11
2.2 Die Erregung eines elektrischen Feldes .....	14
2.3 Methoden zur Berechnung von elektrischen Feldern .....	18
2.3.1 Überlagerungsmethode .....	18
2.3.2 Gauß'scher Satz .....	19
2.3.2 Differentielle Methoden zur Feldberechnung .....	24
2.4 Hochspannungstechnische Anwendungsbeispiele .....	25
2.5 Inhomogene Felder und deren Berechnung .....	27
2.6 Schlussbetrachtung .....	30
<b>3 Erzeugung und Messung hoher Spannungen</b>	<b>33</b>
3.1 Messung hoher Spannungen .....	33
3.2 Erzeugung hoher Wechselspannungen .....	35
3.3 Erzeugung und Messung hoher Stoßspannungen .....	39
3.3.1 Mehrstufige Stoßgeneratoren: .....	48
3.4 Erzeugung und Messung hoher Gleichspannungen .....	54
3.5 Zusammenfassung .....	59
<b>4 Durchschlagverhalten von Isolierstoffen</b>	<b>61</b>

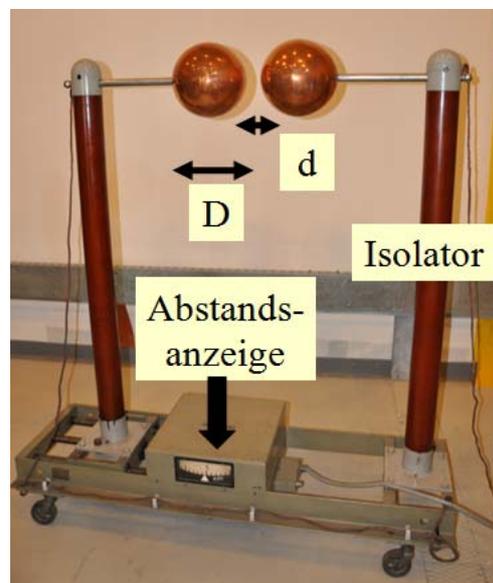
4.1 Gasförmige Isolierstoffe (Luft, SF <sub>6</sub> , ...)	62
4.1.1 Unselbständige Entladung	63
4.1.2 Stoßionisation durch Elektronen	66
4.1.3 Ähnlichkeitsgesetz	69
4.1.4 Selbstständige Entladung (Townsend-Mechanismus)	71
4.1.5 Streamer-Mechanismus	74
4.1.6 Leader-Mechanismus	76
4.1.7 Abhängigkeit der Durchschlagsspannung von Randbedingungen	77
4.1.8 Unvollkommener (Teilentladungs-) Durchschlag	78
4.1.9 Durchschlagsspannungen	81
4.2 Flüssige Isolierstoffe	82
4.2.1 Technische Isolierflüssigkeiten	83
4.2.2 Entladungsverhalten von Isolierflüssigkeiten	84
4.2.3 Alterung und Lebensdauer von Hochspannungsgeräten	88
4.3 Feste Isolierstoffe	89
4.3.1 Verlustfaktor	91
4.3.2 Durchschlagsmechanismen	93
4.3.3 Abschätzung der Lebensdauer von Feststoffen	99
4.4 Teilentladungsmesstechnik	101
<b>5 Blitzentstehung und Blitzschutzmaßnahmen</b>	<b>111</b>
5.1 Blitzentstehung	111
5.2 Fanganordnungen	119
5.3 Blitzschutz von Gebäuden	<b>Fehler! Textmarke nicht definiert.</b>
5.4 Schlussbetrachtungen	125
<b>Anhang: Wie kann man sich als Mensch in freier Natur gegen Blitzschlag schützen ?</b>	<b>127</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>128</b>
<b>Lösungshinweise zu den Aufgaben</b>	<b>131</b>
<b>Glossar</b>	<b>133</b>
<b>Stichwortverzeichnis</b>	<b>Fehler! Textmarke nicht definiert.</b>

### 3 Erzeugung und Messung hoher Spannungen

Dieses Kapitel will Ihnen ein grundlegendes Verständnis für die Erzeugung und Messung hoher Spannungen vermitteln. Es beschreibt wesentliche Konzepte und Elemente zur Auslegung und zum Aufbau von Prüfsystemen und stellt entsprechende Berechnungsgrundlagen zur Verfügung.

#### 3.1 Messung hoher Spannungen

Die dargelegten Spannungsarten, wie Gleichspannungen, Wechsel- und Stoßspannungen, benötigen zum Teil sehr unterschiedliche Messverfahren. Eine Ausnahme bildet das *direkte* Meßverfahren der Kugelfunkenstrecke *KFS*. Dieses Verfahren basiert darauf, dass die kurz vor einem Durchschlag anliegende Spannung über die Geometrie der KFS (Abstand  $d$  und Kugeldurchmesser  $D$ ) festgelegt ist. Das folgende Bild 3.1 zeigt eine Kugelfunkenstrecke mit einem Kugeldurchmesser von  $D = 25$  cm und einem Kugelabstand von 5 cm:



**Abb. 3.1: Kugelfunkenstrecke aus der Hochspannungshalle der Hochschule Darmstadt**

Legt man nun zum Beispiel an die rechte Kugel eine Wechselspannung und erdet die linke Kugel, so kann man die Amplitude der Sinusspannung messen.

Den exakten Wert bestimmen wir mit Hilfe einer Übersicht zu den Durchschlagswerten bei beliebigen Kugelgeometrien (Abbildung 3.2). Aus der Tabelle wird ein Spannungswert von 137 kV ermittelt. Dieser Wert weist bei Wechselspannungen (oder Stoßspannungen) eine Genauigkeit von +/- 3 % auf und gilt für die Bedingung, dass die zu messende Spannung in kV kleiner als der Kugeldurchmesser in mm ist (Kontrolle: 137 < 250).  
Hinweis: für Gleichspannungen reduziert sich die Genauigkeit auf +/-5 %.

*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 °C, p = 1013 mbar = 1013 hPa = 760 Torr).*

*Die Stoßspannungswerte gelten für Rückzeiten größer oder gleich 50 µs, 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 betragen bei Wechsel- und Stoßspannung für d < D/2 mit ±3 % und bei Gleichspannung für d < 0,8D/2 mit ±5 % angenommen, die in Klammern gesetzten Werte weisen größere, ungeklärte Streuungen auf.*

d cm	D = 5 cm		D = 10 cm		D = 15 cm		D = 25 cm		D = 50 cm		D = 75 cm		D = 100 cm		d cm
	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	
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
4	(88,5)	(97,5)	105	109	110	111	112	112	→	→	→	→	→	→	4
5			123	130	133	136	137	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					(209)	(226)	244	254	263	263	265	265	266	266	10
12					(229)	(249)	275	291	309	311	315	315	318	318	12
14							(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						

**Abb. 3.2: Durchschlagspannungen KFS /Küchler/**

Bitte beachten Sie, dass sich dieser Wert auf eine Umgebungstemperatur von  $\vartheta_U = 20^\circ \text{C}$  und einen Druck von  $p = 1013\text{mbar}$  bezieht. Bei abweichenden Werten muss eine Korrektur wie folgt durchgeführt werden:

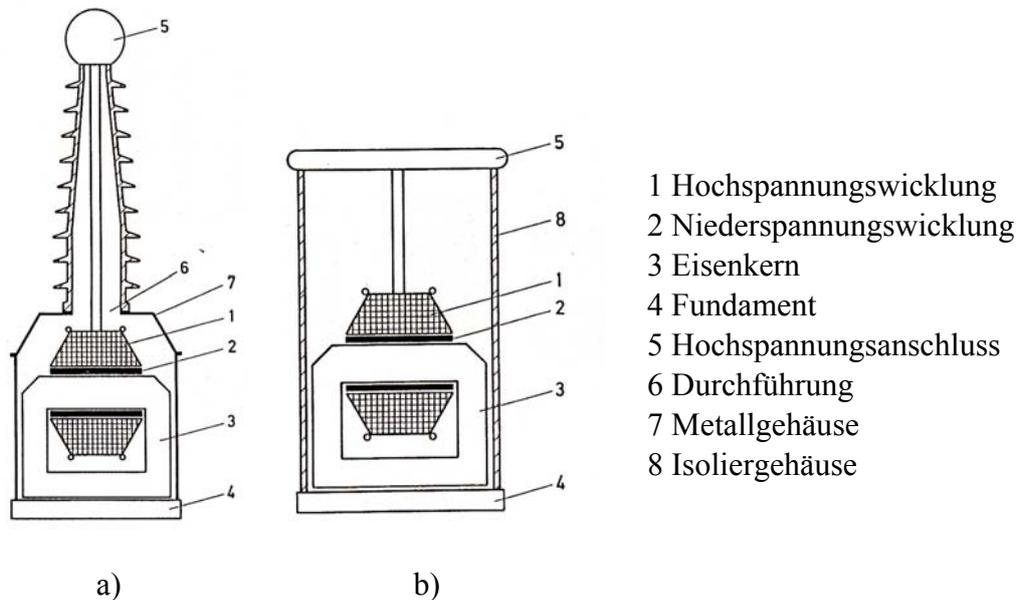
$$\hat{u}_d \approx \hat{u}_{d(0)} \cdot \frac{p}{1013\text{mbar}} \cdot \frac{273\text{K} + 20^\circ\text{C}}{273\text{K} + \vartheta_U (\text{in } ^\circ\text{C})} \quad (3.1)$$

Die Abweichung vom ursprünglichen Wert darf sich in einem Toleranzfaktor-Bereich von 0,9 bis 1,1 abspielen. Die KFS eignet sich hervorragend für orientierende Messungen, nicht aber als normgerechtes Messsystem.

Weitere auf die Spannungsart abgestimmte Messverfahren finden Sie dann in den nachfolgenden speziellen Kapiteln.

### 3.2 Erzeugung hoher Wechselspannungen

Jedes fabrikgefertigte Gerät muss als Ausgangsprüfung eine Wechselspannungsprüfung mit erhöhter Prüfspannung über eine Zeitdauer von 60 Sekunden erfolgreich absolvieren, bevor es ausgeliefert werden darf. Zur Erzeugung von Prüfwechselspannungen werden sogenannte Prüftransformatoren verwendet. Im Gegensatz zu den dreiphasig aufgebauten Leistungstransformatoren im Netz werden die zur Erzeugung hoher Wechselspannungen eingesetzten Prüftransformatoren nur einphasig aufgebaut. Dies hat wirtschaftliche und prüftechnische Gründe. Um nun ein dreiphasiges Hochspannungssystem zu prüfen, müssen die einzelnen Phasen nacheinander geprüft werden.



**Abb. 3.3: Aufbau von Prüftransformatoren: a) Kesselbauweise, b) Isoliermantelbauweise /Kind, Feser/**

Die Abbildung 3.3 zeigt zwei verschiedene 1-phasige Ausführungsformen. Die Kesselbauweise besitzt ein gut wärmeableitendes Metallgehäuse, benötigt aber eine teure Spannungsdurchführung. Die im Folgenden behandelte Isoliermantelbauweise zeichnet sich durch eine kostengünstige Isolierung und die großflächige Anbringung von Abschirm-Elektroden aus.

Zur Erzeugung dieser hohen Wechselspannung kommen zwei Ausführungsarten in Frage:

- Ein Prüftransformator in Isoliermantelbauweise mit Ölisolierung (z. B. 200kV, 100mA)



**Abb. 3.4: Prüftransformator in Isoliermantelbauweise (Hochspannungshalle der Hochschule Darmstadt)**

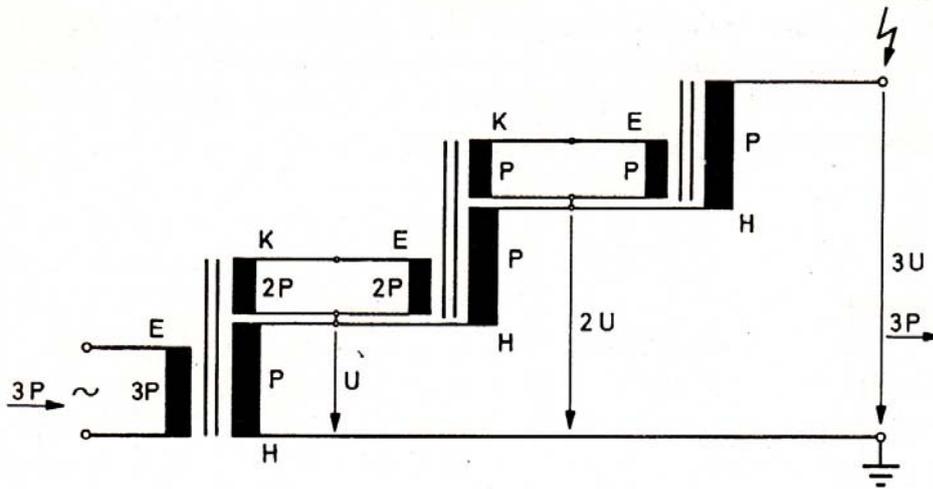
- Wechselspannungs-Kaskade: Zur kostengünstigen Bereitstellung hoher Prüfspannungen werden modular aufgebaute Prüftransformatoren in Reihe geschaltet. Eine solche Prüfanordnung ist zusammen mit einem Prüfling im folgenden Bild erkennbar:



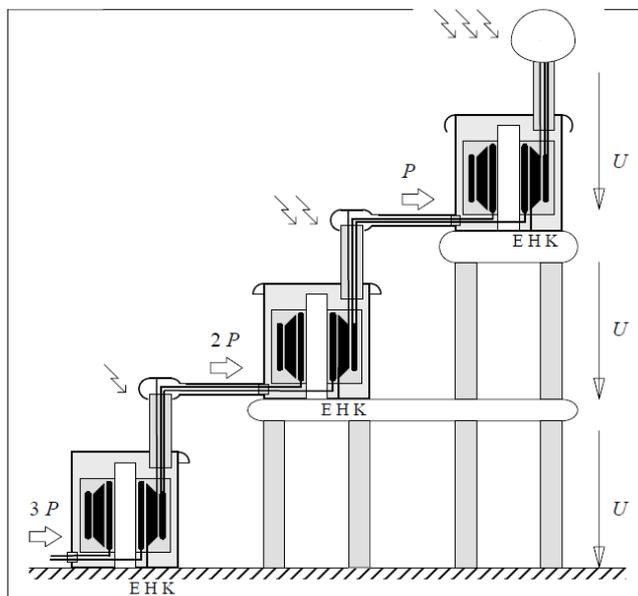
**Abb. 3.5: Gasisolierte Schaltanlage (Prüflabor ABB in Hanau)**

Hierbei handelt es sich um eine Reihenschaltung von zwei 400kV-Prüftransformatoren, die über eine Aluminium-Stange mit einer Phase eines dreiphasigen Prüflings verbunden ist. Bei dem Prüfling handelt es sich um ein dreiphasig gekapseltes gasisoliertes Schaltfeld.

Das zugehörige Ersatzschaltbild einer Kaskadenanordnung sieht wie folgt aus:



**Abb. 3.6 Schematischer Aufbau einer Kaskadenschaltung (E = Erregerwicklung, K = Kopplungswicklung, H = Hochspannungswicklung, P = Prüfleistung einer Hochspannungswicklung). Quelle: /Kind,Feser/**



**Abb. 3.7 Geometrischer Aufbau einer Kaskadenschaltung (E = Erregerwicklung, H = Hochspannungswicklung, K = Kopplungswicklung, P = Prüfleistung einer Hochspannungswicklung) Quelle: /Küchler/**

Zu beachten ist hierbei, dass die untere Erregerwicklung die beiden anderen Erregerwicklungen speisen muss und daher die dreifache Leistung ( $3P$ ) im Vergleich zu einem einzelnen Modul erbringen muss. Weiterhin erkennt man in der Abbildung 3.7, dass der zweite Prüftransformator auf einer isolierenden

Stufe aufgebaut ist, deren Spannungsfestigkeit zur Erde hin durch den Einsatz von vier isolierenden Stützsäulen (graue Balken) gewährleistet wird. Nach identischem Prinzip wird der dritte Prüftransformator auf einer zweiten isolierenden Stufe aufgebaut, welche durch zwei zusätzliche isolierende Stützsäulen einerseits die einfache Spannungsfestigkeit zur ersten Stufe sicherstellt und gleichzeitig die doppelte Spannungsfestigkeit zur Erde gewährleistet. Damit weist der Gesamtaufbau die dreifache Spannungsfestigkeit im Vergleich zur Spannungsfestigkeit eines einzelnen Prüftransformators auf (ausgedrückt durch die drei U-Pfeile in Abb. 3.7).

Nachdem nun bekannt ist, wie hohe Wechselspannungen erzeugt werden können, stellt sich die Frage, welche Prüfspannungshöhe an einen Prüfling angelegt werden muss. Dazu ist in der folgenden Tabelle 3.1 ein Auszug aus der Norm IEC 60694 aufgeführt.

Bemessungs- spannung $U_r$ /kV, Eff./	Prüfwechselspannung $U_d$ /kV, Effektivwert/		Blitzstoßspannung $U_p$ /kV, Scheitelwert/	
	Phase-Phase, Phase-Erde	Spannung über die Trennstrecke	Phase-Phase, Phase-Erde	Spannung über die Trennstrecke
<b>72,5 kV</b>	140	160	325	375
<b>123 kV</b>	230	270	550	650
<b>245 kV</b>	360	415	850	950
	395	460	950	1050
	460	530	1050	1200

**Tabelle 3.1 Auszug von Prüfspannungswerten nach IEC 60694**

Für jede Spannungsebene sind eine Prüfwechselspannung und eine Blitzstoß-Prüfspannung vorgegeben. Wenn ein Schaltgerät eine Trennstrecke aufweist, so sind höhere Prüfwerte anzuwenden. Dies ist damit begründet, dass Trennstrecken im Falle von Wartungsarbeiten die Personensicherheit sicherstellen müssen und daher eine höhere Spannungsfestigkeit aufweisen müssen. Für Spannungsebenen ab 245 kV gibt es mehrere Prüfspannungsklassen. Der Kunde kann je nach Blitzgefährdung und in Abhängigkeit der in seinem Netz eingesetzten Überspannungsmaßnahmen aus mehreren Prüfklassen auswählen. Werden die Hochspannungsbetriebsmittel in Gebieten mit hoher Gewitterhäufigkeit eingesetzt, sollte man immer die höchste Prüfklasse innerhalb der jeweiligen Spannungsebene wählen (z. B. 1050 kV Prüf-Stoßspannung für Geräte ohne integrierte Trennstrecke).

Zur Wechselspannungsmessung eignen sich nach /Kind, Feser/ die folgenden Messsysteme:

- Kapazitiver Teiler (Erdkapazitäten beachten! Genauigkeiten  $< 1\%$ ),
- Scheitelwertmessung, benannt nach deren Erfinder „Chubb und Fortescue“,
- Scheitelwertmessung mit kapazitivem Teiler,
- Elektrostatisches Voltmeter,
- Spannungswandler (induktiver und kapazitiver Spannungswandler, Genauigkeiten deutlich kleiner  $1\%$ , geeignet für Kalibrierzwecke).

### 3.3 Erzeugung und Messung hoher Stoßspannungen

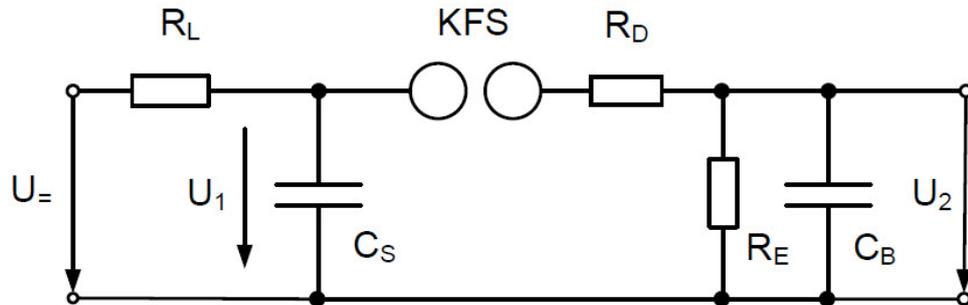
Die dimensionierende Größe für ein Hochspannungsgerät bis ca. 300 kV ist die Blitzstoßspannung. Zur Erzeugung hoher Blitzstoßspannungen werden sogenannte „Marx'sche (Stoß-) Generatoren“ eingesetzt.

Das Wirkungsprinzip soll hier nur vereinfacht beschrieben werden. Eine Gleichspannungsquelle wird auf eine Anordnung geschaltet, die sowohl einen Ladekreis als auch einen Entladekreis enthält. Die Lade- bzw. Entladekreise bestehen aus Kondensatoren, die über Widerstände mit einem Schalter auf die Gleichspannungsquelle geschaltet werden. Damit überlagern sich zwei exponentielle Spannungsverläufe zu einer Stoßspannung (siehe Bild 3.1 und 3.12). Der Anstieg der Stoßspannung ist durch den Ladekreis geprägt, der sogenannte Rücken der Stoßspannung hingegen wird durch den Entladekreis bestimmt.



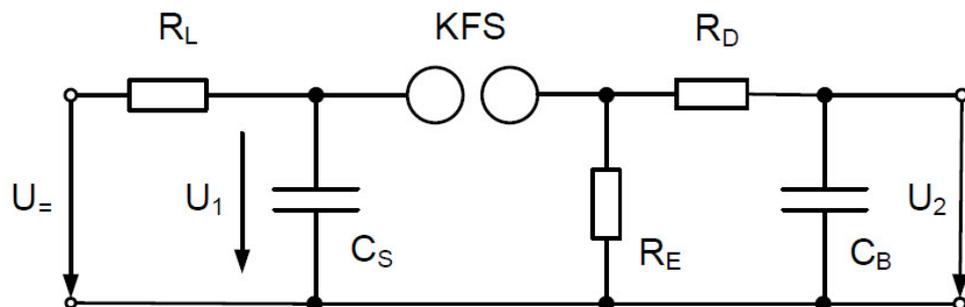
**Abb. 3.8 Blitzstoßgenerator 400 kV (Hochspannungshalle der Hochschule Darmstadt)**

Das Bild 3.8 zeigt den Stoßgenerator, der im Hochspannungslabor der Hochschule Darmstadt vorhanden ist und Stoßspannungen bis 400 kV erzeugen kann. Dieser Generator besteht aus 4 Stufen. Die Ersatzschaltung einer solchen einzelnen Stufe ist im folgenden Bild 3.9 gezeigt:



**Abb. 3.9 Grundsaltung (Typ A) eines Stoßspannungsgenerators.**  $U =$  Lade-Gleichspannung,  $C_S$  Stoßkapazität,  $R_L$  Ladewiderstand, KFS Kugelfunkenstrecke (wirkt wie Schalter),  $R_E$  Entladewiderstand,  $R_D$  (Lade-) Dämpfungswiderstand,  $C_B$  Belastungskapazität,  $U_1$  Startspannung,  $U_2$  resultierende Stoßspannung /Hilgarth/

Zur Erzielung eines besseren Wirkungsgrades und speziell bei geringen Belastungskapazitäten, eignet sich die leicht modifizierte Grundsaltung aus Bild 3.10.



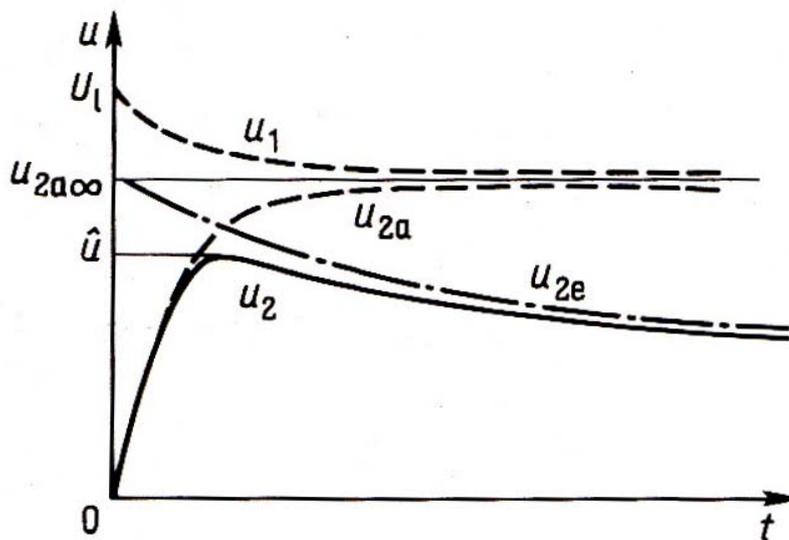
**Abb. 3.10 Modifizierte Grundsaltung (Typ B) eines Stoßspannungsgenerators.**  $U =$  Lade-Gleichspannung,  $C_S$  Stoßkapazität,  $R_L$  Ladewiderstand, KFS Kugelfunkenstrecke (wirkt wie Schalter),  $R_E$  Entladewiderstand,  $R_D$  (Lade-) Dämpfungswiderstand,  $C_B$  Belastungskapazität,  $U_1$  Startspannung,  $U_2$  resultierende Stoßspannung /Hilgarth/

Das Funktionsprinzip ist im nachfolgenden Bild verdeutlicht. Ausgehend von

einer Ladespannung  $U_1$ , erfolgt eine Umladung und die speisende Ladespannung sinkt ab auf den Wert  $U_{2a\infty}$ . Dieser Wert  $U_{2a\infty}$  entspricht auch dem theoretischen Endwert der Spannung des Ladekreises (die aber nicht erreicht wird, da gleichzeitig zur Aufladung schon die Entladung beginnt).

Die Kurve  $U_{2a}$  zeigt also die theoretische Ladekurve, die Kurve  $U_{2e}$  hingegen skizziert die theoretische Entladekurve.

Die eigentliche Stoßspannung  $U_2$  ergibt sich nun aus der Überlagerung der beiden Kurvenformen. Der Verlauf von  $U_2$  kann mit Hilfe von Differentialgleichungen gelöst werden. Dies soll aber hier nicht weiter vertieft werden.



**Abb. 3.11 Erzeugung hoher Stoßspannungen durch Überlagerung von Lade- und Entladekreisen /Hilgarth/**

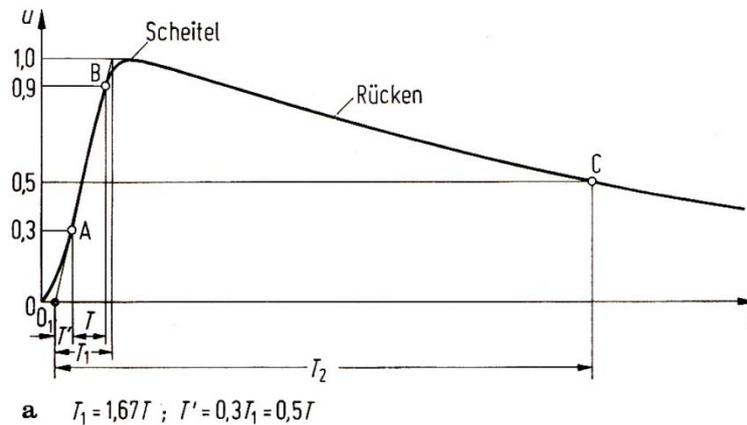
Die Stoßspannungskennwerte sind durch die Anstiegszeit (Stirnzeit)  $T_1$  und die Rückenhalfwertszeit  $T_2$  gemäß Bild 3.12 definiert. Im Falle von Blitzstoßspannungen entspricht  $T_1$  als linearer Teil des Spannungsanstiegs einer Zeitkonstante von 1,2 Mikrosekunden ( $1,2 \mu\text{s}$ ).

Da jede Versuchsanordnung ein anderes Einschwingverhalten aufweist, hat man eine Linearisierung der Stoßspannungskurve durch Einführung der Punkte A und B bei jeweils 30% und 90% des Scheitelwertes vereinbart.

Die Rückenhalfwertszeit  $T_2$  kennzeichnet die Zeitspanne des linearen Anstiegs bis zum Abklingen der Spannung auf 50% des Scheitelwertes (bei Blitzstoßspannungen 50 Mikrosekunden). Insgesamt bezeichnet man diese Stoßspannung in der Kurzform  $1,2/50 \mu\text{s}$ .

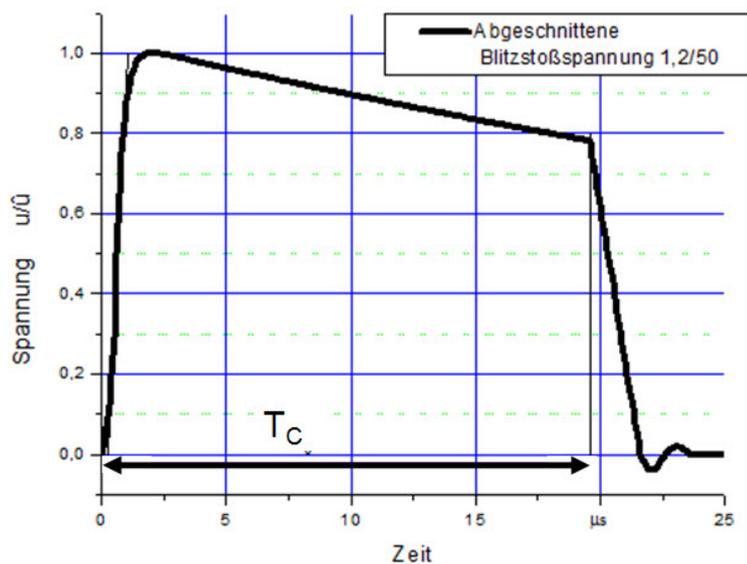
Die Gerade durch die Punkte A und B legt den virtuellen Startpunkt  $0_1$  und das Erreichen des linear angesetzten Scheitelwertes fest. Zwischen  $0_1$  und Erreichen von 30% des Scheitelwertes liegt die Zeitspanne  $T^*$ . Die Zeitspanne zwischen A und B wird durch  $T$  definiert.  $T_1$  ergibt sich als Zeitdifferenz zwischen

$0_1$  und linearem Erreichen des Scheitelwertes.



**Abb. 3.12** Darstellung einer normierten Blitzstoßspannung nach /Hilgarth/. Linearisierung durch die Punkte A (bei 30% des Scheitelwertes) und B (bei 90 % des Scheitelwertes). Virtueller Startpunkt  $0_1$ , Zeitspanne von  $0_1$  bis 30% Scheitelwert ist  $T'$ , Zeitspanne von A bis B ist  $T$ , Zeitspanne von  $0_1$  bis Erreichen des linearen Scheitelwertes ist  $T_1$ , Zeitspanne von  $0_1$  bis C ist  $T_2$

Eine Besonderheit der Prüfung stellen sogenannte abgeschnittene Stoßspannungen dar. Hierbei wird der Effekt nachgebildet, dass die Isolation das Spannungsmaximum zwar beherrscht, dann aber im Verlauf des Spannungsrückens zusammenbricht.

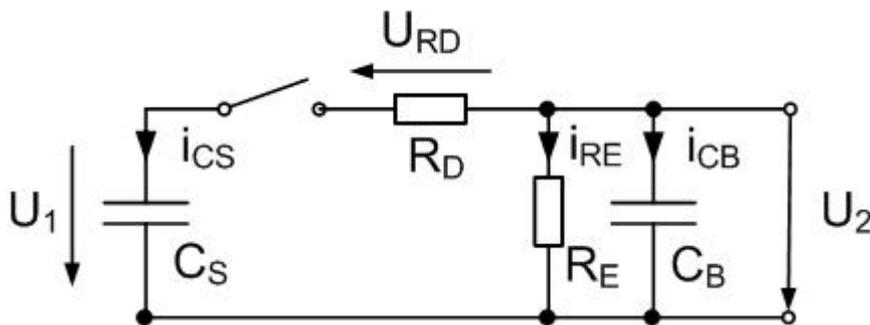


**Abb. 3.13** Beispiel einer abgeschnittenen Stoßspannung (Simulation). Scheitelwert der Stoßspannung  $\hat{U}$ , zeitlicher Verlauf der Spannung  $u$

Hierbei definiert die Zeitspanne  $T_C$  die Abschneide- bzw. die Durchschlagszeit. Im obigen Bild ist eine solche abgeschnittene Stoßspannung simuliert. Man erkennt, dass das  $dU/dt$  des Spannungszusammenbruchs etwas geringer ist als das  $dU/dt$  des Spannungsanstiegs. In Realität kann dieser Spannungszusammenbruch aber sehr viel rascher erfolgen, was zu Wanderwelleneffekten und damit zu hohen Überspannungen an Wicklungen führen kann. Deshalb werden insbesondere induktive Spannungswandler mit abgeschnittener Stoßspannung geprüft.

Im Folgenden werden die bereits vorgestellten zwei Schaltungsarten (Abb. 3.9 und 3.10) zur Erzeugung hoher Stoßspannungen an einem Beispiel berechnet. Hierbei sind einige Randbedingungen zu berücksichtigen. Einerseits sollte die Kapazität  $C_S$  eine Größenordnung größer als die Belastungskapazität der Grundsaltung  $C_B$  gewählt werden (ca. 10:1). Weiterhin sollte die Belastungskapazität  $C_B$  etwa 10-fach größer als die Prüflingskapazität  $C_{PO}$  sein. Würde man die Belastungskapazität in der Größenordnung der Stoßkapazität wählen, würde der Scheitelwert der resultierenden Stoßspannung nur etwa die Hälfte des maximal möglichen Wertes erzielen (hohe Entladung der Stoßkapazität).

Im Folgenden soll die Berechnung der Stoßspannung  $u_2(t)$  am Beispiel der Grundsaltung A aufgezeigt werden. Der Ausgangszustand wird im nächsten Bild dargestellt:



**Abb. 3.14: Grundsaltung A zur Erzeugung von Blitzstoßspannungen. Bezeichnungen wie in Abb. 3.9. Zusätzliche Bezeichnungen: Kapazitiver Strom  $i_{CS}$ ,  $i_{CB}$  und ohmscher Strom  $i_{RE}$ , Spannung über dem Ladewiderstand  $U_{RD}$ , Schalter zur Nachbildung der Kugelfunkenstrecke**

Beim Schließen des Schalters (Funkenstrecke zündet durch) erfolgt eine Umladung des Kondensators  $C_S$  auf die Reihenanzordnung von  $C_S$  und  $C_B$ . Dieser Vorgang soll nun berechnet werden. Dazu beginnen wir mit einem Maschenumlauf:

$$u_1 - u_2 - u_{RD} = 0 \quad (3.2)$$

$$\boxed{u_1 = u_2 - i_{CS} \cdot R_D} \quad (3.3)$$

Nun führen wir eine Knotenpunktanalyse durch:

$$-i_{CS} = i_{RE} + i_{CB} \quad (3.4)$$

$$-i_{CS} = \frac{u_2}{R_E} + C_B \cdot \frac{du_2}{dt} \quad (3.5)$$

Gleichzeitig gilt für  $i_{CS}$ :

$$i_{CS} = C_S \cdot \frac{du_1}{dt} \quad (3.6)$$

Mit Gleichung 3.3 ergibt sich:

$$i_{CS} = C_S \cdot \frac{d}{dt}(u_2 - i_{CS} \cdot R_D) \quad (3.7)$$

Fasst man Gleichung 3.7 und 3.5 zusammen, ergibt sich:

$$-\frac{u_2}{R_E} - C_B \cdot \frac{du_2}{dt} = C_S \cdot \frac{du_2}{dt} - C_S \cdot R_D \cdot \frac{di_{CS}}{dt} \quad (3.8)$$

Es folgt mit Gleichung 3.5:

$$-\frac{u_2}{R_E} - C_B \cdot \frac{du_2}{dt} = C_S \cdot \frac{du_2}{dt} - C_S \cdot R_D \cdot \left[ -\frac{du_2}{dt} \cdot \frac{1}{R_E} - C_B \cdot \frac{d^2u_2}{dt^2} \right] \quad (3.9)$$

$$\boxed{R_E \cdot R_D \cdot C_S \cdot C_B \cdot \frac{d^2u_2}{dt^2} + (R_E \cdot C_S + R_D \cdot C_S + R_E \cdot C_B) \cdot \frac{du_2}{dt} + u_2 = 0} \quad (3.10)$$

Gleichung 3.10 stellt eine homogene lineare Differentialgleichung 2. Ordnung dar. Im Folgenden erfolgt eine Umformung auf eine normierte Form:

$$\boxed{\frac{d^2u_2}{dt^2} + \frac{(R_E \cdot C_S + R_D \cdot C_S + R_E \cdot C_B)}{R_E \cdot R_D \cdot C_S \cdot C_B} \cdot \frac{du_2}{dt} + \frac{1}{R_E \cdot R_D \cdot C_S \cdot C_B} \cdot u_2 = 0} \quad (3.11)$$

Zur Lösung dieser Differentialgleichung 2. Ordnung wird mathematische Hilfe herangezogen /Stingl/. Es werden neue Koeffizienten  $B_1$  und  $B_0$  eingeführt:

$$\frac{d^2u_2}{dt^2} + B_1 \cdot \frac{du_2}{dt} + B_0 \cdot u_2 = 0 \quad (3.12)$$

Die normierte Form nach 3.12 kann wie folgt umgeformt werden:

$$\alpha^2 + B_1 \cdot \alpha + B_0 = 0 \quad (3.13)$$

Es ergeben sich die nachstehenden Koeffizienten:

$$\alpha_{1,2} = -\frac{B_1}{2} \pm \sqrt{\frac{B_1^2}{4} - B_0} \quad (3.14)$$

Aus Gleichung 3.11 ist  $B_1$  ableitbar zu:

$$B_1 = \frac{1}{R_D \cdot C_B} + \frac{1}{R_E \cdot C_B} + \frac{1}{R_D \cdot C_S} \quad (3.15)$$

Ebenso kann  $B_0$  ermittelt werden:

$$B_0 = \frac{1}{R_E \cdot R_D \cdot C_S \cdot C_B} \quad (3.16)$$

Damit kann nun eine allgemeine Lösung der Differentialgleichung nach /Stingl/ angegeben werden (mit noch unbekanntem Koeffizienten  $C_1$  und  $C_2$ ):

$$u_2(t) = C_1 \cdot e^{-\alpha_1 t} + C_2 \cdot e^{-\alpha_2 t} \quad (3.17)$$

Im Folgenden müssen daher erst die unbekanntem Koeffizienten  $C_1$  und  $C_2$  ermittelt werden. Dazu müssen wir zunächst die Randbedingungen unserer Grundschialtung betrachten. Im Zeitpunkt  $t = 0$  ist die Spannung  $u_2 = 0$ . Damit folgt mit 3.17:

$$u_2(t=0) = 0 = C_1 \cdot e^0 + C_2 \cdot e^0 \quad \Rightarrow \quad C_1 = -C_2 \quad (3.18)$$

$$u_2(t) = C_1 \cdot (e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}) \quad (3.19)$$

Da man in der Elektrotechnik sehr mit Zeitkonstanten vertraut ist, wird Gleichung 3.19 umgestellt und die Zeitkonstanten  $\tau_1$  und  $\tau_2$  eingeführt.

$$\tau_1 = \frac{1}{\alpha_2} \quad \tau_2 = \frac{1}{\alpha_1} \quad (3.20)$$

Damit ergibt sich:

$$u_2(t) = C_1 \cdot \left( e^{-\frac{t}{\tau_2}} - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) \quad (3.21)$$

Nun muss der Koeffizient  $C_1$  berechnet werden. Dazu benötigen wir die Ladespannung am Kondensator  $C_S$  vor dem Schliessen des Schalters ( $U_1(t=0) = U_0$ ). Die Zusammenhänge werden in Abb. 3.15 gezeigt:

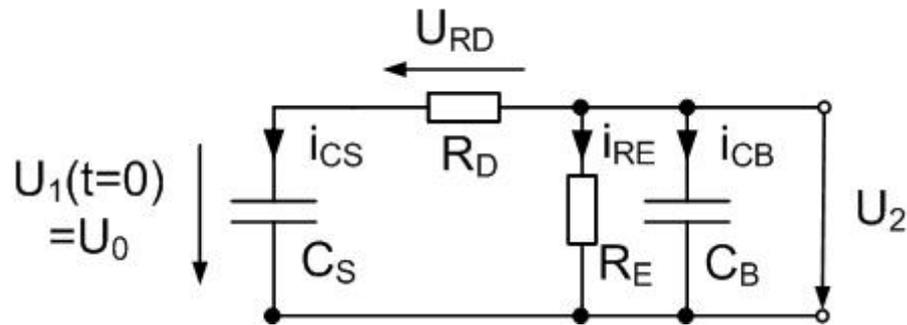


Abb. 3.15 Zustand der Grundschaltung A zum Startzeitpunkt

Mit Hilfe eines Maschenumlaufes erhält man mit  $u_2 = 0$ :

$$U_0 = -u_{RD} = -i_{CS} \cdot R_D \quad (3.22)$$

Durch Einsetzen des kapazitiven Stromes  $i_{CS}$  folgt:

$$U_0 = R_D \cdot \left( \frac{u_2(t=0)}{R_E} + C_B \cdot \frac{du_2(t=0)}{dt} \right) \quad (3.23)$$

Zur Lösung dieser Gleichung benötigen wir die erste Ableitung von  $u_2$ , die wir aus Gleichung 3.18 berechnen:

$$\frac{du_2(t)}{dt} = C_1 \cdot \left( \left( -\frac{1}{\tau_2} \right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}} - \left( -\frac{1}{\tau_1} \right) e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) \quad (3.24)$$

Mit Einsetzen der Randbedingungen erhält man:

$$U_0 = R_D \cdot \left[ \frac{C_1}{R_E} \cdot (e^0 - e^0) + C_B \cdot C_1 \cdot \left( \left( -\frac{1}{\tau_2} \right) \cdot e^0 - \left( -\frac{1}{\tau_1} \right) \cdot e^0 \right) \right] \quad (3.25)$$

Damit folgt für  $C_1$ :

$$C_1 = \frac{U_0}{R_D \cdot C_B} \cdot \frac{1}{\frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_2}} \quad (3.26)$$

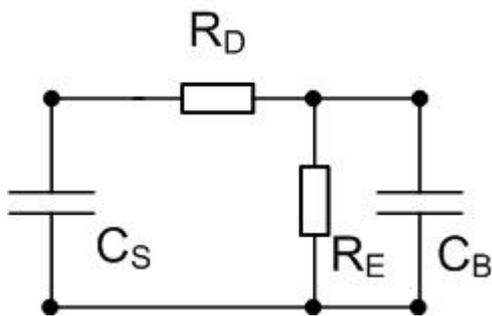
Damit ist die Differentialgleichung gelöst:

$$u_2(t) = \frac{U_0}{R_D \cdot C_B} \cdot \frac{\tau_1 \cdot \tau_2}{\tau_2 - \tau_1} \cdot \left( e^{-\frac{t}{\tau_2}} - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) \quad (3.27)$$

Die Berechnung gestaltet sich trotzdem noch schwierig, da die Zeitkonstanten mit Hilfe von Gleichung 3.14 immer noch kompliziert sind.

Daher wird eine Vereinfachung der in Gleichung 3.27 aufgeführten Zeitkonstanten durchgeführt. Denn man erkennt an Gleichung 3.27, daß man den Term in einen Ladevorgang (entsprechend  $\tau_1$ ) und einen Entladevorgang (entsprechend  $\tau_2$ ) aufsplitten kann:

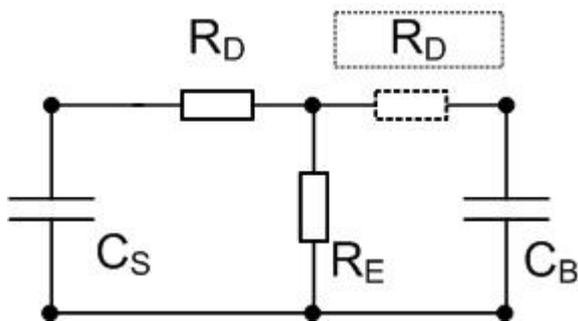
Den Ladevorgang kann man wie folgt vereinfachen:



Beim Laden sind die Kapazitäten  $C_S$  und  $C_B$  in Reihe geschaltet und die Widerstände  $R_D$  und  $R_E$  (bei kurzgeschlossener Spannungsquelle  $C_S$ ) parallel geschaltet. Damit ergibt sich:

$$\tau_1 = \left( \frac{1}{R_D} + \frac{1}{R_E} \right) \cdot \left( \frac{1}{C_S} + \frac{1}{C_B} \right) = \frac{R_D \cdot R_E}{R_D + R_E} \cdot \frac{C_S \cdot C_B}{C_S + C_B} \quad (3.28)$$

Der Entladevorgang kann wie folgt dargestellt und vereinfacht werden:



$$\tau_2 = R_E \cdot C_B + (R_E + R_D) \cdot C_S \quad (3.29)$$

Mit der folgenden Randbedingung

$$C_S \cdot R_E \gg C_B \cdot R_E > C_B \cdot R_D \quad (3.30)$$

ergibt sich (Reihenschaltung R und Parallelschaltung C):

$$\tau_2 = (R_E + R_D) \cdot (C_S + C_B) \quad (3.31)$$

Die folgende Übersicht zeigt nun alle wichtigen Kenngrößen für die beiden Grundschaltungen A und B:

Schaltungsart	A	B
Stirnzeitkonstante	$\tau_1 = \frac{R_E \cdot R_D}{R_E + R_D} \cdot \frac{C_S \cdot C_B}{C_S + C_B}$	$\tau_1 = R_D \cdot \frac{C_S \cdot C_B}{C_S + C_B}$
Rückenzeitkonstante	$\tau_2 = (R_E + R_D) \cdot (C_S + C_B)$	$\tau_2 = R_E \cdot (C_S + C_B)$
Wirkungsgrad	$\eta = \frac{\hat{U}}{U_0} = \frac{R_E}{R_E + R_D} \cdot \frac{C_S}{C_S + C_B}$	$\eta = \frac{\hat{U}}{U_0} = \frac{C_S}{C_S + C_B}$
Vorteile		Höherer Ausnutzungsgrad

**Tab. 3.1 Kennwerte zur Berechnung der Stirn- und Rückenzeit**

Wendet man die obigen Parameter an, dann können die Stirn- und Rückenhalbwegszeiten für den Fall 1,2/50  $\mu\text{s}$  wie folgt bestimmt werden:

$$T_1 = 2,96 \cdot \tau_1 \quad T_2 = 0,73 \cdot \tau_2 \quad (3.32)$$

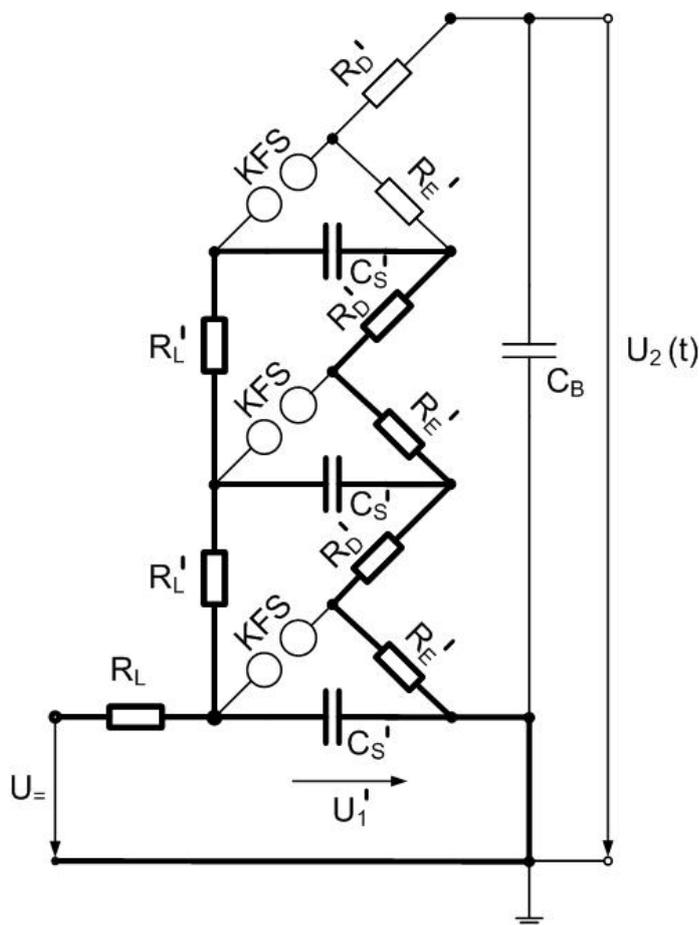
**Hinweis:** für andere Stoßspannungsformen müssen anstelle 2,96 und 0,73 andere Faktoren verwendet werden /Hilgarth/.

### 3.3.1 Mehrstufige Stoßgeneratoren:

Mit Hilfe obiger Zusammenhänge kann nun die Erweiterung auf mehrstufige Stoßspannungsgeneratoren erfolgen. Hierbei werden die einzelnen Stufen in Reihe geschaltet, sodass sich für die Gesamtanordnung mit „n“-Stufen nachfolgende Zusammenhänge ergeben (die Größen einer Stufe werden mit einem hochgestellten Strich gekennzeichnet):

$$\begin{aligned}
 R_{D,gesamt} &= R_D' \cdot n & R_{E,gesamt} &= R_E' \cdot n \\
 C_{S,gesamt} &= \frac{C_S'}{n} & U_{gesamt} &= U_2(t) = U_{Stufe} \cdot n = U_1' \cdot n
 \end{aligned}
 \tag{3.33}$$

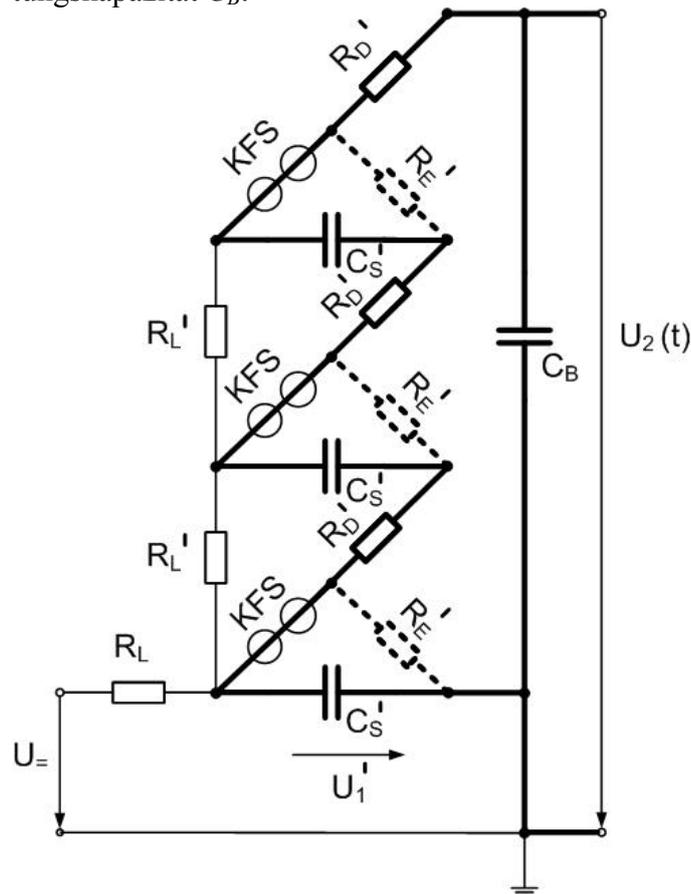
Am Beispiel eines 3-stufigen Stoßgenerators soll zunächst der Ladevorgang dargestellt werden. Hierbei werden die Stoßkapazitäten der einzelnen Stufen über die Ladewiderstände  $R_L$  bzw.  $R_L'$  und die Dämpfungs- und Entladewiderstände  $R_D'$  und  $R_E'$  der einzelnen Stufen geladen.



**Abb. 3.14** Ladevorgang eines 3-stufigen Stoßgenerators. Ladewiderstand  $R_L$ , ( $R_L'$  pro Stufe), Lade- und Entladewiderstand pro Stufe  $R_D'$  und  $R_E'$ , Kugelfunkenstrecke KFS, Stoßkapazität pro Stufe  $C_S'$ , Belastungskapazität  $C_B$ , Gleichspannung  $U_0$ , Ladespannung  $U_1'$ , Stoßspannung  $U_2(t)$

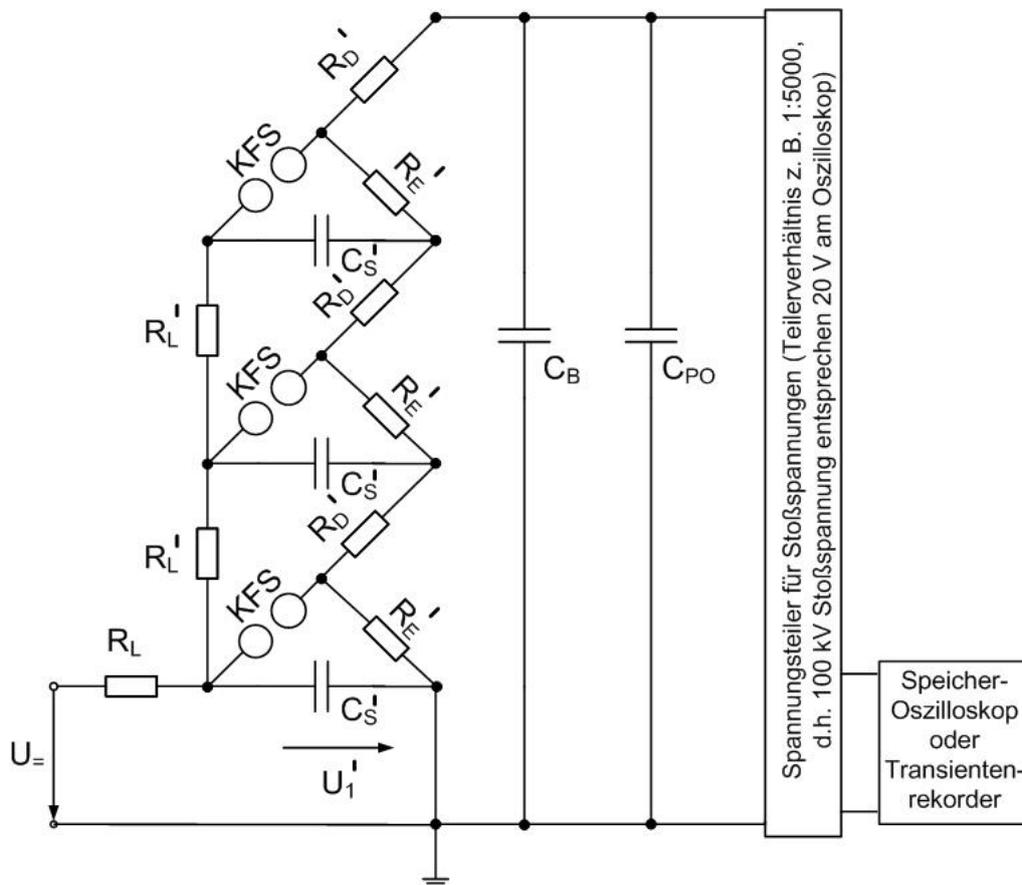
Man erkennt, dass die einzelnen Stufen im Ladevorgang parallel geschaltet sind und sich somit die Stoßkondensatoren  $C_S'$  jeder Stufe auf eine identische Gleichspannung  $U_1'$  aufladen.

Sobald eine Kugelfunkenstrecke KFS entweder durch Triggerung oder bei Erreichen ihrer Durchschlagsfestigkeit durchzündet, ergibt sich an den anderen KFS ein sprunghafter Spannungsanstieg und alle KFS zünden nahezu gleichzeitig durch. Nach dieser Zündung aller KFS verhalten diese sich wie geschlossene Schalter (mit sehr geringem Innenwiderstand). Dadurch werden alle Stoßkondensatoren  $C_S'$  nun in Reihe geschaltet und speisen damit die Belastungskapazität  $C_B$ :



**Abb. 3.15 Entladevorgang eines 3-stufigen Stoßgenerators.**  
(Bezeichnungen wie Abb. 3.14)

Hierbei ist ersichtlich, dass sich die Lade- und Entladewiderstände addieren, während sich die Stufen-Stoßkapazitäten  $C_S'$  aufgrund der Reihenanordnung mit dem Kehrwert addieren. Im Endergebnis ergibt dies eine resultierende Stoßkapazität von  $C_S'/n$ . Die Stufenspannungen hingegen addieren sich zur Gesamt-Stoßspannung  $U_2(t)$ . Eine Übersicht über die Gesamtanordnung einer Blitzstoßspannungskette gibt das nachstehende Bild:



**Abb. 3.16 Prinzip-Anordnung für eine Blitzspannungsprüfung. Prüfobjekt gekennzeichnet durch  $C_{PO}$ , Bezeichnungen wie Abb. 3.14**

Abb. 3.16 zeigt -ausgehend von links nach rechts- zunächst den bereits in Abb. 3.14 und Abb. 3.15 beschriebenen Stoßspannungsgenerator (mit zugehöriger Belastungskapazität  $C_B$ ), der die Spannungsvervielfachung in Abhängigkeit von der Anzahl der Stufen erzeugt. Danach folgt das Prüfobjekt, welches durch seine Eigenkapazität  $C_{PO}$  nachgebildet wird. Um den Verlauf der Stoßspannung messen zu können, folgt im rechten Bildteil ein Spannungsteiler, der die Spannung soweit herunterteilt, dass der Messbereich eines Speicheroszilloskops bzw. eines Transientenrekorders nicht überschritten wird. Für eine zusätzliche Spannungsreduzierung kann auch ein Tastkopf vor das Speicheroszilloskop geschaltet werden.

Der Spannungsteiler muss in der Lage sein, sehr schnelle impulsartige Spannungsänderungen messen zu können. Dazu wird ein sogenannter gedämpftkapazitiver Teiler eingesetzt, der aus einer Reihenschaltung aus Kapazitäten und Dämpfungswiderständen besteht (siehe Abb. 3.22).

Nachdem nun bekannt ist, wie man Blitzstoßspannungen erzeugen kann, stellt sich die Frage, nach welchen Kriterien man die Blitzstoßfestigkeit von Hochspannungsbauteilen überprüft. Hierzu kommt die Norm IEC 60694 zur

Anwendung. Diese besagt, dass das zu überprüfende Gerät mit jeweils 15 Blitzstoßspannungen positiver als auch negativer Polarität zu beaufschlagen ist. Dabei dürfen nur 2 Durchschläge auftreten. Die Spannungshöhe richtet sich nach der Bemessungsspannung. Beispielsweise wird ein Gerät der 123kV-Spannungsebene mit 550 kV Blitzstoßspannung geprüft. Das folgende Bild zeigt einen 3-phasig gekapselten Leistungsschalter. Hierbei muss der Schalter zunächst im geschlossenen Zustand überprüft und danach mit geöffneten Leistungsschalterkontakten nochmals getestet werden.



**Abb. 3.17 Stoßspannungsprüfung eines 3-phasigen gekapselten Leistungsschalters. Spannungszuführung über gasdichte Spannungsdurchführungen /Betz/**

Da es sich bei diesen Prüfungen um sehr hohe Beanspruchungen handelt und eine Vorschädigung des Prüfgerätes nicht ausgeschlossen werden kann, wird diese Prüfung nur einmalig bei neu entwickelten Geräten als sogenannte „Typ-Prüfung“ durchgeführt. Eine Ausgangsprüfung jedes Gerätes im Werk ist also nicht notwendig. Man geht hierbei davon aus, dass unvermeidbare Fertigungstoleranzen auch über die für jedes Gerät notwendige Wechselspannungsprüfung erkannt werden.



### Übungsaufgaben

---

- 3.1 Gegeben sei eine unbekannte positive Stoßspannung, die mit einer Kugelfunkenstrecke gemessen werden soll. Der Kugeldurchmesser beträgt 10 cm und der Abstand der Kugeln beträgt 2 cm. Es wird morgens um 9:00 gemessen. Die Randbedingungen sind wie folgt: Luftfeuchte 60 %, Raumtemperatur von 12°C, Luftdruck 1025 mbar. Geben Sie die obere und untere Grenze der zu messenden Stoßspannung an.
- 3.2 Gegeben sei eine Kaskadenschaltung von zwei Prüftransformatoren von jeweils 200 kV. Geben Sie an, welche Bemessungsspannung mit dieser Kaskadenschaltung möglich wäre, wenn man die Prüfspannungswerte aus Tab. 3.1 zugrunde legt. Bitte beachten Sie, dass es zwei Möglichkeiten gibt und gehen Sie davon aus, dass Ihr Gerät keine Trennstrecke aufweist.
- 3.3 Welche Schaltungsart (Schaltung A oder B) wird in Abb. 3.16 dargestellt?
- 3.4 Im Hochspannungslabor wird ein 4-stufiger Stoßspannungsgenerator mit folgenden technischen Daten eingesetzt:

$$C_{S,Stufe} = C'_S = 10000 \text{ pF} \quad R_{D,Stufe} = R'_D = 12 \Omega$$

$$R_{E,Stufe} = R'_E = 68 \Omega \quad C_B = 2140 \text{ pF}$$

- Berechnen Sie die Stirn- und Rückenzeit des beschriebenen Stoßkreises.
- Wie hoch ist die maximale Stoßspannungsamplitude, wenn eine Ladespannung von 100 kV verwendet wird?
- Sind Stirn- und Rückenzeit innerhalb der zulässigen Toleranz?
- Wie müssten die Widerstandswerte gewählt werden, damit die Zeiten exakt stimmen?

### 3.4 Erzeugung und Messung hoher Gleichspannungen

Das einfachste Prinzip zur Erzeugung von Gleichspannung besteht in der Gleichrichtung von Wechselspannung. Dazu benötigt man nur einen Transformator, Dioden und Kapazitäten. Der Gleichspannungsverbraucher stellt dabei gemäß Abb. 3.18 den Belastungswiderstand  $R_B$  dar. Wird nur eine Halbwelle gleichgerichtet, spricht man von einer Einweggleichrichtung.

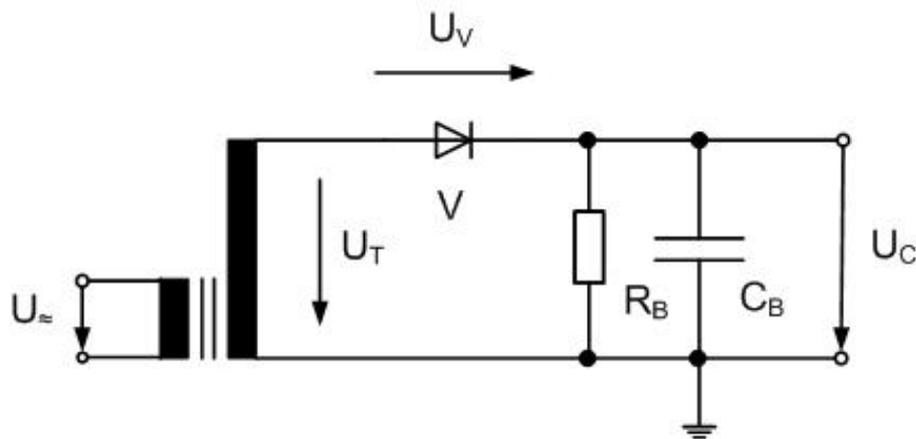


Abb. 3.18 Gleichspannungserzeugung: Einweggleichrichtung. Transformatorspannung  $U_T$ , Diode bzw. Ventil  $V$ , Diodenspannung  $U_V$ , Belastungswiderstand  $R_B$ , Belastungskapazität  $C_B$ , Kondensatorspannung  $U_C$

Die Wirkungsweise ist aus dem folgenden Bild ersichtlich:

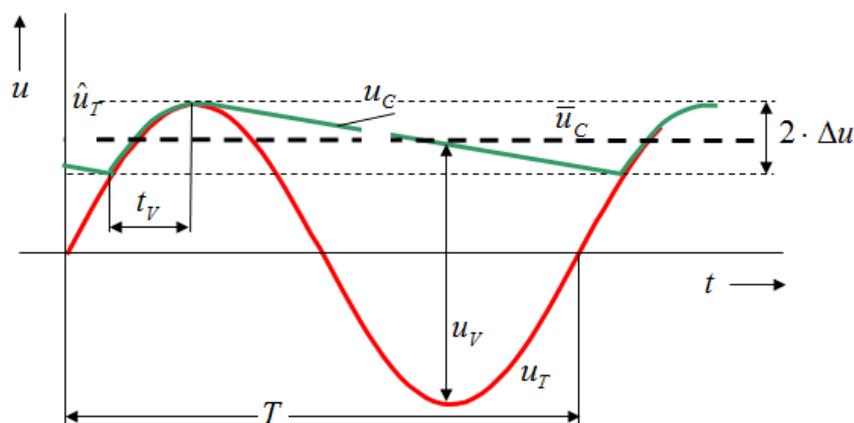


Abb. 3.19 Kurvenverläufe bei der Einweggleichrichtung. Amplitude der Transformatorspannung  $\hat{U}_T$ , Kondensatorspannung  $U_C$ , gemittelte Gleichspannung  $\bar{U}_C$ , Welligkeit  $\Delta u$ , Ventilspannung  $U_V$ , Periodendauer  $T$ , Ventilzeit  $t_V$  (Diode leitfähig)

Die sinusförmige Kurve repräsentiert die hochspannungsseitige Wechselspannung des Transformators  $u_T$ . In der positiven Halbwelle ist die Diode leitfähig und lädt den Kondensator auf. Hier ist bereits der eingeschwungene Zustand dargestellt: der Kondensator ist bereits geladen, wird aber durch den Belastungswiderstand gleichmäßig entladen (siehe linear abfallende Kurve). Sobald nun die abfallende Kurve kleiner als die treibende Spannung  $u_T$  ist, wird der Kondensator wieder aufgeladen. Dieser Bereich zwischen Anstieg und Erreichen der Amplitude ist durch zwei dünn gestrichelte Linien gekennzeichnet und gibt die Ventilzeit  $t_V$  wiedergegeben. Es resultiert eine periodische Auf- und Entladung des Kondensators mit einer Spannung  $U_C$ , eine mittlere Gleichspannung  $\bar{U}_C$  und eine Schwankungsbreite  $\Delta U$ . Die Diode muss die Differenzspannung  $U_V$  sperren.

Mathematisch erhält man folgenden Zusammenhang zur Ermittlung der Gleichspannung:

$$u_C = \hat{u} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \approx \hat{u} \left( 1 - \frac{t}{\tau} \right) \quad \tau = RC \quad (3.34)$$

Die Schwankungsbreite kann damit ermittelt werden:

$$2 \cdot \Delta u \approx \hat{u} \cdot \frac{T}{RC} = \frac{\hat{u}}{RC \cdot f} \quad (3.35)$$

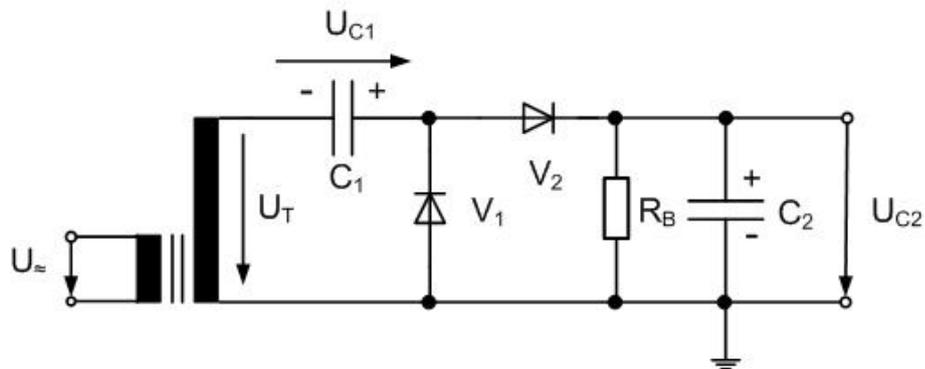
Für eine 50Hz-Anordnung ergibt sich bei einer Belastung von  $20 \text{ M}\Omega$  und  $C = 10 \text{ nF}$  eine sogenannte Welligkeit (Schwankungsbreite bezogen auf Mittelwert) von:

$$\frac{\Delta u}{\bar{u}} \approx \frac{1}{2 \cdot 20 \cdot 10^6 \cdot 10^{-8} \cdot 50} = 5\% \quad (3.36)$$

Zur Reduzierung dieser Welligkeit bietet sich die Zwei- oder Mehrweggleichrichtung (6-fach Brückengleichrichter) an. Im Hochspannungsbereich würde letzteres einen sehr teuren Aufbau bedeuten. Daher beschränken wir uns hier auf die realistischere Zweiweggleichrichtung: hiermit folgt sofort eine Halbierung der Welligkeit:

$$\frac{\Delta u}{\bar{u}} \approx \frac{1}{2 \cdot 20 \cdot 10^6 \cdot 10^{-8} \cdot 100} = 2,5\% \quad (3.37)$$

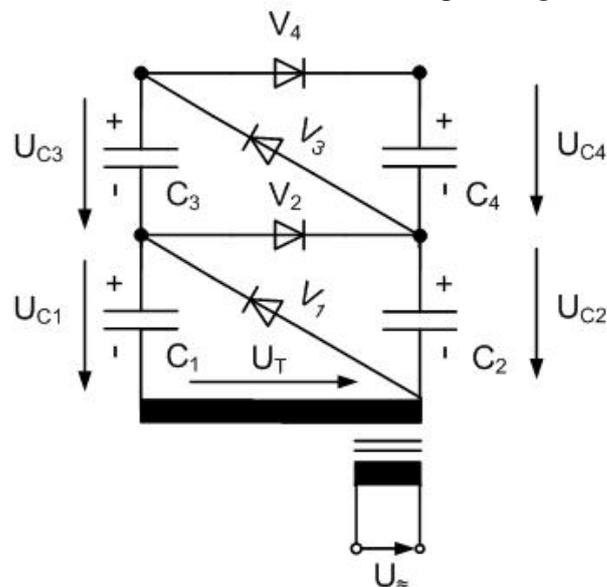
Üblicherweise möchte man sehr hohe Gleichspannungen erzeugen. Um die Kosten der Einzelbauteile gering zu halten, benutzt man z. B. Kaskaden:



**Abb. 3.20** Prinzip der „Greinacher“-Spannungsverdopplung /Hilgarth, modifiziert/. Transformatorspannung  $U_T$ , Kondensatorspannung  $U_{C1}$  an  $C_1$ , Diode  $V_1$  und  $V_2$ , Belastungswiderstand  $R_B$ , Kondensatorspannung  $U_{C2}$  an  $C_2$ .

Das Prinzip der gezeigten sogenannten „Greinacher-Kaskade“ baut auf der Einweggleichrichtung auf. Hierbei wird der Kondensator  $C_1$  auf den maximalen Wert der Wechselspannungsamplitude geladen:  $U_{C1} = \hat{U}_T$ . Auf diesem Potenzial verbleibt nun der Kondensator, während sich die Transformatorwechselspannung von diesem Potenzial bis zur negativen Amplitude verändert. Damit kann sich der Kondensator  $C_2$  bis auf  $U_{C2} = 2 \cdot \hat{U}_T$  aufladen.

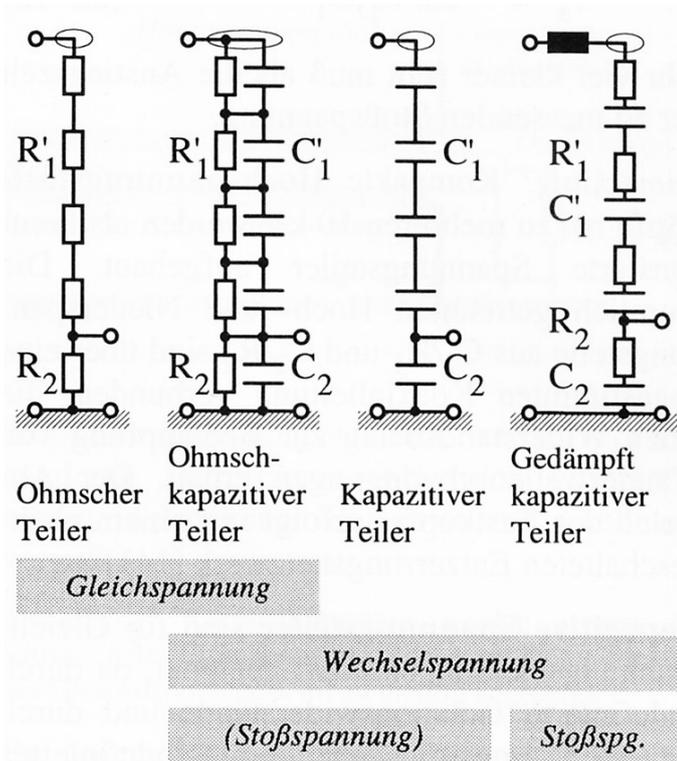
Mit einer sogenannten Vervielfacherschaltung erreicht man hohe Gleichspannungen bis in den MV-Bereich. Ein Beispiel zeigt das nachstehende Bild:



**Abb. 3.21** Spannungsvervielfachung durch Greinacher-Kaskade. Transformatorspannung  $U_T$ , Dioden  $V_1$  bis  $V_4$ , Kapazitäten  $C_1$  bis  $C_4$ , Kondensatorspannungen  $U_{C1}$  bis  $U_{C4}$ .

Man erkennt, dass man mit mehreren identischen (und damit kostengünstigen) Hochspannungsbauteilen beispielsweise eine Vervielfachung der ursprünglichen Gleichspannung erzielen kann. Die Spannung  $U_{C2}$  entspricht dem zweifachen Wert der Amplitude von  $U_T$ , ebenso  $U_{C4}$ . Insgesamt ergibt sich eine Vervielfachung der Amplitude von  $U_T$ . Der Aufbau kann in Richtung höherer Spannungen erweitert werden. Allerdings ist mit zunehmender Spannungshöhe auf die oberen und seitlichen Abstände zu metallischen Anordnungen zu achten.

Wie kann man nun solche erzeugten Gleichspannungen messen? Ist die Gleichspannung mit einer niedrigen Welligkeit versehen, genügt ein einfacher ohmscher Teiler. Ist die Belastung allerdings so hoch, dass ein hoher Wechselanteil entsteht, so würden Streukapazitäten zur Erde das Messergebnis beeinflussen. In diesem Fall müsste man einen gesteuerten ohmschen Teiler verwenden. Eine Übersicht über mögliche Messteiler zeigt das nachfolgende Bild:



**Abb. 3.22 Messteiler für verschiedene Spannungsarten /Küchler/. Der hochgestellte Strich kennzeichnet die in Reihe geschalteten Hochspannungs-Widerstände und -Kapazitäten (z. B.  $R_1 = n \cdot R_1'$ )**

Das Übersetzungsverhältnis  $\ddot{u}$  des reinen ohmschen und des reinen kapazitiven Spannungsteilers verhält sich wie folgt:

$$\ddot{u} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \quad (3.38)$$

Wendet man aus Dämpfungsgründen gemischte Teiler (ohmsch-kapazitiv bzw. gedämpft-kapazitiv) an, so müssen die Zeitkonstanten aufeinander abgestimmt werden:

$$R_1' \cdot C_1' = n \cdot R_1' \cdot \frac{C_1'}{n} = R_1 \cdot C_1 = R_2 \cdot C_2 \quad (3.39)$$

**Merker:** Je dynamischer das zu messende Signal ist, umso abgestimmter und umso gesteuerter muss der Messteiler ausgeführt werden.



### Übungsaufgaben

- 3.5 Sie haben einen Hochspannungstransformator mit einer Ausgangsspannung von 100 kV zur Verfügung. Sie wollen damit eine Gleichspannung von 1 MV erzeugen. Wie viele Stufen muss die Kaskade aufweisen? Skizzieren Sie den Aufbau der Kaskade und geben Sie die Summe der Bauteile an.
- 3.6 Gegeben sei eine Gleichspannung von 50 kV. Diese soll mit einem ohmschen Teiler gemessen werden. Dazu stehen Ihnen verschiedene Bauteile zur Verfügung:
- ein Digitalvoltmeter DV mit einem Innenwiderstand > 10 MΩ und einer maximalen Anzeige von 50 V
  - verschiedene Widerstände: 280 MΩ, 500 kΩ, 10 kΩ
  - der Unterspaltungswiderstand  $R_2$  kann beliebig gewählt werden

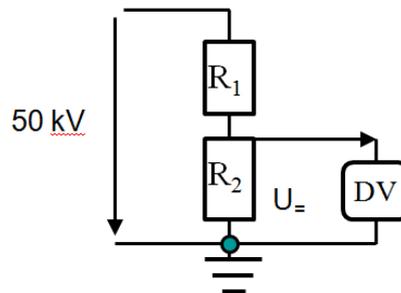


Abb. 3.22 Skizze für den Aufbau

Bitte ermitteln Sie die geeigneten Widerstände  $R_1$  und  $R_2$ .

### **3.5 Zusammenfassung**

Dieses Kapitel beschäftigte sich mit der Erzeugung und den Messmethoden der verschiedenen Spannungsarten Gleichspannung, Wechselspannung und Stoßspannung. Es wurden geeignete Grundschaltungen vorgestellt und Dimensionierungshinweise gegeben.

Wendet man diese Prüf-Anordnungen zur Prüfung von realen Hochspannungsgeräten an, so wird es sowohl erfolgreiche Versuche als auch Durchschläge und damit Versager geben. Um solche Versuchsergebnisse interpretieren zu können, muss man die Versagensmechanismen der einzelnen Isolierstoffe kennen. Diese Theorie zum Durchschlagsverhalten von gasförmigen, flüssigen und festen Isolierstoffen vermittelt das nachfolgende Kapitel.