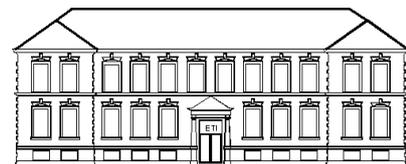


# Energietechnisches Praktikum



Versuch AC/DC

**Erzeugung und Messung hoher  
Gleich- und Wechselspannungen**



**ETI**

Stand: 01.10.2017

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	2
2	Kenngrößen hoher Spannungen.....	4
2.1	Wechselspannung.....	4
2.2	Gleichspannung .....	5
2.2.1	Anforderungen an eine Prüfgleichspannung und an den Gleichstromkreis .....	6
3	Erzeugung hoher Wechselspannung mit Prüftransformatoren.....	7
3.1	Eigenschaften von Prüftransformatoren.....	7
3.2	Ersatzschaltbild eines Transformators .....	8
4	Erzeugung hoher Gleichspannungen .....	9
4.1	Einstufige Gleichrichterschaltungen .....	12
4.2	Spannungsvervielfachschaltungen.....	13
4.2.1	Delon-Schaltung .....	13
4.2.2	Villard-Schaltung.....	13
4.2.3	Greinacher-Schaltung.....	14
5	Messung hoher Spannungen .....	16
5.1	Ermittlung der Hochspannung über die Umrechnung der Primärspannung des Prüftransformators .....	16
5.2	Messung mit der Kugelfunkenstrecke .....	18
5.3	Messung mittels Spannungsteiler .....	20
5.3.1	Ohmsche Spannungsteiler .....	21
5.3.2	Kapazitive Teiler .....	22
5.3.3	Ohmsch-kapazitiv gemischter Teiler.....	24
5.3.4	Gedämpft kapazitiver Spannungsteiler .....	25
6	Literatur.....	27
7	Fragen.....	29

# 1 Einleitung

Im Jahr 1891 gab es den ersten nennenswerten Durchbruch in der Wechselstromtechnik. Zu dieser Zeit führte Oskar von Miller anlässlich der Internationalen Elektrotechnischen Ausstellung in Frankfurt eine historische Energieübertragung zwischen Laufen am Neckar und Frankfurt am Main mit Dreiphasenwechselstrom über eine Entfernung von ca. 175 km durch. Von Miller transformierte Wechselstrom von 55 V auf 15 kV. Die Möglichkeit, Transformatoren zur Anpassung der Spannung einzusetzen, war der entscheidende Vorteil der Wechselstromtechnik gegenüber der Gleichstromtechnik. Damit war es möglich, größere Leistung durch höhere Spannung und geringere Stromstärke zu übertragen, was zu einem geringeren Leiterquerschnitt und daher auch zu weniger Kosten führte. Daher versprach die Wechselstromtechnik bessere Aussichten auf Erfolg bei einer Übertragung über lange Strecken. Durch diese Experimente bewegt, entschloss sich der amerikanische Ingenieur und Industrielle George Westinghouse in die Wechselstromtechnik zu investieren.

Nikola Tesla entwickelte für die Westinghouse Electric Corporation einen verbesserten Wechselstromgenerator und ein verbessertes Energieversorgungssystem. Die Westinghouse Electric Corporation konnte durch die geringeren Kosten im Jahr 1893 die Ausschreibung für die Beleuchtung der Weltausstellung in Chicago gewinnen. Dies war die internationale Entscheidung für die Wechselstromtechnik.

Zunächst fanden hohe Gleichspannungen vor allem in der Versorgung von Bahnen (1,5-4 kV), in Röntgen- und Sendeanlagen (50-80 kV) und in elektrischen Staubfiltern zur Abgasreinigung (5-130 kV) Anwendung.

In der kernphysikalischen Forschung werden zur Beschleunigung von Elementarteilchen Gleichspannungen bis zu 7 MV verwendet.

Ein starker Fokus liegt heutzutage auf der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ). Sie bietet bei der Energieübertragung mit hohen Leistungen und über weite Strecken Vorteile, da im Gegensatz zur Drehstromübertragung keine Schwierigkeiten in Bezug auf Blindleistungskompensation und Netzstabilität auftreten. Außerdem ist der Lastfluss der HGÜ gezielt regelbar, wodurch die Stabilität großer Verbundnetze verbessert wird. Durch gezielte Trennung von Verbundnetzen über HGÜ sinken die Kurzschlussströme, womit diese technisch einfacher beherrscht werden können bzw. ein weiterer Netzausbau überhaupt wieder möglich wird. Auch können asynchrone Netze mit Hilfe einer sogenannten HGÜ-Kurzkopplung gekoppelt werden.

Gleichstromleitungen sind pro Übertragungsleistung billiger als Drehstromleitungen, jedoch ergeben sich bei der HGÜ zusätzliche hohe Kosten für die Errichtung und den Betrieb der Konverterstationen an den Enden der Übertragung, so dass die Verwendung der HGÜ erst ab einer gewissen Entfernung (Freileitung 800 km, Landkabel 170 km) wirtschaftliche Vorteile bringt. Bei Seekabeln ist die HGÜ konkurrenzlos, da Drehstromübertragungen wegen der großen, durch die Kabel aufgenommenen Blindleistungen nur über Entfernungen von 20 bis 25 km unkompensiert möglich sind. Aufgrund der Ertüchtigung der Übertragungsnetze und der Anbindung von Offshore-Windparks werden im europäischen Raum zurzeit etliche HGÜ realisiert.

## 2 Kenngrößen hoher Spannungen

### 2.1 Wechselspannung

Die Prüfspannung muss eine Wechselspannung mit einer Frequenz zwischen 45 Hz und 65 Hz sein, üblicherweise also eine netzfrequente Prüfspannung. Die Kurvenform der Spannung muss annähernd sinusförmig sein mit sehr ähnlichem Verlauf der beiden Halbwellen. Über den Klirrfaktor wird die Abweichung der Kurvenform definiert, die 5 % nicht überschreiten darf. Der Klirrfaktor  $D$  ist definiert:

$$D = \sqrt{\frac{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}} \leq 5\%$$

Die Größen  $U_2$  bis  $U_n$  entsprechen dem jeweiligen Oberschwingungsanteil der Spannung.

Der Effektivwert wird durch folgende Gleichung charakterisiert:

$$U_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}$$

Bei ideal sinusförmiger Spannung berechnet sich der Effektivwert aus dem Scheitelwert zu:  $U_{\text{eff}} = \hat{U} / \sqrt{2}$ .

## 2.2 Gleichspannung

Unter der Höhe einer Gleichspannung wird ihr arithmetischer Mittelwert

$$\bar{U} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt$$

verstanden. Als Überlagerungen bezeichnet man periodische Abweichungen vom arithmetischen Mittelwert einer Gleichspannung. Der Scheitelwert der Überlagerung (engl.: ripple) wird durch

$$\delta U = \frac{1}{2} (U_{\max} - U_{\min})$$

festgelegt. Kurzzeitig hochfrequent überlagerte Schwingungen, z.B. bedingt durch Teilentladungen, bleiben hier unberücksichtigt. Der Überlagerungsfaktor (engl.: ripple factor) bzw. die Welligkeit ist definiert durch:

$$\frac{\text{Scheitelwert der Überlagerung}}{\text{arithm. Mittelwert der Gleichspannung}} = \frac{\delta U}{\bar{U}}$$

Bei sehr gut geglätteter Gleichspannung gilt:

$$\frac{\delta U}{\bar{U}} = 0$$

sowie:

$$\bar{U} \approx U_{\max} \approx U_{\text{eff}}$$

$U_{\text{eff}}$  ist der Effektivwert der gleichgerichteten Wechselspannung. Der Überlagerungsfaktor ist ein Maß für die Güte einer Gleichspannung. Der Überlagerungsfaktor darf nach IEC 60060-1 nicht mehr als 3 % betragen. Aufgrund dieser Festlegung führt auch eine Messung des Effektivwertes der Spannung zu einem richtigen Ergebnis, obwohl streng genommen der arithmetische Mittelwert zu ermitteln ist.

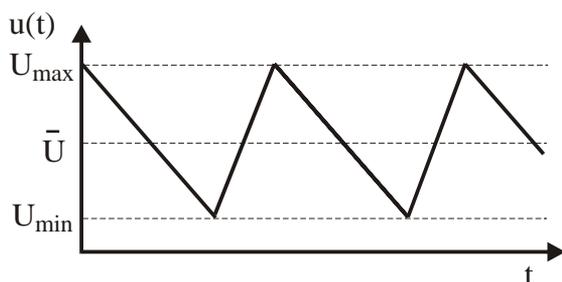


Bild 2.2. Kenngrößen einer Gleichspannung

Eine Gleichspannung kann durch folgende Angaben charakterisiert werden:

- Polarität (positiv, negativ)
- Höhe (arithmetischer Mittelwert  $\bar{U}$ )
- Höchstwert ( $U_{\max}$ )
- Überlagerungsfaktor ( $\delta U / \bar{U}$ )

### **2.2.1 Anforderungen an eine Prüfgleichspannung und an den Gleichstromkreis**

Die Toleranz einer Prüfgleichspannung soll bei einer Prüfdauer kleiner als 60 s maximal 1 %, bei einer Prüfdauer größer als 60 s maximal 3 % betragen, sofern in den Bestimmungen für die zu prüfenden elektrischen Betriebsmittel nichts anderes festgelegt ist. Der Nennstrom des Spannungserzeugers soll ausreichen, um die Belastungsströme des Prüflings, der Messeinrichtung und aller Teile der Prüfanordnung bei den benötigten Spannungen zu liefern. Die Hochspannungsquelle einschließlich ihrer Speicherkapazität sollte außerdem in der Lage sein, alle Leckströme, Verluste und alle inneren und äußeren Vorentladungen mit Spannungseinbrüchen kleiner 10 % der Prüfspannung zu liefern.

## 3 Erzeugung hoher Wechselspannung mit Prüftransformatoren

### 3.1 Eigenschaften von Prüftransformatoren

Hohe Wechselspannungen werden in Laboratorien sowohl für Versuche und Prüfungen mit Wechselspannung, als auch zur Erzeugung hoher Gleichspannung benötigt. Die hierfür vorwiegend verwendeten Prüftransformatoren unterscheiden sich von Leistungstransformatoren wie in Tabelle 1 dargestellt.

Merkmal	Leistungstransformator	Prüftransformator
Aufgabe	Kopplung der einzelnen Spannungsebenen in Energienetzen	Erzeugung hoher Prüfspannungen bei kleinen Strömen
Aufbau	Dreiphasig, Kesselbauweise	Einphasig, Mantelbauweise, Kesselbauweise
Nennleistung	bis zu 1100 MVA	wenige MVA
Übersetzung	klein, z.B. 380 / 110 kV	Groß, z.B. 0,23 / 300 kV
Isolation	Auslegung für Dauerbetrieb	Auslegung für die Dauer eines Prüfintervalls
Streuinduktivität	gering $u_k = 5 \dots 15 \%$	hoch $u_k = 15 \dots 25 \%$
Beispiel		

Tabelle 1: Charakteristische Merkmale von Leistungs- und Prüftransformatoren

### 3.2 Ersatzschaltbild eines Transformators

Das Betriebsverhalten von Prüftransformatoren ist mit dem üblichen Transformator-Ersatzschaltbild (Bild 1a) nur unvollständig erfasst, da die Eigenkapazität  $C_i$  der Hochspannungswicklungen und der angeschlossene Prüfling meist eine überwiegend kapazitive äußere Belastung  $C_p$  darstellt (Bild 1b). Der Magnetisierungsstrom dagegen kann vernachlässigt werden, solange noch keine volle Sättigung des Eisenkerns vorliegt (Bild 1c).

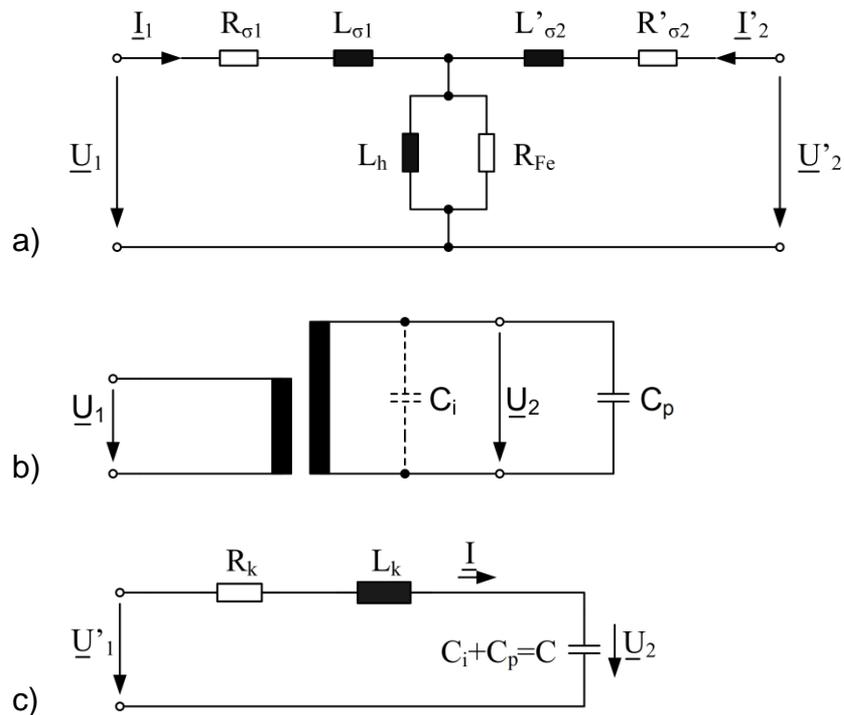


Bild 1: a) Transformatorersatzschaltbild  
 b) Transformator mit kapazitiver Last  
 c) Kurzschlussersatzschaltbild mit kapazitiver Last

## 4 Erzeugung hoher Gleichspannungen

Die Erzeugung hoher Gleichspannungen lässt sich in drei Verfahren aufgliedern:

- Gleichrichtung hoher Wechselspannungen
- Kaskadenschaltungen
- Anwendung elektrostatischer Generatoren

An diesem Versuchstag sowie in dieser Versuchsvorbereitung und -durchführung wird nur die Erzeugung durch Gleichrichtung von Wechselspannungen sowie der Greinacher - Kaskadenschaltung behandelt.

Wenn hohe Spannungen gleichzurichten sind, müssen so viele Halbleiterventile in Reihe geschaltet werden, dass in der Sperrphase die Spannung über jedem Element den zulässigen Wert nicht überschreitet. Tausende solcher tablettenförmig ausgebildeter Gleichrichter müssen dazu aneinandergereiht werden, um Sperrspannungen im MV-Bereich zu erhalten. Ein Ölbad verhindert Entladungen und sorgt für die gleichmäßige Ableitung der Verlustwärme.

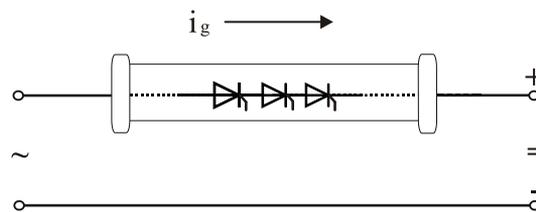


Bild 4: Aufbau eines Hochspannungsgleichrichters

Tabelle 2: Übersicht der Eigenschaften von Halbleitermaterialien

Halbleitermaterial	Selen	Germanium	Silizium
Scheitelspannung je Zelle	30 – 50 V	150 – 300 V	1000 – 2000 V
Belastbarkeit der Sperrschicht	0,1 – 0,5 A/cm <sup>2</sup>	50 – 150 A/cm <sup>2</sup>	50 – 150 A/cm <sup>2</sup>

Als Halbleitermaterialien verwendet man Selen und Silizium. In Fällen, in denen nur kleine Ströme ( $\approx 100$  mA) verlangt werden (z.B. im Laborbetrieb), haben sich Selen-Gleichrichterstäbe vor allem wegen ihres günstigen Preises bewährt. Infolge ihrer sehr hohen Durchlassspannung ergibt sich aber ein schlechter Wirkungsgrad. Mit Silizium-Gleichrichtern erreicht man kleinere Durchlassspannungen und günstigere

Wirkungsgrade als bei Selen. Die ungünstige Spannungsaufteilung entlang der Gleichrichtertabletten erfordert eine aufwendige Beschaltung mit RC-Gliedern oder spannungsabhängigen Widerständen. Silizium-Sperrschichten haben einen hohen Widerstand und eine verhältnismäßig geringe Kapazität, so dass die durch die Erdstreukapazitäten abfließenden Ströme in der Sperrphase eine ungleichmäßige Spannungsverteilung verursachen. Einzelne Gleichrichterelemente werden dadurch im Verhältnis zu anderen mit der mehrfachen Spannung belastet, wodurch die zulässige Gesamtspannung über der ganzen Gleichrichteranordnung stark vermindert wird. Mit Hilfe den Gleichrichtertabletten parallelgeschalteter Kondensatoren lässt sich die ungünstige Spannungsverteilung verändern. Bild 5 zeigt einen schematischen Aufbau des Gleichrichters, wie er in der Hochspannungshalle des Institutes für Elektroenergiesysteme und Hochspannungstechnik benutzt wird. Die gestrichelten Linien stellen das Trägergerüst des Aufbaus dar. Es handelt sich um einen Einweg-Selen-Gleichrichter aus 6 Gleichrichtereinheiten. Um eine angenähert lineare Spannungsverteilung über den Ventilen während der Sperrphase sowie bei Störungen zu erreichen, sind parallel zu den Ventilen Steuerkondensatoren mit abfallender Kapazität angeordnet. Als Nachteil muss dabei eine größere Welligkeit der Gleichspannung in Kauf genommen werden. Auf der Gleichspannungsseite sind vier Stufen von Glättungskondensatoren und hochohmigen Entladewiderständen, die auch zu Spannungsmessungen verwendet werden können, angeschlossen.

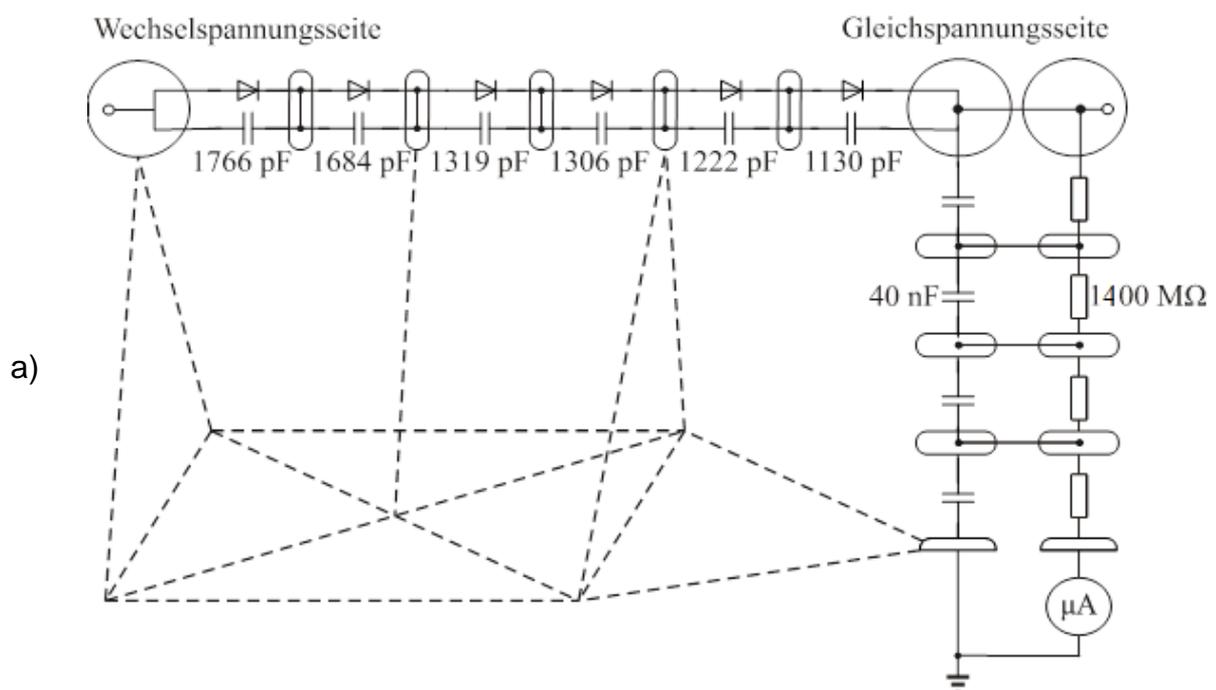


Bild 2: a) Hochspannungsgleichrichter des IEH ( $U_N = 1050 \text{ kV}$ ,  $I_N \approx 10 \text{ mA}$ )

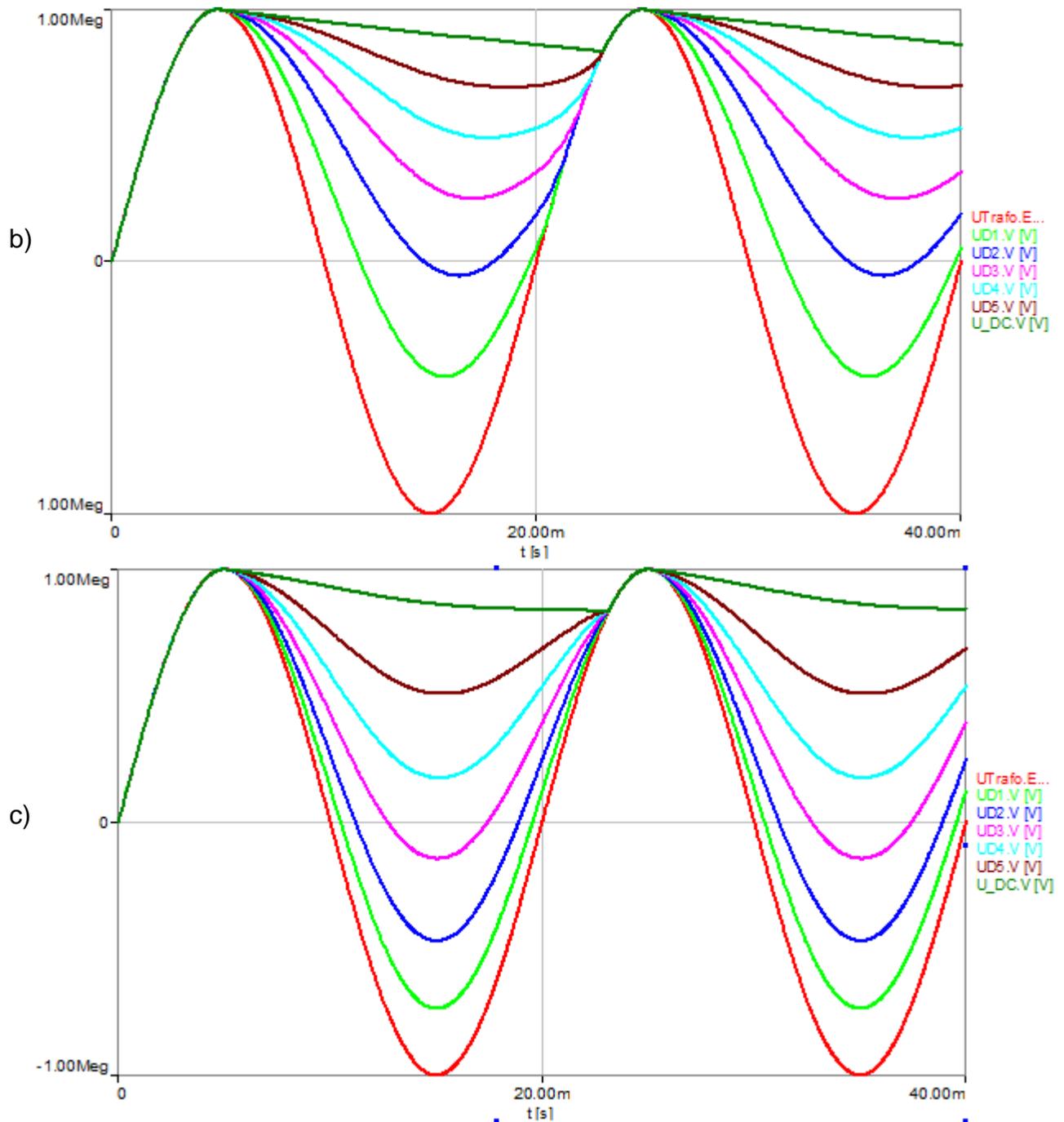


Bild 5: b) Spannungsverteilung ohne Linearisierungskondensatoren  
c) Spannungsverteilung mit Linearisierungskondensatoren

## 4.1 Einstufige Gleichrichterschaltungen

Die einfachste Schaltung ist die Einweg-Gleichrichterschaltung (Bild 6a). Der zeitliche Verlauf der vom Gleichrichter durchgelassenen Halbschwingung ist abhängig von den Eigenschaften des Transformators, des Gleichrichters und vor allem des Laststroms, d.h. des Prüflings. Die über dem Prüfling abfallende Spannung ist entscheidend für die Dimensionierung des Gleichrichters, da er diese sperren können muss.

Bei rein ohmscher Belastung muss der Gleichrichter den Scheitelwert der Wechselspannung sperren (Bild 6b). Wird noch ein Glättungskondensator  $C$  (Bild 6c) hinzugefügt, so ergibt sich eine Gleichspannung, die ununterbrochen am Prüfling liegt. Der Gleichrichter wird in der Sperrphase mit der Differenz zwischen der Wechselspannung und der Kondensatorspannung beansprucht. Die Sperrspannung des Halbleiterventils muss in diesem Betriebsfall mindestens  $2\sqrt{2}U_{T,\text{eff}}$  betragen.

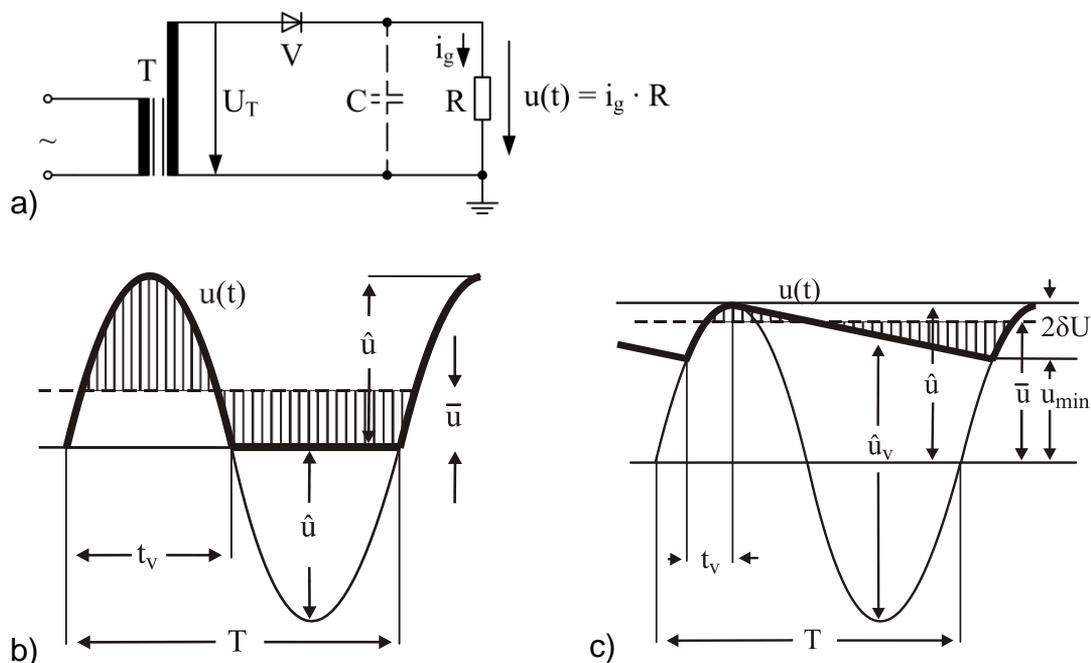


Bild 3: a) Einweg-Gleichrichtung mit idealen Schaltelementen  
b) Spannungsverlauf ohne Glättungskondensator  $C$   
c) Spannungsverlauf mit Glättungskondensator  $C$

Die Einweggleichrichterschaltung eignet sich schlecht für größere Leistungen, da die Spannungsquelle nur während einer Halbschwingung belastet wird. Diesen Nachteil weisen die Brücken-Gleichrichterschaltungen nicht auf.

## 4.2 Spannungsvervielfachschaltungen

### 4.2.1 Delon-Schaltung

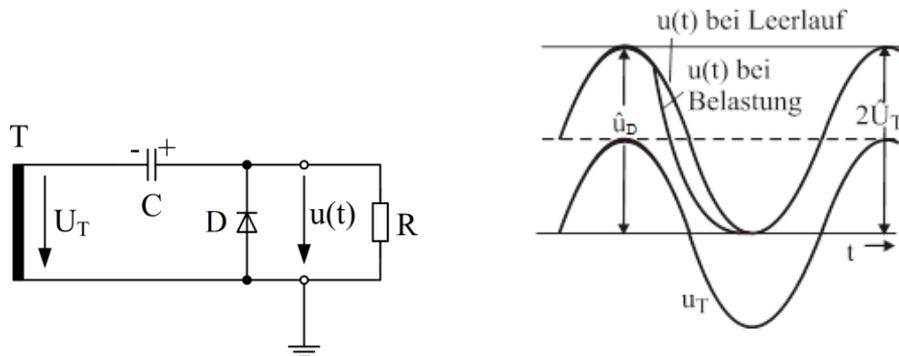


Bild 4: Schaltbild und Spannungsverlauf einer Delon-Schaltung

Die in Bild 4 dargestellte Schaltung ist die einfachste Verdopplungsschaltung. Der Schubkondensator  $C$  lädt sich auf  $U_T$  auf und erhöht das Potential der Hochspannungsklemme gegenüber der Spannung des Transformators um diesen Betrag. Die Ausgangsspannung  $u(t)$  im Leerlauf ist:

$$\bar{U} = \hat{U}_T \quad \text{und} \quad \hat{U} = 2 \cdot \hat{U}_T.$$

Eine Glättung der Ausgangsspannung  $u(t)$  kann durch die Villard-Schaltung realisiert werden.

### 4.2.2 Villard-Schaltung

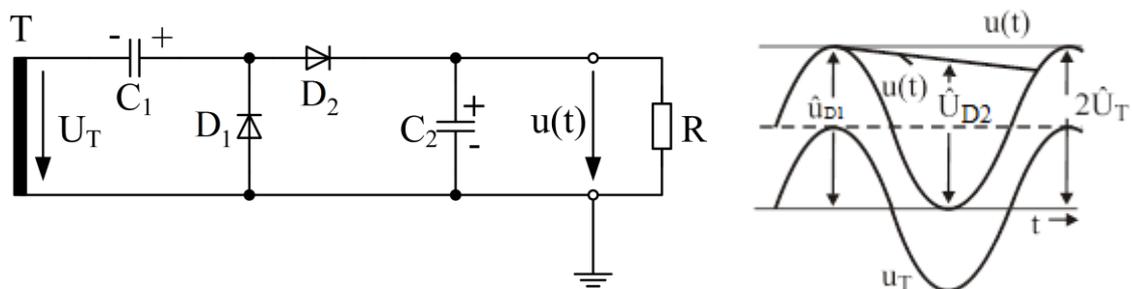


Bild 5: Schaltbild und Spannungsverlauf der Villard- Verdopplungsschaltung

Bild 5 zeigt die Erweiterung der Schaltung um die Diode  $D_2$ , welche die Eingangsspannung  $U_T$  gleichrichtet. Der Glättungskondensators  $C_2$  reduziert den Ripple der gleichgerichteten Spannung. Für die unbelastete Schaltung stellt sich die Ausgangsspannung  $u(t)$  zu ein:

$$\bar{U} = 2 \cdot \hat{U}_T \quad \text{und} \quad \hat{U} = 2 \cdot \hat{U}_T.$$

### 4.2.3 Greinacher-Schaltung

Die gebräuchlichste Schaltung zur Vervielfachung der Gleichspannung ist die Greinacher-Schaltung (Bild 10), die aus mehreren Villard-Verdopplungsschaltungen nach Bild 5 hervorgeht. Die auf der rechten Seite liegenden Kondensatoren bilden die Glättungssäule, die anderen Kondensatoren die Schubsäule. Die Grundstufe, bestehend aus dem Transformator, der Diode  $D_1$  und dem Schubkondensator  $C_{Sch,1}$ , ist im Prinzip eine Delon-Schaltung, deren Ausgang mit einem aus der Diode  $D_2$  und dem Glättungskondensator  $C_{Gl,1}$  bestehenden Einweggleichrichter belastet wird. Im Leerlauf lädt sich  $C_{Sch,1}$  auf die einfache Transformatorscheitelspannung  $\hat{U}_T$  auf. Über  $D_2$  wird der Glättungskondensator  $C_{Gl,1}$  auf  $2\hat{U}_T$  aufgeladen. In der nächsten Stufe wiederholt sich der Vorgang, so dass im Leerlauf die Spannung an jedem Punkt der Schubsäule um den Betrag  $2\hat{U}_T$  pulsiert und über jedem Glättungskondensator die Gleichspannung  $2\hat{U}_T$  liegt. Bei  $n$ -Stufen entsteht am Ausgang eine Hochspannung von  $2n\hat{U}_T$ .

Durch diesen Aufbau werden die einzelnen Kondensatoren und Gleichrichter nur mit der doppelten Scheitelspannung, jedoch nicht mit der vollen Ausgangsspannung beansprucht. Der unterste Kondensator der Schubsäule  $C_{Sch,1}$  kann sogar für die einfache Scheitelspannung ausgelegt werden. Bei Belastung sinkt der Wert der Ausgangsspannung, zudem tritt eine von der Art der Belastung abhängige Welligkeit auf. Für die Stufenzahl  $n$  gibt es ein belastungsabhängiges Optimum, das von der Frequenz und Höhe der Eingangsspannung und der Kondensatorkapazität abhängt. Deshalb wird die Greinacher-Kaskadenschaltung nicht bei 50 Hz sondern bei einer deutlich höheren Frequenz (oft mit 400 Hz) betrieben.

Der Spannungsabfall einer  $n$ -stufigen Greinacher-Kaskade beträgt

$$\Delta u = \frac{\bar{i}}{f \cdot C} \cdot \frac{8n^3 + 9n^2 + n}{12},$$

mit dem Spannungsabfall  $\Delta u$  und dem Mittelwert des Gleichstromes  $\bar{i}$ . Bei einer Erhöhung der Frequenz nehmen der Spannungsabfall und somit auch die Welligkeit der Kaskade ab.

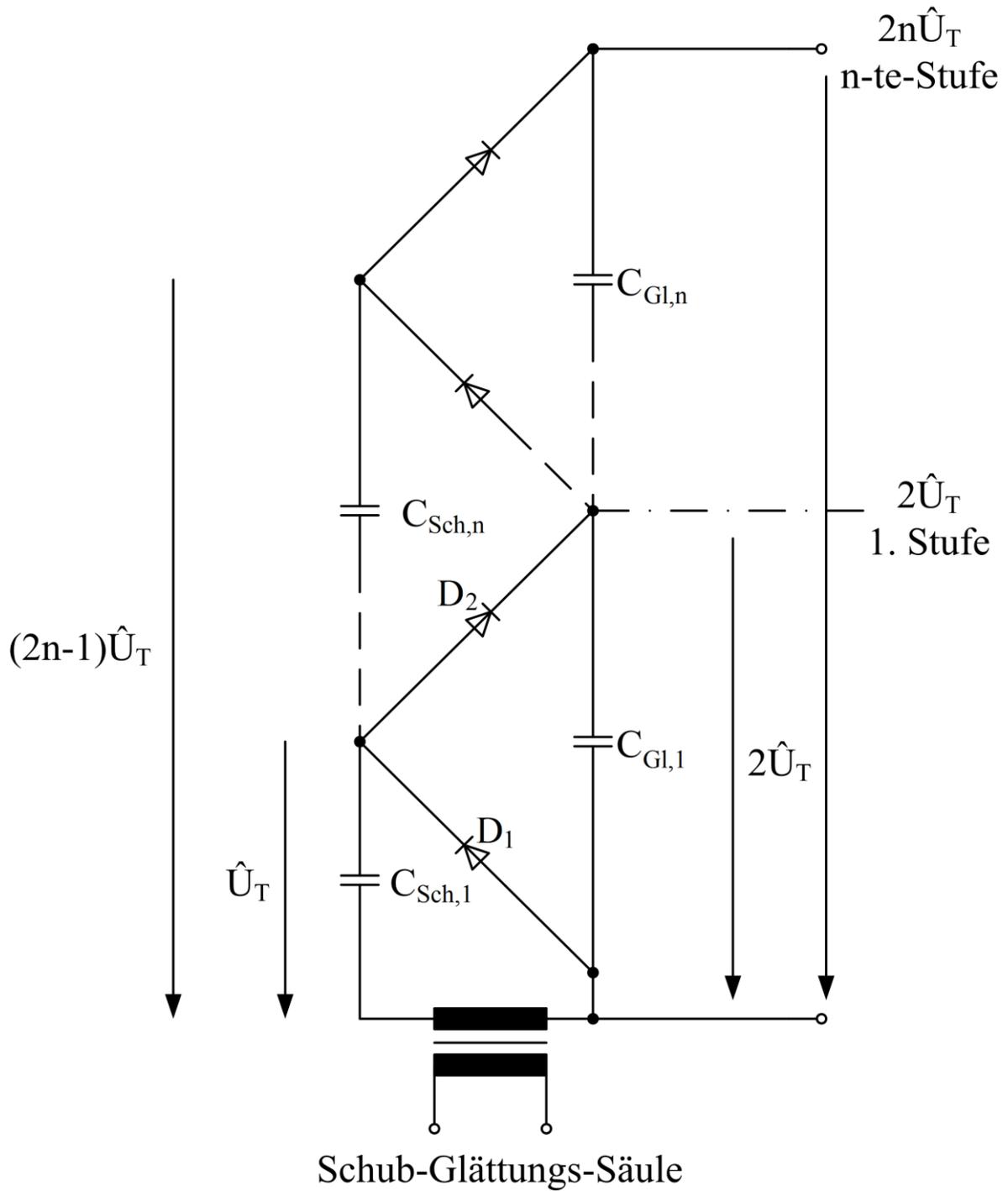


Bild 10: Schematischer Aufbau einer Greinacher-Kaskadenschaltung

## 5 Messung hoher Spannungen

### 5.1 Ermittlung der Hochspannung über die Umrechnung der Primärspannung des Prüftransformators

Für eine näherungsweise Untersuchung des Betriebsverhaltens eines Transformators ist die Ersatzschaltung nach Bild 1 gut geeignet (siehe Kapitel 3.2). Sie enthält die Kurzschlussimpedanz  $R_k + j\omega L_k$  und die gesamte hochspannungsseitige Kapazität  $C = C_i + C_p$ . Die kapazitive Spannungsüberhöhung ergibt sich hier aus dem auf die Oberspannungsseite bezogenen Kurzschlusersatzschaltbild. Es ist auch möglich die kapazitive Spannungsüberhöhung aus dem auf die Unterspannungsseite bezogenen Ersatzschaltbild zu berechnen.  $R_k$  ist die Summe der mit dem Übersetzungsverhältnis  $\ddot{u} = U_{N2}/U_{N1}$  umgerechneten Wicklungswiderstände

$$R_k = R_1 \cdot \ddot{u}^2 + R_2.$$

$L_k$  bzw.  $X_k$  ist die Summe der umgerechneten Streuinduktivitäten bzw. Streureaktanzen:

$$L_k = L_{\sigma 1} \cdot \ddot{u}^2 + L_{\sigma 2}$$

$$X_k = X_{\sigma 1} \cdot \ddot{u}^2 + X_{\sigma 2}.$$

Mit  $U'_1$  wird die auf die Sekundärseite bezogene Primärspannung  $U_1$  bezeichnet.

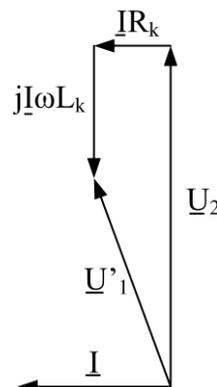


Bild 6: Zeigerdiagramm des Betriebsverhaltens von Prüftransformatoren

Für die kapazitive Spannungsüberhöhung  $\eta$  gilt in komplexer Form:

$$\eta = \frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{j\omega C \cdot (R_k + j\omega L_k + \frac{1}{j\omega C})}$$

und für den Betrag:

$$|\eta| = \frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{\sqrt{(1 - \omega^2 L_k C)^2 + (\omega R_k C)^2}}$$

In der Regel ist  $R_k < \omega L_k$  und die Sekundärspannung  $U_2$  nahezu phasengleich der Primärspannung  $U_1$ . Es gilt deshalb:

$$U_2 \approx U_1 \cdot \frac{1}{1 - \omega^2 L_k C}$$

Da der Ausdruck  $(1 - \omega^2 L_k C)^{-1}$  stets  $> 1$  ist, ergibt sich durch Reihenresonanz eine kapazitive Überhöhung der Sekundärspannung. Diese lässt sich für den Fall, dass  $C$  bei Nennspannung  $U_N$  und Nennfrequenz gerade den Nennstrom  $I_N$  aufnimmt, unmittelbar aus der bezogenen Kurzschlussspannung  $u_k$  des Transformators berechnen:

$$u_k \approx u_x = \frac{I_N \omega L_k}{U_N} \approx \omega^2 L_k C$$

Ein Prüftransformator mit  $u_k = 20\%$  hat demnach bei Nennfrequenz und bei kapazitiver Belastung mit Nennstrom eine Spannungsüberhöhung von 25%. Diese Spannungsüberhöhung muss besonders bei Prüftransformatoren mit großer bezogener Kurzschlussspannung und bei Betrieb mit erhöhter Frequenz beachtet werden.

**Die Sekundärspannung steht in diesem Fall nicht mehr in einem festen Verhältnis zur Primärspannung, weshalb eine Bestimmung des Wertes der Hochspannung durch eine Spannungsmessung auf der Niederspannungsseite unzulässig ist. Sie würde zu niedrige Messwerte ergeben, wodurch Prüfling und Prüftransformator zerstört werden können.**

Zur Ermittlung des Scheitelspannungswertes ist der unterspannungsseitig gemessene Effektivwert mit dem Scheitelfaktor zu multiplizieren. Die Umrechnung mit dem Faktor der reinen Sinusschwingung kann zu falschen Ergebnissen führen,

da beispielsweise die Prüfspannungsquelle als auch die Magnetisierungskurve des Prüftransformators Oberschwingungen verursachen können.

Deswegen sind für genaue Messungen entweder der Einfluss der Oberschwingungen und die Verzerrung der Spannungskurvenform zu überwachen oder die Spannungsmessung auf der Unterspannungsseite mittels einer anderen Scheitelspannungsmessmethode auf den jeweiligen Prüfaufbau und dessen Scheitelfaktor abzugleichen. Die zweite Methode kann nur in der Nähe der Abgleichmessung verwendet werden, da der Oberschwingungsgehalt der Spannung nichtlinear vom Betriebspunkt abhängt.

## 5.2 Messung mit der Kugelfunkenstrecke

Das früher gebräuchlichste Messgerät zur Bestimmung hoher und höchster Spannungen in der Hochspannungsmesstechnik ist die Messfunkenstrecke. Sie spricht auf den Scheitelwert der Spannung an. Der Vorteil der Funkenstrecke liegt in ihrem leicht zu kontrollierenden Aufbau und ihrer einfachen Handhabung, verbunden mit der Möglichkeit, sowohl Wechselspannungen als auch Gleich- und Stoßspannungen damit messen zu können. Ein Nachteil ist, dass die Spannung bei der Messung nicht direkt angezeigt wird.

Zum Durchschlag einer Gasstrecke im elektrischen Feld ist eine bestimmte Spannung erforderlich, deren Höhe u. a. vom Abstand der beiden Elektroden abhängt. Bei Kenntnis der Durchbruchspannung  $U_D$  in Abhängigkeit vom Abstand  $s$  der Kugelfunkenstrecke kann man diese Anordnung zur Spannungsmessung benutzen.

Solange die Durchbruchzeit der Kugelfunkenstrecke klein gegen die halbe Periodenzeit  $T/2$  der speisenden Spannung bzw. der höchstfrequenten Komponente der Stoßspannungswelle ist, so wird der Durchbruch durch den Scheitelwert der Wechsel- oder der Stoßspannung bestimmt. Ein Frequenzeinfluss macht sich bis zu Frequenzen von 1 kHz nicht bemerkbar. Aus umfangreichen Messungen sind Tabellen aufgestellt worden, die die Messwerte für die Funktion  $U_D = f(s)$  enthalten. Um die Messunsicherheit  $\varepsilon$  unter 3 % zu halten, darf die maximal angewandte Messschlagweite  $s$  den halben Kugeldurchmesser  $D/2$  nicht übersteigen.

Die Durchbruchfeldstärke der Luft, also bei gegebener Schlagweite auch die Durchbruchspannung der Kugelfunkenstrecke, ist von der Luftdichte abhängig. Darum müssen bei der Messung sowohl Luftdruck als auch Temperatur berücksichtigt werden. Weichen sie von den normierten Werten ab (relative

Luftdichte  $\delta = 1$  bei Temperatur  $\vartheta = 20^\circ\text{C}$  und Luftdruck  $p = 1013 \text{ hPa}$ ), so ist die beim Durchbruch bestehende Spannung:

$$\hat{U}_D^* = K \cdot \hat{U}_D.$$

$\hat{U}_D$  ist die aus der für Normalbedingungen gültigen Korrekturkurve  $\hat{U}_D = f(s)$  entnommene Durchbruchspannung und  $K$  ein von  $\delta$  abhängiger Umrechnungsfaktor gemäß Tabelle 3.

Mit dem Luftdruck  $p$  in hPa und der Temperatur  $\vartheta$  in  $^\circ\text{C}$  ist

$$\delta = \frac{p}{1013} \cdot \frac{273+20}{273+\vartheta} = 0,289 \cdot \frac{p}{273+\vartheta}.$$

Mit der relative Luftdichte  $\delta$  folgt dann der Korrekturfaktor  $K$  aus folgender Tabelle:

$\delta$	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,05	1,10	1,15
K	0,72	0,77	0,81	0,86	0,91	0,95	1,00	1,05	1,09	1,10

Tabelle 3: Korrekturfaktoren der Kugelfunkenstrecke

Im Rahmen der Messungenauigkeit der Messfunkenstrecke ist kein merklicher Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die Messwerte vorhanden.

Beim Zusammenbruch der Spannungen durch einen Durchschlag werden bei unzureichender Dämpfung hochfrequente Ausgleichsschwingungen angeregt, die Überspannungen am Prüfling bewirken können. Um den Prüftransformator zu schützen, ist außerdem der Strom beim Durchschlag zu begrenzen. Deshalb wird ein möglichst induktionsarmer und spannungsunabhängiger Vorwiderstand in Serie zur Kugelfunkenstrecke zur Schwingungsdämpfung und Strombegrenzung geschaltet. Der Vorwiderstand  $R_d$  wird bei Wechselspannungen bis 1 kHz sowie bei Gleichspannungen üblicherweise im Bereich von 10 k $\Omega$  bis 1 M $\Omega$  gewählt. Bei Wechselspannungen höherer Frequenz ist der Spannungsabfall im Vorwiderstand infolge des Ladestromes der Kugelfunkenstrecke nicht mehr vernachlässigbar und der Widerstandswert ist etwa im umgekehrten Verhältnis der Frequenz zu verkleinern.

Da die Durchschlagspannung einer Kugelfunkenstrecke eine Streuung aufweist, werden bei der Messung mit der Kugelfunkenstrecke für jeden Kugelabstand mehrere Messungen durchgeführt. Das Messprotokoll soll für jeden Kugelabstand einen Wert für die Durchschlagspannung (Mittelwert) enthalten. Zusätzlich muss eine Information darüber gegeben werden, wie stark die Messwerte um den Mittelwert streuen.

Ist die Streuung der Messwerte rein zufälliger Art und hat keine systematischen Ursachen, so kann die Formel der Standardabweichung  $\sigma$  angewandt werden:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\hat{U}_{Di} - \bar{U}_D)^2}$$

Die Standardabweichung  $\sigma$  gibt die gemittelte Abweichung zum Mittelwert aller Messungen an.

### 5.3 Messung mittels Spannungsteiler

Da Messgeräte, Oszilloskope oder andere elektrische Geräte nur einen bestimmten zulässigen Eingangsspannungsbereich besitzen, der deutlich niedriger als die angelegte Hochspannung ist, muss die zu messende Spannung verkleinert werden. Dies geschieht mithilfe von Spannungsteilern. Hochspannungsteiler sind aufgrund ihrer Isolation räumlich groß ausgedehnt, weswegen das sogenannte Übersetzungsverhältnis  $\ddot{u}$  durch Streukapazitäten zur Erd- und Hochspannungsseite beeinflusst werden kann.

In Bild 12 sind die in der Hochspannungstechnik verwendeten Spannungsteiler und deren Einsatzgebiet dargestellt.

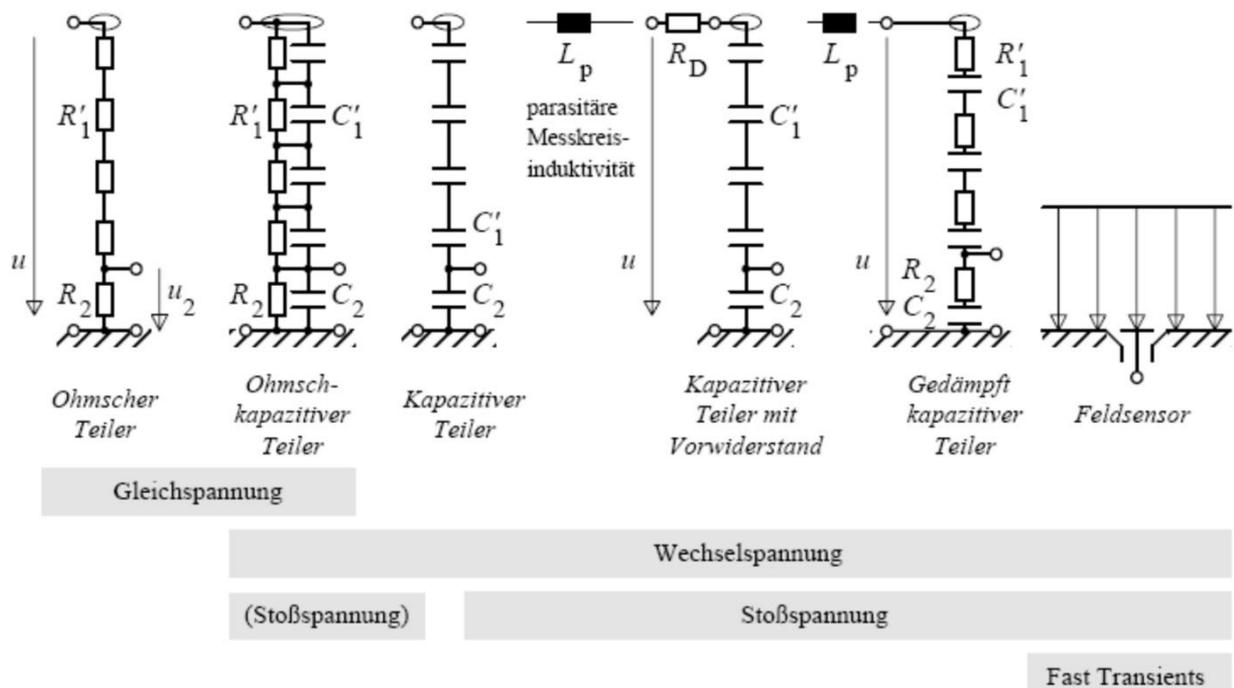


Bild 7: Übliche Spannungsteiler und deren Einsatzgebieten nach Spannungstyp

### 5.3.1 Ohmsche Spannungsteiler

Ein ohmscher Spannungsteiler ist wie in Bild 13 dargestellt aufgebaut. Der ohmsche Spannungsteiler hat gegenüber der Messung mit einem ohmschen Vorwiderstand den Vorteil, dass die spannungs- und temperaturabhängigen Widerstandsänderungen nicht in das Übersetzungsverhältnis und damit in die Messung eingehen. Dies ist natürlich nur der Fall, wenn beide Widerstände die gleichen Eigenschaften besitzen. Koronaerscheinungen, die zu Leckströmen und damit zu Fehlmessungen führen, werden durch geeignete Konstruktion vermieden.

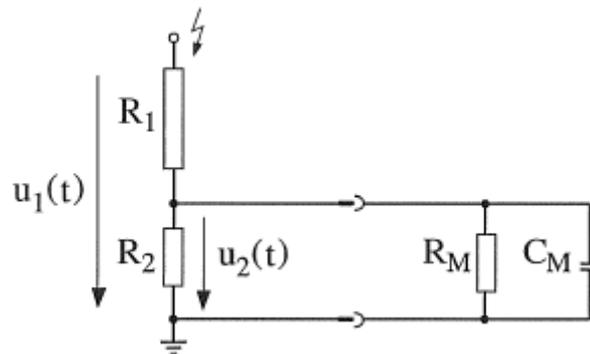


Bild 8: Ohmscher Spannungsteiler ohne Berücksichtigung der verteilten Erdkapazitäten.

Für das Übersetzungsverhältnis des Teilers ergibt sich:

$$\ddot{u} = \frac{u_1(t)}{u_2(t)} = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

Bei der Messung mit dem Teiler wird dem Niederspannungsteil  $R_2$  die Eingangsimpedanz des Messzweiges parallel geschaltet und damit das Teilverhältnis verändert. Bei genügend kleinem Verhältnis von  $R_2$  zum Innenwiderstand des Messgerätes kann dieser vernachlässigt werden. Die kapazitive Belastung durch das Messkabel und das Messinstrument bewirkt, dass das Übersetzungsverhältnis frequenzabhängig wird. Zur Vermeidung dieses bei hohen Frequenzen merklichen Fehlers kompensiert man den Spannungsteiler dadurch, dass man parallel zu  $R_1$  eine Kapazität  $C_1$  anbringt (Bild 9).

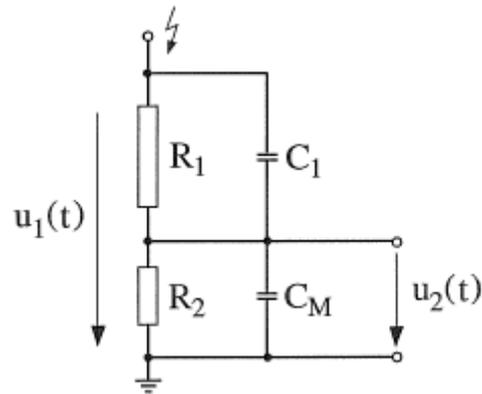


Bild 9: Kompensierter ohmscher Spannungsteiler

$C_1$  muss so gewählt sein, dass für hohe Frequenzen die Impedanz des Hochspannungsteils  $R_1 \parallel C_1$  in der gleichen Weise abnimmt, wie die Impedanz des Niederspannungsteils. Einen so aufgebauten Teiler nennt man einen kompensierten ohmschen Teiler und findet beispielsweise im Tastkopf eines Oszilloskops Anwendung.

### 5.3.2 Kapazitive Teiler

Kapazitive Teiler bestehen entweder aus einer Hochspannungskapazität und einer Niederspannungskapazität entsprechend Bild 10, oder die Hochspannungskapazität  $C_1$  wird in ihrer Konstruktion durch eine Serienschaltung vieler Einzelkondensatoren aufgebaut (Bild 11).

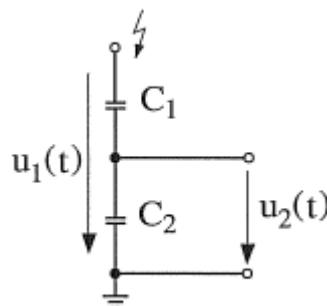


Bild 10: Kapazitiver Spannungsteiler ohne Berücksichtigung der Erdkapazitäten

Zwischen der Eingangsspannung  $u_1(t)$  und der Ausgangsspannung  $u_2(t)$  besteht ein definiertes frequenzunabhängiges Übersetzungsverhältnis:

$$\ddot{u} = \frac{u_1(t)}{u_2(t)} = \frac{C_1 + C_2}{C_1}$$

Vernachlässigt man die Stromverdrängung und die Induktivitäten der Anordnung, so erhält man beim Teiler mit vielen Hochspannungskapazitäten das in Bild 11 dargestellte Ersatzschaltbild. Die Erdkapazitäten  $C_E$  verfälschen hier das Übersetzungsverhältnis. Die Verfälschung ist jedoch nicht frequenzabhängig.

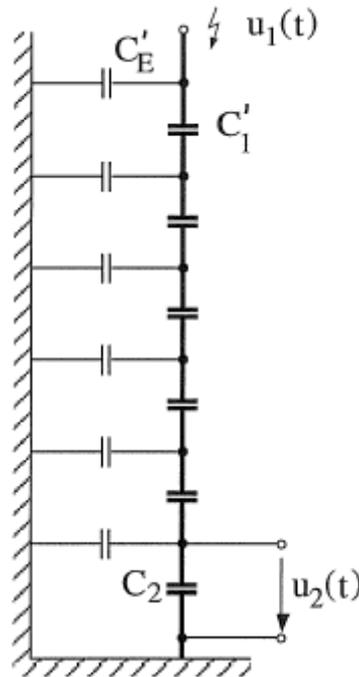


Bild 11: Ersatzschaltbild kapazitiver Spannungsteiler mit verteilten Erdkapazitäten ( $C_i$  Längskapazitätsbelag,  $C_E$  Erdkapazitätsbelag)

Mit der Annahme, dass  $C_1 \ll C_2$  gilt, was für ein großes Übersetzungsverhältnis zutrifft, und  $C_E < C_1$  kann man das Ersatzschaltbild wie in Bild 12 dargestellt vereinfachen. Das Übersetzungsverhältnis der in Bild 12 dargestellten Schaltung ergibt sich dann zu:

$$\ddot{u} = \frac{u_1(t)}{u_2(t)} \approx \frac{C_1 + C_2}{C_1} \cdot \left( 1 + \frac{C_E}{6C_1} \right)$$

Diese Formel berücksichtigt den Einfluss der Erdkapazitäten und liefert brauchbare Ergebnisse bis zu Frequenzen von 1 MHz.

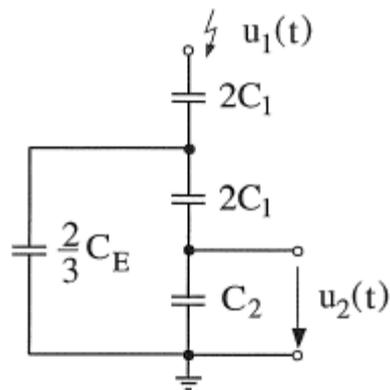


Bild 12: Vereinfachtes Ersatzschaltbild zur Bestimmung der Übertragungsfehler kapazitiver Spannungsteiler mit verteilten Erdkapazitäten

Da das Übersetzungsverhältnis des rein kapazitiven Teilers frequenzunabhängig ist, ist der Teiler auch für die Messung relativ schnell veränderlicher Vorgänge geeignet. Die Einschränkung für die Verwendbarkeit des Teilers bei sehr hohen Spannungen und Frequenzen ist darin begründet, dass für höchste Frequenzen parasitäre Induktivitäten nicht mehr vernachlässigt werden dürfen und dass die Induktivität der Zuleitung zwischen Teiler und Spannungsquelle mit der Kapazität des Teilers einen Serienschwingkreis bildet. Selbst der als ideal kapazitiv angenommene Hochspannungsteiler ist wegen seiner Wanderwellenschwingungen für die Messung steiler Stoßspannungen ungeeignet.

### 5.3.3 Ohmsch-kapazitiv gemischter Teiler

Ein ohmscher Spannungsteiler, der für die Messung hoher Spannungen ausgelegt ist, besitzt einen Hochspannungswiderstand mit einer relativ großen räumlichen Ausdehnung. Die Erd- und Eigenkapazitäten eines solchen Widerstandes müssen bei der Messung berücksichtigt werden. Bild 13 zeigt das Ersatzschaltbild eines solchen Teilers. Die Kapazitäten bewirken, dass die Anstiegszeit des Teilers vergrößert wird, da bei Anlegen einer Stoßwelle zunächst die Kapazitäten aufgeladen werden müssen. Der dafür von der Spannungsquelle gelieferte Ladestrom nimmt vom Teilerkopf zu Teilerfuß hin ab. Dadurch tritt eine nichtlineare, frequenzabhängige Spannungsverteilung längs des Teilers auf. Erst nachdem die Erdkapazitäten aufgeladen sind, stellt sich eine lineare Spannungsverteilung entsprechend dem ohmschen Widerstandsbelag ein. Bei schnell veränderlichen Spannungen führt dies zu sehr ungenauen Messergebnissen. Um diesen Fehler auszuschließen, muss man die kapazitive Feldverteilung der ohmschen Feldverteilung angleichen. Dies wird dadurch erreicht, dass man parallel zu den Eigenkapazitäten weitere Kapazitäten schaltet. Für  $C_p / C_E \rightarrow \infty$  bei festem  $C_E$  würde man theoretisch ideales Übertragungsverhalten erzielen, in praxi wäre

jedoch der Teiler wegen der starken Rückwirkung und nicht mehr vernachlässigbaren Induktivitäten unbrauchbar. Man gibt sich daher mit  $C_p / C_E \geq 3$  zufrieden. Für hohe Frequenzen verhält sich dieser Teiler wie ein kapazitiver Teiler.

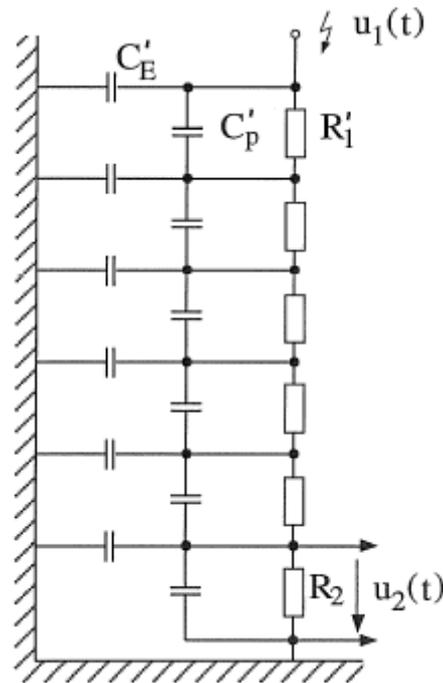


Bild 13: Ersatzschaltbild eines ohmschen Spannungsteilers mit verteilten Erd- und Parallelkapazitäten

( $R'_1$  Widerstandsbelag,  $C'_E$  Erdkapazitätsbelag,  $C'_p$  Parallelkapazitätsbelag)

Eine weitere Variante ist der gesteuerte ohmsche Spannungsteiler, bei dem man mit einer entsprechend ausgebildeten Steuerelektrode eine homogene Feldverteilung längs des Teilers und damit eine dem ohmschen Widerstand eigene, lineare Spannungsverteilung erzwingt. (Nachteil: große geometrische Abmessungen).

### 5.3.4 Gedämpft kapazitiver Spannungsteiler

Der Hochspannungskondensator des Teilers ist praktisch aus vielen, in Reihe geschalteten Einzelkondensatoren aufgebaut. Diese Anordnung ist nicht mehr induktionsfrei, d.h. der Hochspannungsteil verhält sich wie eine Leitung mit verteilten Parametern. Bei der Messung steiler Stoßspannungen entstehen Mehrfachreflexionen, die an den Enden des verlustarmen und nicht mit dem Wellenwiderstand abgeschlossenen Hochspannungsteil Wanderwellenschwingungen hervorrufen. Die Grundfrequenz dieser Schwingungen liegt bei einigen 10 MHz und kann aus der Laufzeit der Leitung berechnet werden.

Zur Unterdrückung dieser Wanderwellen hat der Schweizer Walter Zaengl einen Teiler entworfen, bei dem die einzelnen Hochspannungskapazitäten über Widerstände miteinander verbunden sind (Bild 7).

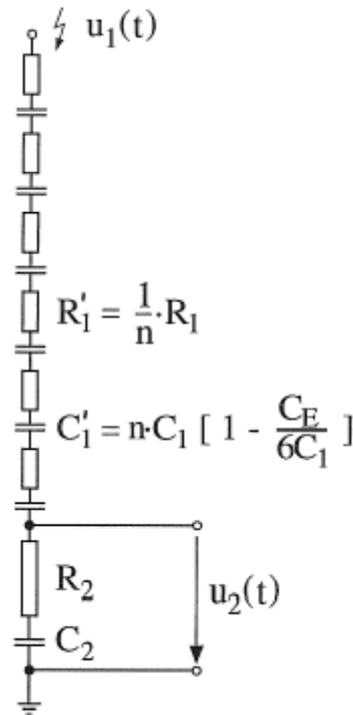
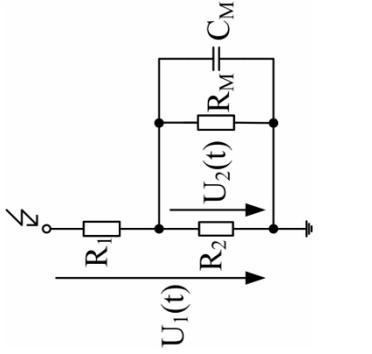
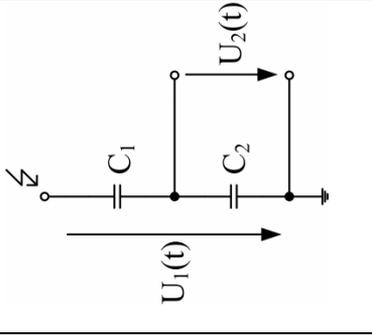
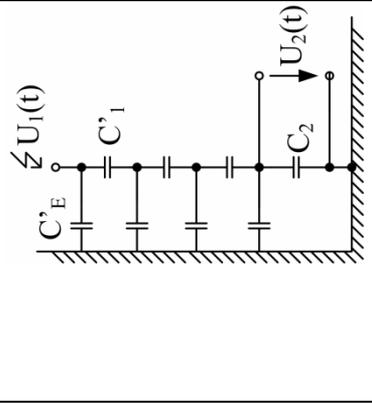
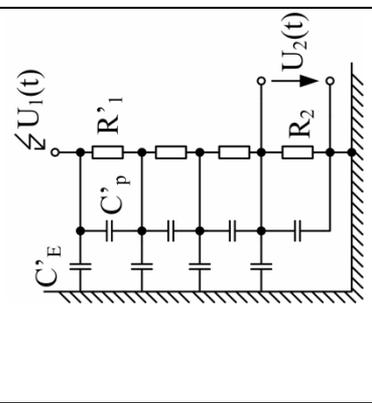


Bild 14: Gedämpfter kapazitiver Spannungsteiler

Ausreichend bedämpft ist der Teiler für einen Gesamtwiderstand von  $R = (3...4)Z_w = (3...4)\sqrt{L/C_E}$ , wenn  $Z_w$  der Wellenwiderstand des als Leitung verstandenen Teilers ist.

gedämpft kapazitiver Spannungsteiler	$R'_1 = \frac{1}{n} \cdot R_1$ $C'_1 = n \cdot C_1 \left[ 1 - \frac{C_E}{6C_1} \right]$	$R'_1 C'_1 = R_2 C_2$	Wechsel-, Stoßspannung	ü ist frequenzunabhängig	typische Stoßspannungsteiler, da Dämpfungswiderstände; Wanderwellen unterdrückbar
--------------------------------------	---	-----------------------	---------------------------	-----------------------------	---

<p>ohmscher Spannungsteiler</p> 	$\dot{u} = \frac{u_1(t)}{u_2(t)} = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$	<p>kapazitiver Spannungsteiler ohne Berücksichtigung der Erdkapazitäten</p> 	$\dot{u} = \frac{u_1(t)}{u_2(t)} = \frac{C_1 + C_2}{C_1}$	<p>kapazitiver Spannungsteiler mit Berücksichtigung der Erdkapazitäten</p> 	$\dot{u} = \frac{u_1(t)}{u_2(t)} \approx \frac{C_1 + C_2}{C_1} \cdot \left( 1 + \frac{C_E}{6C_1} \right)$	<p>ohmsch-kapazitiver Spannungsteiler</p> 	$\frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{C_1}{C_1 + C_2}$
<p>Gleichspannung</p>	<p>nicht geeignet für netzfrequente Wechselspannungen, da durch Erdkapazitäten ein RC-Tiefpass entsteht.</p>	<p>Wechsel-, Stoßspannung</p>	<p>ü ist frequenzunabhängig</p>	<p>Wechsel-, Stoßspannung</p>	<p>Gleich-, Wechsel-, Stoßspannung</p>	<p>ü ist frequenzunabhängig</p>	<p>beide Übersetzungsverhältnisse müssen übereinstimmen</p>

## 6 Literatur

Schwab, A. J. Elektroenergiesysteme; 3. Auflage; 2012; Springer Verlag

Küchler, A. Hochspannungstechnik; 3. Auflage; 2009; Springer Verlag

Ryan, Hugh M.                      High voltage engineering and testing; 2. Auflage; 2001;  
Institution of Engineering and Technology

Beyer, M.; Boeck, W.,            Hochspannungstechnik; 1. Auflage; 1986; Springer  
Möller, K.; Zaengl, W.            Verlag

## 7 Fragen

1. Welche Anwendungen gibt es heutzutage für hohe Gleichspannungen?
2. Durch welche Angaben wird eine Gleichspannung exakt bestimmt?
3. Nennen sie vier wichtige Unterschiede zwischen Prüf- und Leistungstransformatoren.
4. Welche Möglichkeiten zur Erzeugung einer Gleichspannung gibt es?
5. Wie wird die Spannungsverteilung bei Hochspannungsgleichrichtern linearisiert?
6. Welche Aufgabe hat der Kondensator bei der Einweg-Gleichrichterschaltung?
7. Zeichnen und erläutern Sie die Greinacher-Kaskadenschaltung.
8. Geben Sie eine physikalische Begründung für die Frequenzabhängigkeit der Durchbruchspannung von Kugelfunkenstrecken.
9. Wie lautet die Kompensationsbedingung für gedämpft kapazitive Spannungsteiler?
10. Welche zwei Bedingungen müssen bei einer Prüfwechselfspannung erfüllt sein?



# Protokoll zum Energietechnischen Praktikum

## Versuch Erde

### Erzeugung und Messung hoher Gleich- und Wechselspannungen

Gruppe: 

Namen:


Datum: 

Diskutieren Sie alle Versuchsergebnisse in Stichworten.

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

## 1 Messungen mit der Kugelfunkenstrecke (KFS)

Durchschlagspannung Kugelfunkenstrecken:

Schlagweite $s$ in cm	theoretische Durchbruchspannung $\hat{U}_D$ in kV	Spannung am Digitalmultimeter $U_{\text{eff}}$ in V
1,0	31,7	
2,0	59,0	
3,0	86,0	
4,0	112,0	
5,0	137,0	
6,0	161,0	
7,0	184,0	
8,0	206,0	
9,0	226,0	

Tabelle 1: Durchbruchspannungen für Kugeldurchmesser  $d = 25$  cm

1.1 Skizzieren Sie den Versuchsaufbau (Hochspannungsquelle, KFS, etc.).

1.2 Ermitteln Sie das Übersetzungsverhältnis  $\ddot{u}$  des Transformators.

1.3 Bestimmen Sie für verschiedene Schlagweiten die mittlere Primärspannung  $U_{1,m}$  beim Durchbruch der Funkenstrecke. Berechnen Sie mit diesem Wert und dem Nennübersetzungsverhältnis die mittlere Durchschlagspannung  $\hat{U}'_1$  in kV. Führen Sie dazu bei jeder Schlagweite fünf Messungen mit ausreichendem zeitlichem Abstand durch. Berechnen Sie die theoretische Durchschlagspannung  $\hat{U}_D^*$ . Der Kugeldurchmesser beträgt 25 cm.

Lufttemperatur:

Luftdruck:

Messergebnisse:

s in cm	<b><math>U_{1,1}</math> in V</b>	<b><math>U_{1,2}</math> in V</b>	<b><math>U_{1,3}</math> in V</b>	<b><math>U_{1,4}</math> in V</b>	<b><math>U_{1,5}</math> in V</b>	$U_{1,m}$ in V	$\hat{U}'_1$ in kV	$\hat{U}_D^*$ in kV
1								
2								
3								

Die zu messenden Größen sind **fett** dargestellt.

$$U_{1,m} = \frac{1}{4} \sum_{i=2}^5 U_{1,i} \quad \hat{U}'_1 = \sqrt{2} \cdot \ddot{u} \cdot U_{1,m}$$

1.4 Tragen Sie  $\hat{U}_D^* = f(\hat{U}'_1)$  in das Diagramm 1 ein.

1.5 Benennen Sie mögliche Ursachen für die Differenz von  $\hat{U}_D^*$  und  $\hat{U}'_1$ .

---

---

---

---

---

## 2 Spannungsmessung mit kapazitivem Teiler

$$C_1 = 100 \text{ pF}$$

$$U_N = 50 \text{ kV} \quad (\text{oberspannungsseitig})$$

$$C_2 = 102,4 \text{ nF}$$

2.1 Ermitteln Sie das Übersetzungsverhältnis  $\ddot{u}$  des Transformators.

2.2 Skizzieren Sie den Versuchsaufbau.

2.3 Bestimmen Sie das theoretische Übersetzungsverhältnis  $\ddot{u}_{\text{Teiler}}$  des kapazitiven Teilers.

$$\ddot{u}_{\text{Teiler}} = \boxed{\phantom{0}} =$$

2.4 Geben Sie den zu erwartenden maximalen Effektivwert der Spannung an, den Sie am Oszilloskop erwarten und treffen Sie eine Einschätzung zur Sicherheit.

$$U_{\text{eff,max}} =$$

2.5. Bestimmen Sie das resultierende theoretische Übersetzungsverhältnis des Teilers.

$\hat{U}_{res} =$

2.6 Berechnen Sie die prozentuale kapazitive Spannungsüberhöhung  $\hat{u}_{\hat{u}}$  auf der Unterspannungsseite (220 V), die durch den Teiler verursacht wird. Folgende Transformator肯ndaten sind bekannt:

$$S_N = 2,5 \text{ kVA}$$

$$u_{k1} = 2,7 \%$$

2.7 Überprüfen Sie experimentell die berechnete Spannungsüberhöhung. Messen Sie dazu bei verschiedenen Primärspannungen  $U_1$  mittels Oszilloskop die Spannung  $\hat{U}_{Osz.}$  an der Unterspannungskapazität.

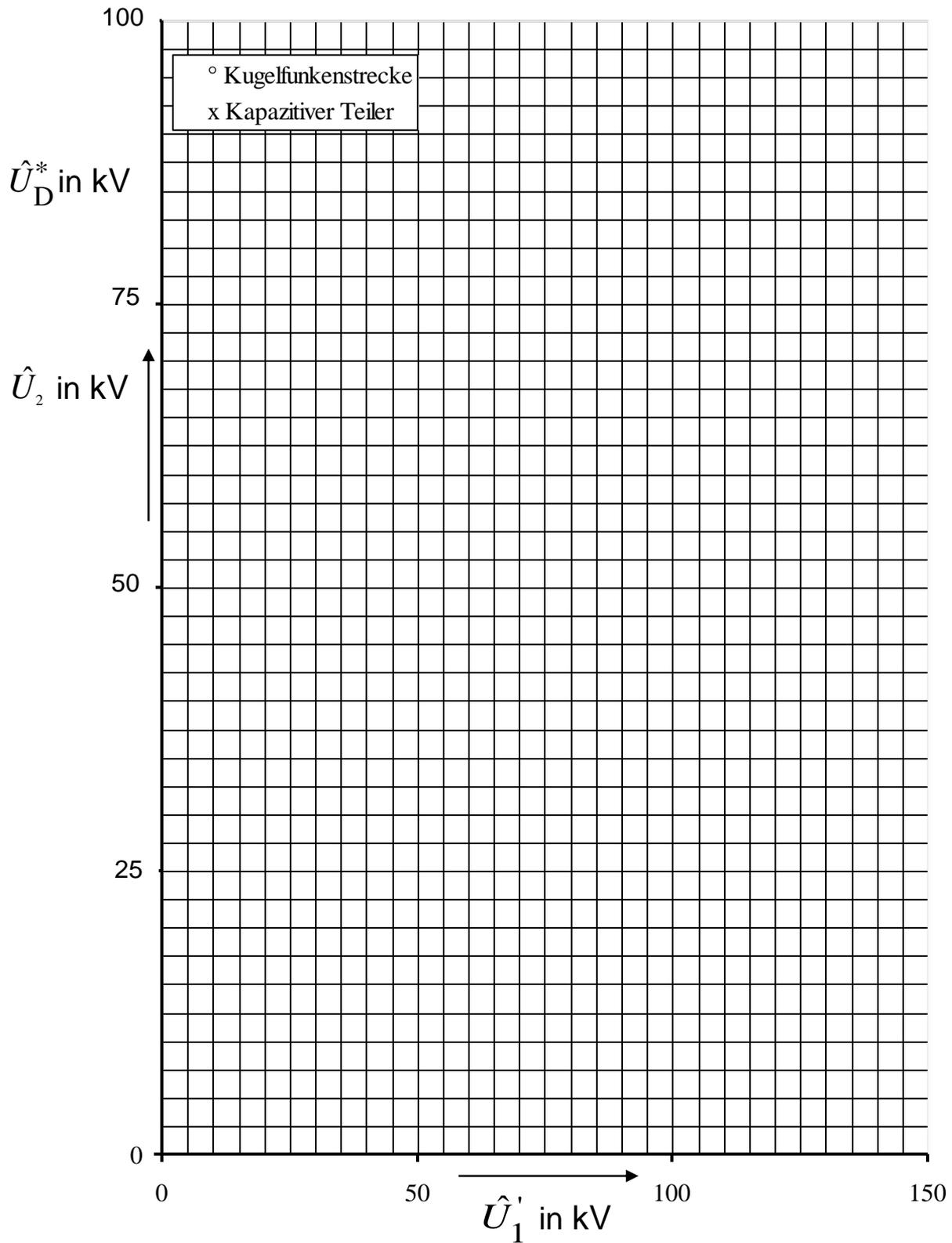
Messergebnisse:

$U_{1,Soll}$ in V	80	120	160	200
<b><math>U_{1,Ist}</math> in V</b>				
$\hat{U}'_1$ in kV				
<b><math>\hat{U}_{Osz.}</math> in V</b>				
$\hat{U}_2 = \hat{u}_{Teiler} \cdot \hat{U}_{Osz.}$ in kV				
$\hat{U}_2/\hat{U}'_1$				

Die zu messenden Größen sind **fett** dargestellt.

2.8 Tragen Sie den Scheitelwert  $\hat{U}_2$  als Funktion von  $\hat{U}'_1$  in das Diagramm 1 ein und erläutern Sie die Abweichungen der Kurvenverläufe.

### 3 Übersicht der Messergebnisse

Diagramm 1: Messergebnisse als Funktion von  $\hat{U}'_1$

## 4 Überlagerungsfaktor und Stromflusszeit einer Einweg-Gleichrichterschaltung

Die in Bild 1 gezeigte Einweg-Gleichrichterschaltung ist zunächst aufzubauen. Der ebenfalls abgebildete Widerstandsteiler, bestehend aus den Widerständen  $R_1$  und  $R_2$ , der gleichzeitig den Belastungswiderstand  $R_B$  bildet, ist danach anzuschließen.

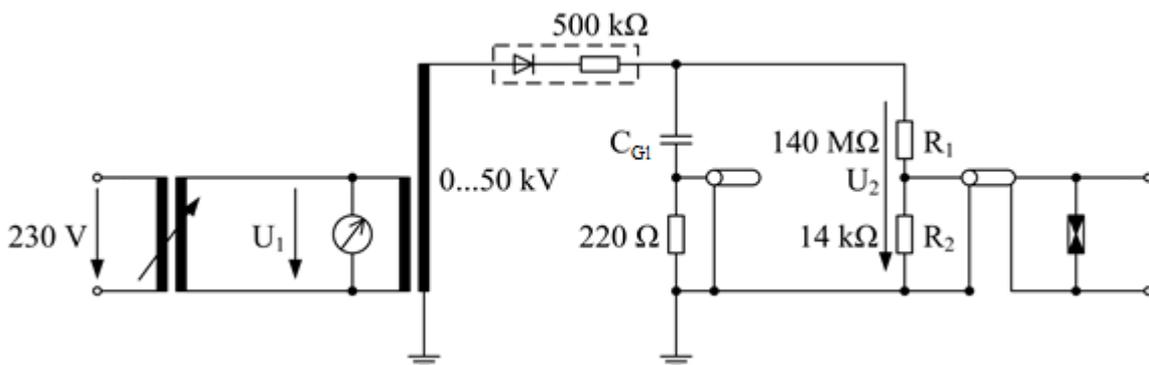


Bild 1: Einweg-Gleichrichterschaltung mit Messanordnung

4.1 Bestimmen Sie das theoretische Übersetzungsverhältnis des ohmschen Teilers.

$$\ddot{U}_{\text{Teiler}} = \boxed{\phantom{0,1}} =$$

4.2 Oszillographieren Sie für eine Primärspannung des Prüftransformators von  $U_1 = 110 \text{ V}$  den Ladestrom des Glättungskondensators  $C_{Gl} = 1,2 \text{ nF}$ , sowie gleichzeitig den Wechselanteil der Ausgangsspannung  $U_2(t)$ . Wie stehen positive und negative Stromzeitfläche im Verhältnis? Geben Sie eine Begründung für das Verhältnis an.

---



---



---

4.2 Bestimmen Sie den Wert des Wechselanteils  $\Delta U_2 = U_{2,\max} - U_{2,\min}$  mit dem Oszilloskop bei 50 V und 110 V Primärspannung mit den Glättungskondensatoren der Kapazitäten  $C_{GI} = 0,3 \text{ nF}$  und  $6 \text{ nF}$ .

Weiterhin sind bei den jeweiligen Primärspannungen und Glättungskondensatoren die Zeiten  $t_D$  zu messen, während durch die Diode ein Durchlassstrom fließt. Daraus ist der Stromflusswinkel  $\Theta$  zu berechnen ( $360^\circ = 1 \text{ Periodendauer}$ ).

Mit Hilfe des parallel liegenden hochohmigen Vorwiderstands ( $R = 140 \text{ M}\Omega$ ) ist der Gleichanteil von  $u_2(t)$  durch eine Strommessung zu bestimmen.

Geben Sie an, wozu der Überspannungsableiter zwischen Innen- und Außenleiter des Messkabels dient.

---

Erläutern Sie, wie Gleichanteil, Wechselanteil, Überlagerungsfaktor und Stromflusszeit von der Primärspannung und der verwendeten Kapazität abhängen.

Hinweise:

- Der Gleichanteil soll während der Messung unberücksichtigt bleiben (Oszilloskop)
- Der Eingangsteiler des Oszilloskops ist dem Spannungspegel so anzupassen, dass das Oszilloskop nicht übersteuert wird
- Für den Scheitelwert der Überlagerung (*ripple*) gilt  $\delta U = 1/2 \Delta U$

Tragen Sie die Ergebnisse in die folgende Tabelle ein.

$U_1$ in V	50	110	50	110
$C_{GI}$ in pF	300	300	6000	6000
<b><math>\Delta U_2</math> in V</b>				
$\Delta U_2$ in kV				
<b><math>t_b</math> in ms</b>				
$\Theta$ in °				
<b><math>I_2</math> in mA</b>				
<b><math>\bar{U}_2</math> in kV</b>				
$\delta U$ in kV				
$\delta U \bar{U}_2$				

Die zu messenden Größen sind **fett** dargestellt.

4.3 Geben Sie an, wie sich Wechselanteil, Gleichanteil, Überlagerungsfaktor und Stromflusszeit in Abhängigkeit von der Primärspannung und der verwendeten Kapazität ändern.

---



---



---



---



---



---



---



---

4.4 Berechnen Sie den Überlagerungsfaktor einer belasteten Einweg-Gleichrichterschaltung ohne Verwendung eines Kondensators  $C$  bei sinusförmig verlaufender Transformatorspannung. Die Durchlassspannung der Diode und der Innenwiderstand des Transformators können vernachlässigt werden.

- 4.5 Berechnen Sie den Wert des Gleichanteils bei Verwendung eines Hochspannungstransformators mit einem Übersetzungsverhältnis von 220 V/50 kV und einer gestellten Primärspannung von 110 V.

- 4.6 Geben Sie den Überlagerungsfaktor und den Gleichanteil für  $C \rightarrow \infty$  an.

- 4.7 Ergänzen Sie anhand der Messungen die folgenden Sätze:

Der Überlagerungsfaktor nimmt zu bei

\_\_\_\_\_ Belastungswiderstand

\_\_\_\_\_ Kapazität des Glättungskondensators

Der Gleichanteil nimmt zu bei

\_\_\_\_\_ Belastungswiderstand

\_\_\_\_\_ Kapazität des Glättungskondensators

## 5 Messung der Spannungsverläufe einer Greinacher-Verdopplungs-Schaltung

In Bild 2 ist der Aufbau für eine Greinacher-Verdopplungsschaltung dargestellt.

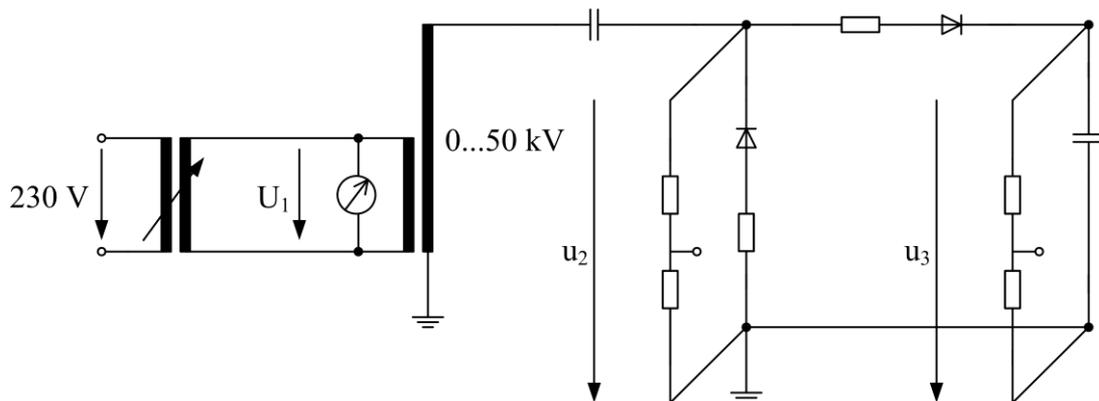


Bild 2: Greinacher-Verdopplungsschaltung

5.1 Bauen Sie die Schaltung zunächst auf.

$C_1 = 1200 \text{ pF}$ ,  $C_2 = 1200 \text{ pF}$ ; ohmscher Spannungsteiler:  $140 \text{ M}\Omega/14 \text{ k}\Omega$

5.2 Oszillographieren Sie die Spannungen  $u_2(t)$  und  $u_3(t)$  bei einer

Primärspannung  $U_1 = 55 \text{ V}$ . Bestimmen Sie die Spitze-Spitze Werte  $U_{2SS}$  und  $U_{3SS}$  sowie den Gleichanteil  $\bar{U}_3$  und den Überlagerungsfaktor von  $u_3(t)$ .

Bestimmen Sie außerdem die maximale Ausgangsspannung am Transformator  $\hat{U}_T$ , die erwartete verdoppelte Spannung  $\hat{U}_D$  und den Maximalwert  $\hat{U}_{2max}$ .

Begründen Sie stichwortartig die Ergebnisse der Messungen.

Einstellungen am Oszilloskop beachten!

$$\hat{U}_T =$$

$$\hat{U}_D =$$

$$U_{2SS} =$$

$$\hat{U}_{2max} =$$

$$\bar{U}_3 =$$

$$U_{3SS} =$$

$$\delta U / \bar{U}_3 =$$