

Universität der Bundeswehr München Professur für Hochspannungstechnik und Blitzforschung	
Hochspannungstechnisches Praktikum 2	Wanderwellen-Untersuchungen
Versuch 5	

1. Grundlagen

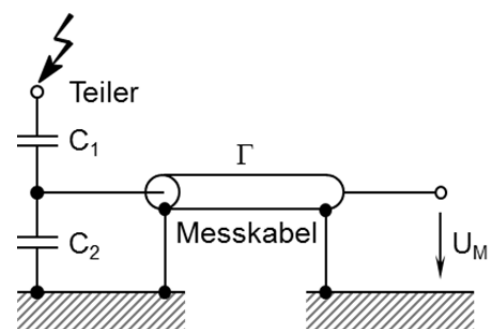
Wanderwellen in Hochspannungsnetzen werden insbesondere durch Blitzeinschläge und Schalthandlungen hervorgerufen. Dabei müssen unzulässige Beanspruchungen der angeschlossenen Betriebsmittel, wie z.B. Isolationsdurchschläge, vermieden werden.

Wanderwellenvorgänge sind auch im Labor- und Prüfbetrieb bedeutsam. Reflexionen auf Leitungen und Messkabeln können eine Verfälschung des Messsignals verursachen.

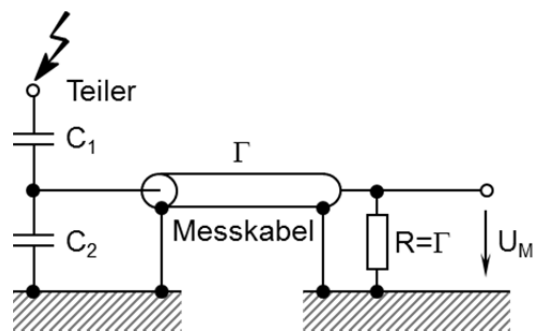
1.1 Wanderwellen bei der Stoßspannungsmessung

Die Stoßspannungsmessung erfolgt über einen kapazitiven Teiler. Zur Aufzeichnung des zeitlichen Spannungsverlaufs dient ein Digital-Speicher-Oszilloskop (DSO) mit Tastkopf ($\ddot{u} = 10:1$), an das ein Drucker zur graphischen Ausgabe angeschlossen ist. Die Übertragung der Messspannung vom Teiler zum DSO erfolgt über ein koaxiales Messkabel ($\Gamma = 50 \Omega$, $v = 200 \text{ m}/\mu\text{s}$).

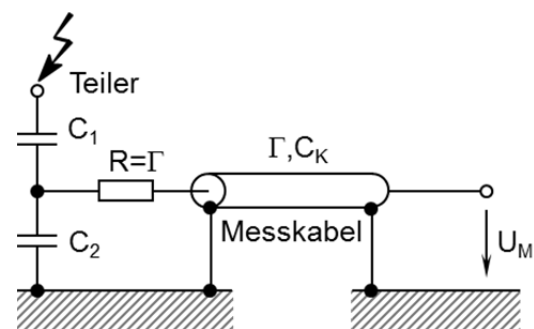
Bei unbeschaltetem Messkabel bewirken die Wanderwellenvorgänge, dass die gemessene Stoßspannung u_M von einer oszillierenden Störspannung eingeleitet wird.



Durch Einbringen eines Abschlusswiderstands $R = \Gamma$ wird eine Reflexion am Messkabelende und somit das Entstehen der oszillierenden Störspannung vermieden. Andererseits entlädt sich die Niederspannungskapazität des Teilers C_2 über den Abschlusswiderstand, was normalerweise zu unzulässigen Messfehlern im Rückenbereich der Stoßspannung (Reduzierung der Rückenhalbwertzeit) führt.



Zur praktischen Anwendung kommt folgendes Messverfahren: Durch längs Schalten eines Widerstandes $R = \Gamma$ zwischen Niederspannungskapazität C_2 und Messkabel wird die in das Messkabel einziehende Wanderwelle amplitudenmäßig halbiert. Die Reflexion am offenen Kabelende bewirkt eine Verdopplung der Messspannung auf den ursprünglichen Wert. Die Niederspannungskapazität C_2 stellt für schnell veränderliche Vorgänge (Stoßspannung) einen Kurzschluss dar. Der längs geschaltete Widerstand $R = \Gamma$ fungiert als wellenwiderstandgleicher Abschluss des Messkabels, sodass keine neuerliche Reflexion auftritt



Für langsam verlaufende Vorgänge (Rückenbereich der Stoßspannung) ist das Wanderwellenverhalten von untergeordneter Bedeutung. Allerdings ist zu beachten, dass die Kabelkapazität C_k parallel zur Niederspannungskapazität des Teilers C_2 geschaltet ist. Um den Einfluss auf das Teilverhältnis zu minimieren, sollte daher $C_k \ll C_2$ sein.

1.2 Wanderwellen in Hochspannungsnetzen

Wanderwellenvorgänge in Freileitungs- und Kabelnetzen lassen sich im Modell mit Hilfe eines Niederspannungs-Impulsgenerators und eines Versuchskabels untersuchen, das zur Nachbildung einer Freileitung dient. Der Impulsgenerator hat einen Innenwiderstand $R_i = 50 \Omega$, was dem Wellenwiderstand des Versuchskabels entspricht (reflexionsfreier Abschluss

des Versuchskabelanfangs). Das Versuchskabel besteht aus 2 Teilen von je 50 m Länge. Die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit längs dieses Versuchskabels beträgt 200 m/ μ s.

Der Impulsgenerator liefert repetierend eine angenäherte Rechteckstoßspannung. Die auf dem Versuchskabel reflektierten Wanderwellen überlagern die vom Impulsgenerator erzeugte Rechteckstoßspannung. Die Impulsdauer der Rechteckstoßspannung sollte daher groß gegenüber den Laufzeiten im Versuchskabel sein.

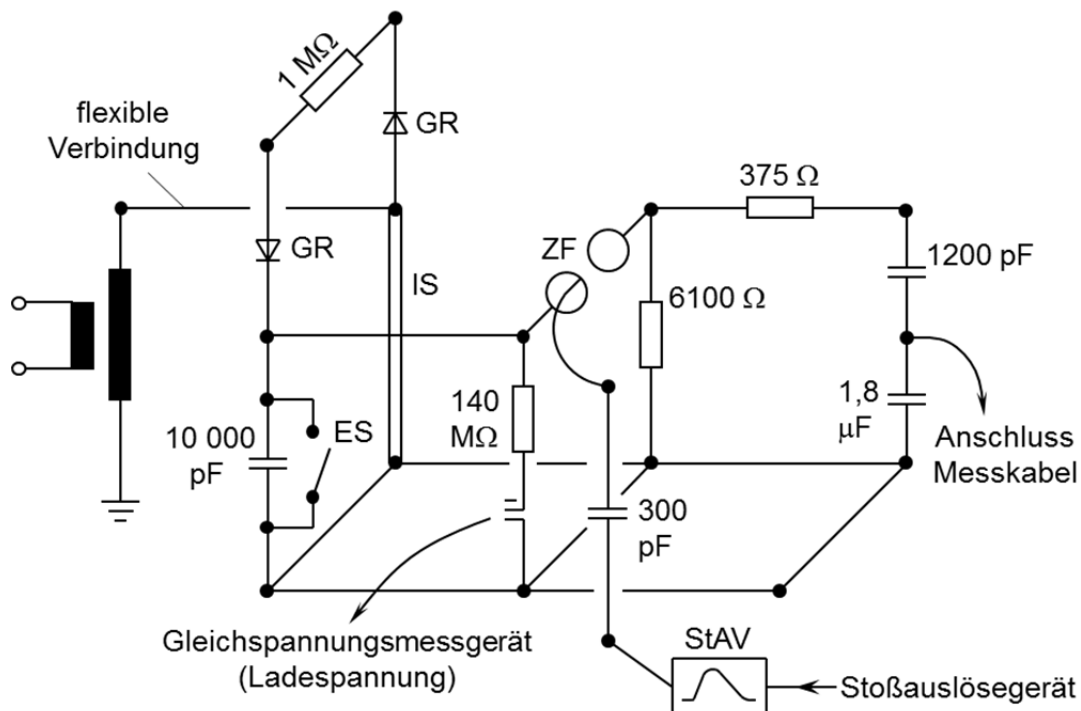
Die Teilstücke des Versuchskabels lassen sich am Anfang und Ende beschalten. Die Schaltelemente (Kondensatoren, Induktivitäten und Widerstände) können quer und längs zur Leitung eingebracht werden.

Zur Spannungsmessung dient ein Digital-Speicheroszilloskop (DSO). Das Oszilloskop wird im 2-Kanalmodus betrieben, um eine zeitsynchrone Aufzeichnung von Messspannung und Referenzspannung zu ermöglichen. Als Referenzspannung fungiert die Spannung am Kabelanfang ($\ell = 0$).

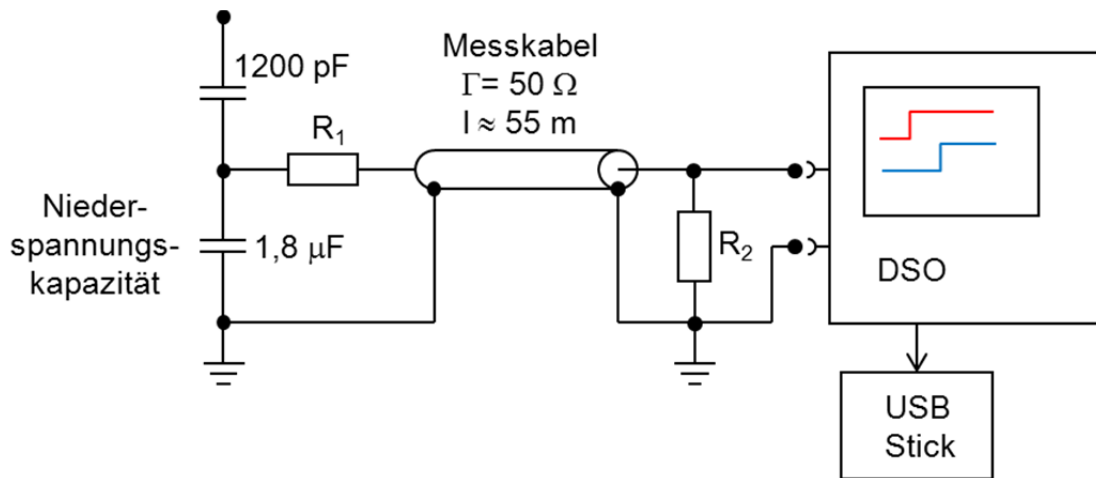
2. Schaltung

2.1 Schaltung bei Blitzstoßspannung

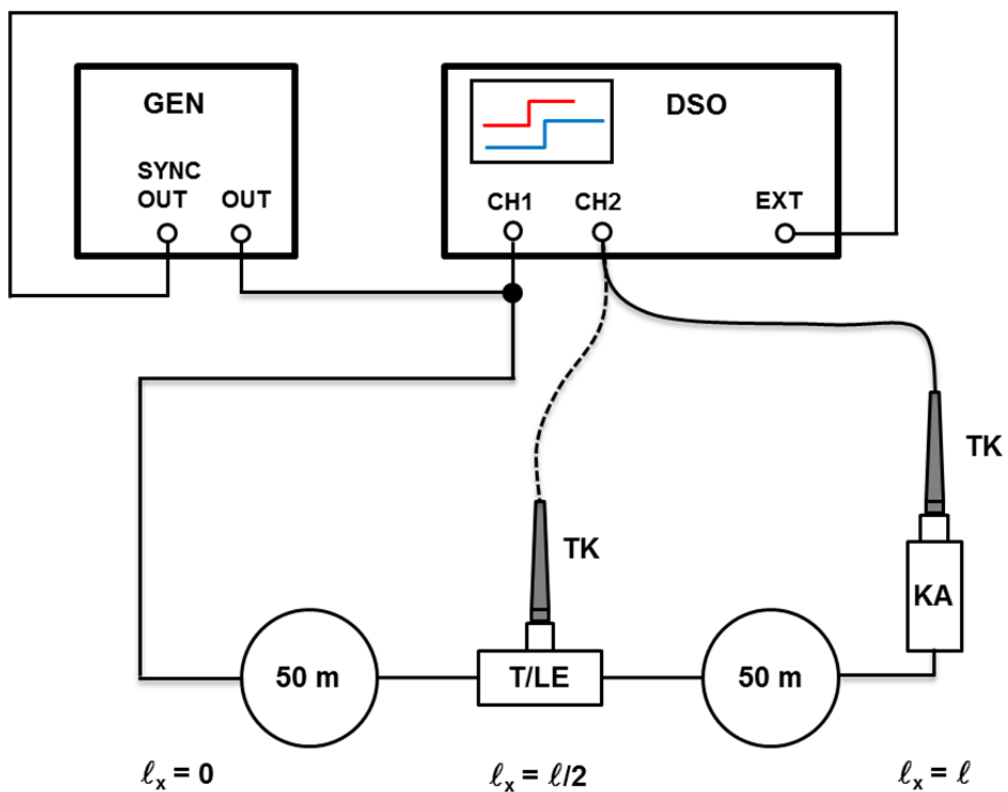
Aufbau



Anschluss des Messkabels:



2.2 Schaltung für das Versuchsmodell einer Hochspannungsfreileitung



- DSO: Digital-Speicheroszilloskop LeCroy 332
- GEN: Rechteck-Generator Wavetek Model 81
- KA: Kabelabschluss
- T/LE: T-Stück bzw. Längselement
- TK: Tastkopf 1:10

3. Versuchsdurchführung

3.1 Stoßspannungsmessung und Wanderwellenverhalten

Nach Schaltung und Versuchsaufbau gemäß Abschnitt 2.1 ist bei einer Ladespannung $U_L = 25 \text{ kV}$ eine positive Blitzstoßspannung zu erzeugen. Die Untersuchungen sind unter Zugrundelegung der nachfolgenden Messkabelbeschaltungen durchzuführen.

- $R_1 = 0 \Omega, \quad R_2 = \infty$ (Schaltung 1)
- $R_1 = 0 \Omega, \quad R_2 = 50 \Omega$ (Schaltung 2)
- $R_1 = 50 \Omega, \quad R_2 = \infty$ (Schaltung 3)

Es ist jeweils ein Oszillogramm für den Stirn- und den Rückenbereich der gemessenen Stoßspannung aufzunehmen.

3.2 Wanderwellenuntersuchungen an einer Freileitungsnachbildung

Der Rechteckgenerator ist so einzustellen, dass eine Rechteckspannung $\hat{u} = 1 \text{ V}$ bei einer Wiederholfrequenz $f = 10 \text{ kHz}$ abgegeben wird.

3.2.1 Verschiedene Leitungsabschlüsse

Nach Schaltung und Aufbau gemäß Abschnitt 2.2 werden die beiden 50 m Kabelabschnitte in Reihe geschaltet. Die Kabel werden mit einem T-Stück verbunden. Der zeitliche Verlauf der Spannungen ist an den Stellen $\ell_x = \ell/2$ und $\ell_x = \ell$ aufzuzeichnen. Für die Messung wird ein 1:10 Tastkopf verwendet. Als Leitungsabschluss sind folgende Elemente einzubringen:

- $R = 0 \Omega$
- $R = \Gamma/2 = 25 \Omega$
- $R = \Gamma = 50 \Omega$
- $R = 2 \cdot \Gamma = 100 \Omega$
- $R = \infty$
- $L = 33 \mu\text{H}$
- $C = 11 \text{ nF}$

3.2.2 Wirkung von Widerständen, Drosseln und Kondensatoren im Zuge der Leitung

Nach Schaltung und Aufbau gemäß Abschnitt 2.2 ist bei einem Leitungsabschluss $R = \Gamma$ der zeitliche Verlauf der Spannungen den Stellen $\ell_x = \ell/2$ (ggf. vor und hinter dem eingeschalteten Element) und $\ell_x = \ell$ für die folgenden an der Stelle $\ell_x = \ell/2$ einzusetzenden Elemente zu oszillografieren und graphisch auszugeben:

- $R = \Gamma/2 = 25 \Omega$ quer zur Leitung,
- $C = 11 \text{ nF}$ quer zur Leitung,
- $R = 2 \Gamma = 100 \Omega$ längs der Leitung,
- $L = 33 \mu\text{H}$ längs der Leitung.

4. Auswertung

4.1 Für das im Abschnitt 3.1 verwendete Messkabel (Länge $\ell = 55$ m) ist zu ermitteln:

- Induktivitätsbelag L'_k
- Kapazitätsbelag C'_k und Kapazität C_k
- Dielektrizitätszahl ϵ_r
- Laufzeit T_k von Kabelanfang zu Kabelende

Die Kapazität des Messkabels ist mit der Niederspannungskapazität des Teilers zu vergleichen.

4.2 Für Schaltung 1, 2 und 3 (Abschnitt 3.1) sind jeweils der Scheitelwert \hat{u} und die Stirnzeit T_1 zu ermitteln und zu vergleichen.

Ferner sind zu bestimmen:

- Die Periodendauer T_p der oszillierenden Spannung bei Schaltung 1
- Die Rückenhalbwertzeit T_2 bei Schaltung 2 und 3.

Die Periodendauer T_p ist mit der Kabellaufzeit T_k zu vergleichen.

4.3 Aus den Messungen gemäß Abschnitt 3.2.1 ist der idealisierte zeitliche Verlauf der Spannungen (normiert auf die Amplitude des Eingangsimpulses) an den Stellen $\ell_x = 0$, $\ell/2$ und ℓ in jeweils 3 zeitlich richtig untereinander liegenden Skizzen aufzutragen. (Der Verlauf der Rechteckspannung sei als ideal angenommen). Für die Leitungsabschlüsse $R = 2 \Gamma$ und $R = \Gamma/2$ sind Messergebnisse rechnerisch zu überprüfen. Ferner sind die Zeitkonstanten für den Abschluss mit L und C zu ermitteln.

4.4 Aus den Messungen gemäß Abschnitt 3.2.2 ist der idealisierte zeitliche Verlauf der Spannungen an den Stellen $\ell_x = 0$, $\ell/2$ und ℓ in jeweils 3 bzw. 4 zeitlich richtig untereinander liegenden Skizzen aufzutragen.