

## TDR Messtechnik

### Einführung

TDR (Time Domain Reflectometry) ist ein Reflexions-Messverfahren, das besonders gut auf die Probleme der Impulstechnik zugeschnitten ist. Es eignet sich zur breitbandigen Untersuchung von Leitungen, Leitungsabschlüssen und -übergängen, Komponenten und Netzwerken.

Bei Schmalbandanwendungen wird meistens das FDR-Verfahren (Frequency Domain Reflectometry) bevorzugt. Das Testsignal ist hier eine Sinusspannung mit variabler Frequenz. Ein geeignetes Messgerät ermittelt z. B. das Stehwellenverhältnis oder den Reflexionsfaktor nach Betrag und Phase in Abhängigkeit von der Frequenz des eingespeisten Testsignals. Resonanzfrequenzen lassen sich mit diesem Verfahren besonders genau und schnell bestimmen.

Bei Digitalsignalen mit hohen Bitraten, z. B. in der Nachrichtenübertragungstechnik, ist die breitbandige Anpassung von Komponenten und Leitungen wichtig, d. h. im gesamten Frequenzbereich von DC bis eventuell mehreren Gigahertz dürfen keine störenden Reflexionen auftreten.

Die TDR Messung stellt eine einfache und schnelle Möglichkeit für breitbandige Untersuchungen dar, denn zur Messung werden schnelle Impulse verwendet, die den tatsächlichen Betrieb genau simulieren.

### TDR Messaufbau und Verfahren

Ein Impuls mit möglichst kurzer Anstiegszeit wird in das Messobjekt, z. B. eine Leitung mit unbekanntem Wellenwiderstand oder mit Fehlanpassung am Leitungsende eingespeist. Die Impulsdauer kann beliebig lang sein, sie sollte länger als das betrachtete Zeitfenster sein, damit mögliche Reflexionen nicht zeitgleich mit der Rückflanke des Impulses eintreffen. Für das betrachtete Zeitfenster stellt der Messimpuls damit praktisch eine Sprungfunktion dar. Ein Oszillograph zur Auswertung der Messsignale wird zusätzlich zwischen dem Ausgang des Impulsgenerators und dem Eingang des Messobjekts angeschlossen. Nach der doppelten Signallaufzeit trifft bei einer Fehlanpassung am Leitungsende die reflektierte Welle wieder am Leitungsanfang ein und kann bzgl. Form und Amplitude ausgewertet werden. Setzt man die reflektierte Welle in Bezug zum eingespeisten Signal, lässt sich ein zeitabhängiger Reflexionsfaktor bestimmen, der alle Informationen über Betrag und Phase der Reflexion enthält.

In der Ersatzschaltung in Abbildung 1 ist gezeigt, wo die Messspannung abgegriffen und das Messobjekt angeschlossen wird.

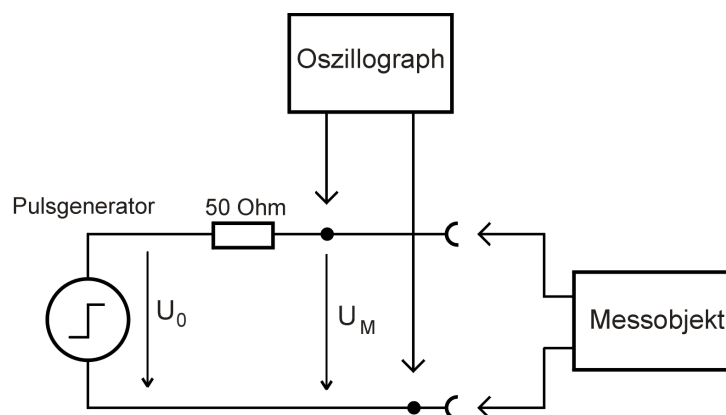


Abbildung 1: Ersatzschaltung zur TDR Messung

Zum Anschluss eines Oszillographen gibt es unterschiedliche Möglichkeiten:

1. Hochohmiger Labor-Oszillograph

Grundsätzlich möglich, ein hochohmiger Oszillograph scheidet aber meistens aus, da die Bandbreite nicht ausreicht.

2. Oszillograph mit  $50\ \Omega$  Eingang

Ein Analog- oder Digital-Oszillograph mit  $50\ \Omega$  Eingang kann über ein angepasstes T-Glied an die zu untersuchende Leitung geschaltet werden. Die Auswertung wird jedoch erschwert, weil das T-Glied die reflektierte Welle um den Faktor 2 (6 dB) abschwächt.

3. Sampling-Oszillograph

Bei einem Sampling-Oszillographen mit Durchgangs-Eingang kann das Messsignal ungedämpft durchgeschleift werden.

4. Spezial Koppler

Ein spezieller Koppler, der die rücklaufende Welle nicht beeinflusst, ermöglicht den Anschluss eines beliebigen  $50\ \Omega$  Oszillographen.

Der Impulsgenerator muss ebenso wie der Oszillograph gut an den Systemwellenwiderstand von  $50\ \Omega$  angepasst sein, da sonst Mehrfachreflexionen auftreten.

Im Bild 2 ist der TDR Messaufbau mit dem Wellenwiderstandsmessgerät TDR 3000 dargestellt. Der Impulsgenerator und ein spezieller Koppler sind im TDR 3000 eingebaut.

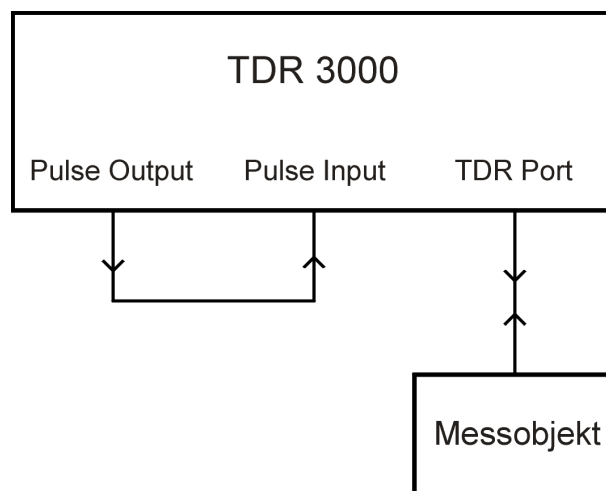
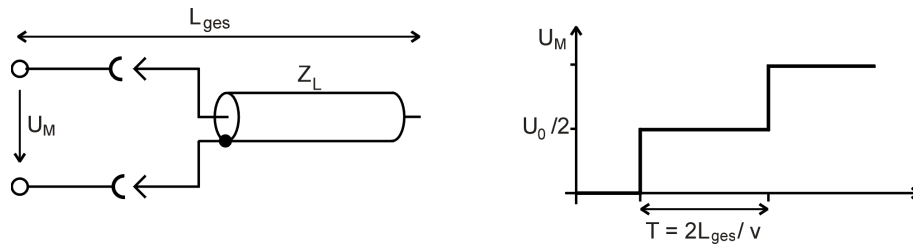


Abbildung 2: TDR Messaufbau mit Wellenwiderstandsmessgerät TDR 3000

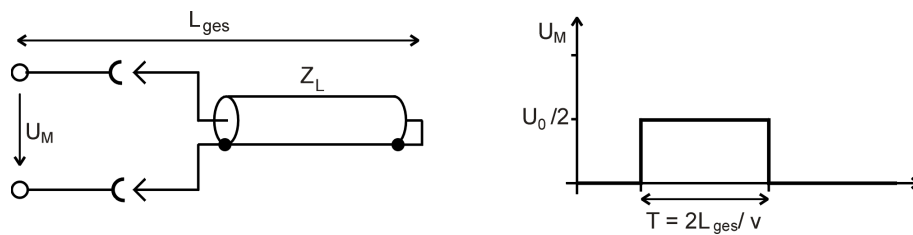
Abbildung 3 zeigt einige Beispiele zu Extremfällen von Leitungsabschlüssen mit der entsprechenden Spannung  $U_M$  zur Veranschaulichung des Verfahrens.

Es wird immer nur die Vorderflanke des Messimpulses betrachtet und als Sprungfunktion angesehen. Der bei allen Beispielen gleich aussehende erste Teil von  $U_M$  ist die hinlaufende Welle. Dazu addiert sich nach der Zeit  $T$  die reflektierte Welle.  $T$  ist die doppelte Laufzeit der untersuchten Leitung einschließlich des kurzen Leitungsstücks im Koppler.

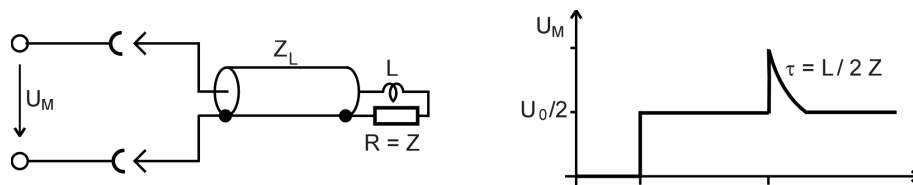
**a) Leerlaufende Leitung** Die am Ende leerlaufende Leitung (Reflexionsfaktor  $r = +1$ ) erzeugt eine reflektierte Welle mit derselben Amplitude wie die hinlaufende Welle. Also stellt sich nach der Zeit  $T$  die doppelte Amplitude wie am Anfang ein.



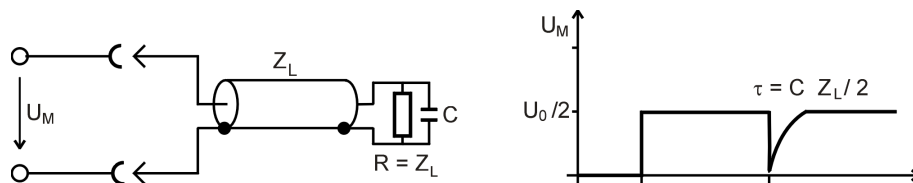
(a) Am Ende leerlaufende Leitung



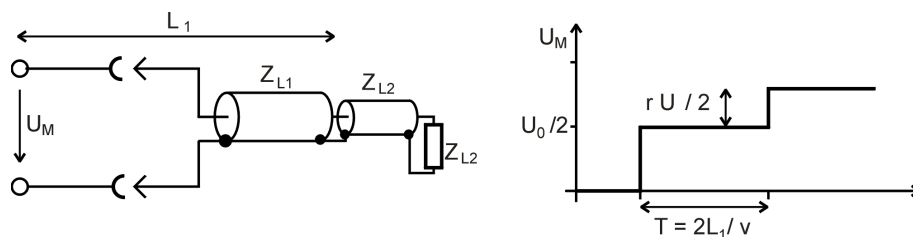
(b) Am Ende kurzgeschlossene Leitung



(c) Induktiver Abschluss



(d) Kapazitiver Abschluss



(e) Falscher Abschluss oder Leitungsübergang

Abbildung 3: Idealisierte Beispiele zur TDR Messung

**b) Kurzgeschlossene Leitung** Der Kurzschluss am Leitungsende (Reflexionsfaktor  $r = -1$ ) erzeugt eine reflektierte Welle mit der Amplitude  $-U_0/2$ , die zu einer resultierenden Spannung Null nach der Zeit  $T$  führt.

**c) Induktiver Abschluss** Bei sauberer Anpassung würde sich keine Reflexion ergeben, wenn  $R = Z_L$  ist. Die Induktivitäten in Serie mit  $R$  wirken bei dieser idealisierten Betrachtung für die steile Impulsflanke wie ein großer Widerstand. Deshalb ist der Reflexionsfaktor  $r$  zunächst  $+1$  und nach exponentiellem Übergang stellt sich der angepasste Zustand  $r = 0$  ein.

**d) Kapazitiver Abschluss** Ein Kondensator parallel zu  $R = Z_L$  wirkt zunächst wie ein Kurzschluss mit  $r = -1$ .

**d) Falscher Abschluss oder Leitungsübergang** Ein Leitungsabschluss mit  $R > Z_L$  führt zu einer Reflexion mit  $0 < r < +1$ . Ein Übergang auf eine zweite Leitung mit einem Wellenwiderstand  $Z_{L2} > Z_{L1}$  hat dieselbe Wirkung. Die reflektierte Welle hat eine Amplitude von  $r * U_0/2$ .

Diese Beispiele mit einer idealen Sprungfunktion und idealen Bauelementen sind in der Praxis nur angenähert nachzuvollziehen. Die endliche Anstiegszeit des Messimpulses begrenzt die Systembandbreite und lässt nur eine Auflösung im Bereich von 1 bis 10 mm Leitungslänge zu. Für Demonstrationszwecke sollte man deshalb genügend große Reaktanzen und Leitungslängen wählen. Die Beispiele wurden ausgewählt, weil sie sich einfach nachmessen lassen und so die Möglichkeit bieten, das TDR Verfahren kennenzulernen. Einige Ergebnisse der aufgeführten Beispiele lassen sich auch mit anderen Methoden ermitteln. In vielen praktischen Fällen ist die Anschaulichkeit des Verfahrens jedoch ein unschätzbare Vorteil. Man denke nur an eine Stripline mit gestuften Wellenwiderständen oder an eine längere Busleitung mit vielen verteilten Treiberanschlüssen, deren zeitliches Reflexionsverhalten mit anderen Methoden kaum messbar ist.