

ORTUNG VON FEHLERN AN ERDKABELN

KABELFEHLERORTUNG
MIT DEM REFLEKTOMETER



DAS PROBLEM

EIN ERDKABELFEHLER VERURSACHT EINEN TEIL-/AUSFALL EINER ELEKTRISCHEN LEITUNG

Fällt eine öffentliche Beleuchtung aus, dann wird es im wahrsten Sinne des Wortes dunkel. Deren Betreiber, die Kommunalbetriebe und Kommunen, sind für die Instandhaltung und Wiederherstellung der Funktion zuständig. Durch die eingesetzten Messtechniken wird versucht die Fehlerstelle in der Niederspannungsinstallation so schonend wie möglich zu lokalisieren und deren Ursache zu ermitteln. Je präziser die Fehlerortung ist, desto kürzer sind die Ausfallzeiten und umso niedriger die Kosten für Reparatur und Wiederherstellung an einem defekten Kabel sowie der Umgebung, bei Erdkabeln die Oberfläche, d.h. Gehwege und Straßen.

VERFAHREN ZUR VORORTUNG VON KABELFEHLERN

Die Kabelfehlerortung dient der Lokalisierung von punktuellen Fehlern wie Isolationsfehler in Erdkabeln und ist ein Anwendungsbereich der elektrischen Messtechnik. Isolations- und Widerstandsmessung geben Aufschluss über die Art des Kabelfehlers.

Bei der sogenannten **Fehlervorortung** wird die die Entfernung zum Fehler ermittelt. Dabei kommen hauptsächlich zwei Methoden zum Einsatz. Die Zeitbereichsreflektometrie und die Transientenmethode.

Bei der Impuls- oder **Transientenmethode** wird mit einem Stoßwellengenerator eine Stoßspannung erzeugt die Kabelfehler zum Durchschlag bringt. Sie wird eingesetzt für hochohmige Kabelfehler, Durchschlags- und intermittierende-Fehler. In Verbindung mit ICE und ARM Vorortungsverfahren erfolgt die Lokalisierung des Fehlers.

Die **Zeitbereichsreflektometrie**, auch bekannt als **TDR** (Time Domain Reflectometry) ist der schnellste und einfachste Weg zur Ortung von Kabelfehlern. In symmetrischen Kabeln werden die Laufzeiten und Reflexionsbildern elektromagnetischer Wellen bestimmt und lokalisiert. TDR wird eingesetzt zur Ortung von niederohmigen Kabelfehlern, Unterbrechungen und Abzweigungen sowie zur Kabellängenmessung.

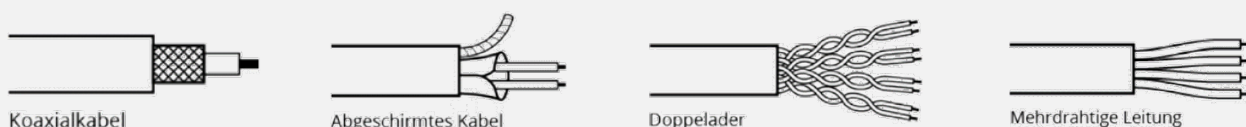
Eine drittes Verfahren ist die **Brückenmessung**, das auf dem Prinzip der Wheatstone Brückenschaltung beruht. Damit können auch Fehler an einadrigen (Signal)-kabeln ohne Schirmung lokalisiert werden. Es ist für hoch- und niederohmige Fehler sowie Fehler an der äußeren Isolierung geeignet. Die Anwendung ist jedoch aufwändiger.

DAS TDR VERFAHREN:

- Laufzeitmessung für einen elektrischen Impuls von der Aussendung bis zum Empfang der Echos.
- Kennt man nun die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Kabel, die auch vom Dielektrikum abhängt, so kann man von der Zeit direkt auf den Abstand zur Reflexionsstelle im Kabel oder der Länge des Kabels schließen
- Reflexionen bzw. Echos werden durch Änderungen der Impedanz des symmetrischen Kabels verursacht.
- Die Impedanz ändert sich durch Kabelverbindungen, -abzweige oder -fehler. Fehler in der Isolation oder im Leiter hervorgerufen durch Bruch, Korrossion und vieles andere mehr.
- In verzweigten Niederspannungsnetzen können auch Impedanzänderungen durch den Vergleich von einem gesunden mit einer fehlerhaften Adernpaar lokalisiert werden. Durch einen Adervergleich können auch kleine Impedanzänderungen erkannt werden.
- Breite Messimpulse erzeugen eindeutiger Reflexionen in der Betriebsart Adervergleich. Die Auflösung nimmt jedoch ab.
- Kurze Impulse liefern eine bessere Auflösung jedoch mit geringerer Reichweite.
- Trennfilter (400 V) ermöglichen den direkten Anschluss eines Reflektometers auch an unter Spannung stehende Niederspannungsnetze.
- Durch die Verwendung von leistungsfähigen Kabelbrenngeräten wird die Isolierung an hochohmigen Fehlern karbonisiert, der Fehler niederohmig und mit TDR lokalisierbar.

Symmetrische Kabel:

Die Zeitbereichsreflektometrie ist nur für symmetrische Kabel möglich. Beispiele:



ERGÄNZENDE ORTUNGSVERFAHREN

Die Vorortungsverfahren liefern nur die Entfernung zum Kabelfehler. Die ergänzenden Ortungsverfahren werden eingesetzt um den genauen Verlauf des Kabels zu bestimmen und den Fehler punktgenau zu lokalisieren. Bei der akustischen Punktortung wird ein Niederfrequenzsignal auf die fehlerbehaftete Ader gekoppelt und mit geeigneten Empfängern der Fehlerort punktgenau lokalisiert. Eine anderes Verfahren ist die Schrittspannungsmethode, die bei niederohmigen Erdfehlern eingesetzt wird wenn keine akustische Punktortung möglich ist.

EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE FEHLERORTUNG MIT TDR

Bestimmend für die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Messimpulses, und damit auch für die Messgenauigkeit sind hierbei insbesondere die Unterschiede oder Veränderungen im Dielektrikum, der Isolierung zwischen den Adern oder der Ader und dem Schirm, aber auch die Struktur des Kabels, weniger der Leiteraufbau.

Einflussfaktoren VF:

1. Kabelisolierung:
 - a. Material
 - b. Dicke
 - c. Alterung
2. Kabelaufbau
 - a. Verdrillung (stärkere Verdrillung verlängert die Ader im Kabel!)
 - b. Anzahl der Adern
 - c. Aderabstand
 - d. Schirmung
3. Struktur des Leiters
 - a. Isolierung
 - b. Litze
 - c. Draht
 - d. Material
 - e. Querschnitt

Genauigkeit:

Eine punktgenaue Ortung ist mit TDR nicht möglich. Die Genauigkeit ist vom Verkürzungsfaktor abhängig und nur im Bereich 1%. Das Kabel liegt vielleicht nicht gerade. Außerdem ist das Ablesen am Display ohne Zoom nicht präzise. Eine einfache Methode um die Genauigkeit der Fehlerortung zu verbessern ist die Messung von beiden Kabelenden. Der Fehler liegt dann in der Mitte der beiden Ergebnisse.

Impulslaufzeit, Ausbreitungsgeschwindigkeit und Verkürzungsfaktor:

Im Vakuum breitet sich der eine elektromagnetische Welle mit Lichtgeschwindigkeit C_0 aus. In Materie ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit v geringer. Das Verhältnis von v/C_0 bezeichnet man als Verkürzungsfaktor VF, im Englischen Velocity Factor.

$$VF = \frac{v}{C_0}$$

$C_0: \approx 300 \times 10^6 \text{ m/s.}$

Der Messimpuls durchläuft das Kabel zweimal: Von der Aussendung zur Reflexionsstelle und zurück. Wenn die Reflexion das Kabelende ist ergibt sich die Kabellänge l damit wie folgt:

$$l = \frac{TL}{2} * C_0 * VF$$

TL:= Laufzeit des Impulses von der Aussendung bis zum Empfang der Reflexion.

Genauigkeit:

Kurze und deshalb energiearme Impulse erlauben nur kurze Reichweiten, dafür aber mit hoher örtlicher Auflösung:

Kurze Impulse > Hohe Auflösung

Breite Impulse > Hohe Reichweite

Mit der Impulsbreite T_{Impuls} verbunden ist eine sogenannte Totzone. Das ist der Längenbereich l_{Tot} am Anfang des Kabels, in dem rückkehrende Echos durch den noch abgehenden Sendepuls verformt oder verdeckt werden.

$$l_{\text{Tot}} = T_{\text{Impuls}} * C_o * VF$$

Beispiel: Für einen 25-ns-Prüfimpuls beträgt bei einem Kabel mit $VF = 0,8$ die Totzone $l_{\text{Tot}} = 6 \text{ m}$.

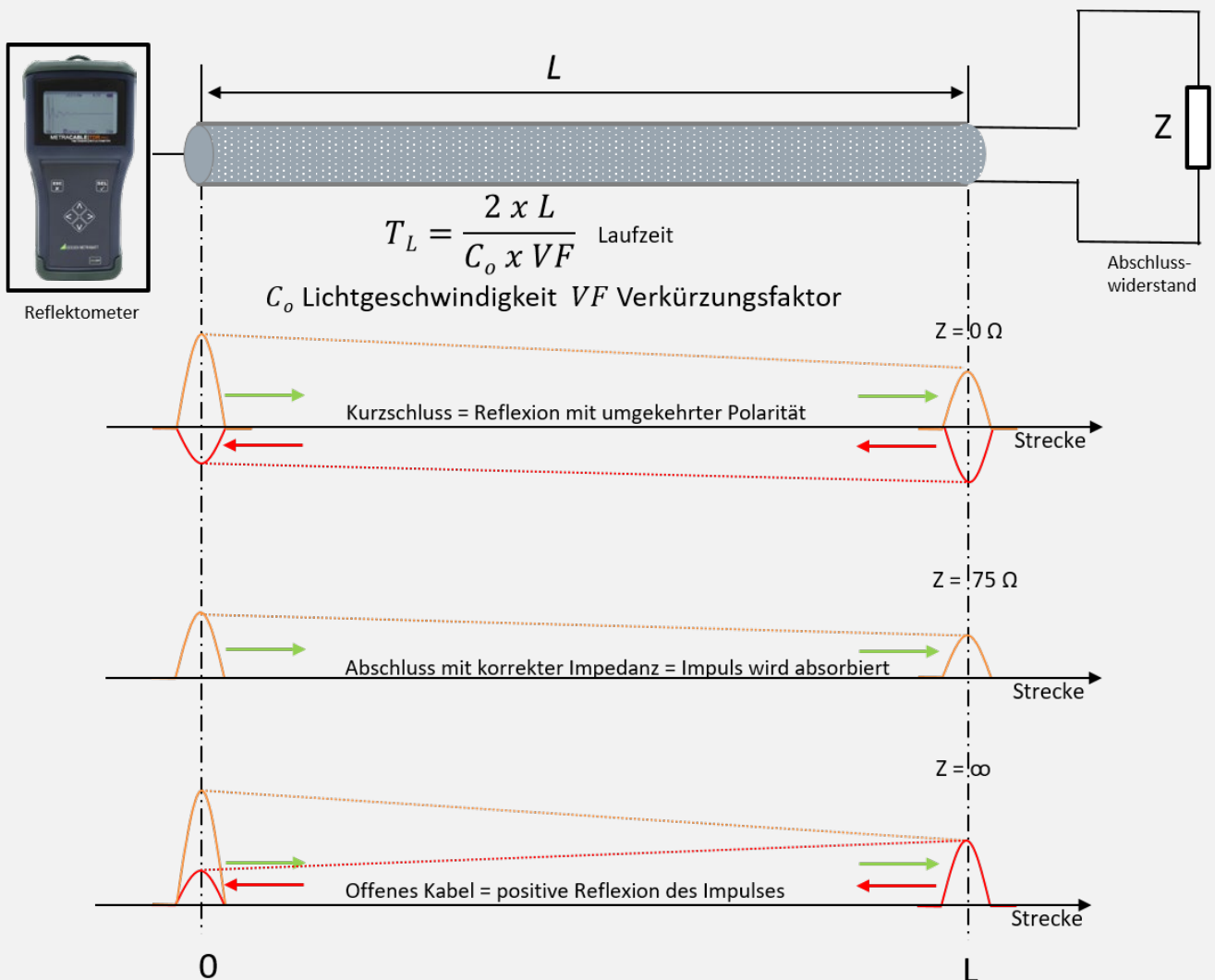
Durch ein Vorschaltkabel definierter Länge lässt sich die zeitliche Überschneidung von Sendepuls und Empfangsimpuls vermeiden.

Aber auch im Verlauf der Ausbreitung des Sendepulses kann dieser zwei kurz aufeinanderfolgende Ereignisse (Reflexionen) auf dem Kabel überdecken.

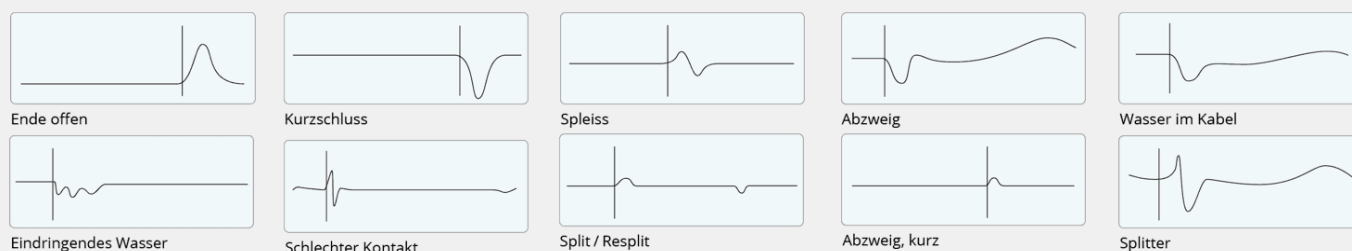
Impedanz:

Damit die volle Energie, d.h. die maximale Amplitude, des Sendepulses in das Kabel eingespeist werden müssen die Ausgangsimpedanz des Impulsgenerators und der Wellenwiderstand des Kabels gleich sein. Bei Koaxialkabeln sind das typisch 75Ω .

Jede Änderung der Impedanz auf dem Ausbreitungsweg des Sendepulses führt zu einer Reflexion mit einer von der Amplitude abhängig von der Impedanzänderung. Aus einer Vergrößerung der Impedanz resultiert eine Reflexion mit positiver Amplitude und aus einer Verkleinerung der Impedanz eine Reflexion mit negativer Amplitude für einen Sendepuls mit positiver Amplitude.



Die Impedanz ändert sich wie im Beispiel zuvor am Kabelende, aber auch an Abzweigungen und Kabelfehlern, Fehlerstellen. Im Folgenden idealisierte typische Reflexionsbilder :



Bei einem Kabel mit mehreren Abzweigen und Kabelenden kommt es folglich zu mehreren Reflexionen, für jeden Abzweig und jedes folgende Kabelende. Zusätzlich noch die Reflexionen von Kabelfehlern. Dadurch wird es schwierig die Fehlerstelle zu lokalisieren. Sehr hilfreich ist hier die Möglichkeit des Vergleichs einer gesunden mit der fehlerhaften Ader mit einer Referenz Funktion. Man speichert die Reflexionskurve einer gesunden Ader auf dem Display als Hintergrund und überlagert dieser die Reflexionskurve der fehlerhaften Ader. Der Fehler kann dann leicht an der Stelle erkannt werden, an der die beiden Bilder beginnen voneinander abzuweichen.

VERKÜRZUNGSFAKTOR

Der Verkürzungsfaktor oder auch Velocity Faktor ist die bestimmende Größe für eine genaue Messung der Kabellänge und der Entfernung zum Kabelfehler.

Wesentlichen Einfluss auf den Verkürzungsfaktor hat das Dielektrikum. In der folgenden Tabelle die Verkürzungsfaktoren für Koaxialkabel abhängig vom Dielektrikum:

Isoliermaterial	VF		v/2 (m/μs)	
Luft / Vakuum	~	1,00	~	149,9
Polyethylen (PE)	~	0,66	~	98,9
PE Schaum	0,77	... 0,85	115,4	... 127,4
PE Stege / Wendel	0,89	... 0,99	133,4	... 148,4
Teflon (PTFE)	~	0,70	~	104,9

Weitere Verkürzungsfaktoren für Koaxialkabel: <https://de.wikipedia.org/wiki/Koaxialkabel>

Im Folgenden eine Tabelle mit typischen Werten für Kabelisolierungen für verschiedene Anwendungsbereiche:

Kabeltypen	VF			v/2 (m/μs)	
	von		bis	von	bis
Telekommunikation					
PIC	0,65	...	0,72	98	... 108
Pulp	0,66	...	0,71	99	... 107
Gel Filled	0,58	...	0,68	87	... 102
Koaxialkabel	0,82	...	0,98	123	... 147
Twisted Pair					
PE	0,64	...	0,67	96	... 101
PTFE		~	0,71		~ 107
Papier	0,72	...	0,88	108	... 132
Energiekabel/ Isolierung					
PILC / imprägniertes Papier	0,50	...	0,57	75	... 85
PILC / trockenes Papier	0,72	...	0,88	108	... 132
XLPE	0,52	...	0,58	78	... 87
PE		~	0,67		~ 100
PVC	0,51	...	0,58	76	... 87
EPR	0,45	...	0,55	68	... 83

VERKÜRZUNGSFAKTOREN FÜR STROMKABEL

Kabeltyp	Isolierung	Adern x mm ²	VF		v/2 (m/μs)		
Normkabel bis 500 V		Cu wenn nicht spezifiziert					
H05VV-F	PVC	3 G 1,5	~	0,56	~	83,9	
H05VV-F	PVC	3 G 2,5	~	0,56	~	83,9	
H05VV-F	PVC	5 G 1,5	~	0,60	~	89,9	
H05VV-F	PVC	5 G 2,5	~	0,57	~	85,4	
H05RR-F	Gummi	3 G 1,5	~	0,54	~	80,9	
H05RR-F	Gummi	3 G 2,5	~	0,53	~	79,4	
H05RR-F	Gummi	5 G 1,5	~	0,54	~	80,9	
H05RR-F	Gummi	5 G 2,5	~	0,53	~	79,4	
NYM-J	PVC	3 G 1,5	~	0,56	~	83,9	
NYM-J	PVC	3 G 2,5	~	0,57	~	85,4	
NYM-J	PVC	5 G 1,5	~	0,63	~	94,4	
NYM-J	PVC	5 G 2,5	~	0,62	~	92,9	
SiHF-J	Silikon	3 G 1,5	~	0,57	~	85,4	
SiHF-J	Silikon	3 G 2,5	~	0,58	~	86,9	
SiHF-J	Silikon	5 G 1,5	~	0,58	~	86,9	
SiHF-J	Silikon	5 G 2,5	~	0,59	~	88,4	
Kabeltyp	Isolierung	Adern x mm ²	VF		v/2 (m/μs)		
Stromkabel bis 1 kV		Alu wenn nicht spezifiziert		von	bis	von	bis
NA2XY	VPE	3 x 95/95	~	0,46		~	69,0
NA2XY	VPE	4 x 95	~	0,53		~	80,0
NA2XY	VPE	4 x 95+1,5	~	0,53		~	80,0
NAKLEY	Papier / Öl	3 x 95 sm	~	0,58		~	87,5
NAKLEY	Papier / Öl	3 x 95 se	~	0,54		~	81,5
NKBA	Papier / Öl	4 x 10 re	~	0,49		~	73,0
NKBA	Papier / Öl	4 x 25 sm	~	0,52		~	78,5
NKBA	Papier / Öl	4 x 50 sm	0,50	... 0,53	74,5	...	80,0
NKBA	Papier / Öl	3 x 70/35 sm	0,58	... 0,59	87,0	...	88,0
NYCY	PVC	3 x 16/16	~	0,50		~	75,0
NYCY	PVC	4 x 120/70	~	0,53		~	79,0
NYY	PVC	4 x 1,5 Cu	~	0,60		~	90,0
NYY	PVC	5 x 4 Cu	~	0,53		~	79,0
NYY	PVC	4 x 10 Cu	~	0,51		~	76,0
NYY	PVC	4 x 16 Cu	~	0,50		~	74,5
NYY	PVC	4 x 70 Cu	~	0,58		~	86,5
Kabeltyp	Isolierung	Adern x mm ²	VF		v/2 (m/μs)		
Stromkabel bis 10 kV		Alu wenn nicht spezifiziert		von	bis	von	bis
NKBA	Papier / Öl	3 x 25 sm	0,54	... 0,55	81,5	...	82,5
NKBA	Papier / Öl	3 x 35 sm	0,55	... 0,56	82,5	...	83,5
NKBA	Papier / Öl	3 x 70	~	0,53		~	79,0
NKY	Papier / Öl	3 x 50	~	0,39		~	58,5
NA2YSY	PE	3 x 150/16	~	0,51		~	76,0
NA2XS(F)2Y	VPE	3 x 150 <u>rm</u> /25	~	0,54		~	81,0
NAKBA	Papier / Öl	3 x 95 sm	~	0,54		~	81,5
NAKBA	Papier / Öl	3 x 185 sm	~	0,55		~	82,0
NAKBA	Papier / Öl	3 x 240 sm	~	0,54		~	81,5
NEKBA (dreifach)	Papier / Öl	3 x 120 rm	~	0,49		~	74,0

Wenn der Verkürzungsfaktor für einen Kabeltyp nicht bekannt ist kann er durch eine Referenzmessung an einem Kabel mit bekannter Länge einfach ermittelt werden. Entweder man ändert den VF bis die mit dem TDR-Gerät ermittelte Kabellänge gleich der Länge des Referenzkabels ist oder man berechnet nach der Referenzmessung mit dem folgenden Dreisatz:

$$VF = VF_r \frac{l}{l_r}$$

VF:= VF des Kabels; VF_r:= VF der Messung; *l*:= tatsächliche Kabellänge; *l_r*:= Kabellänge Referenzmessung
Bedingt durch unterschiedliche Materialien und Kunststoffe können bei der Kabellängenmessung geringe Messfehler auftreten. Gegebenenfalls ist der Verkürzungsfaktor durch eine vergleichende Messung mit bekannter Kabellänge einzustellen.

Der Verkürzungsfaktor ist zudem nicht unabhängig vom Adernpaar. Beispiel SiHF-J 5 G 2,5: Adernpaar benachbarter Adern 0,59, sonst 0,58.

VORTEILE METRACABLE TDR PRO

Das METRACABLE ist ein handliches und kompaktes TDR-Gerät für die Lokalisierung von Fehlern für alle Arten von Kabeln ohne Service wie z.B. Doppeladern, Koax- und Stromleitungen. Es hat eine sehr kurze Mindestauflösung und eine Reichweite von bis zu 14 km. Die einstellbare Impedanz und der editierbare Verkürzungsfaktor erfüllen alle Anforderungen für einen erfolgreichen Testaufbau.

Mit dem AUTO-Test wird durch nur einen Klick sichergestellt, dass Impedanz, Pulslänge und Messbereich der zu untersuchenden Kabelstrecke entsprechen. Das gewährleistet eine schnelle Diagnose.
Eine hohe Bildschirmauflösung mit Hintergrundbeleuchtung ermöglicht eine genaue Fehlerbeurteilung des Traces. Die mitgelieferte Management-Software verwaltet die Kabeldatenbank.
Mit der praktischen Referenz Funktion ist durch den Vergleich von zwei Reflexionskurven die Fehlerstelle einfach zu lokalisieren.

ANWENDUNGEN UND ERFAHRUNGEN

Das METRACABLE TDR PRO wird bereits von Serviceunternehmen für den öffentliche Raum zur Vorortung von Kabelfehlern an öffentlichen Beleuchtungsanlagen eingesetzt. Zusätzlich kommen Kabelbrenngeräte zum Einsatz zur Wandlung von hochohmigen in niederohmige Fehler für die Lokalisierung mit dem METRACABLE TDR PRO.

Grenzen der Fehlerortung mit TDR sind dabei einadrige Erdfehler an ungeschirmten Kabeln. Diese können mit TDR nicht immer entdeckt werden, wenn z.B. der Isolationsfehler von der Ader im Kabel nur nach außen besteht ändert sich die Impedanz zu den anderen Adern im Kabel nicht. Eine Brückenmessung kann hier zum Fehler führen.

Gute Erfahrung hat man mit dem METRACABLE auch bei der Fehlerortung an Koaxialkabeln im Gebäude gemacht. Die Entfernung zu Kabelbrüchen und -quetschungen aber auch zu eingedrungenen Schrauben konnte genau gemessen und damit der Fehler lokalisiert werden. Hilfreich war dabei auch die AUTO-Funktion des METRACABLE TDR PRO die automatisch die richtige Impedanz und die optimale Impulsbreite für die Kabellänge einstellt. Gemessen wurde an Antennenleitungen mit bis zu ca. 25 m Länge.

Bei kürzeren Abschnitten wurde ein Vorschaltkabel verwendet um die Totzone zu überbrücken.

Die Totzone ist der Bereich des Kabels unmittelbar nach dem TDR-Gerät. In diesem Bereich überlagern sich der noch abgehende Sendeimpuls und bereits zurückkehrende Echos. Die Totzone entspricht der Impulsbreite.





Autor

KLAUS LEIBOLD
Product Manager
Gossen Metrawatt GmbH

Tel: + 49 911 8602-532
Fax: + 49 911 8602-80532
E-mail: klaus.leibold@gossenmetrawatt.com

GMC INSTRUMENTS

 **GOSSEN METRAWATT**
 **CAMILLE BAUER**

Gossen Metrawatt GmbH

Südwestpark 15 ■ 90449 Nürnberg ■ Deutschland
Tel.: +49 911 8602-0 ■ Fax: +49 911 8602-669

www.gossenmetrawatt.com ■ info@gossenmetrawatt.com