

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
20. Dezember 2001 (20.12.2001)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 01/96887 A2

- (51) Internationale Patentklassifikation⁷: G01R 31/00 (72) Erfinder; und
(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): SCHMIDT, Rolf
(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/DE01/02170 [DE/DE]; Fritzlarerstrasse 49, 34212 Melsungen (DE).
(22) Internationales Anmeldedatum: 13. Juni 2001 (13.06.2001) (81) Bestimmungsstaaten (national): CZ, PL, US.
(25) Einreichungssprache: Deutsch (84) Bestimmungsstaaten (regional): europäisches Patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR).
(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch
(30) Angaben zur Priorität: Veröffentlicht:
100 29 000.0 16. Juni 2000 (16.06.2000) DE — ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu
101 26 262.0 29. Mai 2001 (29.05.2001) DE veröffentlichen nach Erhalt des Berichts
(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): DETEMOBIL DEUTSCHE TELEKOM MOBIL- Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen
NET GMBH [DE/DE]; Landgrabenweg 151, 53227 Bonn Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on
(DE) Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe
der PCT-Gazette verwiesen.

(54) Title: METHOD FOR MEASURING FAULT LOCATIONS IN HIGH FREQUENCY CABLES AND LINES

(54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUR FEHLERORTMESSUNG BEI HOCHFREQUENZKABELN UND -LEITUNGEN

(57) Abstract: The invention relates to a method for measuring fault locations in high frequency cables and lines. A signal with the frequency f_0 and a level a_0 is emitted from the source. This signal is split up in the splitter and is routed to the same parts in the test piece (DUT = device under test) and to a sink. The signals of the source and the returning wave of the DUT are added, whereby the result of this addition is a signal with the frequency f_0 and an amplitude a_1 . The value of the frequency f_0 is changed, and the amplitude of the newly generated sum signal is, in turn, recorded, whereby this is repeatedly carried out in an appropriate frequency domain (Span). An inverse Fourier transformation is applied to the measured values and transforms the signals from the frequency domain into the time domain. The transition point, which appears as the defined peak in the time diagram, can, as a result, be found located while taking the shortening factor into account.

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Fehlerortmessung bei Hochfrequenzkabeln und -leitungen. Von der Quelle wird ein Signal mit der Frequenz f_0 und einem Pegel a_0 ausgesendet. Dieses Signal wird im Splitter aufgeteilt und zu gleichen Teilen in den Prüfling (DUT = Device under Test) und zu einer Senke weitergeleitet. Die Signale der Quelle und die rücklaufende Welle des DUT werden addiert, wobei das Ergebnis dieser Addition ein Signal mit der Frequenz f_0 und einer Amplitude a_1 ist. Die Frequenz f_0 wird in ihrem Wert geändert und die Amplitude des neu erzeugten Summensignals wird wiederum aufgenommen, wobei dies wiederholt in einem geeigneten Frequenzbereich (Span) durchgeführt wird. Auf die Messwerte wird eine inverse Fouriertransformation angewendet, die die Signale vom Frequenzbereich in den Zeitbereich transformiert. Die Stossstelle, die als definierter Peak im Zeitdiagramm erscheint, kann somit, unter Berücksichtigung des Verkürzungsfaktors, in ihrer Örtlichkeit gefunden werden.



WO 01/96887 A2

Verfahren zur Fehlerortmessung bei Hochfrequenzkabeln und -leitungen

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Fehlerortmessung bei Hochfrequenzkabeln und -leitungen nach dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1.

Eine Fehlerortmessung wird verwendet, um Kabellängen zu messen oder Fehlerstellen in Kabeln zu finden.

In der Regel wird dazu ein kurzer Impuls in das zu messende Kabel gesendet und dann die Laufzeit, der Pegel und die Phase der Reflexionen des Impulses gemessen und bewertet. Eine solche Messung wird auch als TDR-Messung bezeichnet. Hierzu sind jedoch recht aufwendige Vektor-Network-Analyser-Systeme notwendig, die in den Ausmaßen recht unhandlich, schwer und daher eher Laborgeräte sind.

Als Alternative bietet sich jedoch noch eine weitere Variante an, die technisch weniger aufwendig ist, jedoch einiges an Rechenleistung benötigt. Bei dieser Variante wird ein Frequenz-Sweep in das Kabel gesendet und die Addition des Grundsignals und des reflektierten Signals in aufwendigen Rechnungen bewertet, sodass eine Fehlerortbestimmung möglich ist. Diese Variante wird auch als FDR-Messung bezeichnet. Bei der FDR-Messung macht man sich den Umstand zu nutze, dass eine Frequenzinformation mittels einer Fouriertransformation (oder Fast-Fourier-Transformation) in den Zeitbereich umgewandelt werden kann.

Ein Spektrumanalyser mit integrierten Frequenzgenerator ist inzwischen zu einem kleinen robusten Gerät geworden, welches sich gerade im mobilen Einsatz bewährt und genau für einen solchen Anwendungsfall geeignet ist.

Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren zu beschreiben, mit den Daten aus einem Spektrumanalysator eine Fehlerort-Messung nach FDR durchzuführen, dabei

ein besonderes Augenmerk auf die Kalibrierungsdaten und deren Anwendung zu richten.

Diese Aufgabe wird durch die Merkmale des Patentanspruchs 1 gelöst.

In welcher Form die Rechenschritte des Verfahrens durchgeführt, wie die Daten dem Verfahren zugeführt und wie die Ergebnisse des Verfahrens dargestellt werden ist dabei unerheblich. Während der Entwicklung des Verfahrens wurde vornehmlich mit EXCEL (Software der Fa. Microsoft) gearbeitet, es ist aber auch denkbar das Verfahren als eigene Software, die dann auch die Steuerung des Analysators vornehmen kann, auszuführen oder direkt in den Analysator zu implementieren.

Vorteilhafte Ausführungsformen und Weiterbildungen des erfindungsgemäßen Verfahrens sind in den abhängigen Patentansprüchen angegeben.

Die Erfindung wird nachfolgend anhand eines Ausführungsbeispiels mit Bezugnahme auf die Zeichnungen näher erläutert. Aus den Zeichnungen und ihrer Beschreibung ergeben sich weitere Merkmale, Vorteile und Anwendungsgebiete der Erfindung.

Figur 1 zeigt schematisch einen möglichen Aufbau der Messapparatur zur Durchführung des Verfahrens;

Figur 2: Darstellung eines Messdiagramms einer Messung an einer Leitung bestehend aus drei miteinander verbundenen Kabeln mit jeweils 15 m Länge und Fehlabschluss mit $s=1,2$ am Ende der Leitung;

Figur 3: Darstellung eines Messdiagramms einer Messung an einer Leitung bestehend aus drei miteinander verbundenen Kabeln mit jeweils 15 m Länge und offenem Kabelende.

Es gelten alle Regeln der Fast-Fouriertransformation, der Komplexen-Rechnung und die Grundlagen der numerischen Mathematik.

Der Aufbau der verwendeten Messapparatur ist schematisch in Figur 1 dargestellt. Ausgegangen wird von einer Quelle (dem Signalgenerator), der eine beliebige einstellbare Frequenz erzeugen kann, einem Powersplitter als Koppelglied welches in jede Richtung eine Anpassung mit 50Ohm realisiert und einer Senke (Spannungsmesser), der die Spannungen eines Signals mit der Frequenz f messen kann.

Von der Signalquelle 1 wird ein Signal mit der Frequenz f_0 und einem Pegel a_0 in ein Messkabel 4 ausgesendet. Dieses Signal wird im Splitter 3 aufgeteilt und zu gleichen Teilen in den Prüfling 5 (DUT= Device under Test) und zur Senke 2 weitergeleitet. Wenn man annimmt, dass am Ende des DUT 5 eine Totalreflexion vorliegt, wird sich auf dem DUT eine stehende Welle ausbilden. Nimmt man nun weiterhin an, dass sich der Powersplitter 3 auf einen Punkt konzentriert, werden die Signale der Quelle 1 und die rücklaufende Welle des DUT 5 in genau diesem Punkt addiert.

Ergebnis dieser Addition ist ein Signal mit der Frequenz f_0 und einer Amplitude a_1 , die eine Funktion der Addition ist und von der Art der Reflexion (kapazitiv / induktiv), der Länge l des DUT und dem Reflexionsfaktor abhängt. Dieses Signal kann an der Senke 2 gemessen werden.

Das bis jetzt gewonnene Ergebnis ist jedoch noch nicht ausreichend, um eine Aussage über den Fehlerort zutreffen.

Wenn nun die Frequenz f_0 in ihrem Wert geändert wird und man wiederum die Amplitude des neu erzeugten Summensignals aufnimmt und dies wiederholt in einem geeigneten Bereich (Span) durchführt, wird man erkennen können, dass die Amplitudenmesswerte des Summensignals einer Sinusschwingung stark ähneln, wobei es sich hierbei natürlich um eine Sinusschwingung im Frequenzbereich d.h. der Frequenzmesswerte handelt.

An diesem Punkt angelangt wird auf genau diese Messwerte eine Fouriertransformation angewendet, die den Zeitbereich in den Frequenzbereich wandelt und umgekehrt. Es ist zu erwarten, dass die Transformation (analog zur

Wandlung einer Sinusschwingung vom Zeit in den Frequenzbereich) einen ausgeprägten Peak im Zeitbereich erzeugt.

Wie erwartet tritt das Ergebnis auch ein, wobei der Peak die Zeit darstellt, die eine Welle benötigt, um vom Splitter 3 zum Reflexionspunkt und wieder zurück zu laufen. Die Stoßstelle kann somit, unter Berücksichtigung des Verkürzungsfaktors, in ihrer Örtlichkeit gefunden werden. Der Amplitudenwert des Peaks lässt darüber hinaus eine Aussage über den Reflexionsfaktor zu, ist der Peak sehr hoch, handelt es auch um eine starke Reflexion.

Hiermit ist nun die Grundlage gelegt, um mit dem beschriebenen Verfahren eine Fehlerortbestimmung durchzuführen.

Konfiguration des Spektrumanalysators:

Zur Durchführung des Verfahrens wird ein Spektrumanalysator verwendet. Der Analysator muss über einen Tracking-Generator verfügen und sollte in der Auflösung (Punkte pro Sweep) einstellbar sein. Als externe Komponenten wird lediglich noch ein Power-Splitter (Dämpfung in jede Richtung von 6dB) benötigt, der den Ausgang des Tracking-Generators mit dem Eingang des Analysators und dem DUT verbindet. Die Mittenfrequenz ist so einzustellen, dass die Nutzfrequenz des DUT für die Messung genutzt wird und den Span-Bereich zulässt, der für die zu messende Kabellänge und Auflösung ausschlaggebend ist.

Nachfolgend sollen die wesentlichen Einstellungen des Analysators aufgelistet werden:

Messpunkt:

Anzahl: Ein vielfaches von 2^x , also 2, 4, 8, 16,; 256, 512, 1024 usw.
Ein guter Kompromiss ist 512.
Ist der Wert nicht einstellbar, ist nur eine Anzahl 2^x Punkte (wegen der FFT) nutzbar!

Y-Amplituden Einstellung:

Skalierung: Linear

Ref-Level: 200mV

Frequenz Einstellung:

Mittelfrequenz: Nutzfrequenz des zum messenden DUT

Span: Abhängig von der zu messenden Länge und der Anzahl der Messpunkte (siehe auch unten)

Span.Beispiele:	700Mhz	kleiner 25m	bei 512 Messpunkten
	300Mhz	kleiner 60m	bei 512 Messpunkten
	100Mhz	kleiner 190m	bei 512 Messpunkten

Tracking-Generator:

Power-Level: 200mV

Averaging:

Video-Averaging: 10

Alle anderen Parameter, wie Messbandbreite, Sweeptime usw. sollten nach den automatischen Vorgaben des Analysators eingestellt werden, da so das Optimum aus dem Analysator herausgeholt werden kann.

Durchführung der Messung:

Nachdem der Analysator eingestellt und die Verkabelung vorgenommen wurde, kann mit der Messung begonnen werden.

Hierzu sollte zwischen DUT und Powersplitter ein Messkabel (Vorlaufkabel) geschaltet werden, welches, wie der Powersplitter und das Messsystem selbst, herauskalibriert wird. Es ist jedoch darauf zu achten, dass die angeschalteten Komponenten (Splitter, Vorlaufkabel, Verbindungskabel, Übergänge) in gutem Zustand sind und dem Z-Wert des Systems entsprechen.

Die Messung besteht aus zwei Kalibriermessungen, denen dann eine beliebige Anzahl von Objekt-Messungen folgen kann.

Eine Kalibriermessung ist ein SHORT am Ende des Vorlaufkabels.

Die zweite Kalibriermessung ist ein LAOD am Ende des Vorlaufkabels.

Verfahren zur FDR:

Vorbereitung und Wandlung vom Frequenzbereich in den Zeitbereich:

Ausgangspunkt für die folgende mathematisch Stossstellenbestimmung sind die drei Messreihen

as() [Short],

al() [Load] und

ad() [DUT]

mit einer Arraygröße von je 2^x Messpunkten.

Diese drei Messreihen können auch in komplexer Schreibweise dargestellt werden $\{z:=a+bi\}$, wobei der Imaginärteil der Messereihen immer mit 0 angenommen wird:

zs() := as() + 0i

zl() := al() + 0i

zd() := ad() + 0i

Die folgenden Betrachtungen gehen davon aus, das ein Array mit dem Index 0 beginnt.

Um die Auflösung im Bereich starker Stoßstellen zu vergrößern, bietet es sich an, die Messreihen einem WINDOWING zu unterziehen. Ein einfaches Window (Fenster) ist ein Cosinus-Roll-Off Fenster, also eine Kosinusfunktion, die invertiert, mit dem Wert eins addiert, dann halbiert wurde und den Bereich 0 bis 2π für die Messpunkte 0 bis $(2^x - 1)$ abdeckt.

Window(index) = $0.5 \cdot (1 - \cos(\text{index} \cdot 2\pi / (2^x - 1)))$ für Index [0 bis $2^x - 1$]

Jeder Messpunkt der Arrays wird nun mit dem äquivalenten Messpunkt des Cosinus-Fensters multipliziert und wieder in das Array zurückgeschrieben.

Es sind natürlich auch alle andere Fensterfunktionen möglich.

Im folgenden wird davon ausgegangen, dass die Messwerte, gefenstert oder nicht, in den Arrays **zs()**, **zl()** und **zd()** vorliegen.

Auf jede dieser komplexen Messreihen wird nun die inverse Fast-Fourier-Transformation (iFFT) ausgeführt, die als Ergebnis ein komplexes Array mit 2^x Punkten (für jede Messreihe) erzeugt.

zts() := iFFT [zs()]

ztl() := iFFT [zl()]

ztd() := iFFT [zd()]

Das erste Element des Arrays repräsentiert den Gleichspannungsanteil der Messreihe und wird für alle weiteren Betrachtungen ausgeschlossen.

Eine FFT liefert zwar 2^x Punkte als Ergebnis, es handelt sich dabei jedoch um eine Ergebnisreihe, mit $2^{(x-1)}$ Punkten, die gespiegelt ist.

Für alle weiteren Betrachtungen genügt es somit, wenn man das Array bis zum Index $(2^{(x-1)})-1$ betrachtet.

Aus diesem Grund, werden nun die Arrays **zts()**, **ztl()** und **ztd()** auf die Indizes (1 ... $(2^{(x-1)})-1$) beschränkt.

Normierung auf SHORT

Von den Ergebnissen in der Reihe **zts()** ist bekannt, dass es sich um einen Kurzschluss am Ende des Vorlaufkabels handelt. Es ist also zu erwarten, dass im Zeitbereich ein ausgeprägter Maximalwert zu finden ist, der genau das Ende dieses Vorlaufkabels und somit den SHORT repräsentiert.

Im Array (2 ... $(2^{(x-1)})-1$) [es wird beim Index 2 begonnen, da nach einem Windowing der Peak in der Breite zunimmt, was auch für den Gleichspannungsanteil zutrifft] wird nun nach diesem Maximalwert gesucht und wenn er gefunden wurde, sowohl der Wert als auch der Index extrahiert. Der Index, an dem das Maximum gefunden wurde, wird im folgenden (**max**) genannt, sodass der Wert dieses Punktes mit **zts(max)** bezeichnet werden kann.

Der komplexe Wert **zts(max)** wird nun in den Absolut-Wert [Betrag] (**abs{}**) und sein Argument [Phase] (**arg{}**) umgewandelt.

Hierbei gelten die Regeln der komplexen Rechnung:

Bei $z := a + bi$ folgt

$\text{abs}\{z\} = \text{sqr}(a^2 + b^2)$ und

$\text{arg}\{z\} = \text{arctan}(b/a)$

Da es sich bei diesem Messwert um einen SHORT handelt, kann man mit folgender Annahme arbeiten:

Ein Short ist eine Reflexion mit dem Wert 1 und mit einem Phasenversatz von 180° (Pi).

Für die Werte $\text{abs}\{zts(\text{max})\}$ und $\text{arg}\{zts(\text{max})\}$ sind hierfür nun geeignete Faktoren und Summanden zu finden, die wie folgt bezeichnet werden:

$\text{korabs} = 1/(\text{abs}\{zts(\text{max})\})$

$\text{korarg} = \text{Pi} + \text{arg}\{zts(\text{max})\}$

Ziel ist es nun, die Messwerte aller Messreihen mit diesen Faktoren zu korrigieren und damit bezogen auf einen SHORT am Ende des Vorlaufkabels definierte Zustände zu erhalten.

Hierzu ist zunächst die Umwandlung in Absolutwert und Argument für jedes Element der Messreihen durchzuführen.

Daraufhin folgt die Normierung nach der Form:

$\text{abs}\{zt_k()\} := \text{korabs} * \text{abs}\{zt_()\}$

$\text{arg}\{zt_k()\} := \text{korarg} - \text{arg}\{zt_()\}$

Der Unterstrich steht hierbei für **s** (Short), **l** (Load) und **d** (DUT).

Aus den entsprechenden Arrays für Absolutwert und Argument, werden im folgenden wieder komplexe Arrays erzeugt, wobei folgender Zusammenhang gilt:

$zt_k() := [\text{abs}\{zt_k()\} * \text{cos}(\text{arg}\{zt_k()\})] + [\text{abs}\{zt_k()\} * \text{sin}(\text{arg}\{zt_k()\})]i$

Die erste Normierung ist hiermit durchgeführt.

Die erzeugten Absolutwerte entsprechen nun der Einheit UNITS, ein in Kreisen von Networkanalysatoren gebräuchlicher Wert, der eine Aussage über die Anpassung macht und eine Umrechnung in dB auf folgende Weise erlaubt:

$$\text{Anpassung[dB]} = 20 \cdot \log(\text{UNITS}) \quad \rightarrow 1 \text{Unit} = 0\text{dB}, 0.01 \text{Unit} = -40\text{dB}$$

Normierung auf LOAD

Bis zum jetzigen Zeitpunkt, sind lediglich die Phasen und Beträge der Messungen angepasst, also normiert worden. Geht man davon aus, dass es sich bei dem Messsystem um ein ideales System handelt, sprich dass in diesem System immer optimale Anpassung herrscht und somit keine Reflexionen erzeugt werden, ist sicherlich keine weitere Normierung notwendig.

In realen System ist dies jedoch nicht der Fall, sodass interne Reflexionen einige Probleme bereiten und schnell zu Fehlmessungen führen können, wenn diese nicht eliminiert werden.

Nun kann man nicht die Reflexionen beseitigen, man kann aber eine mathematische Rückrechnung machen, die diese Fehler des Messsystems ermittelt und dann in der Messung korrigiert.

Im folgenden wird nun diese Korrektur näher beschrieben.

Von den Ergebnissen in der Reihe **ztlk()** ist bekannt, dass es sich um einen Load am Ende des Vorlaufkabels handelt. Alle Werte im Zeitbereich sollten bei dieser Messung also als ideale Messung gelten, also keine Reflexionen und Stoßstellen aufweisen. In einem realen System kann man aber sehr wohl solche Fehlerstellen erkennen, die aber lediglich die Fehler des eigentlichen Messsystems darstellen. Solche Fehler haben in der späteren Messung jedoch keine Aussagekraft und müssen deshalb dort eliminiert werden. Dies geschieht dadurch, dass von den Messwerten **ztdk()** die Messwerte **ztlk()** in komplexer Weise abgezogen (Subtrahiert) werden.

Es entsteht eine neue Messreihe, die folgender Beziehung gehorcht:

$$\text{ztdkk()} := \text{ztdk()} - \text{ztlk()} \text{ [Komplexe Subtraktion]}$$

Es ist außerordentlich wichtig diese Subtraktion in komplexer Weise auszuführen, da nur so gewährleistet ist, dass nur die Systemfehler eliminiert werden und Fehlerstellen im Objekt weiterhin erkennbar bleiben, da die Phaseninformation als zusätzlicher Indikator zur Verfügung steht.

In dem Array **ztdkk()** sind nun die amplituden- und fehlerkorrigierten Messwerte des Messobjekts enthalten.

Einfügen von Kabeldaten

Bis zum jetzigen Zeitpunkt waren alle kabelspezifischen Daten wie Dämpfung und Verkürzungsfaktor irrelevant. Für den nächsten Schritt sind diese Werte jedoch von großer Bedeutung.

Zunächst wird mittels des Verkürzungsfaktors die Schrittweite pro Messpunkt ermittelt.

Hierfür wird folgende Formel verwendet:

$$\mathbf{St := ((Vc * c)/Sp)/2}$$

Vc := VelocityFaktor (Verkürzungsfaktor [0 .. 1])

c := Lichtgeschwindigkeit mit ca. 299.792.458 m/sec (im Vakuum)

Sp := Spanbereich in Mhz (Messspan)

St := Step in der Einheit Meter

Dämpf:= Kabeldämpfung in der Einheit dB/m

Hieraus kann man nun mit der Formel

$$\mathbf{MaxDist := (AnzahlMesspunkte / 2) * St}$$

die maximale Distanz, die angezeigt werden kann, errechnet werden.

Die Anzahl der Messpunkte muss hierfür halbiert werden, da die iFFT am Mittelpunkt des Arrays ein gespiegelt ist.

Es ist jedoch sehr problematisch diesen gesamten Wertebereich auszunutzen, da es ebenfalls ein Wesen der iFFT ist, dass starke Peaks als Harmonische im Verlauf der Messreihe wieder auftreten können. Dies ist dann recht problematisch, wenn am Ende des Messobjektes eine große Stoßstelle vorhanden ist, die in abgeschwächter Form in der doppelten Messentfernung durch die iFFT wieder auftritt (ca. 30dB schwächer) und so durch das oben erwähnte Spiegelverhalten der iFFT zurück in den Messbereich gespiegelt wird. Hier ist dann eine Fehlinterpretation der Messung die unweigerliche Folge.

Aus diesem Grund ist es erforderlich, den nutzbaren Messbereich nochmals um die Hälfte zu reduzieren und so diese Spiegelbilder aus den Betrachtungsraum der Messwerte weitestgehend zu eliminieren.

NutzDist := (AnzahlMesspunkte / 4) * St [siehe oben]

Mit Hilfe der vorrangegangenen Informationen ist es nun möglich, die Daten aufzubereiten und darzustellen.

Jedem Messpunkt kann mit der Formel

Dist := Index * St

eine eindeutige Entfernung zugeordnet werden, was in der grafischen Darstellung hilfreich ist. Zudem soll es das Ziel sein, nur die Messwerte ab dem Index (**max**) darzustellen, da alle Messwerte davor lediglich das Vorlaufkabel und das Messsystem darstellen. Weiterhin muss der Dämpfungsverlauf des Kabels ab dem Punkt des Index (**max**) herausgerechnet werden, um korrekte Anpassungswerte auch in größeren Entfernungen sicher bestimmen zu können.

Es wird ein Array **Dist()** angelegt, welches (**NutzDist**) Werte enthält.

Ausgehend von dem Array **Dist()** wird nun ein Array **AmpKor()** nach folgender Formel erzeugt:

AmpKor() := 10^((2 * Dist() * Dämpf)/20)

wobei der Wert **Dämpf** die Dämpfung des Kabels in dB auf einen Meter angibt
Der Faktor 2, mit dem **Dist()** multipliziert wird ist notwendig, da die Welle das Kabel einmal als hinlaufende und einmal als rücklaufende passiert und die Kabeldämpfung damit zweimal zu berücksichtigen ist.

Das Array **ztdkk()** wird nun so verschoben, das der Index (0) den Wert des Index (**max**) erhält, Index (1) den Wert von Index (**max+1**) und so weiter.

So werden die unrelevanten Daten des Messsystems entfernt dass nur noch Messdaten des Objektes vorliegen und ein direkter Zusammenhang zwischen den Arrays **ztdkk()**, **AmpKor()** und **Dist()** hergestellt werden kann.

Die Absolutwerte **abs{ztdkk()}** werden nun mit den Korrekturwerten von **AmpKor()** multipliziert und zusammen mit den Werten von **Dist()** grafisch dargestellt.

Auf der y-Achse ist nun die Einheit UNIT als Indikator der Reflexion und auf der x-Achse die Einheit METER als Indikator über die Entfernung zu finden.

Die Darstellung der y-Achse kann auch logarithmisch erfolgen, um eine bessere Auflösung von starken und schwachen Stoßstellen zu ermöglichen.

Bestimmung von Kabeldämpfungen

Wie unschwer zu erkennen ist, spielte bei der eigentlichen Fehlerortmessung die Center-Frequenz bisher keine Rolle. Die Messung soll, wie schon oben erwähnt jedoch in dem Frequenzbereich durchgeführt werden, indem das Objekt auch betrieben wird. Bei der korrekten Bestimmung der Kabeldämpfung, spielt die Center-Frequenz nun aber eine erhebliche Rolle, da diese vom benutzten Frequenzbereich stark abhängig ist.

In der Regel wird die Kabeldämpfung für 1GHz angegeben und damit auch alle anderen Frequenzbereiche abgedeckt, was je nach Kabel jedoch zu erheblichen Messfehlern führt.

Aus diesem Grund soll an dieser Stelle ein Verfahren aufgezeigt werden, mit dem es möglich ist, die Kabeldämpfung für jede beliebige Frequenz innerhalb eines

Bereiches zu ermitteln, ohne einen Referenzwert für genau diesen Punkt zu besitzen.

Dazu werden im Vorfeld folgende Überlegungen angestellt:

- Die Kabeldämpfung ist, aufgetragen in einer logarithmischen Teilung, einer e-Funktion ähnlich, eine Tatsache, die aus den Verlusten des Dielektrikum herrührt, welche sich über den Frequenzbereich nicht linear verhalten.
- Die Funktion kann innerhalb eines endlichen Frequenzbereichs mit einer Formel nachgebildet werden, die eine kubische Form hat.
- Die Stützstellen zur Bestimmung der Formel dürfen nicht den Anspruch genügen äquidistant zu sein.

Ausgehend von diesen Punkten liegt es nahe, den Bereich der numerischen Mathematik zu bemühen.

Dort findet sich ein Verfahren, welches mittels vier Stützstellen eine Formel der Form

$$p(x) = a \cdot x^3 + b \cdot x^2 + c \cdot x + d$$

erzeugen kann, die zudem die Bedingung erfüllt, die Werte der Stützstellen genau zu durchlaufen.

Dieses Verfahren nennt sich: Interpolation durch Polynome nach Newton

Das Verfahren eignet sich hervorragend um in der Rechnertechnik eingesetzt zu werden.

Auch wenn die Stützstellen nicht äquidistant sein müssen, so ist es jedoch sehr zu empfehlen, den Frequenzbereich möglichst gleichmäßig zu unterteilen, um damit die Integrität der Formel zu erhöhen.

Zudem sollte die Formel nicht über die beiden Eckwerte hinaus angewendet werden, da in diesem Bereich die Formel schnell ungenau wird.

In der Praxis haben sich Stützstellen bei 170Mhz, 450Mhz, 900Mhz und 1800Mhz sehr bewährt, wobei die Formel dann im Bereich von 170Mhz bis 1800Mhz eingesetzt werden kann.

Nachfolgend soll eine rechnerische Variante aufgezeigt werden, die das Polynom wie beschrieben erzeugt.

**** Erzeugung des Polynoms****

anz=4 *** Anzahl der Stützstellen

redim x1(anz) *** Frequenzwerte (in logarithmischer Form)

redim y1(anz) *** Koeffizienten des erzeugten Polynoms

redim y2(anz) *** Dämpfungswerte an den Stützstellen

x1(1)=log10(170/100) *

x1(2)=log10(450/100) ** Logarithmieren der Frequenzen

x1(3)=log10(900/100) **

x1(4)=log10(1800/100) *

y2(1)= Wert 1 bei 170Mhz *

y2(2)= Wert 2 bei 450Mhz ** Zuweisen der spezifischen Stützstellen

y2(3)= Wert 3 bei 900Mhz ** zu den Frequenzen mit der Einheit dB/m

y2(4)= Wert 4 bei 1800Mhz *

*** lauf und laufa sind lediglich Index-Variablen, die innerhalb

*** von Schleifen eingesetzt werden

*** Erzeugung des Koeffizienten ***

for lauf = 2 to anz

 for laufa = lauf to anz

 y2(laufa)=(y1(laufa)-y1(laufa-1))/(x1(laufa)-x1(laufa-lauf+1))

 next laufa

 for laufa = lauf to anz

 y1(laufa)=y2(laufa)

```

    next laufa
next lauf
for lauf = 1 to anz-1
    for laufa = anz-1 to lauf step -1
        y1(laufa)=y1(laufa)+(y1(laufa+1)*x1(laufa-lauf+1))
    next laufa
next lauf

```

****Benutzung des Polynoms****

```

input "Frequenz in Mhz (170Mhz - 1800Mhz) = ",f
xp=log10(f/100)
y=0
for lauf = anz to 1 step -1
    y=y+y1(lauf)*xp^(lauf-1)
next lauf
print " Die Dämpfung des Kabels beträgt bei ";f;"Mhz = ";y;"dB/m."

```

Das kleine Basic-Programm soll hier eine Möglichkeit zur Erzeugung des Polynoms darstellen, welche sich in der Praxis sehr bewährt hat.

Durch die vorangegangene Betrachtung ist es nun möglich, für jede Center-Frequenz die passende Kabeldämpfung zu errechnen (innerhalb der Stützstellen) und so ein Optimum bezüglich der Kabeldämpfungskorrektur zu erreichen.

Innerhalb des SPAN-Bereichs um die Center-Frequenz herum ist dieser Kabeldämpfungswert ebenfalls nur eine Näherung. Da man jedoch bei relativ kleinen Span-Bereichen von einem linearen Verlauf der Dämpfungsänderung ausgehen kann, bedeutet dies, dass die Rechnung mit dem Mittelwert einen relativ kleinen Fehler erzeugt.

Im Messdiagramm nach Figur 2 ist eine Leitung aus drei miteinander verbundenen Kabeln mit jeweils einer Länge von 15m zu erkennen, die mit einem Fehlabschluss mit einem Wert von $s=1,2$ abgeschlossen sind. Der Fehlabschluss ist bei Lauflänge

45m deutlich als starker Peak zu erkennen. Das letzte Kabel (Bereich von 30-45m) wurde in der Vergangenheit stark beansprucht und weist daher etwas schlechtere Anpassungswerte auf als die beiden ersten Kabel. Die Messung wurde bei 1200Mhz durchgeführt, was die relativ hohen Reflexionswerte der Übergänge zwischen den Kabeln bei den Lauflängen 15m und 30m erklärt. Die Messdynamik liegt hier bei etwa 55dB, ausreichend um Stoßstellen mit einer Anpassung von 40dB sicher erkennen zu können.

Die Messung gemäß Figur 3 zeigt die gleiche Anordnung von Kabeln und Übergängen, wie das vorhergehende Diagramm in Figur 2. Als Unterschied ist lediglich der Abschluss am Ende des Kabels zu sehen, der hier einen Reflexionsfaktor von ca. 1 aufweist, d.h. ein offenes Ende ist. Dadurch ergibt sich ein sehr hoher Peak mit dem Wert 1 bei der Lauflänge von 45m. Es ist deutlich zu erkennen, daß die Messdynamik in vollem Umfang ausgenutzt werden kann, ohne qualitative Einbuße der Messwerte erkennen zu können.

Das oben beschriebene Verfahren zur Fehlerortbestimmung mit Spektrumanalysatoren besitzt den Vorteil einer hohen Messdynamik (besser 50dB) bei minimalen Kalibrierungsaufwand. Die Messergebnisse konnten in vielen Untersuchungen in ihrer Genauigkeit bestätigt werden. Der benötigte Rechenaufwand ist dabei überschaubar und von modernen Rechnersystemen problemlos zu bewältigen.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Fehlerortmessung bei Hochfrequenzkabeln und Leitungen, gekennzeichnet durch die Schritte:
 - a) Aussenden eines Signals mit der Frequenz f_0 und einem Pegel a_0 von einer Signalquelle (1),
 - b) Aufteilen des Signals in einem Powersplitter (3) und Weiterleitung des Signals zu gleichen Teilen in einen Prüfling (5) DUT und eine Senke (2),
 - c) Messen des Summensignals der Quelle (1) und der rücklaufenden Welle des DUT (5) mit der Frequenz f_0 und einer Amplitude a_1 an der Senke (2) und Abspeichern der zur Frequenz f_0 zugeordneten Amplitude a_1 in einem Array $zd()$,
 - d) Ändern der Frequenz f_0 um einen vorgegebenen Frequenzbetrag dF und Wiederholen der Schritte a) - d) bis die Frequenz f_0 eine vorgegebene Grenzfrequenz erreicht,
 - e) Anwenden einer inversen Fouriertransformation auf die Messwerte $ad()$ und Abspeichern der Ergebnisse in einem Array $ztd()$
 - f) Bestimmen der Orte von Stoßstellen, unter Berücksichtigung des Verkürzungsfaktors.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass zusätzlich zur Messung am Prüfling (5) zwei Kalibriermessungen am Meßsystem erfolgen
3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass eine erste Kalibriermessung mit einem SHORT am Ende des Messkabels (4) durchgeführt wird, die Messwerte in einem Array $as()$ abgespeichert, einer inversen Fouriertransformation unterzogen und in einem Array $zts()$ abgespeichert werden.

4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Messwerte des Prüflings $ztd()$ anhand der Messwerte $zts()$ der ersten Kalibriermessung einer Normierung unterzogen werden.
5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass eine zweite Kalibriermessung mit einem LOAD am Ende des Messkabels (4) durchgeführt wird, die Messwerte in einem Array $zl()$ abgespeichert, einer Fouriertransformation unterzogen und in einem Array $ztl()$ abgespeichert werden.
6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Messwerte des Prüflings $ztd()$ anhand der Messwerte $ztl()$ der zweiten Kalibriermessung einer Normierung unterzogen werden.
7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Messwerte $ztd()$ mit einer Fensterfunktion $window()$ multipliziert werden.
8. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass als Fensterfunktion $window()$ ein Cosinus-Roll-Off Fenster verwendet wird.
9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Leitungsdämpfung und der Verkürzungsfaktor des Prüflings (5) in den Messwerten berücksichtigt wird.
10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Leitungsdämpfung des Prüflings (5) über den gemessenen Frequenzbereich durch Interpolation mittels einer kubischen Polynoms anhand von einigen wenigen Messpunkten bestimmt wird.

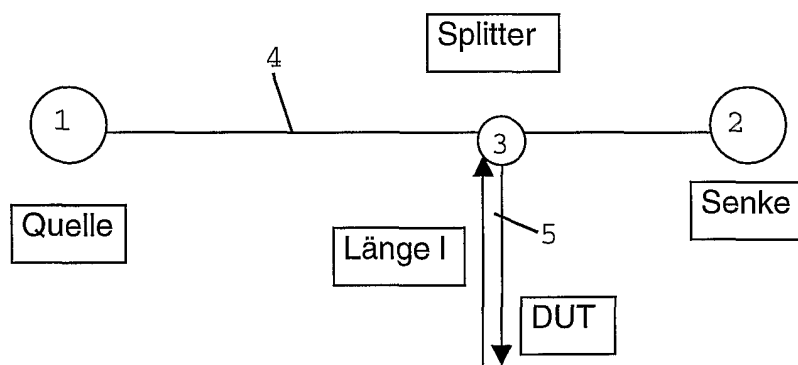
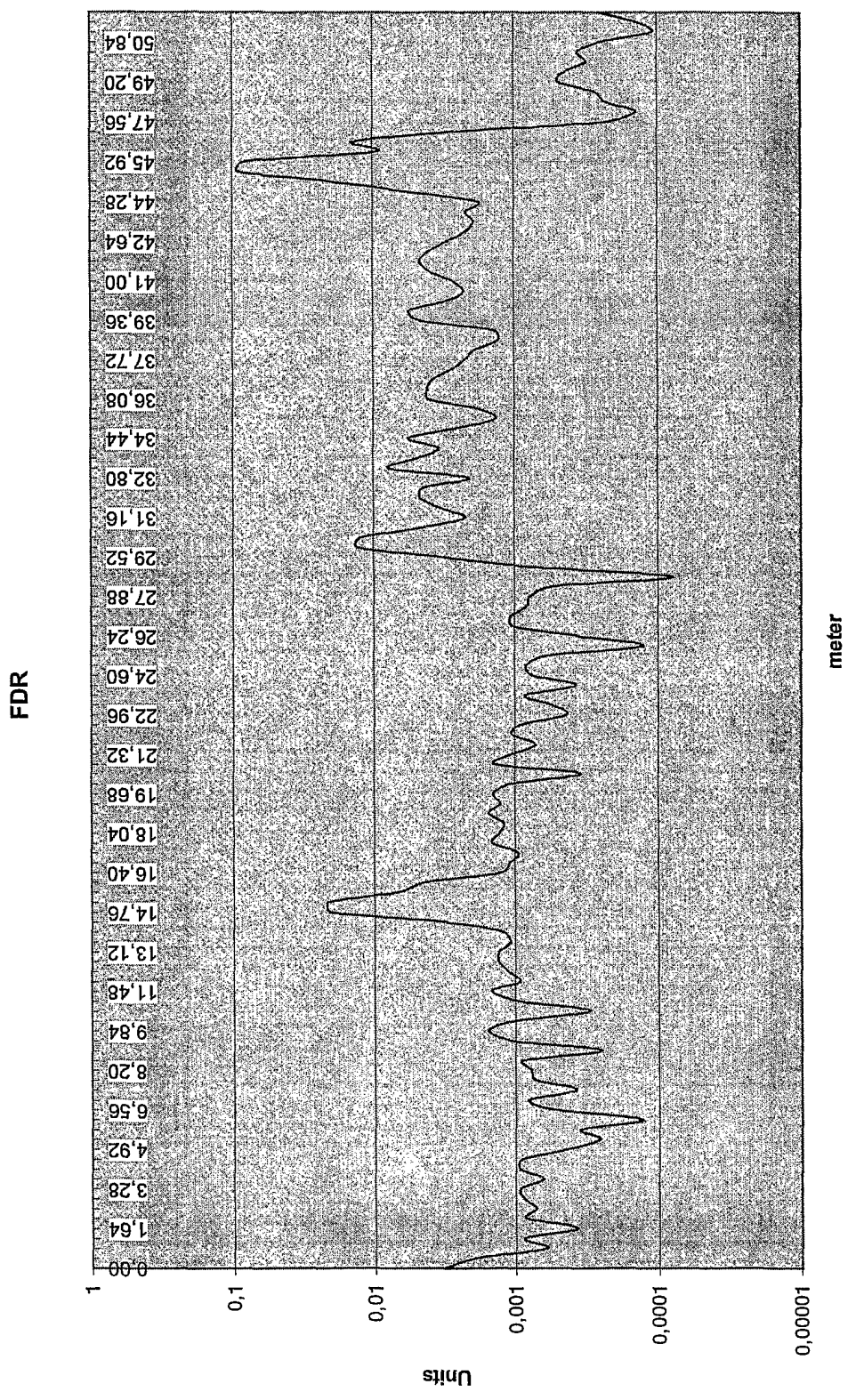


Fig. 1

Fig. 2



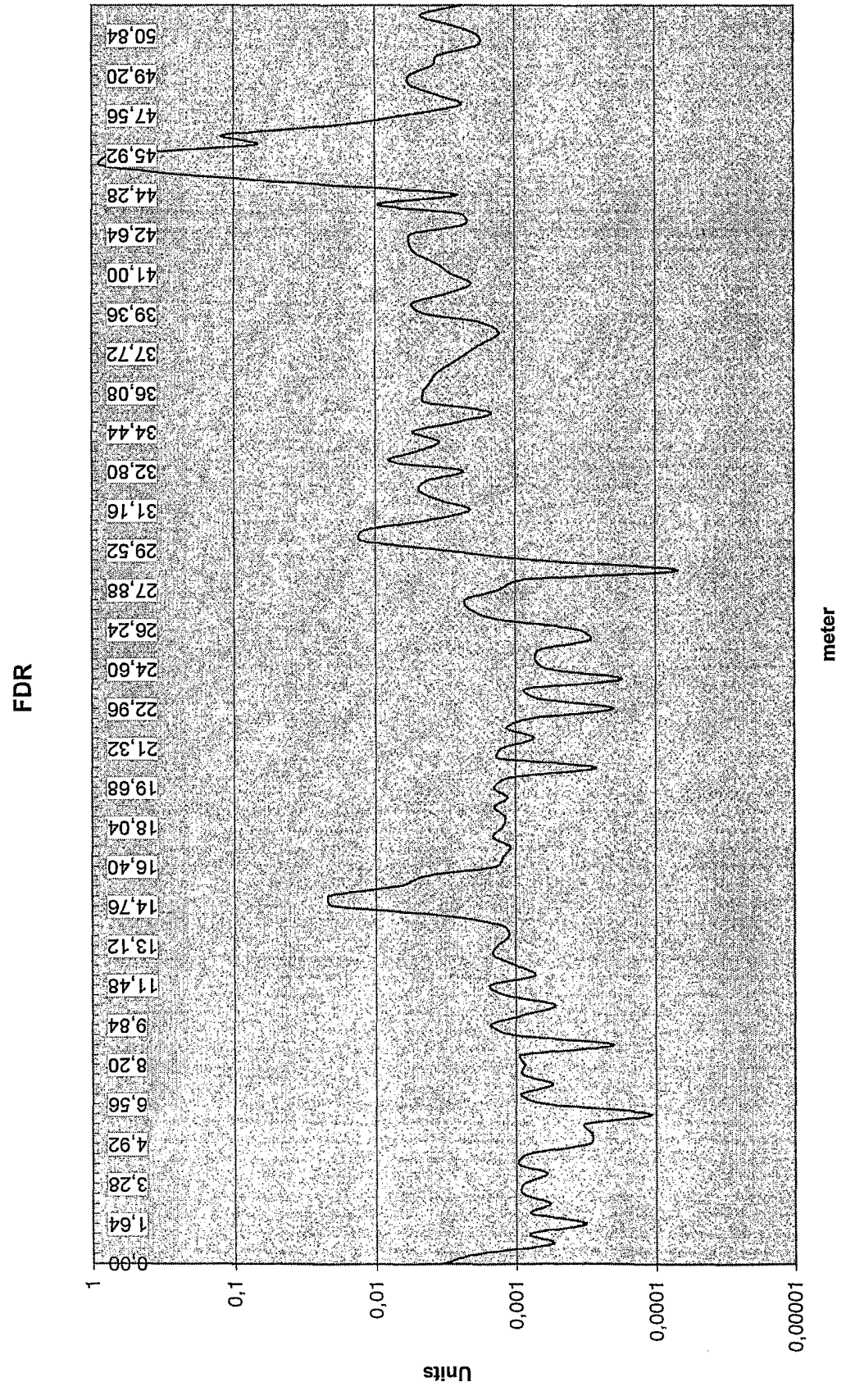


Fig. 3