

(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
23. Juni 2016 (23.06.2016)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2016/096124 A1

- (51) Internationale Patentklassifikation:
G01R 35/00 (2006.01) **G01R 27/28** (2006.01)
- (21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2015/002523
- (22) Internationales Anmeldedatum:
15. Dezember 2015 (15.12.2015)
- (25) Einreichungssprache: Deutsch
- (26) Veröffentlichungssprache: Deutsch
- (30) Angaben zur Priorität:
10 2014 019 008.0
18. Dezember 2014 (18.12.2014) DE
- (71) Anmelder: **ROSENBERGER
HOCHFREQUENZTECHNIK GMBH & CO. KG**
[DE/DE]; Hauptstrasse 1, 83413 Fridolfing (DE).
- (72) Erfinder: **KOLB, Stefan**; Rennweg 17a, 79106 Freiburg
(DE). **WAGNER, Sebastian**; Gartenweg 1, 87679
Westendorf (DE).
- (74) Anwalt: **ZEITLER VOLPERT KANDBINDER
PATENT- UND RECHTSANWÄLTE
PARTNERSCHAFT MBB**; Postfach 26 02 51, 80059
München (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

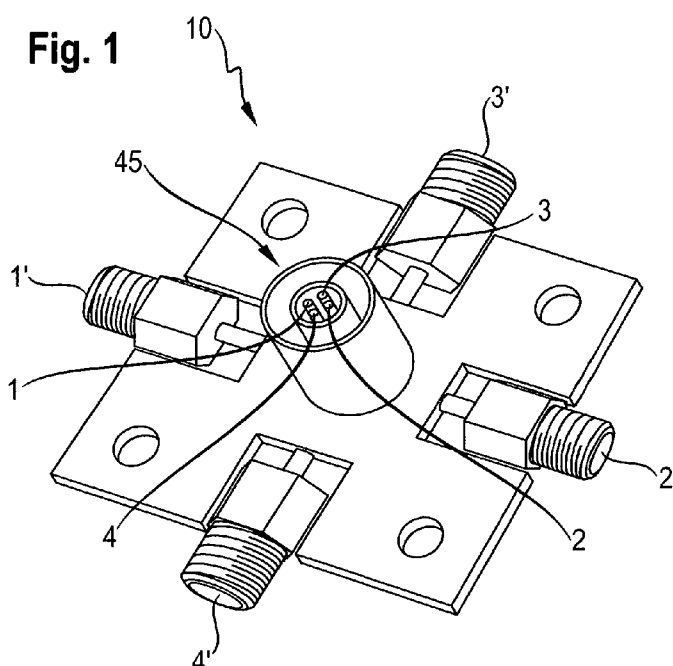
(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

(54) Title: METHOD FOR CALIBRATING A MEASURING ADAPTATION DEVICE HAVING TWO DIFFERENTIAL INTERFACES

(54) Bezeichnung : VERFAHREN ZUM KALIBRIEREN EINER MESSADAPTIERUNG MIT ZWEI DIFFERENTIELLEN SCHNITTSTELLEN



(57) Abstract: The invention relates to a method for calibrating a measuring assembly (100) for measuring electrical components (14), comprising at least one measuring adapter (10), which can be connected to a network analyzer (20) and which has four measuring gates (1, 2, 3, 4), which are arranged in a calibration plane (15) for connecting the electrical component and form two differential interfaces (1/2 and 3/4), wherein the measuring adapter (10) can be described by a linear 8-gate error network ($C_{1, 2, 3, 4}$). The error network is represented in modal representation. 15 error terms of each of two 4×4 error matrices, which describe linear errors in the differential-mode path and linear errors in the common-mode path, are determined, in each case by using a 15-term calibration method. Next, the two error matrices are placed in relation to each other using a reciprocal standard R. The invention further relates to a set of calibration standards for such a calibration method.

(57) Zusammenfassung:

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zum Kalibrieren einer Messanordnung (100) zum Vermessen von elektrischen Bauteilen (14), umfassend zumindest einen an einen Netzwerkanalysator (20) anschließbaren Messadapter (10) mit vier Messtoren (1, 2, 3, 4), die in einer Kalibrierebene (15) zum Anschließen des elektrischen Bauteils (14) angeordnet sind und zwei differentielle Schnittstellen (1/2 und 3/4) bilden, wobei der Messadapter (10) durch ein lineares 8-Tor Fehlernetzwerk ($C_{1,2,3,4}$) beschreibbar ist. Das Fehlernetzwerk wird in modaler Repräsentation dargestellt, es folgt die Bestimmung von jeweils 15 Fehlertermen von zwei 4x4 Fehlermatrizen, die lineare Fehler im Gegentaktpfad und lineare Fehler im Gleichentaktpfad beschreiben, jeweils unter Verwendung eines 15-Term Kalibrierverfahrens. Anschließend werden die beiden Fehlermatrizen unter Einsatz eines Reziprok-Standards R zueinander in Beziehung gesetzt. Ferner betrifft die Erfindung einen Satz von Kalibrierstandards für ein solches Kalibrierverfahren.

Verfahren zum Kalibrieren einer Messadaptierung mit zwei differentiellen Schnittstellen

15

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zum Kalibrieren einer Messanordnung zum Vermessen von elektrischen Bauteilen (device under test, DUT) wie etwa HF-Bauteilen. Eine solche Messanordnung umfasst
20 herkömmlicherweise einen Netzwerkanalysator wie etwa einen vektoriellen Netzwerkanalysator VNA, mit dem die Streuparameter (wie z.B. Reflexions- und Transmissionsfaktoren) durch Messung der Wellengrößen an Toren des zu vermessenden elektrischen Bauteils in Abhängigkeit von der Frequenz bis hin zu einigen GHz bestimmt werden können. Ein Netzwerkanalysator weist regelmäßig
25 eine kalibrierte Referenzebene mit einem, zwei oder mehr Messtoren zum Anschließen des zu vermessenden elektrischen Bauteils auf.

Bei Messungen mit einem Netzwerkanalysator werden mit einem Frequenzbereichsmessprinzip die Wellengrößen der hin- und rücklaufenden Wellen
30 nach Real- und Imaginärteil bestimmt (kohärente Messstellen). Das Messverfahren ermöglicht dabei eine sehr genaue Bestimmung der Streuparameter, da sämtliche systematische, lineare Fehler mit Hilfe einer Systemfehlerkorrektur durch eine nachträgliche Rechnung entfernt werden können. Die vom Netzwerkanalysator ausgesandten Messsignale durchlaufen auf ihrem Weg zum und vom DUT nämlich

verschiedene elektrische Komponenten wie etwa Leitungen und Richtkoppler mit nichtidealen elektrischen Eigenschaften, was bei der Netzwerkanalyse zu systematischen Fehlern führen kann. Aus diesem Grund werden vor den eigentlichen DUT-Messungen Kalibriermessungen durchgeführt, um die elektrischen Eigenschaften der Messanordnung selbst zu bestimmen, und um diese anschließend aus den Messsignalen korrigieren/kompensieren zu können. Bezogen auf eine frei definierbare Referenzebene können somit Einflüsse von Leitungen oder Messadaptierungen vollständig kompensiert werden. Zu diesem Zweck wird zwischen den Messstellen der Wellengrößen im Netzwerkanalysator und der Referenzebene („Kalibrierebene“) ein lineares Fehlernetzwerk definiert. Kalibrierverfahren ermöglichen die Bestimmung der Fehlerkoeffizienten dieser Fehlernetzwerke, die sich je nach Anwendungsfall erheblich voneinander unterscheiden können. Das DUT wird dann genau in der Kalibrierebene angeschlossen, in der die Eigenschaften der Messanordnung nach der Kalibrierung bekannt sind.

Aus dem Stand der Technik sind zahlreiche unterschiedliche Kalibrierverfahren bekannt. Je nachdem, wie viele Messtore der Netzwerkanalysator und das DUT aufweisen und von welchen Eigenschaften der Messanordnung und des DUTs ausgegangen werden kann (Symmetrie, Reziprozität, etc.), eignen sich bestimmte Kalibrierverfahren. Bspw. kann für die Kalibrierung eines Zweitor-VNAs zur sukzessiven Messung der vier Streuparameter eines Zweitor-DUTs ein 12-Term-Kalibrierverfahren oder das einfachere TSD-Kalibrierverfahren verwendet werden. Grundsätzlich wird außerdem zwischen Fehlermodellen mit entkoppelten bzw. verkoppelten Messtoren unterschieden. Verkoppelte Fehlermodelle berücksichtigen elektrische Kopplung zwischen den Reflektometern des VNA oder Übersprechen über das Messobjekt hinweg, das bspw. durch die Messanordnung gegeben ist. Werden mehr als zwei Messtore betrachtet, kann außerdem Teilverkopplung zwischen beliebigen Messtoren oder auch zwischen allen Messtoren berücksichtigt werden. Ein das verkoppelte Fehlernetzwerk modellierendes Kalibrierverfahren für Zweitor-VNAs arbeitet nach dem 15-Term-Verfahren (manchmal auch 16-Term-Verfahren genannt). In diesem Zusammenhang wird bspw. auf die Druckschriften EP 0 706 059 B1, DE 433 2273 C2 und DE 19736897 C2 verwiesen. Das

Fehlernetzwerk zwischen den Messstellen und der Kalibrierebene eines Zweitor-VNAs lässt sich nämlich durch eine 4X4-Fehlermatrix mit sechzehn Fehlertermen beschreiben, von denen für Verhältnismessungen wie etwa Streuparametermessungen die Bestimmung von 15 Fehlertermen ausreichend ist.

Grundsätzlich ist zwischen zwei Typen von Kalibrierverfahren zu unterscheiden: Im Fall von direkten Kalibrierverfahren müssen elektrisch sehr exakt beschreibbare Kalibrierstandards an die zu kalibrierende Referenzebene angeschlossen werden. Die Kenntnis dieser Standards wird durch spezielle mechanische Strukturen und eine hohe Genauigkeit der Fertigung erreicht. Im Gegensatz dazu stehen die Selbstkalibrierverfahren, die in Bezug auf die Kenntnis der elektrischen Eigenschaften nur eine eingeschränkte Genauigkeit erfordern, da sich jene Eigenschaften im Laufe des Kalibrierprozesses durch Verwendung von Redundanz oder besonderer Eigenschaften der eingesetzten Standards von selbst bestimmen.

Einige zu vermessende elektrische Bauteile weisen allerdings nicht die geeignete Schnittstelle zum unmittelbaren Anschließen an die Messtore des VNAs in der kalibrierten Referenzebene des VNAs (im Folgenden: „Vorkalibrierebene“) auf. Zum Vermessen solcher Bauteile können Messadapter verwendet werden, die zum einen an die Vorkalibrierebene des VNAs und zum anderen an die Messeingänge des zu vermessenden elektrischen Bauteils ankoppelbar sind. Problematisch an solchen Messadaptern ist allerdings, dass sie wiederum systematische lineare Fehler einführen können, die im Hinblick auf möglichst exakte Messergebnisse einer eigenen Korrektur bedürfen. Deshalb kann es erforderlich sein, zusätzlich auch die durch den Messadapter gebildete Messadaptierung zu kalibrieren. Die Messtore des Messadapters zum Anschließen des zu vermessenden Messobjekts sind dabei in der Kalibrierebene angeordnet.

Ein Messadapter mit 4 Messtoren (also mit 4 Eingangstoren zum Anschließen an den VNA und 4 Ausgangstoren zum Anschließen des Messobjekts) kann dabei durch ein lineares 8-Tor-Fehlernetzwerk beschrieben werden, das grundsätzlich die Bestimmung von insgesamt 64 Fehlertermen erforderlich macht. Kalibrierverfahren zum Kalibrieren eines solchen Messadapters wären allerdings außerordentlich

komplex und zeitaufwändig, insbesondere wenn eine (Teil- oder Voll-) Verkopplung zwischen den einzelnen Messtoren berücksichtigt werden soll, so dass herkömmlicherweise regelmäßig auf die Kalibrierung von Messadaptern mit 4 oder mehr Messtoren verzichtet wird und dadurch ggf. systematische Messfehler in Kauf genommen werden.

In Anbetracht der beschriebenen Probleme ist es die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein möglichst einfaches und zuverlässiges Kalibrierverfahren zum Kalibrieren einer Messanordnung aus Netzwerkanalysator und Messadapter mit vier Messtoren bereitzustellen, wobei die vier Messtore des Messadapters in der Kalibrierebene zum Anschließen des elektrischen Bauteils (DUT) angeordnet sind und zwei differentielle Schnittstellen bilden.

Diese Aufgabe wird durch ein Kalibrierverfahren mit den folgenden Schritten gelöst:

- Zuordnen von jeweils 2 Messtoren, die zu einer differentiellen Schnittstelle gehören, zu einem Modaltor I, II,
- Darstellung des Fehlernetzwerks in modaler Repräsentation, in der lineare Fehler im Gegentaktpfad für beide Modaltore durch eine 4×4 Matrix $C_{I-II, dd}$ und lineare Fehler im Gleichtaktpfad für beide Modaltore durch eine 4×4 Matrix $C_{I-II, cc}$ beschrieben werden, unter Vernachlässigung von Intermodalverkopplung zwischen Gegentaktpfad und Gleichtaktpfad,
- Bestimmen von jeweils 15 Fehlertermen der Matrizen $C_{I-II, dd}$ und $C_{I-II, cc}$ unter Verwendung eines 15-Term Kalibrierverfahrens,
- Bestimmen eines multiplikativen Verknüpfungsfaktors zwischen den bestimmten 15 Fehlertermen der Matrix $C_{I-II, cc}$ und der Matrix $C_{I-II, dd}$ unter Einsatz eines Reziprok-Standards R.

Diese Fehlerterme der beiden Matrizen $C_{I-II, dd}$ und $C_{I-II, cc}$ charakterisieren das durch den Messadapter eingeführte Fehlernetzwerk vollständig. Aus den auf diese Weise bestimmten Fehlertermen der Matrizen $C_{I-II, dd}$ und $C_{I-II, cc}$ können dann Korrekturwerte berechnet werden, die bei nachfolgenden Messungen von Streuparametern des elektrischen Bauteils DUT berücksichtigt werden.

Die Erfindung geht zum einen auf die Erkenntnis zurück, dass es zur Kalibrierung von Messadaptationen mit vier Messtoren nicht in jedem Fall erforderlich ist, alle 64 Fehlerterme der Fehlermatrix des zugehörigen 8-Tor-Fehlernetzwerks zu bestimmen. Vielmehr existiert unter bestimmten Voraussetzungen eine Darstellung der Fehlermatrix, in der 32 der 64 Fehlerterme vernachlässigbar sind oder sogar vollständig verschwinden. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn die vier Messtore des Messadapters in der Kalibrierebene zwei differentielle Schnittstellen bilden, und von symmetrischen bzw. im Wesentlichen gleichen elektrischen Eigenschaften der beiden jeweils eine differentielle Schnittstelle bildenden Messtore sowie der damit jeweils verbundenen elektrischen Leitungen und Komponenten auf dem Messadapter ausgegangen werden kann. Diese vereinfachte Darstellung der Fehlermatrix entspricht der modalen Repräsentation des Fehlernetzwerks, bei der die durch den Messadapter geführten HF-Signale in Gegentaktmode und Gleichtaktmode zerlegt sind. Dabei werden die jeweils zwei einer differentiellen Schnittstelle zugeordneten Messtore zu einem Modaltor zusammengefasst, durch das die Messsignale in Gleichtakt und Gegentakt geführt werden, wobei eine Intermodalverkopplung zwischen Gegentaktpfad und Gleichtaktpfad vernachlässigbar sein soll.

Diese Voraussetzungen sind insbesondere bei einer einander entsprechenden Anordnung der elektrischen Leitungen und Messtore der differentiellen Schnittstellen an dem Messadapter erfüllt, so dass sich symmetrische elektrische Eigenschaften für die zusammengehörigen Messtore ergeben. Hingegen soll eine Kopplung zwischen den Gegentaktmoden des einen Modaltors und den Gegentaktmoden des anderen Modaltors, sowie zwischen den Gleichtaktmoden des einen Modaltors und den Gleichtaktmoden des anderen Modaltors berücksichtigt werden. In diesem Zusammenhang wird auf das Lehrwerk [Holger Heuermann: „*Hochfrequenztechnik: Komponenten für High-Speed und Hochfrequenzschaltungen*“, Springer 2009], verwiesen, in dem die Grundlagen der modalen Darstellung von Mehrstoren beschrieben sind, die durch Verweis in die vorliegenden Offenbarung aufgenommen werden.

Die Erfindung basiert nun auf der Erkenntnis, dass die eingangs bereits erwähnten 15-Term-Kalibrierverfahren, die bisher bei nodaler Repräsentation des zu bestimmenden Fehlernetzwerks angewandt wurden, auf die modale Repräsentation übertragen werden können. Nach Darstellung des Fehlernetzwerks in modaler Repräsentation, in der lineare Fehler im Gegentaktpfad für beide Modaltore durch die 4×4 Matrix $C_{I-II, dd}$ und lineare Fehler im Gleichtaktpfad für beide Modaltore durch die 4×4 Matrix $C_{I-II, cc}$ beschrieben werden, unter Vernachlässigung von Intermodalverkopplung zwischen Gegentaktpfad und Gleichtaktpfad, ist es also möglich, die jeweils 15 Fehlerterme der Fehlermatrizen $C_{I-II, dd}$ und $C_{I-II, cc}$ unter Verwendung eines auf die modale Repräsentation angepassten 15-Term Kalibrierverfahrens zu bestimmen. Damit kann erfindungsgemäß die Bestimmung der 64 Parameter der nodalen 8×8 -Fehlermatrix auf die Bestimmung zweier modaler 4×4 Fehlermatrizen durch ein modal angewandtes 15-Term Kalibrierverfahren reduziert werden. Da nur 15 Terme pro Fehlermatrix $C_{I-II, dd}$ und $C_{I-II, cc}$ bestimmt werden, ist eine Normierung der beiden 4×4 -Fehlermatrizen notwendig, bei der bspw. einer der Fehlerterme jeder Matrix auf 1 gesetzt wird.

Allerdings ist hierdurch das Relativverhältnis zwischen den beiden Fehlermatrizen $C_{I-II, dd}$ und $C_{I-II, cc}$ noch nicht bestimmt. Für die Kenntnis des vollständigen Fehlernetzwerks ist also noch eine Relativverknüpfung zwischen den beiden Fehlermatrizen $C_{I-II, dd}$ und $C_{I-II, cc}$ bzw. eine Entnormierung einer der beiden Fehlermatrizen $C_{I-II, dd}$ und $C_{I-II, cc}$ erforderlich.

Die Erfindung basiert zum anderen auf der überraschenden Erkenntnis, dass eine solche Entnormierung mit vergleichsweise einfachen Mitteln möglich ist. Erfindungsgemäß erfolgt die Bestimmung des multiplikativen Verknüpfungsfaktors zwischen den bestimmten 15 Fehlertermen der Matrix $C_{I-II, cc}$ und der Matrix $C_{I-II, dd}$ durch den Einsatz eines Reziprok-Standards R, der an den vier Messtoren des Messadapters anschließbar ist. Der 4-Tor Reziprok-Standard R ist notwendigerweise reziprok, kann aber darüber hinaus in seinen elektrischen Eigenschaften unbekannt sein. Diese Methode basiert auf der Tatsache, dass die Determinante der Transmissionsmatrix eines beliebigen, reziproken Netzwerks jeweils Eins ergibt und damit in einer Kaskadendarstellung als bekannt angenommen werden kann. Dadurch

resultiert dann durch Kalibrationsmessung der unbekannte multiplikative Verknüpfungsfaktor zur Entnormierung lediglich mit einer Phasenmehrdeutigkeit, die bei ungefährender Kenntnis der geometrischen Länge des Netzwerks aufgelöst werden kann.

Damit ist es erfindungsgemäß möglich, mit vergleichsweise einfachen Mitteln und ohne größeren Zeitaufwand das vollständige Fehlernetzwerk zu charakterisieren, das ein zwischengeschalteter Messadapter mit 4 Messtoren bewirkt, wenn davon ausgegangen werden kann, dass Intermodalverkopplung zwischen Gegentaktpfad und Gleichentaktpfad vernachlässigt werden kann. Dies ist insbesondere dann möglich, wenn die Messtore des Messadapters nach Art einer doppelt differentiellen Schnittstelle aufgebaut sind. Eine Transformation zwischen den Fehlermatrizen bzw. den Wellengrößen in modaler und in nodaler Darstellung ist durch bekannte lineare Umformungen möglich, so dass Messungen an elektrischen Bauteilen modal oder nodal durchgeführt und anschließend entsprechend umgerechnet werden können. Es wird auf die dem Fachmann bekannten einschlägigen Lehrwerke wie etwa auf das oben bereits genannte Lehrwerk „Hochfrequenztechnik: Komponenten für High-Speed und Hochfrequenzschaltungen“ verwiesen.

Besonders exakt sind die sich durch das erfindungsgemäße Kalibrierverfahren ergebenden Fehlerterme dann, wenn der Adapter derart aufgebaut ist, dass die elektrische Verkopplung zwischen den beiden Messtoren der ersten differentiellen Schnittstelle im Wesentlichen der elektrischen Verkopplung zwischen den beiden Messtoren der zweiten differentiellen Schnittstelle entspricht, und/oder dass die elektrische Verkopplung zwischen einem der Messtore der ersten differentiellen Schnittstelle und einem der Messtore der zweiten differentiellen Schnittstelle jeweils im Wesentlichen der Verkopplung zwischen den beiden anderen Messtoren entspricht. Damit weist der Messadapter die für ein vollständiges Verschwinden der gemäß dem erfindungsgemäßen Verfahren zu vernachlässigenden Fehlerterme erforderlichen Symmetrieeigenschaften auf. Eine vergleichbare elektrische Kopplung zwischen zwei Messtorpaaren und den jeweils dazu gehörenden Leitungspaaren ergibt sich insbesondere dann, wenn diese in analoger Anordnung, insbesondere mit

vergleichbarem gegenseitigen Abstand und vergleichbarem gegenseitigen Verlauf an dem Messadapter angeordnet sind.

Vorzugsweise ist der Messadapter bzgl. aller vier Messtore im Wesentlichen symmetrisch eingerichtet.

Im Hinblick auf einen einfachen Aufbau des Messadapters hat es sich als zweckmäßig erwiesen, dass der Messadapter über vier vorzugsweise als koaxiale Schnittstellen eingerichtete Eingangstore an eine kalibrierte Vorkalibrierebene des Netzwerkanalysators angeschlossen wird. Herkömmliche Netzwerkanalysatoren weisen nämlich in der Vorkalibrierebene regelmäßig koaxiale Schnittstellen (bspw. SMA) zum Anschließen von Messobjekten auf. Die vier koaxialen Schnittstellen können sternförmig von einem zentralen Träger wie etwa einer Platine des Messadapters vorstehen.

Alternativ oder zusätzlich weisen die zwei differentiellen Schnittstellen des Messadapters vier bevorzugt in quadratischer Anordnung an dem Messadapter vorgesehene Kontaktelemente zum Kontaktieren eines zwei differentiellen Leiterpaars aufweisenden elektrischen Bauteils wie etwa eines 4-Tor-Kalibrierstandards oder eines Sternviererkabels auf. Ein solcher Messadapter hat nämlich zum einen die erfindungsgemäß bevorzugten Symmetrieeigenschaften und ist zum anderen besonders geeignet zum Vermessen von DUTs mit zwei differentiellen Schnittstellen, ohne dass weitere Adapterelemente erforderlich werden. Die vier Kontaktelemente können im Zentrum eines Trägers wie etwa einer Platine des Messadapters angeordnet sein. Dabei bilden vorzugsweise jeweils zwei einander diagonal gegenüberliegende Kontaktelemente eine der differentiellen Schnittstellen.

Die vier Kontaktelemente der zwei differentiellen Schnittstellen (die Ausgangstore) des Messadapters sind vorzugsweise über elektrische Leitungen jeweils mit einer koaxialen Schnittstelle des Messadapters (den Eingangstoren) elektrisch verbunden.

Es wird ein Kalibrierverfahren benötigt, das die Kalibrierung eines modalen 15-Term-Fehlermodells bei Intermodenentkopplung (vollverkoppeltes Fehlermodell für zwei

Tore je Mode) leistet. Hierfür hat sich ein Selbstkalibrierverfahren als besonders zweckmäßig erwiesen, da es geringere Anforderungen an die zu verwendenden Kalibrierstandards stellt.

Als besonders geeignete Selbstkalibrierverfahren haben sich die für den nodalen Zweitor-Fall bekannten TMRG- oder LRM-Verfahren erwiesen. Die hierfür erforderlichen Kalibrierstandards sind vergleichsweise einfach bereitstellbar, und eine Übertragung auf den hier vorliegenden Viertor-Fall (bzw. modalen Zweitor-Fall) ist bei überschaubarer Komplexität möglich.

Insbesondere bei dem genannten TMRG-Verfahren ist es möglich, für die Bestimmung der jeweils 15 Fehlerterme der Matrizen $C_{I-II, dd}$ und $C_{I-II, cc}$ teilweise oder sogar ausschließlich konzentrierte („lumped“) Kalibrierelemente zu verwenden. Im Gegensatz zu ausgedehnten Kalibrierelementen (bspw. Leitung als Impedanzstandard, der jeweils nur in einem finiten Frequenzintervall eingesetzt werden kann) können konzentrierte Elemente elektrisch kurz sein (d.h. sehr viel kürzer als die Wellenlänge der verwendeten Frequenz). Solche konzentrierten Elemente, die wiederum Eintor-Reflexionsstandards repräsentieren, sind bspw. Widerstände, Wellensumpf/Impedanzstandard (Match M), Kurzschluss (Short S, nichtideal/ weitgehend unbekannt), Leerlauf (Open O, nichtideal/ weitgehend unbekannt). Die Durchverbindung (Thru, T) ist eine ideale oder vollständig bekannte Verbindungsleitung zwischen zwei Toren.

Bei einer besonders bevorzugten Ausführungsform werden zumindest drei, vorzugsweise vier, und insbesondere fünf der folgenden Kalibrierstandards verwendet: Thru, match-open MO, short-match SM, short-open SO, open-short OS. In modaler Repräsentation erscheint dabei vorzugsweise der jeweilige Zweitor-Kalibrierstandard an den Gleichtakt- und Gegentakt-Fehlernetzwerken. In der tatsächlichen/realen nodalen Repräsentation sind jeweils zwei Messtore mit dem einen und die anderen zwei Messtore des Messadapters mit dem anderen Messstandard abgeschlossen. Insbesondere bezeichnet der erste Buchstabe jeweils den Abschluss der Messtore der einen differentiellen Schnittstelle und der zweite Buchstabe den Abschluss der Messtore der anderen differentiellen Schnittstelle. Die

Durchgangsverbindung Thru verbindet zweimal zwei Messtore miteinander, vorzugsweise jeweils zwei Messtore, die nicht zu derselben differentiellen Schnittstelle gehören.

Für den Schritt des Bestimmens des multiplikativen Verknüpfungsfaktors zwischen den 15 Fehlertermen der Matrix $C_{I-II, cc}$ und der Matrix $C_{I-II, dd}$ wird vorzugsweise ein Reziprok-Standard R verwendet, der eine hohe Verkopplung von Gleichtakt- und Gegentaktmoden an jeweils einem Modaltor aufweist bzw. der unsymmetrisch bzgl. der beiden Messtore jeweils einer differentiellen Schnittstellen eingerichtet ist. Ein solcher Reziprok-Standard kann derart eingerichtet sein, dass er zwei Messtore mit einem (nicht-idealen) Kurzschluss und zwei Messtoren mit einem (nicht-idealen) Leerlauf abschließt. Bspw. stellt der R-Standard an den beiden Messtoren jeder differentiellen Schnittstelle einen Kurzschluss S (nicht-ideal) und einen Leerlauf O (nicht-ideal) bereit.

Gemäß einem weiteren Aspekt betrifft die vorliegende Erfindung ein Verfahren zum Kalibrieren einer Messadaption mit 8 Messtoren. Eine solche Messadaption kann zwei zwischen den Netzwerkanalysator und das zu vermessende elektrische Bauteil geschaltete Messadapter mit jeweils vier Messtoren umfassen. Die beiden Messadapter können auch integral gebildet sein. Dabei bilden jeweils zwei zusammengehörige Messtore eines Messadapters eine differentielle Schnittstelle mit den oben erläuterten Symmetrieeigenschaften. Vorzugsweise ist jeder der beiden Messadapter so aufgebaut wie der oben beschriebene Messadapter der ersten Ausführungsform der Erfindung. Wichtig ist, dass eine elektromagnetische Kopplung zwischen den beiden Messadaptern vernachlässigbar ist. Dies kann dadurch besonders gut erreicht werden, dass die beiden Messadapter beim Kalibrieren und beim Messen räumlich voneinander getrennt angeordnet sind, so dass sich die Leitungen und Schnittstellen der beiden Messadapter nicht gegenseitig elektrisch beeinflussen können. Bspw. sind die Leitungen und Schnittstellen der beiden Messadapter auf zwei separaten Trägern wie etwa Platinen vorgesehen.

Eine derartige Messadaption kann bspw. zum Bestimmen der Streuparameter von 8-Tor-Messobjekten verwendet werden, bei denen jeweils zwei Tore eine differentielle

Schnittstelle bilden. Ein solches 8-Tor-Messobjekt ist bspw. ein Kabel mit zwei Twisted-Pair-Aderpaaren, insbesondere ein Kabel in Sternviereranordnung, das an jedem Kabelende zwei differentielle Aderpaare aufweist (bspw. High Speed Data HSD-Schnittstellen).

Das Kalibrierverfahren gemäß dieser zweiten Ausführungsform der Erfindung umfasst die folgenden Schritte:

- Zuordnen der jeweils 2 Messtore einer differentiellen Schnittstelle der Messadapter zu einem Modaltor,
- Darstellung der die Messadapter beschreibenden Fehlernetzwerke in modaler Repräsentation, in der je Messadapter lineare Fehler im Gegentaktpfad für beide Modaltore durch eine 4x4 Fehlermatrix ($C_{I-II, dd}$, $C_{III-IV, dd}$) und lineare Fehler im Gleichentaktpfad für beide Modaltore durch eine 4x4 Fehlermatrix ($C_{I-II, cc}$, $C_{III-IV, cc}$) beschrieben werden, unter Vernachlässigung von Intermodalverkopplung zwischen Gegentaktpfad und Gleichentaktpfad,
- Bestimmen von jeweils 15 Fehlertermen der Fehlermatrizen $C_{I-II, dd}$, $C_{I-II, cc}$, $C_{III-IV, dd}$, $C_{III-IV, cc}$ unter Verwendung eines 15-Term Kalibrierverfahrens,
- Bestimmen eines multiplikativen Verknüpfungsfaktors zwischen den bestimmten 15 Fehlertermen der Matrizen $C_{I-II, cc}$ und $C_{I-II, dd}$ und eines zweiten multiplikativen Verknüpfungsfaktors zwischen den bestimmten 15 Fehlertermen der Matrizen $C_{III-IV, cc}$ und $C_{III-IV, dd}$ unter Einsatz eines Reziprok-Standards R_1 ,
- Bestimmen eines dritten multiplikativen Verknüpfungsfaktors zwischen Fehlertermen, die für den ersten Messadapter bestimmt wurden, und Fehlertermen, die für den zweiten Messadapter bestimmt wurden, unter Einsatz eines weiteren Reziprok-Standards R_2 .

Eine Verallgemeinerung des erfindungsgemäßen Verfahrens auf mehr als zwei Adapter ist möglich, wenn eine Kopplung zwischen den einzelnen Adaptern vernachlässigbar ist.

Als weiterer Reziprok-Standard R_2 wird vorzugsweise ein 8-Tor-Standard mit zweimal zwei differentiellen Schnittstellen zum Anschließen an den jeweils zwei differentiellen Schnittstellen der beiden Messadapter verwendet.

Als weiterer Reziprok-Standard R_2 kann ein 4-adriges Kabel, insbesondere ein Sternvierer-Kabel verwendet werden, wobei für die Kalibrationsmessung die differentiellen Aderpaare an beiden Kabelenden mit den vier Messtoren bzw. mit den dadurch gebildeten differentiellen Schnittstellen der Messadapter verbunden werden.

Gemäß einem weiteren Aspekt betrifft die Erfindung einen Satz von Kalibrierstandards zur Verwendung bei einem erfindungsgemäßen Kalibrierverfahren, umfassend zumindest drei, bevorzugt vier oder fünf konzentrierte 4-Tor-Kalibrierstandards und zumindest einen 4-Tor Reziprok-Standard R zum Kalibrieren einer Messadaptierung mit mindestens vier Messtoren, die zwei differentielle Schnittstellen bilden, insbesondere zum Kalibrieren einer Messanordnung aus Netzwerkanalysator und Messadapter mit vier oder acht Messtoren.

Die zumindest drei konzentrierten 4-Tor Standards sind vorzugsweise aus den folgenden Kalibrierstandards ausgewählt: Thru; MO, SM, SO, OS, wobei der erste Buchstabe den Abschluss von zwei Messtoren der Messadaptation und der zweite Buchstabe den Abschluss der anderen beiden Messtore der Messadaptation bezeichnet. Insbesondere bezeichnet der erste Buchstabe den Abschluss der beiden Messtore, die eine differentielle Schnittstelle der Messadaptation bilden, und der zweite Buchstabe den Abschluss der beiden Messtore, die die andere differentielle Schnittstelle der Messadaptation bilden.

Dazu sind die einzelnen Kalibrierstandards derart eingerichtet, dass sie an einer doppelt differentiellen Schnittstelle anschließbar sind, die vorzugsweise vier Kontaktelemente in quadratischer Anordnung aufweist, wobei jeweils zwei diagonal gegenüberliegende Kontaktelemente eine differentielle Schnittstelle bilden.

Der erfindungsgemäße Satz von Kalibrierstandards kann ferner einen 8-Tor Reziprok-Standard zum Anschließen an zwei Messadaptern aufweisen, wobei jeder Messadapter eine doppelt differentielle Schnittstelle aufweist. Der 8-Tor-

Reziprokstandard kann in Form eines Kabels, bevorzugt eines 4-adrigen Kabels, insbesondere eines Sternviererkabels vorgesehen sein.

Ferner betrifft die Erfindung eine Messzusammenstellung, bestehend aus einem oder zwei oben beschriebenen Messadaptern und dem zugehörigen erfindungsgemäßen Satz von Kalibrierstandards für deren Kalibrierung.

Im Folgenden wird die Erfindung unter Bezugnahme auf die beigefügten Zeichnungen erläutert. Ferner wird im Detail ein Kalibriervorgang einschließlich der dabei durchgeführten mathematischen Umformungen präsentiert. Dabei sind sämtliche Skalare und resultierende Größen, sofern nicht anders angegeben, komplexe Größen, Skalare werden klein und kursiv geschrieben, Vektoren werden klein und fett geschrieben und Matrizen werden groß und fett geschrieben. Für den Fachmann ist ohne weiteres ersichtlich, dass der explizit vorgestellte Kalibriervorgang lediglich beispielhaft ist, und dass alternative Bezeichnungen, Darstellungen, Reihenfolgen, Umformungen etc. zum Erreichen desselben Ergebnisses verwendet werden können. Das erfindungsgemäße Verfahren ist lediglich durch die beigefügten Ansprüche beschränkt. Dabei zeigt:

Fig. 1 einen Messadapter mit vier Messtoren einer Messanordnung, die gemäß dem erfindungsgemäßen Verfahren kalibriert wird, in einer perspektivischen Darstellung,

Fig. 2 ein zu kalibrierendes, nodales Fehlermodell eines an die Vorkalibrierebene eines VNAs angeschlossenen Messadapters,

Fig. 3 ein zu kalibrierendes, modales Fehlermodell des an die Vorkalibrierebene des VNAs angeschlossenen Messadapters,

Fig. 4a eine schematische Darstellung, die die Übertragung eines nodalen Kalibrierverfahrens auf den modalen Fall veranschaulicht, wobei jeweils Reflexions-Kalibrierstandards verwendet werden,

Fig. 4b eine schematische Darstellung, die die Übertragung eines nodalen Kalibrierverfahrens auf den modalen Fall veranschaulicht, wobei jeweils eine Durchverbindung (Thru) verwendet wird,

Fig. 5 eine beispielhafte Zusammenstellung eines erfindungsgemäßen Satzes von Kalibrierstandards (oben), die an die zwei differentiellen Schnittstellen (unten) eines in Fig. 1 dargestellten Messadapters anschließbar sind,

Fig. 6 eine perspektivische Darstellung zweier Messadapter mit jeweils vier Messtoren, an denen ein zu vermessendes Messobjekt (DUT) in Form eines Kabels mit zwei differentiellen Aderpaaren angeschlossen ist.

Fig. 7 ein zu kalibrierendes, nodales Fehlermodell zweier an die Vorkalibrierebene eines VNAs angeschlossener Messadapter, und

Fig. 8 ein zu kalibrierendes, modales Fehlermodell der zwei an die Vorkalibrierebene des VNAs angeschlossenen Messadapter.

Fig. 1 zeigt einen Messadapter 10 mit vier Messtoren für eine Messanordnung, die gemäß dem erfindungsgemäßen Verfahren kalibriert wird, in einer perspektivischen Darstellung.

Eine mittels des erfindungsgemäßen Verfahrens zu kalibrierende Messanordnung 100 mit Messadapter 10 ist schematisch in Fig. 2 dargestellt. Sie umfasst einen vektoriellen 4-Tor-Netzwerkanalysator VNA 20 mit einer kalibrierten Vorkalibrierebene 12 mit vier Messtoren zum Anschließen eines elektrischen Bauteils DUT.

Anstelle eines unmittelbar an die Vorkalibrierebene 12 angeschlossenen 4-Tor-DUTs ist allerdings der Messadapter 10 an die Vorkalibrierebene 12 angeschlossen. Der Messadapter 10 ist dabei zwischen den Netzwerkanalysator 20 und das zu vermessende 4-Tor-DUT 14 zwischengeschaltet. Der Messadapter 10 weist vier Eingangstore 1', 2', 3', 4' zum Anschließen an die Vorkalibrierebene 12 des

Netzwerkanalysators 20 und vier Ausgangstore zum Anschließen des DUTs 14 in der Kalibrierebene 15 auf, er umfasst also vier Messtore 1, 2, 3, 4. Die vier Messtore 1, 2, 3, 4 bilden zwei differentielle Schnittstellen 1/2 und 3/4. Der Messadapter 10 stellt also ein 8-Tor-Fehlernetzwerk 13 dar, das durch eine 8x8 Fehlermatrix $\mathbf{C}_{1,2,3,4}$ mit 64 Fehlertermen beschrieben werden kann. Zur Bestimmung der Streumatrix $\mathbf{S}_{SE}$ des DUTs 14 ohne durch den Messadapter 10 eingeführte systematische Fehler müssen die Fehlerterme der Fehlermatrix $\mathbf{C}_{1,2,3,4}$ bestimmt werden. Dies ist auf besonders einfache und elegante Weise durch das erfindungsgemäße Kalibrierverfahren möglich, das im Folgenden beschrieben wird:

Das hier beschriebene Kalibrierverfahren entwickelt ein neuartiges Vorgehen für eine spezielle Art von Fehlernetzwerken unter Verwendung von 4-Tor-Kalibrierstandards auf Basis eines Selbstkalibrierverfahrens. Adressiert werden damit Messungen von Messobjekten DUT mit vier Toren. Es wird dem Fehlernetzwerk 13 die Eigenschaft zugesprochen, dass jeweils vier Einzelmesstore 1, 2, 3, 4 einen Messadapter 10 bilden und vor bzw. an der Kalibrierebene 15 durch gegebene räumliche Nähe miteinander verkoppelt sein dürfen. Weiterhin weist die Beschreibung eines Messadapters 10 Symmetrie bzgl. der vier Einzelpfade auf.

Bei Austausch der nodalen durch die modale Betrachtung mittels Zusammenfassung von jeweils zwei der vier Messtore 1, 2, 3, 4 wird dadurch eine Entkopplung von Gleichtakt- und Gegentaktbeschreibung erreicht. Sämtliche Fehlernetzwerke sind damit intermodal voneinander entkoppelt. Je Messadapter 10 besteht jedoch weiterhin eine Intramoden-Verkopplung (d.h. in Bezug auf jeweils einen Mode darf Kopplung zwischen den modalen Toren bestehen), die innerhalb der Systemfehlerkorrektur und eines geeigneten Selbstkalibrierverfahrens berücksichtigt werden muss. Nach Bestimmung sämtlicher Fehlernetzwerke von Gleichtakt- und Gegentaktbeschreibung müssen diese in Relation zueinander gesetzt werden. Dieser Vorgang entspricht der Entnormierung von einem der zwei Einzelfehlernetzwerke. Für diesen Zweck nutzt das hier beschriebene Kalibrierverfahren ein jeweils reziprokes Kalibrierelement R, das beide Moden grundsätzlich miteinander verbindet, aber darüber hinaus nur die Eigenschaft der

Reziprozität (Austauschbarkeit der Richtungsabhängigkeit) aufweisen muss. Eine konkrete Realisierung wird ebenfalls präsentiert.

Als Anwendungsbeispiel dient der Messadapter 10 entsprechend Fig. 1. Vorerst folgen sämtliche Wellengrößen sowie resultierende Streuparameter einer nodalen Beschreibung (auch unsymmetrisch oder unbalanciert genannt). Entsprechend den Figuren 1 und 2 werden die für eine modale Beschreibung (auch Mixed-Mode, symmetrisch oder balanciert genannt) notwendigen Torpaare (I , II) sowie zwei Ebenen für den Messplatz definiert. Das DUT 14 besitzt vier nodale Tore und wird mit den in der Fig. 2 angegebenen Wellengrößen bzw. der nodalen 4×4 -Streumatrix $\mathbf{S}_{SE}$ an der Kalibrierebene 15 beschrieben.

Die Vorkalibrierebene 12 wird coaxial mit Standardsteckverbindern bspw. durch einen handelsüblichen Netzwerkanalysator 20 zur Verfügung gestellt und befindet sich in einem kalibrierten Zustand, d.h. herkömmliche Kalibrier- und Systemfehlerkorrekturverfahren kommen zur Anwendung. Die zugehörigen Wellengrößen der hinlaufenden Wellen (a) und der rücklaufenden Wellen (b) dieser Messung sind bei mit einem tiefgestellten „m“ gekennzeichnet. Zwischen der Vorkalibrierebene 12 und der Kalibrierebene 15 werden sämtliche systematische, lineare Fehler durch das 8-Tor-Fehlernetzwerk zusammengefasst, das mit der 8×8 -Fehlermatrix $\mathbf{C}_{1,2,3,4}$ beschrieben wird.

Bei Kenntnis aller Koeffizienten des Fehlernetzwerks kann schließlich die gesuchte Streumatrix $\mathbf{S}_{SE}$ des Messobjekts 14 berechnet werden. Dabei handelt es sich um insgesamt 64 Koeffizienten, die für jede relevante Frequenz bestimmt werden müssen.

Unter Voraussetzung von Linearität aller Elemente wird für eine modale Beschreibung sämtlicher Wellengrößen und der zugehörigen Streuparameter die Gleichtaktbeschreibung (engl. *common mode*) und die Gegentaktbeschreibung (engl. *differential mode*) gewählt. In diesem Zusammenhang wird auf die Veröffentlichung [David E. Bockelman und William R. Eisenstadt. „Combined differential and common-mode scattering parameters: Theory and simulation“, *Microwave Theory and*

Techniques, *IEEE Transactions on* 43.7 (1995), S. 1530-1539] verwiesen, deren Inhalt durch Verweis in die vorliegende Beschreibung aufgenommen wird.

Zu diesem Zweck werden jeweils die Nodaltore 1 und 2, die die erste differentielle Schnittstelle bilden, zu Modaltor I und die Nodaltore 3 und 4, die die zweite differentielle Schnittstelle bilden, zu Modaltor II zusammengefasst. Außerdem wird dem Fehlernetzwerk eine derartige Symmetrie bzgl. der nodalen Eigenschaften von Tor 1 zu 2 und 3 zu 4 unterstellt, dass eine Intermodalverkopplung innerhalb der modalen Fehlernetzwerke vernachlässigbar ist. In der Praxis wird dies durch eine vorkalibrierte Ebene zum Anschluss der Messadaptierung und deren symmetrischen Aufbau gewährleistet. In Fig. 3 ist nun das resultierende Gesamt-Fehlernetzwerk wiedergegeben, das weiterhin eine Intramodalverkopplung beider Moden zwischen Tor I und II berücksichtigt. Lineare Fehler werden im Gegentaktpfad mit einem 4-Tor-Fehlernetzwerk zusammengefasst, das mit der 4x4-Matrix $\mathbf{C}_{I-II,dd}$ beschrieben wird (siehe dazu auch Gl.(8)). Außerdem werden lineare Fehler im Gleichtaktpfad mit einem 4-Tor-Fehlernetzwerk zusammengefasst, das mit der 4x4-Matrix $\mathbf{C}_{I-II,cc}$ beschrieben wird (siehe dazu auch Gl.(9)). Die insgesamt zwei 4-Tor-Fehlernetzwerke beinhalten 32 Fehlerkoeffizienten, die mit der im Folgenden beschriebenen Selbstkalibrieremethode bestimmt werden können. Im Detail erfolgt dabei – wie bei einer Kalibrierung bzw. Systemfehlerkorrektur üblich und zulässig – die Normierung eines beliebigen Fehlerkoeffizienten und schließlich die Bestimmung der verbleibenden 31 Unbekannten.

Im Folgenden wird das Kalibrierverfahren erläutert:

Die Wellengrößen von Fig. 3 in ihrer modalen Darstellung am Messobjekt DUT 14 werden zu Wellen-Vektoren zusammengefasst.

Hinlaufende Wellen:

$\mathbf{a} := [a_{dI}, a_{dII}, a_{cI}, a_{cII}]^T = [\mathbf{a}_d, \mathbf{a}_c]^T$	(1)
---	-----

mit

$\mathbf{a}_d := [a_{dI}, a_{dII}]^T, \mathbf{a}_c := [a_{cI}, a_{cII}]^T$	(2)
--	-----

Rücklaufende Wellen:

$\mathbf{b} := [b_{dl}, b_{dll}, b_{cl}, b_{cII}]^T = [\mathbf{b}_d, \mathbf{b}_c]^T$	(3)
---	-----

mit

$\mathbf{b}_d := [b_{dl}, b_{dll}]^T, \mathbf{b}_c := [b_{cl}, b_{cII}]^T$	(4)
--	-----

Entsprechend definiert sich die modale 4x4-Streumatrix $\mathbf{S}_{MM}$ eines Messobjekts wie folgt:

$\mathbf{b} = \mathbf{S}_{MM} \cdot \mathbf{a} \quad \text{bzw.} \quad \begin{bmatrix} \mathbf{b}_d \\ \mathbf{b}_c \end{bmatrix} = \mathbf{S}_{MM} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{a}_d \\ \mathbf{a}_c \end{bmatrix}$	(5)
---	-----

Diese Streumatrix lässt sich wiederum in 2x2-Einzelmatrizen aufspalten, die das Intra- ($\mathbf{S}_{dd}, \mathbf{S}_{cc}$) und Intermoden- ($\mathbf{S}_{cd}, \mathbf{S}_{dc}$) Verhalten des Messobjekts beschreiben:

$\mathbf{S}_{MM} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{dd} & \mathbf{S}_{dc} \\ \mathbf{S}_{cd} & \mathbf{S}_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{dIdI} & S_{dIdII} & S_{dIcI} & S_{dIcII} \\ S_{dIIIdI} & S_{dIIIdII} & S_{dIIcI} & S_{dIIcII} \\ S_{cIdI} & S_{cIdII} & S_{cIcI} & S_{cIcII} \\ S_{cIIIdI} & S_{cIIIdII} & S_{cIIcI} & S_{cIIcII} \end{bmatrix}$	(6)
---	-----

Die 4x4-Modenkonversionsmatrix des Messobjekts $\mathbf{T}_{MM}$ wird als

$\begin{bmatrix} \mathbf{b}_d \\ \mathbf{a}_d \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{MM} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{a}_c \\ \mathbf{b}_c \end{bmatrix}$	(7)
---	-----

definiert. Sie ähnelt in ihrer Form einer Transmissionsmatrix, verknüpft jedoch statt Einzeltoren nun Einzelmoden und eignet sich in dieser Form zur Kaskadierung von Netzwerken unterschiedlicher Moden (ohne Intermodenkopplung). Diese Beschreibungsform ist essenziell für das weitere Vorgehen (siehe z.B. Gl.(22)) und darüber hinaus als neuwertig herauszustellen.

Die zwei in Fig. 3 eingeführten Fehlernetzwerke (beschrieben durch die Matrizen $\mathbf{C}_{I-II,dd}$ und $\mathbf{C}_{I-II,cc}$) dienen der Verknüpfung der Wellengrößen an Vorkalibrierebene 12 und Kalibrierebene 15:

$\begin{bmatrix} b_{dl} \\ b_{dll} \\ a_{dl} \\ a_{dll} \end{bmatrix} = \mathbf{C}_{I-II,dd} \cdot \begin{bmatrix} b_{m,dl} \\ b_{m,dll} \\ a_{m,dl} \\ a_{m,dll} \end{bmatrix}$	(8)
--	-----

$\begin{bmatrix} a_{cl} \\ a_{cII} \\ b_{cl} \\ b_{cII} \end{bmatrix} = \mathbf{C}_{I-II,cc} \cdot \begin{bmatrix} a_{m,cl} \\ a_{m,cII} \\ b_{m,cl} \\ b_{m,cII} \end{bmatrix}$	(9)
--	-----

Unter Beibehaltung der modalen Beschreibung und zusammengefasst zu einem Gesamtgleichungssystem mit einem Gesamt-Fehlernetzwerk (beschrieben durch eine 8x8-Matrix **C**) wird der Zusammenhang zwischen allen Toren und allen Moden an Vorkalibrierebene 12 und Kalibrierebene 15 beschrieben:

$\begin{bmatrix} \mathbf{b} \\ \mathbf{a} \end{bmatrix} = \mathbf{C} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{b}_m \\ \mathbf{a}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{E} & \mathbf{F} \\ \mathbf{G} & \mathbf{H} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{b}_m \\ \mathbf{a}_m \end{bmatrix}$	(10)
--	------

Dabei gelte folgende Definition der gemessenen Wellengrößenvektoren:

$\mathbf{a}_m := [a_{m,dI}, a_{m,dII}, a_{m,cI}, a_{m,cII}]^T$	(11)
$\mathbf{b}_m := [b_{m,dI}, b_{m,dII}, b_{m,cI}, b_{m,cII}]^T$	(12)

Für eine übersichtliche Darstellung wird für die folgende Beschreibung die Matrix **C** entsprechend Gl.(10) in die vier 4x4-Einzelmatrizen **E**, **F**, **G**, **H** zerlegt. Ausmultipliziert und unter Anwendung von Gl.(5) ergibt sich damit:

$\mathbf{E}\mathbf{b}_m + \mathbf{F}\mathbf{a}_m = \mathbf{S}_{MM} (\mathbf{G}\mathbf{b}_m + \mathbf{H}\mathbf{a}_m)$	(13)
---	------

Diese Gleichung beschreibt den Zusammenhang aller Wellengrößen an der Vorkalibrierebene und der Streumatrix eines Messobjektes an der Kalibrierebene für die Anregung eines Mode an einem Tor an der Vorkalibrierebene.

Der Zusammenhang bei Anregung sämtlicher Moden an sämtlichen Toren wird durch das Ersetzen der gemessenen Wellengrößenvektoren (**a_m**, **b_m**) in Gl.(13) durch die gemessenen 4x4-Wellengrößenmatrizen (**A_m**, **B_m**), die Messdaten sämtlicher Anregungen enthalten, erreicht:

$\mathbf{E}\mathbf{B}_m + \mathbf{F}\mathbf{A}_m = \mathbf{S}_{MM} (\mathbf{G}\mathbf{B}_m + \mathbf{H}\mathbf{A}_m)$	(14)
---	------

Die Messmatrizen definieren sich dabei wie folgt (hochgestellt in Klammern kennzeichnet die jeweilige Anregung):

$\mathbf{A}_m = \begin{bmatrix} a_{m,dI}^{(dI)} & a_{m,dI}^{(dII)} & a_{m,dI}^{(cI)} & a_{m,dI}^{(cII)} \\ a_{m,dII}^{(dI)} & a_{m,dII}^{(dII)} & a_{m,dII}^{(cI)} & a_{m,dII}^{(cII)} \\ a_{m,cI}^{(dI)} & a_{m,cI}^{(dII)} & a_{m,cI}^{(cI)} & a_{m,cI}^{(cII)} \\ a_{m,cII}^{(dI)} & a_{m,cII}^{(dII)} & a_{m,cII}^{(cI)} & a_{m,cII}^{(cII)} \end{bmatrix}$	(15)
---	------

$\mathbf{B}_m = \begin{bmatrix} b_{m,dl}^{(dl)} & b_{m,dl}^{(dll)} & b_{m,dl}^{(cl)} & b_{m,dl}^{(cII)} \\ b_{m,dII}^{(dl)} & b_{m,dII}^{(dll)} & b_{m,dII}^{(cl)} & b_{m,dII}^{(cII)} \\ b_{m,cl}^{(dl)} & b_{m,cl}^{(dll)} & b_{m,cl}^{(cl)} & b_{m,cl}^{(cII)} \\ b_{m,cII}^{(dl)} & b_{m,cII}^{(dll)} & b_{m,cII}^{(cl)} & b_{m,cII}^{(cII)} \end{bmatrix}$	(16)
---	------

Mit der Definition der Teilmatrizen von $\mathbf{C}$ nach Gl.(10) und Verknüpfung der Wellengrößen durch die Einzel-Fehlernetzwerke nach Gl.(8), (9) ergibt sich die Aufstellung der Einzel-Fehlernetzwerke in Abhängigkeit der Fehlerkoeffizienten der Einzelmatrizen von $\mathbf{E}$, $\mathbf{F}$, $\mathbf{G}$, $\mathbf{H}$ wie folgt:

$\mathbf{C}_{I-II,dd} = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & F_{11} & F_{12} \\ E_{21} & E_{22} & F_{21} & F_{22} \\ G_{11} & G_{12} & H_{11} & H_{12} \\ G_{21} & G_{22} & H_{21} & H_{22} \end{bmatrix}$	(17)
$\mathbf{C}_{I-II,cc} = \begin{bmatrix} H_{33} & H_{34} & G_{33} & G_{34} \\ H_{43} & H_{44} & G_{43} & G_{44} \\ F_{33} & F_{34} & E_{33} & E_{34} \\ F_{43} & F_{44} & E_{43} & E_{44} \end{bmatrix}$	(18)

Sämtliche weiteren Matrixelemente von $\mathbf{E}$, $\mathbf{F}$, $\mathbf{G}$, $\mathbf{H}$ betragen durch die der Messadaptierung zugesprochenen Modenentkopplung Null.

Durch die Modifikation bekannter Selbstkalibrierverfahren für das 15-Term-Fehlermodell (z.B. ein nodales TMRG-Kalibrierverfahren, wie es in der Veröffentlichung [A. Gronefeld und B. Schiek: „Network-analyzer self-calibration with four or five standards for the 15-term error model“, 1997, IEEE MTT-S *International Microwave Symposium Digest*, S. 1655-1658] beschrieben ist, oder ein nodales LRM-Kalibrierverfahren, wie es in der Veröffentlichung [K. Silvonen: „LMR 16-a self-calibration procedure for a leaky network analyzer“, IEEE *Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 45.7 (1997), S. 1041-1049] beschrieben ist), können zunächst jeweils 15 der 16 Fehlerterme der beiden Fehlermatrizen ($\mathbf{C}_{I-II,dd}$, $\mathbf{C}_{I-II,cc}$) bestimmt werden. Die jeweiligen nodalen Kalibrierverfahren sind dafür auf modale Wellengrößen, modale Fehlernetzwerke sowie modale Kalibrierstandards anzupassen (Doppelt-Nodal-TMRG), wie es im Folgenden noch im Detail erläutert wird. Es erfolgt jeweils eine Normierung (einmal pro modalem Fehlernetzwerk). Für die Kenntnis des vollständigen Fehlernetzwerkes ($\mathbf{C}$) ist folglich eine Entnormierung von einem der beiden Einzelfehlernetzwerke notwendig. Ohne Beschränkung der

Allgemeinheit soll die Entnormierung in Bezug auf das Fehlernetzwerk $\mathbf{C}_{I-II,dd}$ erfolgen. Demnach wird das zweite Fehlertor $\mathbf{C}_{I-II,cc}$ bis auf einen Faktor $\alpha_{I-II,cc}$ bestimmt, so dass gilt:

$\mathbf{C}_{I-II,cc} = \alpha_{I-II,cc} \tilde{\mathbf{C}}_{I-II,cc} = \alpha_{I-II,cc} \begin{bmatrix} \tilde{H}_{33} & \tilde{H}_{34} & \tilde{G}_{33} & \tilde{G}_{34} \\ \tilde{H}_{43} & \tilde{H}_{44} & \tilde{G}_{43} & \tilde{G}_{44} \\ \tilde{F}_{33} & \tilde{F}_{34} & \tilde{E}_{33} & \tilde{E}_{34} \\ \tilde{F}_{43} & \tilde{F}_{44} & \tilde{E}_{43} & 1 \end{bmatrix}$	(19)
---	------

Hier erfolgte ohne Beschränkung der Allgemeinheit die Normierung auf das Element E_{44} .

Die Bestimmung der Unbekannten $\alpha_{I-II,cc}$ soll durch Einsatz eines reziproken, aber darüber hinaus unbekannten Kalibrierstandards R erfolgen. Dafür wird auf eine Unknown-Thru-Methode zurückgegriffen. Grundsätzlich basiert die Methode auf der Tatsache, dass die Determinante der Transmissionsmatrix eines beliebigen, reziproken Netzwerkes jeweils Eins ergibt und damit in einer Kaskadendarstellung als bekannt angenommen werden kann. In einem weiteren Schritt resultiert dann die unbekannte Größe zur Entnormierung mit lediglich einer Phasenmehrdeutigkeit, die bei ungefährender Kenntnis der geometrischen Länge des Netzwerkes aufgelöst werden kann.

Zur Formulierung der Kaskadengleichung werden in Gl.(7) die Gleichungen (8) und (9) eingesetzt:

$\mathbf{C}_{I-II,dd} \begin{bmatrix} b_{m,dI} \\ b_{m,dII} \\ a_{m,dI} \\ a_{m,dII} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{I-II,MM} \mathbf{C}_{I-II,cc} \begin{bmatrix} a_{m,cI} \\ a_{m,cII} \\ b_{m,cI} \\ b_{m,cII} \end{bmatrix}$	(20)
--	------

Analog zu Gl.(13) beschreibt diese Gleichung den Zusammenhang sämtlicher Größen für eine (beliebige) Anregung eines Mode an einem Tor. Werden sämtliche Anregungen (Anregung sämtlicher Moden an sämtlichen Toren) betrachtet, können für deren Berücksichtigung alle Wellengrößen in ihrer jeweiligen Anregungsvariante spaltenweise aneinandergereiht werden:

$$\mathbf{C}_{I-II,dd} \begin{bmatrix} b_{m,dl}^{(dl)} & b_{m,dl}^{(dll)} & b_{m,dl}^{(cl)} & b_{m,dl}^{(cII)} \\ b_{m,dII}^{(dl)} & b_{m,dII}^{(dll)} & b_{m,dII}^{(cl)} & b_{m,dII}^{(cII)} \\ a_{m,dl}^{(dl)} & a_{m,dl}^{(dll)} & a_{m,dl}^{(cl)} & a_{m,dl}^{(cII)} \\ a_{m,dII}^{(dl)} & a_{m,dII}^{(dll)} & a_{m,dII}^{(cl)} & a_{m,dII}^{(cII)} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{I-II,MM} \mathbf{C}_{I-II,cc} \begin{bmatrix} a_{m,cl}^{(dl)} & a_{m,cl}^{(dll)} & a_{m,cl}^{(cl)} & a_{m,cl}^{(cII)} \\ a_{m,cII}^{(dl)} & a_{m,cII}^{(dll)} & a_{m,cII}^{(cl)} & a_{m,cII}^{(cII)} \\ b_{m,cl}^{(dl)} & b_{m,cl}^{(dll)} & b_{m,cl}^{(cl)} & b_{m,cl}^{(cII)} \\ b_{m,cII}^{(dl)} & b_{m,cII}^{(dll)} & b_{m,cII}^{(cl)} & b_{m,cII}^{(cII)} \end{bmatrix} \quad (21)$$

Ein Umstellen der Gleichung bewirkt die Trennung von gemessenen Wellengrößen an der Vorkalibrierebene und der Kaskade von Fehlernetzwerken und Messobjekt:

$$\begin{bmatrix} b_{m,dl}^{(dl)} & b_{m,dl}^{(dll)} & b_{m,dl}^{(cl)} & b_{m,dl}^{(cII)} \\ b_{m,dII}^{(dl)} & b_{m,dII}^{(dll)} & b_{m,dII}^{(cl)} & b_{m,dII}^{(cII)} \\ a_{m,dl}^{(dl)} & a_{m,dl}^{(dll)} & a_{m,dl}^{(cl)} & a_{m,dl}^{(cII)} \\ a_{m,dII}^{(dl)} & a_{m,dII}^{(dll)} & a_{m,dII}^{(cl)} & a_{m,dII}^{(cII)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{m,cl}^{(dl)} & a_{m,cl}^{(dll)} & a_{m,cl}^{(cl)} & a_{m,cl}^{(cII)} \\ a_{m,cII}^{(dl)} & a_{m,cII}^{(dll)} & a_{m,cII}^{(cl)} & a_{m,cII}^{(cII)} \\ b_{m,cl}^{(dl)} & b_{m,cl}^{(dll)} & b_{m,cl}^{(cl)} & b_{m,cl}^{(cII)} \\ b_{m,cII}^{(dl)} & b_{m,cII}^{(dll)} & b_{m,cII}^{(cl)} & b_{m,cII}^{(cII)} \end{bmatrix}^{-1} = \mathbf{C}_{I-II,dd}^{-1} \mathbf{T}_{I-II,MM} \mathbf{C}_{I-II,cc} \quad (22)$$

Nach Zusammenfassung der linken Seite zur einer Messmatrix

$$\mathbf{P}_{I-II} = \begin{bmatrix} b_{m,dl}^{(dl)} & b_{m,dl}^{(dll)} & b_{m,dl}^{(cl)} & b_{m,dl}^{(cII)} \\ b_{m,dII}^{(dl)} & b_{m,dII}^{(dll)} & b_{m,dII}^{(cl)} & b_{m,dII}^{(cII)} \\ a_{m,dl}^{(dl)} & a_{m,dl}^{(dll)} & a_{m,dl}^{(cl)} & a_{m,dl}^{(cII)} \\ a_{m,dII}^{(dl)} & a_{m,dII}^{(dll)} & a_{m,dII}^{(cl)} & a_{m,dII}^{(cII)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{m,cl}^{(dl)} & a_{m,cl}^{(dll)} & a_{m,cl}^{(cl)} & a_{m,cl}^{(cII)} \\ a_{m,cII}^{(dl)} & a_{m,cII}^{(dll)} & a_{m,cII}^{(cl)} & a_{m,cII}^{(cII)} \\ b_{m,cl}^{(dl)} & b_{m,cl}^{(dll)} & b_{m,cl}^{(cl)} & b_{m,cl}^{(cII)} \\ b_{m,cII}^{(dl)} & b_{m,cII}^{(dll)} & b_{m,cII}^{(cl)} & b_{m,cII}^{(cII)} \end{bmatrix}^{-1} \quad (23)$$

resultiert die Kaskadendarstellung mit Gl.(19) schließlich zu:

$$\mathbf{P}_{I-II} = \alpha_{I-II,cc} \mathbf{C}_{I-II,dd}^{-1} \mathbf{T}_{I-II,MM} \tilde{\mathbf{C}}_{I-II,cc} \quad (24)$$

Nun soll die Determinante von Gl.(24) berechnet werden, so dass auf der rechten Seite der Gleichung das Produkt der Determinanten sämtlicher Einzelmatrizen sowie der Unbekannten $\alpha_{I-II,cc}$ in ihrer vierten Potenz steht. Dabei soll die Determinante der Modenkonzversionsmatrix $\mathbf{T}_{MM}$ ausgedrückt durch die Streuparameter (siehe Gl.(6)) des Messobjektes vorab betrachtet werden:

$$\det(\mathbf{T}_{MM}) = \frac{S_{dlcl} S_{dlcII} - S_{dlcII} S_{dlcl}}{S_{clcl} S_{cllII} - S_{cllII} S_{clcl}} \quad (25)$$

Dieser Ausdruck steht nicht mehr in Abhängigkeit der Reflektionskoeffizienten (S_{dldl} , S_{clcl} , ...) so dass ein nahezu beliebig angepasster Standard eingesetzt werden kann. Im Falle eines reziproken Standards gilt für die noch verbleibenden Streuparameter:

- $S_{dlcl} = S_{clcl}$
- $S_{dlcII} = S_{clcl}$
- $S_{dldl} = S_{clcl}$

- $S_{dIIcl} = S_{cdII}$

Die Determinante $\det(\mathbf{T}_{MM})$ resultiert somit zu Eins im Falle einer reziproken Verbindung, wobei die folgende Einschränkung gilt: Das Produkt $S_{dIcl} S_{dIIcl}$ muss zum Produkt $S_{dIcl} S_{dIIcl}$ zur Vermeidung einer Singularität verschieden sein. Dafür wird ein Kalibrierstandard vorgeschlagen, der eine hohe Verkopplung von Gleich- und Gegentaktmode an jeweils einem modalen Tor aufweist. Konkret wird dieser durch Einsatz von nicht-idealem Kurzschluss an einem nodalen Tor und nicht-idealem Leerlauf an dem verbleibenden nodalen Tor erreicht (siehe R-Standard in Fig. 5). Somit gilt $S_{dIcl} \approx S_{dIIcl} \approx \pm 1$ und $S_{dIcl} \approx S_{dIIcl} \approx 0$.

Erneut wird nun die Determinante der Kaskadendarstellung nach Gl.(24) betrachtet, die aufgrund des Einsatz des reziproken Standards zu folgendem Ausdruck resultiert:

$\det(\mathbf{P}_{I-II}) = \alpha_{I-II,cc}^4 \cdot \det(\mathbf{C}_{I-II,dd}^{-1}) \cdot \det(\tilde{\mathbf{C}}_{I-II,cc})$	(26)
---	------

Zur gesuchten Unbekannten $\alpha_{I-II,cc}$ aufgelöst ergibt sich damit folgender Ausdruck:

$\alpha_{I-II,cc} = \sqrt[4]{\frac{\det(\mathbf{P}_{I-II}) \cdot \det(\mathbf{C}_{I-II,dd})}{\det(\tilde{\mathbf{C}}_{I-II,cc})}} \cdot \exp\left(j \frac{\pi}{2} \mu\right) \quad \text{mit } \mu = \{0, 1, 2, 3\}$	(27)
--	------

Aus den vier möglichen Lösungen für $\alpha_{I-II,cc}$ wird die korrekte durch ungefähres Wissen des eingesetzten Standards (z.B. Phasenbeziehung beider Moden) gewählt. Der Kalibrierprozess wird schließlich unter Anwendung von Gl.(19) für die Fehlernetzwerke $\mathbf{C}_{I-II,dd}$ und $\mathbf{C}_{I-II,cc}$ abgeschlossen. Der Einsatz dieser Kalibriermethode mit reziprokem Standard R und den daraus resultierenden geringen Anforderungen an das Kalibrierelement ist als besonders vorteilhaft und elegant zu bewerten.

Nun sind alle Fehlertore vollständig bekannt. Eine Systemfehlerkorrektur und damit die korrigierte Bestimmung der Streuparameter eines Messobjektes DUT 14 kann durch Umstellen von Gl.(14) nach $\mathbf{S}_{MM}$ erreicht werden:

$\mathbf{S}_{MM} = (\mathbf{EB}_m + \mathbf{FA}_m)(\mathbf{GB}_m + \mathbf{HA}_m)^{-1}$	(28)
---	------

Mittels dem Fachmann bekannter linearer Umformung kann aus diesem Ergebnis auch die nodale Streumatrix berechnet werden.

Im Folgenden wird beschrieben, wie ein nodales- 15-Term Kalibrierverfahren auf den modalen Fall angewendet werden kann. Als Beispiel soll das nodale TMRG-Verfahren verwendet werden, hier als Doppelt-Nodal-TMRG-Verfahren bzw. als modales TMRG-Verfahren bezeichnet:

Es wird ein Kalibrierverfahren benötigt, das die Selbstkalibrierung eines modalen 15-Term-Fehlermodells bei Intermodenentkopplung (vollverkoppeltes Fehlermodell für zwei Tore je Mode) mit konzentrierten Elementen leistet. Im nodalen Fall kann ein vollverkoppeltes Fehlermodell ($\mathbf{C}_n$, siehe dazu Fig. 4a, 4b, jeweils links) mit zwei Messtoren mithilfe des TMRG-Verfahrens kalibriert werden. Es wird auf die oben bereits genannte Veröffentlichung von A. Gronefeld und B. Schiek verwiesen. Für das erfindungsgemäße Kalibrierverfahren ist eine Übertragung auf den modalen Fall erforderlich, die im Folgenden beispielhaft aufgezeigt wird:

Für den Ausgangsfall des nodalen TMRG-Verfahrens zeigen Fig. 4a und 4b (jeweils links) das Fehlermodell: die zwei Eingangstore (m,1 und m,2) sind mit den zwei zugänglichen Messtoren 1, 2 in der Kalibrierebene mit einem Fehlernetzwerk (beschrieben mit 4x4-Matrix $\mathbf{C}_n$) verknüpft. Das Kalibrierverfahren sieht den Anschluss der vier folgenden unterschiedlichen Zweitor-Reflexionsstandards in der Kalibrierebene an den beiden Messtoren 1 und 2 vor (entsprechend Fig. 4a links):

- Tor 1: $\Gamma_{n,a} \approx 1$ (realer, unbekannter Leerlauf), Tor 2: $\Gamma_{n,b} \approx 0$ (realer Wellensumpf)
- Tor 1: $\Gamma_{n,a} \approx 0$ (realer Wellensumpf), Tor 2: $\Gamma_{n,b} \approx -1$ (realer, unbekannter Kurzschluss)
- Tor 1: $\Gamma_{n,a} \approx -1$ (realer, unbekannter Kurzschluss), Tor 2: $\Gamma_{n,b} \approx 1$ (realer, unbekannter Leerlauf)
- Tor 1: $\Gamma_{n,a} \approx 1$ (realer, unbekannter Leerlauf), Tor 2: $\Gamma_{n,b} \approx -1$ (realer, unbekannter Kurzschluss)

Ferner ist eine Durchverbindung Thru beider Tore 1, 2 vorgesehen (entsprechend Fig. 4b links: $S_{21}=1$).

Die Figuren 4a und 4b (jeweils Mitte) stellen nun das aus Fig. 3 bekannte Fehlermodell einer Viertormessung bei modaler Betrachtung und der oben unterstellten Symmetrieeigenschaften des Messadapters dar. Zur Anwendung des TMRG-Verfahrens für das differentielle Fehlernetzwerk (beschrieben mit 4x4-Matrix $\mathbf{C}_{dd}$) müssen analog zur Vorgehensweise beim nodalen TMRG-Verfahren folgende Zweitor-Reflexionsstandards (entsprechend Abb. 4b Mitte) angeschlossen werden:

- Tor dl : $\Gamma_{dd,a} \approx 1$ (realer, unbekannter Leerlauf), Tor dll : $\Gamma_{dd,b} \approx 0$ (realer Wellensumpf)
- Tor dl : $\Gamma_{dd,a} \approx 0$ (realer Wellensumpf), Tor dll : $\Gamma_{dd,b} \approx -1$ (realer, unbekannter Kurzschluss)
- Tor dl : $\Gamma_{dd,a} \approx -1$ (realer, unbekannter Kurzschluss), Tor dll : $\Gamma_{dd,b} \approx 1$ (realer, unbekannter Leerlauf)
- Tor dl : $\Gamma_{dd,a} \approx 1$ (realer, unbekannter Leerlauf), Tor dll : $\Gamma_{dd,b} \approx -1$ (realer, unbekannter Kurzschluss).

Die Bestimmung dieser Größen gelingt durch Anschließen von Kalibrierstandards an die tatsächlich vorliegenden nodalen Messtore 1, 2, 3, 4 gemäß der in Fig. 4a (rechts) dargestellten Anordnung. Dabei wird jeweils der eine Kalibrierstandard an beide Messtore 1, 2 der ersten differentiellen Schnittstelle und der andere Kalibrierstandard an beide Messtore 3, 4 der zweiten differentiellen Schnittstelle angeschlossen, oder umgekehrt, was aus den folgenden Gründen möglich ist:

Für die Synthese der tatsächlichen/realen Kalibrierstandards in ihrer nodalen Realisierung wird der Ausdruck für den jeweiligen differentiellen Reflexionsfaktor gemäß dem Lehrwerk [Holger Heuermann, „Hochfrequenztechnik: Komponenten für High-Speed- und Hochfrequenzschaltungen“, Springer 2009] betrachtet. Für den Reflexionsfaktor an Tor dl gilt $\Gamma_{dd,a} = (S_{11} + S_{22})/2 = \Gamma_{n,a}$, d.h. bei Anschluss von zwei identischen Eintor-Reflexionsstandards an die nodalen Tore 1 und 2 von Fig. 4a (rechts) wird eben jener Reflexionsfaktor am differentiellen Tor l realisiert. Analog gilt

dies auch für das differentielle Tor // in Verbindung mit den nodalen Messtoren 3 und 4, da $\Gamma_{dd,b} = (S_{33}+S_{44})/2 = \Gamma_{n,b}$ gilt.

Außerdem muss eine Durchverbindung zwischen den differentiellen Toren dI und dII gemäß Fig. 4b (rechts) hergestellt werden. Betrachtet wird auch zu diesem Zweck die Berechnung des modalen Streuparameters aus den modalen Parametern: $S_{dII dI} = (S_{31} - S_{41} - S_{32} + S_{42})/2$. Mit einer doppelten Verbindung ($S_{31} = S_{42} = 1$, $S_{41} = S_{32} = 0$, siehe auch Fig. 4b, rechts) resultiert dieser zu $S_{dII dI} = 1$. Die Selbstkalibrierung des Gleichtaktfehlermodells kann analog mit der gleichen nodalen Beschaltung durchgeführt werden, da gilt: $\Gamma_{cc,a} = (S_{11} + S_{22})/2 = \Gamma_{n,a}$, $\Gamma_{cc,b} = (S_{33} + S_{44})/2 = \Gamma_{n,b}$, $S_{cII cI} = (S_{31} + S_{41} + S_{32} + S_{42})/2$.

Als direkte Folgerung resultieren die nodalen Viertor-Kalibrierstandards nach Fig. 5 für eine doppelt-differentielle Schnittstelle. Dabei ist die Nummerierung der Messtore, die derjenigen der Fig. 2 entspricht, in Fig. 5 unten angegeben.

Eingesetzt werden als Kalibrierstandards also ein nicht-idealer Kurzschluss ("Short") und ein nicht-idealer Leerlauf ("Open"). Als Impedanzstandard dient ein Wellensumpf ("Match"). Die Durchverbindung ("Thru") besitzt eine bekannte räumliche Ausdehnung. Neuartig ist dabei die Anwendung einer doppelten TMRG-Kalibrierung je Adapter mit vier nodalen bzw. zwei modalen Toren. Zu diesem Zweck werden die vorgeschlagenen nodalen Kalibrierstandards Thru, Short-Open (SO), Match-Open (MO), Open-Short (OS) und Short-Match (SM) doppelt aufgebaut, so dass der jeweilige Zweitord-Kalibrierstandard nun modal betrachtet an jedem der beiden Moden-Fehlernetzwerke erscheint.

Der in Fig. 5 unten rechts dargestellte R-Standard wird nicht für die eigentliche TMRG-Kalibrierung verwendet, sondern dient der anschließenden Verknüpfung der modal-getrennten Fehlernetzwerke.

Die vorgestellte Modifikation des Kalibrierverfahrens zur Bestimmung der Fehlerkoeffizienten eines modalen Fehlermodells sowie die zugehörigen Viertor-Kalibrierstandards sind als besonders vorteilhaft und neuartig zu bewerten.

Ablauf der Kalibrierung:

Vorausgesetzt wird ein vorkalibrierter Netzwerkanalysator 20 und ab der gegebenen Vorkalibrierebene 12 ein vorliegendes Fehlernetzwerk 13 mit denen oben beschriebenen Symmetrie-Eigenschaften, das bei modaler Repräsentation wiederum eine Intermodalentkopplung sämtlicher Messtore erreicht. An den jeweiligen Messadaptern 10 darf weiterhin eine Intramoden-Verkopplung existieren. Sämtliche Messungen und nachfolgende Berechnungen können auf Basis von nodalen oder modalen Messungen erfolgen. Unter Voraussetzung von Linearität erfolgt bei den nodalen Messungen eine nachträgliche Berechnung der modalen Messwerte.

Der eigentliche Ablauf des erfindungsgemäßen Kalibrierverfahrens kann wie folgt zusammengefasst werden:

1. Anwendung der oben erläuterten doppelten TMRG-Kalibrierung bei modaler Betrachtung oder eines anderen 15-Term-Kalibrierverfahrens auf den Messadapter 10 liefert die Fehlerterme der Fehlermatrizen $\mathbf{C}_{I-II,dd}$ sowie $\tilde{\mathbf{C}}_{I-II,cc}$
2. Einsatz des Reziprok-Standards R mit hoher Modenkonzersion an dem Messadapter 10 liefert den Wert des Multiplikationsfaktors $\alpha_{I-II,cc}$; dadurch Entnormierung von $\tilde{\mathbf{C}}_{I-II,cc}$ zu $\mathbf{C}_{I-II,cc}$

Die Vorteile der vorliegenden Erfindung können wie folgt zusammengefasst werden:

Das dargelegte Kalibrierverfahren und die dadurch mögliche Systemfehlerkorrektur leisten die Bestimmung der vollständigen modalen Streumatrix eines elektrischen Bauteils DUT 10 mit zwei differentiellen Schnittstellen (4 Toren) wie etwa eines HSD-Steckverbinders oder eines HSD-Kabels mit zwei differentiellen Aderpaaren. Zu diesem Zweck wird der Einfluss einer Messadaptierung zwischen den Koaxial-Schnittstellen eines Netzwerkanalysators und den doppelt differentiellen Schnittstellen des Messadapters rechnerisch kompensiert. Das Verfahren ist mit einer beliebigen Anzahl von Messadaptern (mit jeweils vier Messtoren) anwendbar. Begründet durch das eingesetzte Selbstkalibrierprinzip werden nur geringe

Ansprüche an die zu verwendenden Kalibrierstandards gestellt. Für die korrekte Funktion sollen folgende Bedingungen erfüllt sein:

- Die Vorkalibrierung des Netzwerkanalysators 20 an den Koaxial-Schnittstellen (Vorkalibrierebene 12) muss ausreichend gut sein, so dass die Symmetrie der Messadapter ausgenutzt werden kann. Abweichungen führen zu einer reduzierten Messdynamik.
- Die Messadapter 10 sollen nur eine geringe bzw. keine Modenkonversion aufweisen, da diese innerhalb des Fehlernetzwerks nicht abgebildet wird. Abweichungen führen zu einer reduzierten Messdynamik (in etwa auf Niveau der Modenkonversion des Messadapters) in Bezug auf die Modenkonversions-Streuparameter. Der Einfluss dieser Modellabweichung auf weitere Streuparameter ist als gering zu bewerten.
- Die für die Viertor-Kalibrierstandards eingesetzten nodalen Reflektionselemente (realer Kurzschluss, realer Leerlauf, Impedanzstandard) sollen sich auf allen Viertor-Standards identisch verhalten. Abweichungen führen zu einer reduzierten Messdynamik und zu Messfehlern in Bezug auf alle Streuparameter. Dies gilt nicht für den Reziprok-Standard.
- Die Durchverbindung Thru soll elektrisch bekannt sein (Länge und Dämpfung). Die unzutreffende Annahme einer idealen Verbindung führt zur geringfügigen Verschiebung der Referenzebene und zu Messfehlern in Bezug auf sämtliche Transmissions-Streuparameter.

Im Folgenden soll kurz zusammengefasst werden, wie das oben für den Einadapterfall erläuterte Kalibrierverfahren auf zwei Messadapter erweitert werden kann. Eine entsprechende Erweiterung auf mehr als zwei Messadapter ist analog möglich:

Von besonderem technischem Interesse ist die Verwendung von zwei Messadaptern 10, 10' mit jeweils zwei differentiellen Schnittstellen (also insgesamt acht Messtoren 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 mit den beiden differentiellen Schnittstellen 1/2, 3/4 des ersten Messadapters 10 und den beiden differentiellen Schnittstellen 5/6, 7/8 des zweiten Messadapters 10'). Auf diese Weise können Messobjekte mit zwei doppelt-

differentiellen Schnittstellen (z.B. Messung des Übertragungsverhaltens eines vieradrigen Kabels, siehe Fig. 6) charakterisiert werden.

Wie in Fig. 7 besonders deutlich dargestellt ist, werden zwischen der Vorkalibrierebene 12 und der Kalibrierebene 15 für jeden der beiden Messadapter 10, 10' sämtliche systematische, lineare Fehler durch ein 8-Tor-Fehlernetzwerk zusammengefasst, das mit der 8x8-Matrix $\mathbf{C}_{1,2,3,4}$ bzw. $\mathbf{C}_{5,6,7,8}$ beschrieben wird. Eine elektrische Kopplung zwischen den Einzeladaptern wird aufgrund räumlicher Trennung nicht berücksichtigt. An der Kalibrierebene 15 befindet sich schließlich das durch seine nodale 8x8-Streumatrix $\mathbf{S}_{SE}$ beschriebene Messobjekt DUT 14. Die Anzahl der unbekannten Fehlerkoeffizienten beträgt für den Messaufbau mit zwei Adaptern 128.

Mit einem zu dem oben beschriebenen Einadapterfall analogen Vorgehen kann auch für das Fehlermodell für zwei Messadapter ein modales Fehlermodell unter erneuter Voraussetzung von Symmetrie innerhalb der Einzeladapter erreicht werden. Es resultiert das Fehlermodell nach Fig. 8, das eine Intramodalverkopplung beider Moden zwischen Tor I und II und zwischen Tor III und IV berücksichtigt. Die jeweilige Intermodenkopplung sei erneut vernachlässigbar gering. Die zugehörigen vier Einzel-4-Tor-Fehlernetzwerke beinhalten jeweils 64 Fehlerkoeffizienten und können mit dem folgenden Vorgehen bestimmt werden.

Das Vorgehen für den Zwei-Messadapter-Fall wird an dieser Stelle lediglich skizziert, da die notwendigen Grundlagen und die mathematischen Methoden bereits vom Ein-Adapter-Fall bekannt sind. Es wird erneut die Verwendung von konzentrierten Kalibrierelementen bei Einsatz von Selbstkalibriermethoden adressiert. Konkret werden beide Adapter separat mit dem oben beschriebenen Kalibrierverfahren kalibriert (Modal-TMRG und Reziprok-Standard). Dabei kommt jeweils der Satz an Kalibrierstandards nach Fig. 5 zum Einsatz. Im Anschluss müssen die Fehlernetzwerke der beiden Messadapter 10, 10' miteinander in Relation gesetzt werden, was wiederum einer Entnormierung entspricht. Auch für diese Aufgabe kann ein Verfahren mit Reziprok-Standard R_2 bzw. ein Unknown-Thru-Ansatz verwendet werden. Im Detail sind folgende Maßnahmen zur Erweiterung des Kalibrier- und

Messverfahrens für den Zwei-Adapter-Fall notwendig, wobei bereits das modale Fehlermodell nach Fig. 8 gelten soll:

1. Unter Beibehaltung der Moden Gleich- und Gegentakt werden analog zu Gl.(5) sämtliche Wellengrößen definiert, die schließlich die Formulierung einer modalen 8x8-Streumatrix des Messobjekts mit acht Toren zulassen.

2. Der Zusammenhang zwischen Wellengrößen an Vorkalibrierebene und Kalibrierebene wird an dem zweiten Messadapter 10' mit den Modaltoren III und IV analog zu Gl.(8),(9) mit Fehlerviertoren verknüpft, die durch die 8x8-Matrizen $\mathbf{C}_{III-IV,dd}$ und $\mathbf{C}_{III-IV,cc}$ beschrieben werden. Es gilt folglich auch ein Gesamt-Fehlernetzwerk entsprechend Gl.(10), wobei die beschreibende Matrix $\mathbf{C}$ nun die Größe 16x16 besitzt. Es erfolgt die Zerlegung in die vier 8x8-Einzelmatrizen $\mathbf{E}$, $\mathbf{F}$, $\mathbf{G}$, $\mathbf{H}$, die bei Betrachtung sämtlicher Anregungen und Verwendung von 8x8-Wellengrößenmatrizen analog zu Gl.(14) den Zusammenhang zwischen Streumatrix des Messobjekts, der Messdaten und den Fehlernetzwerken herstellt.

3. Ein Koeffizientenvergleich ermöglicht analog zu Gl.(17),(18) das Aufstellen der Fehlernetzwerke $\mathbf{C}_{I-II,dd}$, $\mathbf{C}_{I-II,cc}$, $\mathbf{C}_{III-IV,dd}$ und $\mathbf{C}_{III-IV,cc}$ in Abhängigkeit von Elementen der Einzelmatrizen $\mathbf{E}$, $\mathbf{F}$, $\mathbf{G}$, $\mathbf{H}$. 64 der insgesamt 256 Elemente von $\mathbf{C}$ sind dabei von Null verschieden.

4. Von den Fehlernetzwerken $\mathbf{C}_{I-II,dd}$, $\mathbf{C}_{I-II,cc}$, $\mathbf{C}_{III-IV,dd}$ und $\mathbf{C}_{III-IV,cc}$ werden mit dem oben beschriebenen Modal-TMRG-Selbstkalibrierverfahren oder einem anderen 15-Term-Kalibrierverfahren jeweils 15 der 16 Fehlerterme bestimmt, d.h. es finden vier Normierungen statt, wobei jedoch nur eine Normierung zulässig ist. Entsprechend müssen die drei zugehörigen Entnormierungsfaktoren $\alpha_{I-II,cc}$, $\alpha_{III-IV,dd}$, $\alpha_{III-IV,cc}$ bestimmt werden (ohne Beschränkung der Allgemeinheit wurde dabei vorausgesetzt, dass das normierte Element in $\mathbf{C}_{I-II,dd}$ enthalten ist) und eine Entnormierung der Fehlernetzwerke $\mathbf{C}_{I-II,cc}$, $\mathbf{C}_{III-IV,dd}$ und $\mathbf{C}_{III-IV,cc}$ erfolgen.

5. Die Vorgehensweise zur Bestimmung von $\alpha_{I-II,cc}$ unter Verwendung eines reziproken Standards R sowie dessen Realisierung ist oben bereits beschrieben. Für

den hier betrachteten Fall mit zwei Messadaptern 10, 10' folgt die Bestimmung von $\alpha_{III-IV,dd}$, bei der ebenfalls ein reziproker aber sonst unbekannter Standard R_2 zum Einsatz kommen soll. Vorgeschlagen wird eine Kabelverbindung (vieradrig) zwischen beiden Messadaptern 10, 10' mit beliebiger Länge, Leitungsimpedanz und Einfügedämpfung. Die Determinante der Kaskade von $C_{I-II,dd}$, reziproker Verbindung R_2 und $C_{III-IV,dd}$ liefert schließlich nach Umformung und Auswahl von einer von vier möglichen Lösungen $\alpha_{III-IV,dd}$. Die korrekte Lösung wird durch Kenntnis der ungefähren Länge der Leitung gewählt. Die Bestimmung von $\alpha_{III-IV,cc}$ unter Verwendung des reziproken Modenkonverters R erfolgt dann analog dem oben beschriebenen Verfahren an dem zweiten Messadapter 10'.

Die Bestimmung der Koeffizienten $\alpha_{I-II,cc}$, $\alpha_{III-IV,cc}$, $\alpha_{III-IV,dd}$, ist ebenso in einer anderen Reihenfolge möglich. Insbesondere ist das normierte Element nicht notwendigerweise in $C_{I-II,dd}$ enthalten. Wichtig ist lediglich, dass die vier Fehlermatrizen bis auf eine einzige Normierung bzw. eine einzige Unbekannte bestimmt werden, so dass die Relativverhältnisse dazwischen bestimmt sind.

Patentansprüche:

5

1. Verfahren zum Kalibrieren einer Messanordnung (100) zum Vermessen von elektrischen Bauteilen (14), umfassend zumindest einen an einen Netzwerkanalysator (20) anschließbaren Messadapter (10) mit vier Messtoren (1, 2, 3, 4), die in einer Kalibrierebene (15) zum Anschließen des elektrischen Bauteils (14) angeordnet sind und zwei differentielle Schnittstellen (1/2 und 3/4) bilden,

10

wobei der Messadapter (10) durch ein lineares 8-Tor Fehlernetzwerk ($C_{1,2,3,4}$) beschreibbar ist, **gekennzeichnet durch** die folgenden Schritte:

- Zusammenfassen von jeweils 2 Messtoren (1/2; 3/4) einer differentiellen Schnittstelle zu einem Modaltor (I, II),
- Darstellung des Fehlernetzwerks in modaler Repräsentation, in der lineare Fehler im Gegentaktpfad für beide Modaltore durch eine 4x4 Matrix $C_{I-II, dd}$ und lineare Fehler im Gleichtaktpfad für beide Modaltore durch eine 4x4 Matrix $C_{I-II, cc}$ beschrieben werden, unter Vernachlässigung von Intermodalverkopplung zwischen Gegentaktpfad und Gleichtaktpfad,
- Bestimmen von jeweils 15 Fehlertermen der Matrizen $C_{I-II, dd}$ und $C_{I-II, cc}$ unter Verwendung eines 15-Term Kalibrierverfahrens,
- Bestimmen eines multiplikativen Verknüpfungsfaktors zwischen den bestimmten 15 Fehlertermen der Matrix $C_{I-II, cc}$ und der Matrix $C_{I-II, dd}$ unter Einsatz eines Reziprok-Standards (R).

15

20

25

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass aus den bestimmten Fehlertermen der Matrizen $C_{I-II, dd}$ und $C_{I-II, cc}$ Korrekturwerte berechnet werden, die bei nachfolgenden Messungen von Streuparametern (S_{SE}) elektrischer Bauteile berücksichtigt werden.

30

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Adapter derart aufgebaut ist, dass die elektrische Verkopplung zwischen den beiden Messtoren der ersten differentiellen Schnittstelle im Wesentlichen der

elektrischen Verkopplung zwischen den beiden Messtoren der zweiten differentiellen Schnittstelle entspricht, und/oder dass die elektrische Verkopplung zwischen einem der Messtore der ersten differentiellen Schnittstelle und einem der Messtore der zweiten differentiellen Schnittstelle jeweils im Wesentlichen der Verkopplung zwischen den beiden anderen Messtoren entspricht.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Messadapter (10) über vier vorzugsweise als koaxiale Schnittstellen eingerichtete Eingangstore (1', 2', 3', 4') an eine kalibrierte Vorkalibrierebene (12) des Netzwerkanalysators (20) angeschlossen wird und/oder dass die zwei differentiellen Schnittstellen (1, 2; 3, 4) des Messadapters (10) bevorzugt vier in quadratischer Anordnung an dem Messadapter vorgesehene Kontaktelemente (45) zum Kontaktieren eines zwei differentiellen Leiter aufweisenden elektrischen Bauteils wie etwa eines 4-Tor-Kalibrierstandards oder eines Sternviererkabels aufweisen, wobei vorzugsweise jedes Kontaktelement (45) jeweils mit einer koaxialen Schnittstelle elektrisch verbunden ist.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass als 15-Term Kalibrierverfahren ein Selbstkalibrierverfahren wie etwa ein auf modale Wellengrößen angepasstes TMRG oder LRM-Verfahren verwendet wird.

6. Verfahren nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass für die Bestimmung der jeweils 15 Fehlerterme der Matrizen $C_{I-II, dd}$ und $C_{I-II, cc}$ ausschließlich konzentrierte Kalibrierelemente wie etwa an die zwei differentiellen Schnittstellen und/oder an Masse anschließbare Brücken, Widerstände etc. verwendet werden.

7. Verfahren nach Anspruch 5 oder 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass zumindest drei, vorzugsweise vier, insbesondere fünf der folgenden Kalibrierstandards verwendet werden: Durchverbindung Thru; match-open MO, short-match SM, short-open SO, open-short OS, wobei bevorzugt in modaler Repräsentation der jeweilige Zweitor-Kalibrierstandard an den Gleichtakt- und Gegentakt-Fehlernetzwerken erscheint, und insbesondere der erste Buchstabe den

Abschluss der Messtore (1, 2) der einen differentiellen Schnittstelle und der zweite Buchstabe den Abschluss der Messtore (3, 4) der anderen differentiellen Schnittstelle bezeichnet oder umgekehrt.

- 5 8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Reziprok-Standard (R) verwendet wird, der eine hohe Verkopplung von Gleichtakt und Gegentaktmode an den Modaltoren (I, II) aufweist und/oder der unsymmetrisch bzgl. der beiden Messtore jeweils einer differentiellen Schnittstellen eingerichtet ist.

10

9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Reziprok-Standard (R) zwei Messtore (1, 3) mit (nicht idealem) Kurzschluss und die anderen zwei Messtore (4, 2) mit (nicht idealem) Leerlauf abschließt.

15

10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem zwei oder mehr ggf. integral gebildete Messadapter (10, 10') mit jeweils vier Messtoren (1, 2, 3, 4; 5, 6, 7, 8) an den Netzwerkanalysator (20) angeschlossen werden, wobei die Messtore jeweils in der Kalibrierebene (15) zum Anschließen des elektrischen Bauteils (14) angeordnet sind und pro Messadapter (10, 10') zwei differentielle Schnittstellen (1/2, 3/4; 5/6, 7/8) bilden, wobei eine Kopplung zwischen einzelnen Messadaptoren (10, 10') vernachlässigbar ist, **gekennzeichnet durch** die folgenden Schritte:

20

- Zusammenfassen von jeweils 2 Messtoren eines Messadapters zu einem
- 25 Modaltor (I, II; III, IV),
- Darstellung der die Messadapter beschreibenden Fehlernetzwerke in modaler Repräsentation, in der je Messadapter lineare Fehler im Gegentaktpfad für beide Modaltore durch eine 4x4 Fehlermatrix ($C_{I-II, dd}$, $C_{III-IV, dd}$) und lineare Fehler im Gleichtaktpfad für beide Modaltore durch eine 4x4 Fehlermatrix ($C_{I-II, cc}$, $C_{III-IV, cc}$) beschrieben werden, unter
- 30 Vernachlässigung von Intermodalverkopplung zwischen Gegentaktpfad und Gleichtaktpfad,
- Bestimmen von jeweils 15 Fehlertermen der Fehlermatrizen ($C_{I-II, dd}$, $C_{I-II, cc}$, $C_{III-IV, dd}$, $C_{III-IV, cc}$) unter Verwendung eines 15-Term Kalibrierverfahrens,

- Bestimmen erster und zweiter multiplikativer Verknüpfungsfaktoren zwischen den bestimmten 15 Fehlertermen der Matrizen $C_{I-II, cc}$ und $C_{I-II, dd}$ und der Matrizen $C_{III-IV, cc}$ und $C_{III-IV, dd}$ unter Einsatz eines Reziprok-Standards R_1 ,
- 5 • Bestimmen eines dritten multiplikativen Verknüpfungsfaktors zwischen für den ersten Messadapter bestimmten Fehlertermen und für den zweiten Messadapter bestimmten Fehlertermen unter Einsatz eines weiteren Reziprok-Standards R_2 .
- 10 11. Verfahren nach Anspruch 10, **dadurch gekennzeichnet**, dass als weiterer Reziprok-Standard R_2 ein 8-Tor-Standard mit zweimal zwei differentiellen Schnittstellen zum Anschließen an den zwei differentiellen Schnittstellen zweier Messadapter verwendet wird.
- 15 12. Verfahren nach Anspruch 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass als der weitere Reziprok-Standard R_2 ein Kabel mit vier Adern, insbesondere ein Sternvierer-Kabel verwendet wird.
- 20 13. Satz von Kalibrierstandards zur Verwendung bei einem Kalibrierverfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **gekennzeichnet durch** zumindest drei, bevorzugt vier, insbesondere fünf, vorzugsweise konzentrierte 4-Tor-Standards und zumindest einen 4-Tor Reziprok-Standard R zum Kalibrieren einer Messadaptierung mit mindestens vier Messtoren, die mindestens zwei differentielle Schnittstellen ausbilden.
- 25 14. Satz von Kalibrierstandards nach Anspruch 13, **dadurch gekennzeichnet**, dass die zumindest drei konzentrierten 4-Tor Standards aus den folgenden Standards ausgewählt sind: Thru; MO, SM, SO, OS, wobei der erste Buchstabe den Abschluss von zwei Messtoren und der zweite Buchstabe den Abschluss der
- 30 zwei anderen Messtore der Messadaptierung durch den jeweiligen Standard bezeichnet.

15. Satz von Kalibrierstandards nach Anspruch 13 oder 14, ferner umfassend einen 8-Tor Reziprok-Standard R_2 zum Anschließen an zwei Messadapter der Messadaptierung mit jeweils vier Messtoren, vorzugsweise in Form eines Kabels mit vier Adern, insbesondere in Form eines Sternviererkabels.

Fig. 1

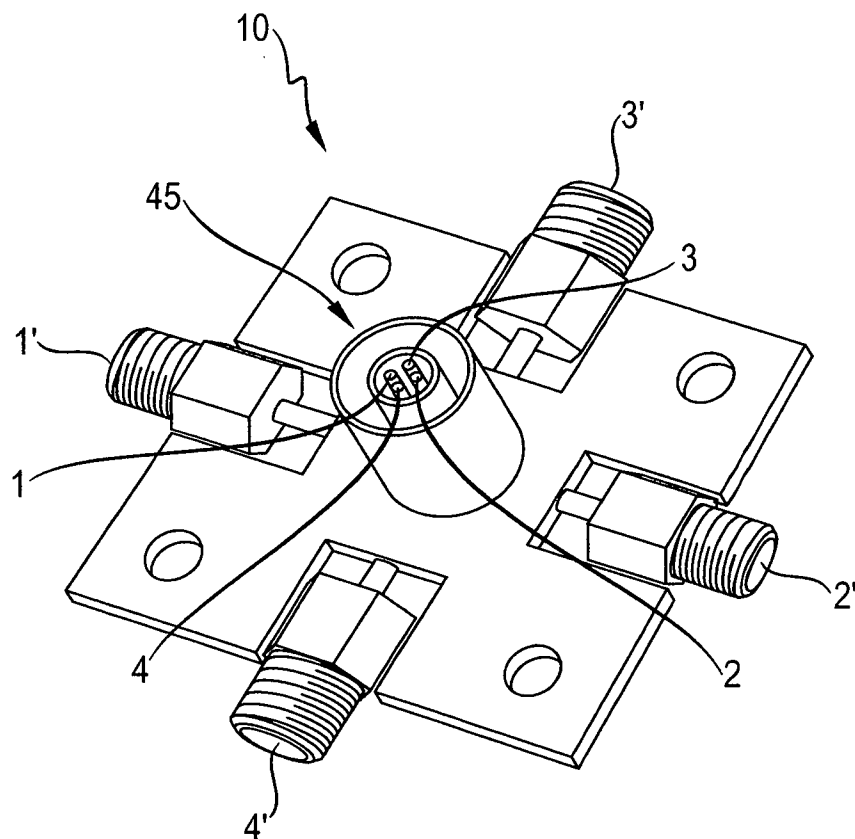
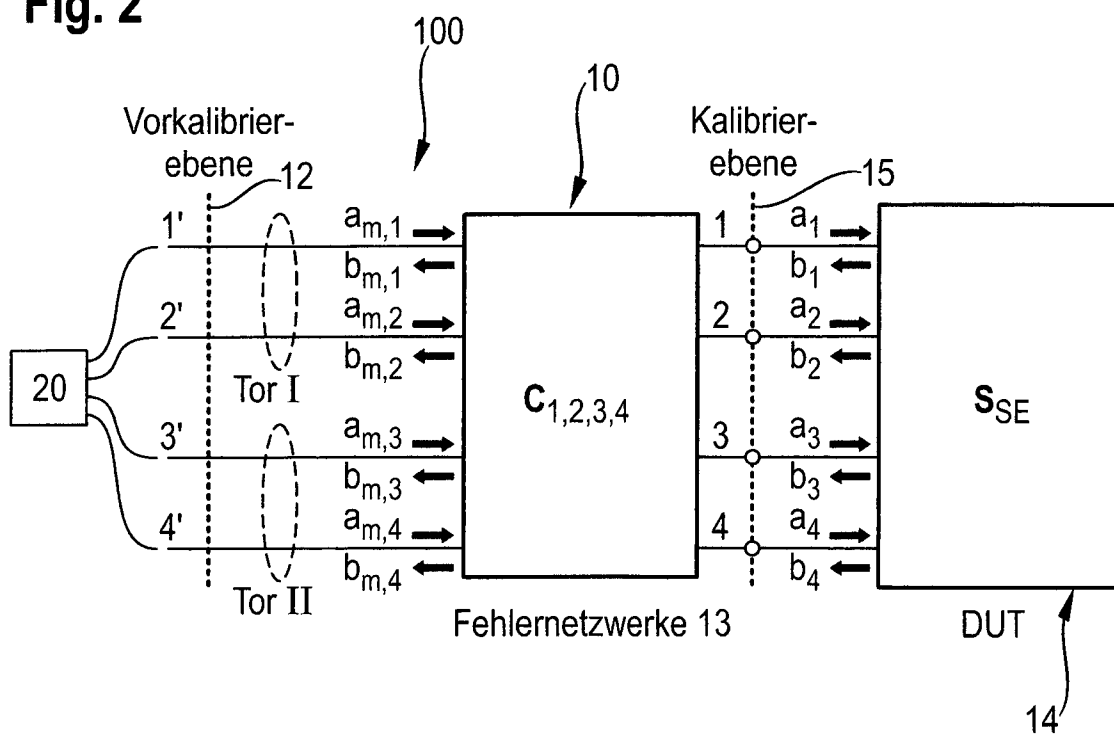


Fig. 2



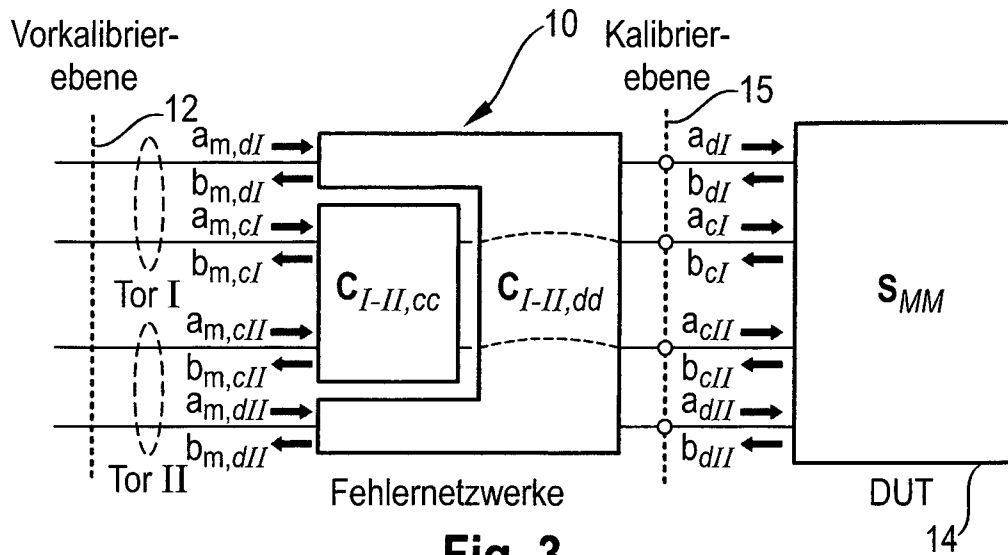


Fig. 3

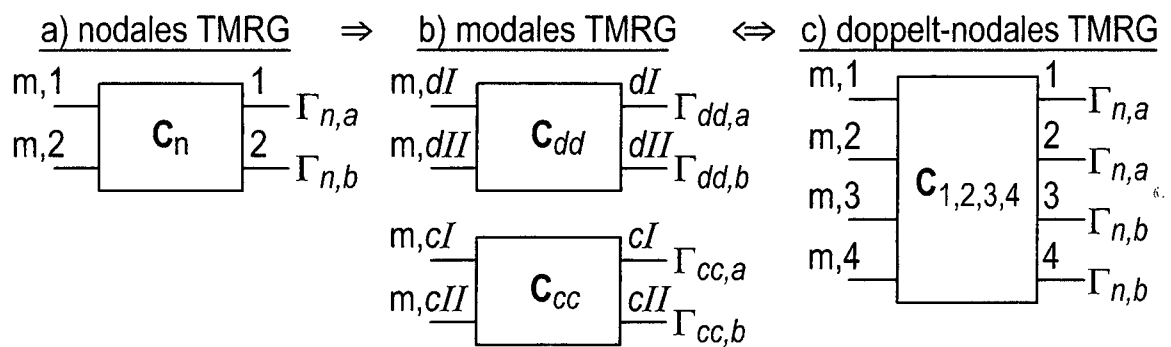


Fig. 4a

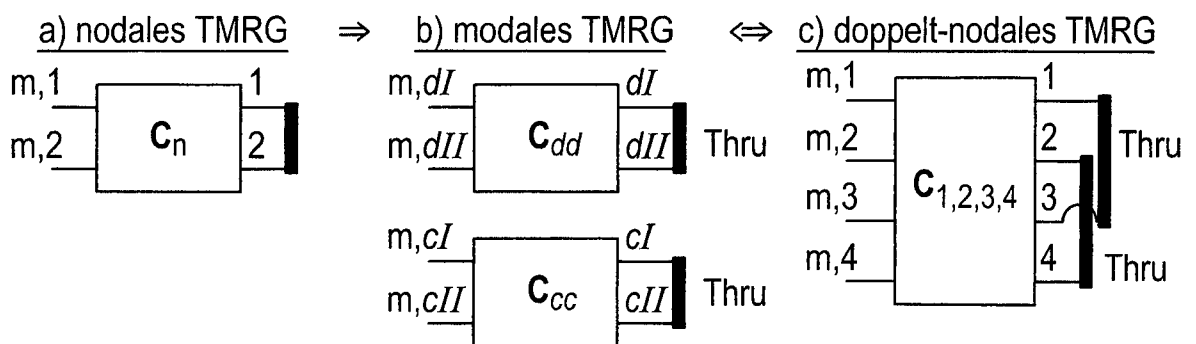


Fig. 4b

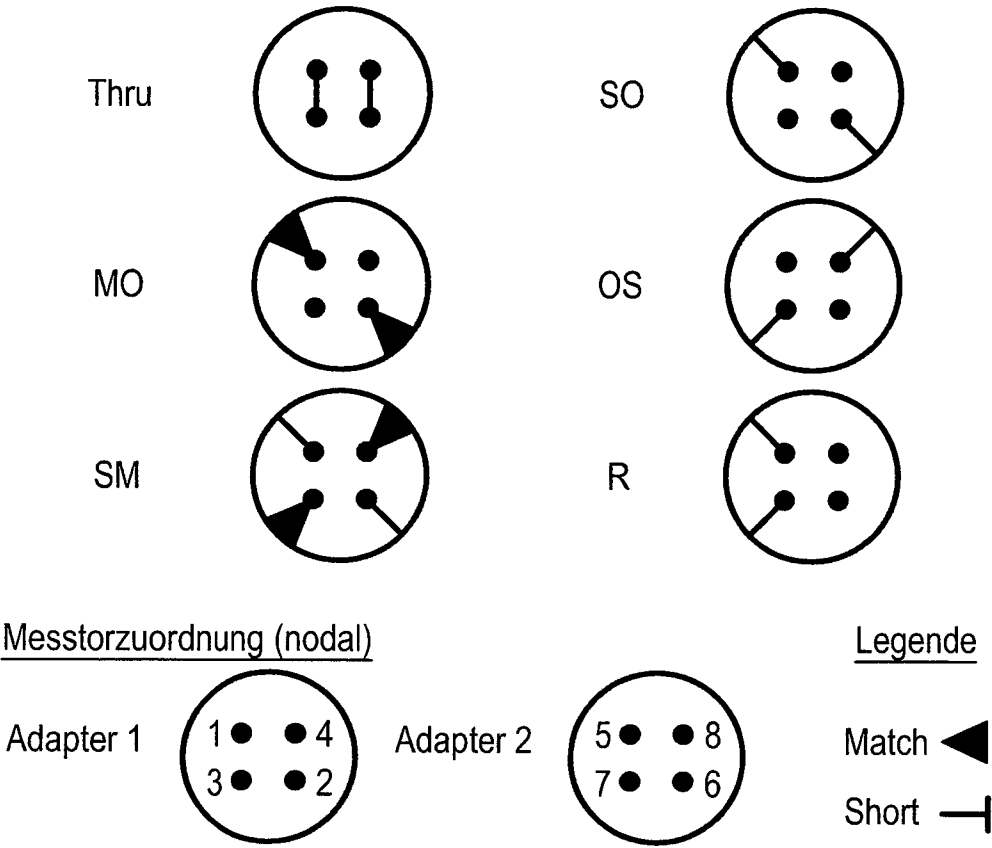


Fig. 5

Fig. 6

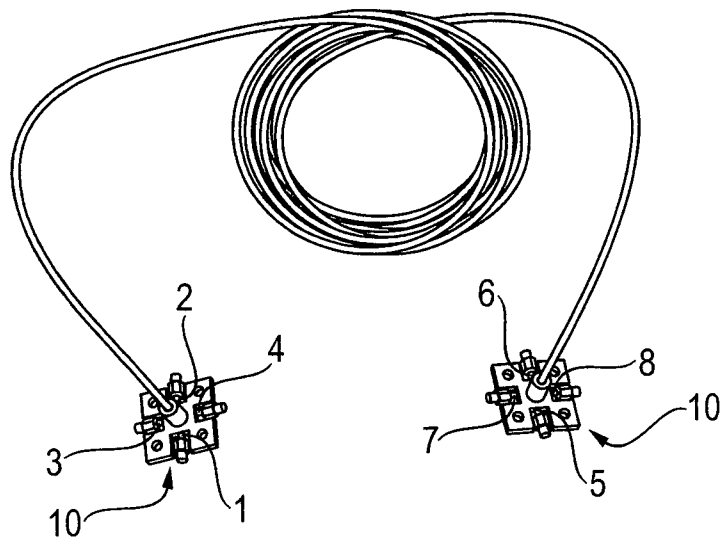
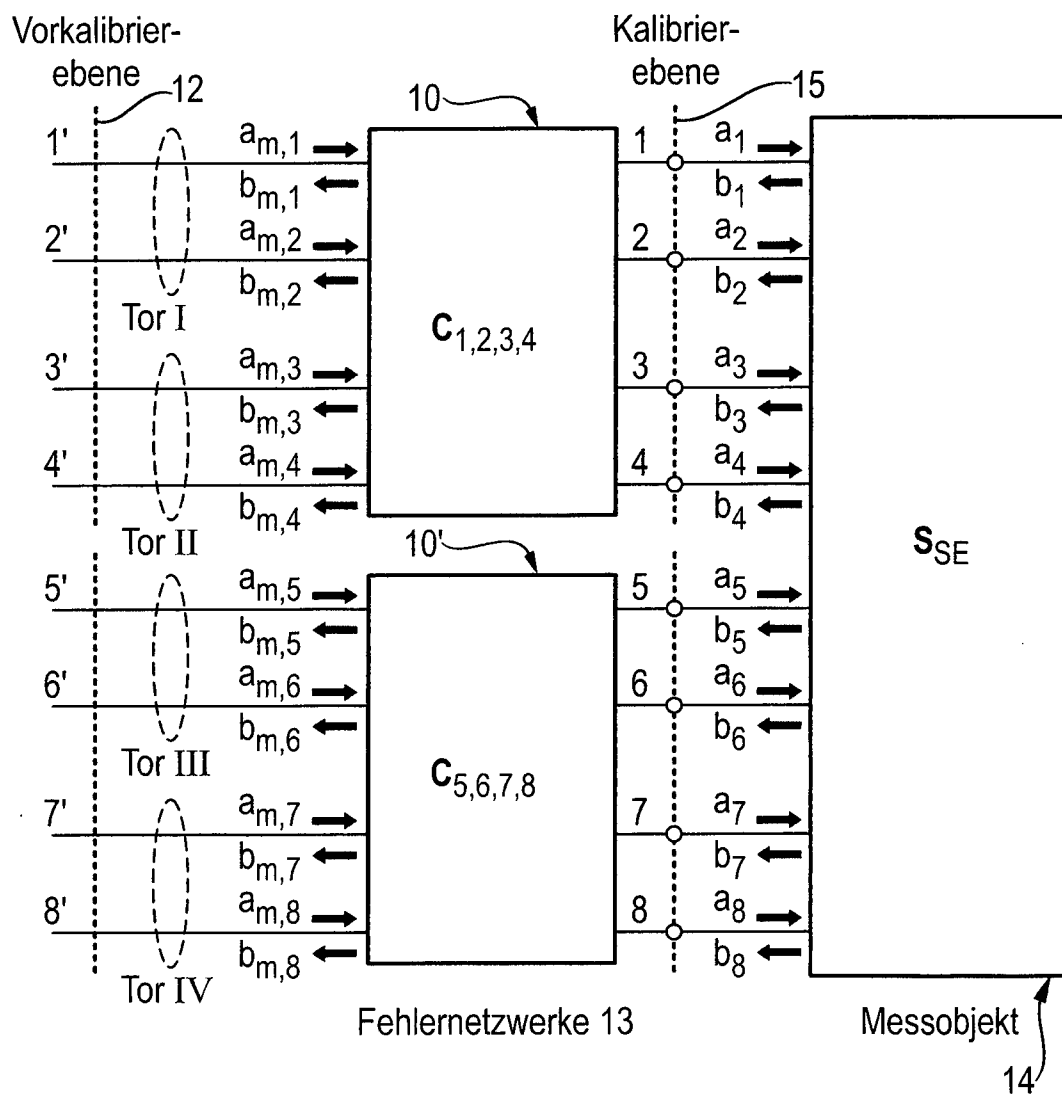
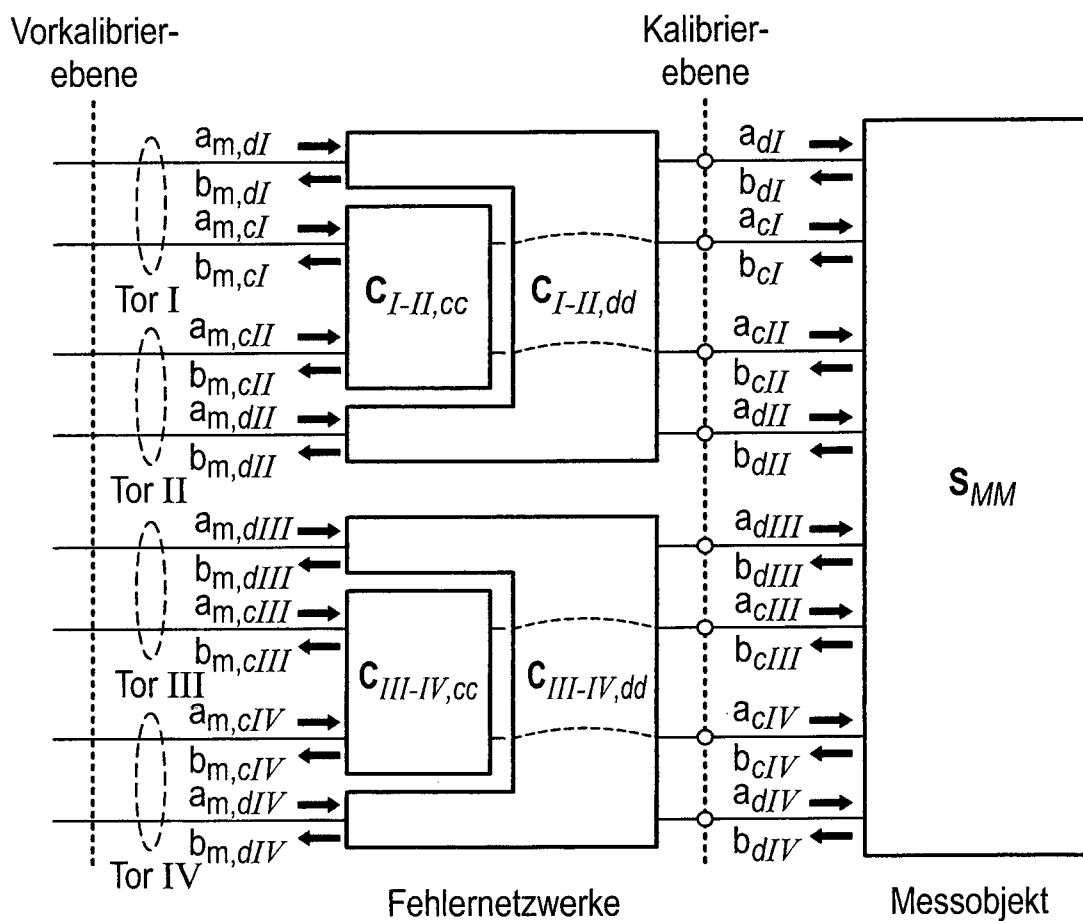


Fig. 7



**Fig. 8**

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2015/002523

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. G01R35/00 G01R27/28
ADD.

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
G01R

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 2004/201383 A1 (ANDERSON KEITH F [US]) 14 October 2004 (2004-10-14) abstract; figures 1-3 paragraphs [0005] - [0008], [0010], [0017] - [0019], [0022] - [0025], [0029] - [0030], [0032] - [0037], [0039], [0045] - [0056] -----	1-15
A	BOCKELMAN D E ET AL: "COMBINED DIFFERENTIAL AND COMMON-MODE SCATTERING PARAMETERS: THEORY AND SIMULATION", IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, US, vol. 43, no. 7, 31 July 1995 (1995-07-31), pages 1530-1539, XP008062293, ISSN: 0018-9480, DOI: 10.1109/22.392911 abstract; figures 1,3 ----- -/-	1-15



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

18 March 2016

Date of mailing of the international search report

29/03/2016

Name and mailing address of the ISA/

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Maric, Viktor

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2015/002523

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	DE 43 32 273 A1 (ROHDE & SCHWARZ [DE]) 16 June 1994 (1994-06-16) abstract; figures 1-3,5 page 2, line 55 - page 6, line 5 -----	1-15
A	DE 197 36 897 A1 (ROHDE & SCHWARZ [DE]) 2 April 1998 (1998-04-02) the whole document -----	1-15
A	US 2010/204941 A1 (HEUERMANN HOLGER [DE]) 12 August 2010 (2010-08-12) abstract; figures 1-3 paragraphs [0002], [0010] - [0011], [0014] - [0015], [0018], [0043], [0085], [0094] - [0099] -----	1-15

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2015/002523

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 2004201383 A1	14-10-2004	JP 2004317506 A US 2004201383 A1	11-11-2004 14-10-2004
DE 4332273 A1	16-06-1994	DE 4332273 A1 GB 2273364 A US 5442296 A	16-06-1994 15-06-1994 15-08-1995
DE 19736897 A1	02-04-1998	NONE	
US 2010204941 A1	12-08-2010	DE 102007027142 A1 EP 2030028 A2 US 2010204941 A1 WO 2007147511 A2	10-01-2008 04-03-2009 12-08-2010 27-12-2007

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
INV. G01R35/00 G01R27/28
ADD.

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
G01R

Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal, WPI Data

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	US 2004/201383 A1 (ANDERSON KEITH F [US]) 14. Oktober 2004 (2004-10-14) Zusammenfassung; Abbildungen 1-3 Absätze [0005] - [0008], [0010], [0017] - [0019], [0022] - [0025], [0029] - [0030], [0032] - [0037], [0039], [0045] - [0056]	1-15
A	BOCKELMAN D E ET AL: "COMBINED DIFFERENTIAL AND COMMON-MODE SCATTERING PARAMETERS: THEORY AND SIMULATION", IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, US, Bd. 43, Nr. 7, 31. Juli 1995 (1995-07-31), Seiten 1530-1539, XP008062293, ISSN: 0018-9480, DOI: 10.1109/22.392911 Zusammenfassung; Abbildungen 1,3 ----- -/-	1-15



Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen



Siehe Anhang Patentfamilie

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert,
aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

"E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach
dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft er-
scheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer
anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden
soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie
ausgeführt)

"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung,
eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach
dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum
oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der
Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der
Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden
Theorie angegeben ist

"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung
kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf
erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung
kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet
werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren
Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und
diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

18. März 2016

Absendedatum des internationalen Recherchenberichts

29/03/2016

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde
Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040,
Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Maric, Viktor

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	DE 43 32 273 A1 (ROHDE & SCHWARZ [DE]) 16. Juni 1994 (1994-06-16) Zusammenfassung; Abbildungen 1-3,5 Seite 2, Zeile 55 - Seite 6, Zeile 5 -----	1-15
A	DE 197 36 897 A1 (ROHDE & SCHWARZ [DE]) 2. April 1998 (1998-04-02) das ganze Dokument -----	1-15
A	US 2010/204941 A1 (HEUERMANN HOLGER [DE]) 12. August 2010 (2010-08-12) Zusammenfassung; Abbildungen 1-3 Absätze [0002], [0010] - [0011], [0014] - [0015], [0018], [0043], [0085], [0094] - [0099] -----	1-15

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2015/002523

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung	
US 2004201383	A1	14-10-2004	JP 2004317506 A	11-11-2004
			US 2004201383 A1	14-10-2004

DE 4332273	A1	16-06-1994	DE 4332273 A1	16-06-1994
			GB 2273364 A	15-06-1994
			US 5442296 A	15-08-1995

DE 19736897	A1	02-04-1998	KEINE	

US 2010204941	A1	12-08-2010	DE 102007027142 A1	10-01-2008
			EP 2030028 A2	04-03-2009
			US 2010204941 A1	12-08-2010
			WO 2007147511 A2	27-12-2007
