

# Einsatz von Low-Cost Substratmaterialien in Anwendungen bei hohen Frequenzen

Prof. Dr.-Ing. Gregor Gronau

## Zusammenfassung

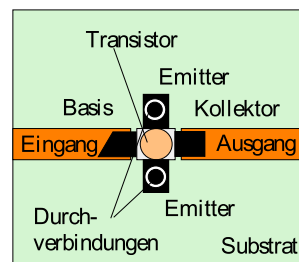
Der vorliegende Beitrag befaßt sich mit Verfahren zur Kalibrierung von Netzwerkanalysatoren, die zur Bestimmung der Streuparameter von Bauteilen im Hoch- und Höchstfrequenzbereich Einsatz finden. Er zeigt einen Vergleich möglicher Kalibriermethoden und der dadurch zu erzielenden Meßgenauigkeiten auf Standard-Substratmaterial (hier FR4). Dabei werden die verschiedenen Kalibrierverfahren hinsichtlich ihrer Vor- bzw. Nachteile bezüglich der Handhabung einerseits und der Meßgenauigkeit andererseits gegenübergestellt.

## 1 Einführung

Bei der Realisierung von Schaltungen im Konsumgüterbereich ergeben sich oft hohe Stückzahlen. Die Preise für Materialien beeinflussen deutlich die Herstellungskosten, so dass die Hersteller stets bestrebt sind, kostengünstige Bauelemente zu verwenden. Aus diesem Grunde werden zunehmend preisgünstige Substratmaterialien bei der Schaltungsentwicklung im Frequenzbereich bis 3GHz eingesetzt. Höhere Verluste und anisotropes Verhalten erschweren dabei den Schaltungsentwurf. Darüberhinaus steht den Entwicklern kaum Information zu Kalibriertechniken mit diesen „Low-Cost“-Materialien im zuvor genannten Frequenzbereich zur Verfügung. Aus diesem Grunde soll der vorliegende Beitrag, unter der Berücksichtigung möglichst vieler praxisrelevanter Gesichtspunkte, Lösungsansätze aufzeigen. Ausgehend von der Frage „Wie können Bauteile bezüglich ihrer vorgegebenen Bezugsebenen charakterisiert werden, damit die Daten im Schaltungsentwurf erfolgversprechend eingesetzt werden können“, sollen zunächst die dabei zu lösenden Teilaufgaben genannt werden.

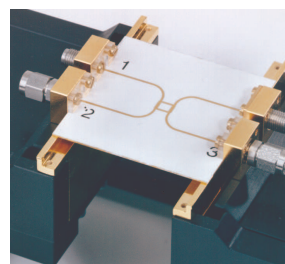
1. Wie verbinde ich mein Meßobjekt (DUT, device under test) mit den Anschlüssen des Netzwerkanalysators (NWA)?
2. Wie kalibriere ich meinen NWA?
3. Wie erhalte ich die Daten aus dem NWA in mein CAD-Programm?

Bei der Beantwortung der ersten Frage ist zu berücksichtigen, dass das Bauteil, wenn es sich nicht schon direkt um eine Leitungskomponente handelt, in der Umgebung zu charakterisieren ist, in der es auch später eingesetzt wird. Dazu zählt die Erfassung der Substratart und der genauen Einbauform, denn dadurch werden die Bauteileigenschaften beeinflusst.



**Bild 1:** Typischer Meßaufbau bei der Transistormessung

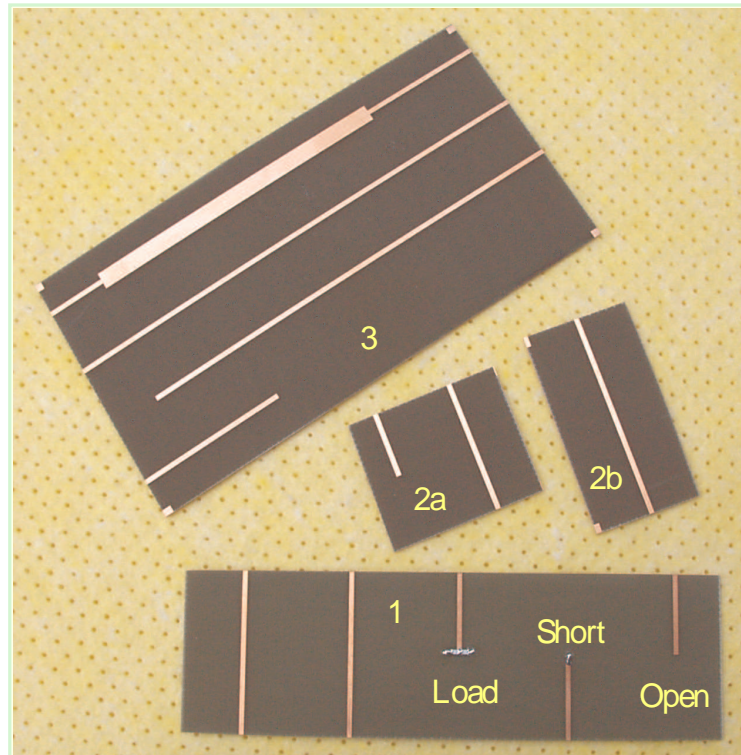
Bei einem Transistors, der sich in einer Meßumgebung gemäß Bild 1 befindet, sind die Streuparameter von der Lage und der Gestaltung der Kontaktierungsflächen abhängig. Für den Fall, dass das Bauteil in eine Mikrostreifenleitung eingesetzt wird und die Emitteranschlüsse mit der „Ground“-Metallisierung verbunden werden müssen, liefern die Durchkontaktierungen einen zusätzlichen Einfluß, der bei der Charakterisierung zu berücksichtigen ist.



**Bild 2:** Meßhalterung mit Branch-Line-Koppler in Mikrostreifenleitungstechnik

Sollen nun viele unterschiedliche Meßaufgaben durchgeführt werden, so ist zur Aufnahmen von Substraten die Verwendung einer flexiblen, universellen Meßhalterung (Test-Fixture) gemäß Bild 2 von Vorteil, da diese einen zuverlässig wiederhol-

baren Wechsel von Substraten ermöglicht. Da diese kommerziell erhältlich sind und damit die erste Frage als beantwortet anzusehen ist, soll nicht weiter auf die Verbindungsproblematik eingegangen werden.



**Bild 3:** Substrate zur Überprüfung der Kalibrier- und Meßgenauigkeit auf einem Standard-Substratmaterial (FR4: Substrathöhe ( $h = 0.5\text{mm}$ ), Metallisierungsdicke ( $T = 15\mu\text{m}$ ),  $\epsilon_r \approx 4.4$ ).  
 Substrat 1: Open, Short, Load, Thru (OSLT)-Kalibriersubstrat  
 Substrat 2 (a und b): Thru, Reflect, Line (TRL) Kalibrierkit  
 Substrat 3: Kalibrierkit zur Kalibrierung nach [1] mit Testobjekt

## 2 Kalibrierung des NWA

Die Kalibrierung des Netzwerkanalysators stellt die Hauptaufgabe in der Streuparametermeßtechnik dar. Hierzu sind in der Firmware moderner Geräte von den Geräteherstellern die gängigsten Kalibrierverfahren integriert, so dass der Anwender, bei Vorhandensein der benötigten Kalibrierstandards, eine Kalibrierung durchführen kann. Umfangreiches Zubehör für Leitungsvarianten in koaxialer Leitungstechnik stehen von Seiten der Hersteller ebenfalls zur Verfügung. Für andere Leitungsarten wie z.B. die Mikrostreifenleitung können die Gerätehersteller keine derartige Unterstützung liefern, da die Vielfalt an Leitungsvarianten sehr groß ist und nahezu alle Anwender eine an-

dere Konfiguration verwenden. Deswegen erzielen die Benutzer die größtmögliche Genauigkeit dadurch, indem sie ihre eigenen Kalibrierstandards unter der Berücksichtigung der eigenen Technologie verwenden. Zur vertiefenden Betrachtung der Geräte- und Kalibriertechniken sei an dieser Stelle auf [2] verwiesen. Im nachstehenden konzentriert sich dieser Beitrag auf die Kalibrierung des NWA in Mikrostreifenleitungstechnik. Mögliche Kalibrierelemente sind in Bild 3 dargestellt. So zeigt das Substrat 1 die Standards für eine Open, Short, Load, Thru (OSLT)-Kalibrierung, das Substrat 2 (a und b) die Standards für das Thru, Reflect, Line (TRL) Kalibrierverfahren und das Substrat 3 die Standards zur Kalibrierung nach dem in [1] be-

schriebenen Verfahren, das von der Transformation der Meßergebnisse in den Zeitbereich Gebrauch macht.

Zu Kontrollzwecken befindet sich auf diesem Substrat ein Testobjekt, ein doppelter Wellenwiderstandsprung ( $50\Omega$ - $20\Omega$ - $50\Omega$ ). Die Längen von der Substratkante zu den jeweiligen Impedanzsprüngen sind bewußt unterschiedlich gewählt, damit Problembereiche und Unzulänglichkeiten bei den Kalibrierverfahren deutlich zum Vorschein kommen.

Zusammenfassend sollen nun zuerst die Vor- bzw. Nachteile der einzelnen Kalibriertechniken aufgezeigt werden.

- 1. Die OSLT-Kalibrierung:** Das OSLT-Verfahren stellt das allgemeinste Verfahren zur Bestimmung der Fehlerkoeffizienten dar. Es ist in der Lage, alle Einflüsse der in den Test-Sets benutzten Umschalter zu erfassen. Es setzt aber die Kenntnis der Eigenschaften der Standards voraus und benötigt eine nahezu perfekte Load (Fixed-Load) bei niedrigeren Frequenzen und eine Sliding Load bei höheren Frequenzen. Diese Forderungen können in koaxialer Leitungstechnik hinreichend gut erfüllt werden, wobei derartige Kalibrierkits relativ kostspielig sind. In anderen Leitungstechniken, insbesondere bei Wellenleitern mit dispersiven Eigenschaften, ist die Realisierung der Load das große Problem. Bei niedrigeren Frequenzen lassen sich, wie die weiteren Ausführungen zeigen werden, noch brauchbare Loads realisieren, aber bei höheren Frequenzen steht keine akzeptable Lösung bereit.
- 2. Die TRL-Kalibrierung:** Dieses Verfahren stellt bei Netzwerkanalysatoren, deren interner Aufbau alle zur Berechnung der Streuparameter benötigten Wellengrößen ohne Umschalter in den Signalzweigen bereitstellen, das genaueste Kalibrierverfahren dar. Es benötigt keine genaue Kenntnis der Eigenschaften der Standards, da dieses Verfahren in der Lage ist, den Reflexionsfaktor
- 3. Die Time-Domain-Kalibrierung nach [1]:** Dieses Verfahren stellt kein Standardverfahren zur direkten Kalibrierung des kompletten Meßsystems dar. Es setzt eine Kalibrierung des NWA in koaxialer Technik voraus. Die Verwendung von zwei leerlaufenden Leitungen und einer Durchverbindung als Kalibrierstandard liefert eine einfache Möglichkeit sämtliche Einflußgrößen der Meßhalterung zu bestimmen. Genauso wie beim TRL-Verfahren ergeben sich der Reflexionsfaktor des Reflect-Standards sowie die frequenzabhängigen Ausbreitungskoeffizienten ( $\gamma = \alpha + j\beta$ ) der Welle auf der Leitung bei der Kalibrierung. Unter Zuhilfenahme des externen Steuerrechners lassen sich die Fehlerkoeffizienten im NWA derart modifizieren, dass mit dem System die Streuparameter bezüglich frei wählbarer Bezugsebenen bestimmt werden können. Eine breitbandige Kalibrierung eröffnet zudem die Möglichkeit der Verwendung der Zeitbereichstransformation zum Ausblenden oder Selektieren spezieller Reflexions- bzw. Transmissionsbeiträge. Da das Verfahren auf die SOLT-Kalibrierung aufsetzt, eignet es sich auch zur Kalibrierung der Systeme, die die Voraussetzung zum direkten Einsatz des TRL-Verfahrens nicht erfüllen.

des Reflect-Standards sowie die frequenzabhängigen Ausbreitungskoeffizienten ( $\gamma = \alpha + j\beta$ ) der Welle auf der Leitung zu bestimmen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass bei der Anwendung der in den Geräten implementierten Routinen eine aufeinander abgestimmte Thru-Line Kombination einen Frequenzbereich abdeckt, dessen Endfrequenz das 8-9 fache der Anfangsfrequenz ist. Muß ein größerer Frequenzbereich erfaßt werden, so werden zusätzliche Line-Standards nötig. Zudem erfordert die Kalibrierung bei sehr niedrigen Frequenzen sehr lange Line-Standards, so dass die Handhabung ebenfalls aufwendiger wird.

Die wesentlichen Eigenschaften der Verfahren, die hier benutzt werden, sind damit genannt. Für die SOLT-Kalibrierung wird die Routine im NWA herangezogen, für die anderen Verfahren erfolgt die Berechnung der Fehlerkoeffizienten auf einem externen Steuerrechner. Dieses Vorgehen ermöglicht die Vorgabe der Bezugsebenen unter der Berücksichtigung der frequenzabhängigen Ausbreitungseigenschaften auf der Leitung. Dieses ist mit der im NWA bereitgestellten Firmware nicht so direkt möglich.

Nach der kurzen Darstellung wesentlicher Eigenschaften möglicher Kalibrierverfahren und der Berücksichtigung der eingangs gezeigten Gesichtspunkte zur Charakterisierung von Bauteilen bei niedrigen Frequenzen auf Low-Cost Substratmaterialien konzentriert sich die Aufgabe auf die Frage: „Wie gut kann eine Load in Mikrostreifenleitungstechnik realisiert werden?“

Zur Beantwortung dieser Frage werden im folgenden sowohl das TRL- als auch das Time-Domain-Verfahren genutzt, damit Vertrauen in die erzielten Ergebnisse gewonnen werden kann. Hierbei werden zunächst die Ergebnisse während der Kalibrierung, dann die Ergebnisse für das Beispiel des doppelten Wellenwiderstandsprungs (Double-Step) und abschließend die Eigenschaften der Load diskutiert.

Zur Durchführung der Kalibrierung wurden die folgende Einstellungen verwendet:

- — TRL-Verfahren:

$f_{start} = 0.6\text{GHz}$  und  $f_{stop} = 5\text{GHz}$ , so dass mit einer Thru und Line Kombination gemessen werden konnte.

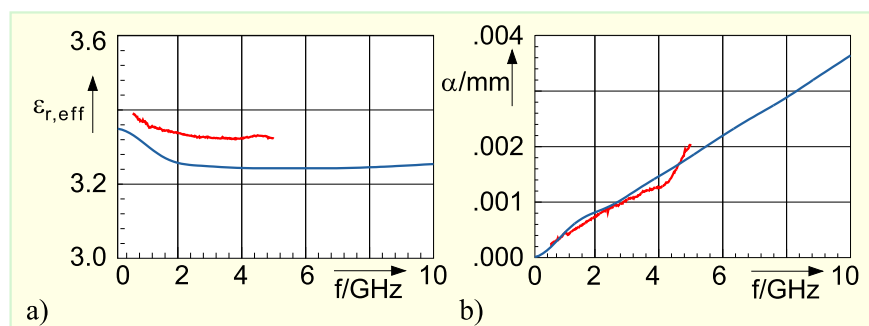
- — Time-Domain-Verfahren [1]:

$f_{start} = 0.124\text{GHz}$  und  $f_{stop} = 25\text{GHz}$

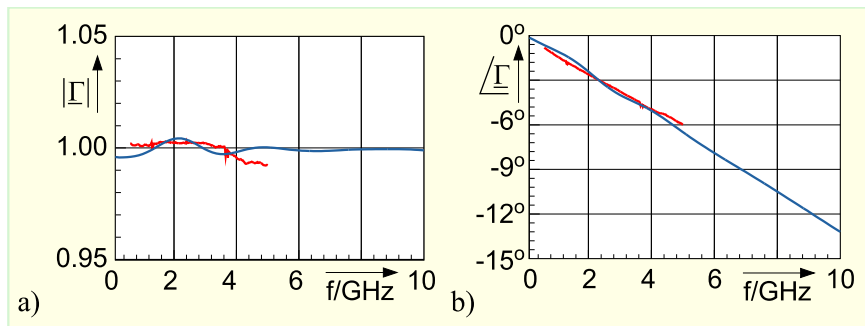
Die ersten Ergebnisse, die miteinander verglichen werden können, ergeben sich aus der Kalibrierung. So liefern beide Verfahren den Reflexionsfaktor des Reflect-Standards sowie die frequenzabhängigen Ausbreitungskoeffizienten ( $\gamma = \alpha + j\beta$ ) der Welle auf der Leitung. Aus  $\beta$  kann

dann direkt der Wert für die effektive Permittivität  $\epsilon_{r,eff}$  der verwendeten Standards in Mikrostreifenleitungstechnik berechnet werden. Die Ergebnisse hierfür zeigt Bild 4 a). Entsprechend sind in Bild 4 b) die Gegenüberstellung der Ergebnisse für den Dämpfungskoeffizienten  $\alpha$  dargestellt. Ein Vergleich der Ergebnisse aus beiden Verfahren zeigt eine gute Übereinstimmung.

Als nächstes werden die Ergebnisse für den Reflexionsfaktor  $\Gamma$  des Reflect-Standards miteinander verglichen. Die Ergebnisse für den Betrag von  $\Gamma$  zeigt Bild 5 a), die Ergebnisse für den Winkel von  $\Gamma$  zeigt Bild 5 b). Auch hier ist eine sehr gute Übereinstimmung festzustellen.



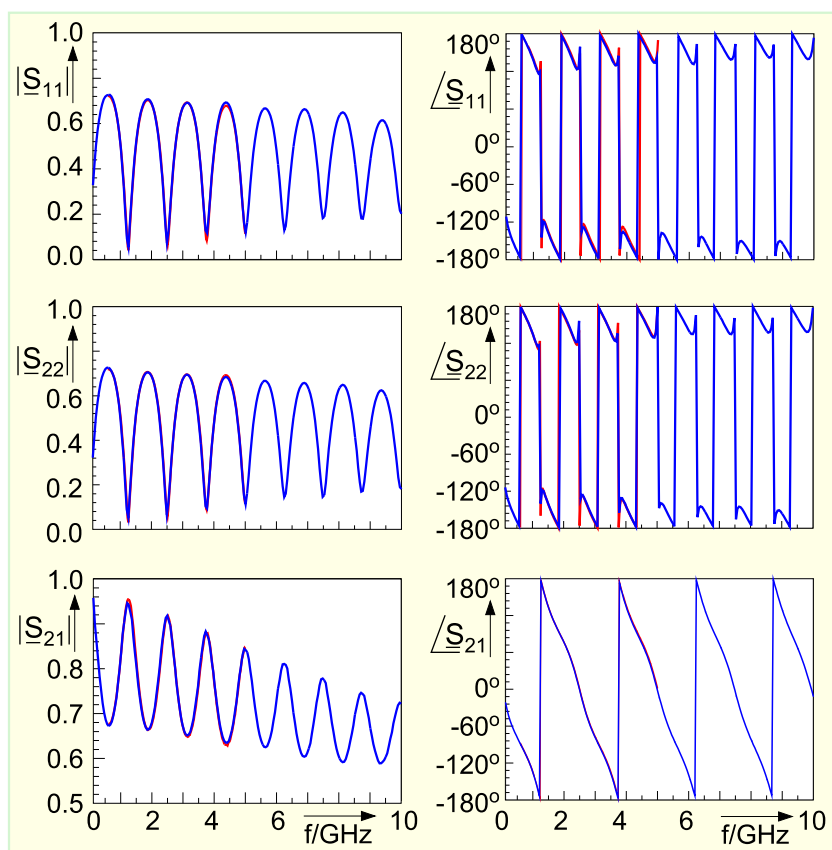
**Bild 4:** Effektive Permittivität  $\epsilon_{r,eff}$  a) und Dämpfungskoeffizient  $\alpha$  b) der Mikrostreifenleitung  
— TRL-Verfahren, — Time-Domain-Verfahren [1]



**Bild 5:** Betrag a) und Winkel b) des Reflexionsfaktors eines Leerlaufs in Mikrostreifenleitungstechnik  
 — TRL-Verfahren, — Time-Domain-Verfahren [1]

Zur Verdeutlichung der zu erwartenden Meßgenauigkeit erfolgt nach der Kalibrierung des NWA die Messung eines unbekannten Meßobjektes, ein doppelter Wellenwiderstandsprung ( $50\Omega$ - $20\Omega$ - $50\Omega$ ). Dieser ist derart gestaltet, dass anhand von Plausibilitätsbetrachtungen Aussagen getroffen werden dürfen. Es sei an dieser Stelle erneut darauf hingewiesen, dass die Längen von der Substratkante zum jeweiligen Impedanzsprung unterschiedlich gewählt sind, damit Fehler bei der Kalibrierung und den Bezugsebenenverschiebungen

deutlich zum Vorschein kommen. Da also nach einer Verschiebung der Bezugsebenen genau in die Position der Impedanzsprünge ein symmetrisches Zweitor als Meßobjekt vorliegt, müssen auch die Streuparameter  $S_{11}$  und  $S_{22}$  identisch sein. Fehler in der Ermittlung der Ausbreitungskoeffizienten ( $\gamma = \alpha + j\beta$ ) während der Kalibrierung müßten nach der Bezugsebenenverschiebungen mit unterschiedlichen Längen zu deutlichen Abweichungen führen. In Bild 6 sind die Meßergebnisse für die Streuparameter dargestellt.



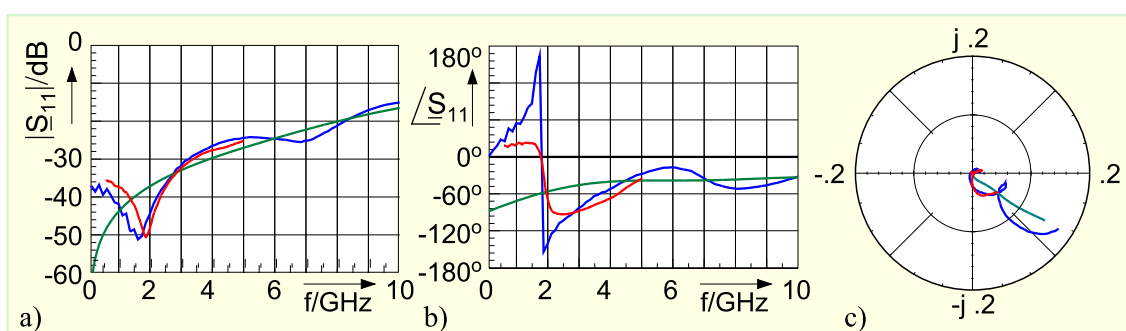
**Bild 6:** Gemessene Streuparameter für den Double-Step; — TRL-Verfahren, — Time-Domain-Verfahren [1]

Das Bild 6 zeigt zunächst eine hohe Übereinstimmung der Ergebnisse, die durch die Anwendung der unterschiedlichen Kalibrierverfahren ermittelt wurden. Zudem liefert der Vergleich von  $S_{11}$  mit  $S_{22}$  ein nahezu identisches Verhalten.

Damit kann an dieser Stelle festgestellt werden, dass die vorgestellten Verfahren zur Kalibrierung des Systems geeignet sind und dass das System zur Beurteilung der Load in Mikrostreifenleitungstechnik herangezogen werden kann. Bild 7 zeigt den gemessenen Verlauf des Eingangsreflexionsfaktors der Load. Zu den direkt im Frequenzbereich ermittelten Ergebnissen ist ein weiteres Ergebnis in den Bildern dargestellt. Dieses ergibt sich aus der Transformation von  $S_{11}$ , das nach der TD-Kalibrierung ermittelt wurde, in den Zeitbereich und der Wahl eines Zeitfensters (Gating),

das die Reflexionsbeiträge am Übergang zu null setzt. Dadurch ergibt sich, insbesondere für niedrige Frequenzen, nahezu nur noch der Anteil, der von der Load hervorgerufen wird.

Der in Bild 7 a) dargestellte Verlauf des Betrages von  $S_{11}$  im logarithmischen Maßstab verdeutlicht, dass die Anpassung der Load an die Mikrostreifenleitung bis zu 3GHz deutlich besser als  $-30\text{dB}$  ist. Da bei derart niedrigen Reflexionsfaktoren die Messung der Phase problematisch ist, ist in Bild 7 c) zur Beurteilung des Ergebnisses der Eingangsreflexionsfaktor in Polardarstellung angegeben. Aus dieser Darstellung kann ebenfalls eine hervorragende Übereinstimmung der Ergebnisse aus den unterschiedlichen Kalibrierverfahren entnommen werden.



**Bild 7:** Gemessene Streuparameter für die Load; — TRL-Verfahren, — Time-Domain-Verfahren [1] — Time-Domain-Verfahren [1] mit Gating

#### 4 Fazit

Nach den vorgestellten Untersuchungen von Kalibrierverfahren auf Low-Cost Substratmaterialien und die dabei gewonnenen Ergebnisse für die Eigenschaften einer Load kann abschließend gesagt werden, dass ein OSLT-Kalibrierverfahren in Mikrostreifenleitungstechnik im Frequenzbereich bis

3GHz zu einer zufriedenstellenden Meßgenauigkeit führen kann. Derartige Kalibriersubstrate sind relativ einfach zu entwerfen. Erfolgt die Herstellung in der eigenen Technologie, so werden die eigenen Technologieparameter mit berücksichtigt. Dadurch läßt sich mit einem relativ geringen finanziellen Aufwand jede Art von Netzwerkanalysator mit einer hohen Zuverlässigkeit kalibrieren.

#### Literatur

- [1] GRONAU G., WOLFF I.: *A Simple Broad-Band De-embedding Method Using an Automatic Network Analyzer with Time-Domain Option*, IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, vol. MTT-37, no.3, pp. 479-483
- [2] GRONAU G.: *Höchstfrequenztechnik*, 670 Seiten, Springer-Verlag, Berlin, 2001, ISBN 3-540-41790-7