

Die Tücke steckt im stecker



Die Tücke steckt im Stecker

Das Kalibrieren koaxialer Hochfrequenz- und Mikrowellenkomponenten ist immer den Einflüssen von Steckerverbindungen und somit ihrer Reproduzierbarkeit unterworfen. Sowohl der Prüfling wie auch das zum Vergleich verwendete Referenznormal müssen jeweils mit Hilfe ihrer Stecker mit der Testeinrichtung verbunden werden. Verschiedene Faktoren beeinflussen die Steckerreproduzierbarkeit: Konstruktionsmerkmale, mechanische Toleranzen, Abnutzung oder auch unsachgemässe Anwendung. Weil solche Einflüsse erhebliche Messunsicherheiten zur Folge haben können, sind sie – insbesondere in der Metrologie – zu berücksichtigen.

JÜR G FURRER

Da die Reproduzierbarkeit von RF-Steckern (RF=Radio Frequency) in letzter Zeit vermehrt Thema von Metrologiekonferenzen war, wurde bei METAS der Bereich der RF-Leistungsmessung diesbezüglich genauer unter die Lupe genommen. Dieser praxisbezogene Beitrag zeigt anhand der Kalibrierung koaxialer Hochfrequenz- und Mikrowellenleistungsmessköpfe (nachstehend RF-Sensoren genannt) bis 50 GHz auf, wie die Steckerreproduzierbarkeit das Resultat beeinflussen kann. Es wird erläutert, wie man beim Kalibrieren Fehler erkennt und verhindert und wie der Problematik optimal begegnet werden kann.

Funktion von RF-Sensoren

Ein Sensor für echte RF-Leistungsmessung wandelt die anliegende, zu messende RF-Leistung P_{RF} in Wärme um. Mit einem automatisch abgleichenden Brückensystem wird anschliessend die gleiche thermische Gleichstromleistung P_{DC_subst} in einem Substitutionszweig erzeugt und schliesslich angezeigt. Da der Wirkungsgrad von jedem RF-Sensor unterschiedlich und zudem frequenzabhängig ist (z. B. infolge Zuführungsverlusten), muss jedes Gerät individuell kalibriert werden.

Der Kalibrierfaktor K_e eines RF-Sensors gibt grundsätzlich das Verhältnis zwischen der vom Leistungsmesser angezeigten (d. h. der substituierten Gleichstromleistung) und der tatsächlich eingespeisten RF-Leistung an:



1: Die Kontaktierung der HF-Stecker muss mit viel Fingerspitzengefühl erfolgen.

$$\text{Kalibrierfaktor } K_e = \frac{P_{DC_substituiert}}{P_{RF_eingespeist}} = \frac{P_{DC_angezeigt}}{P_{RF_eingespeist}} \quad 1$$

RF-Sensoren kalibrieren

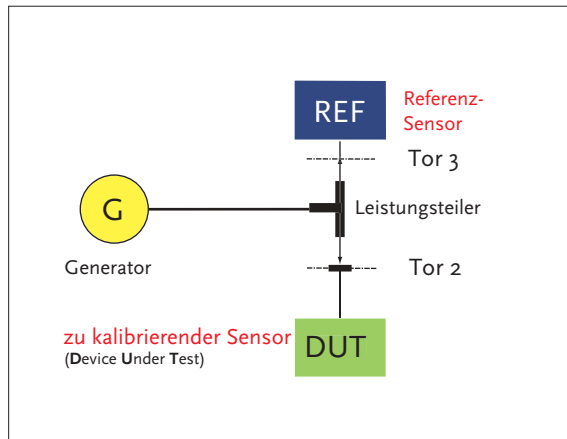
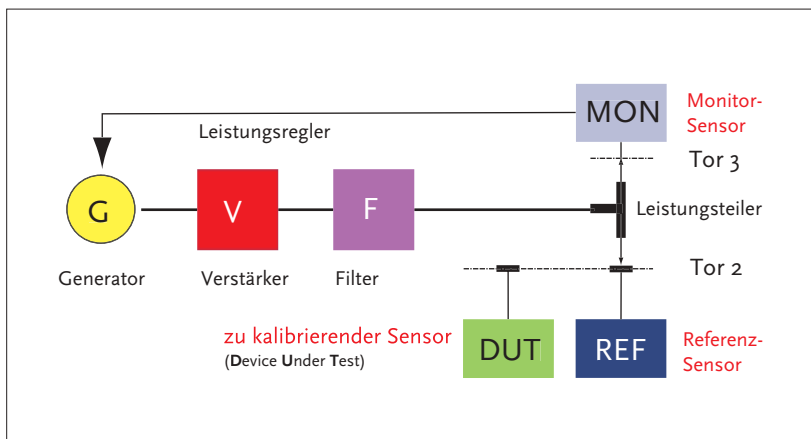
RF-Sensoren werden in den meisten Fällen mit Hilfe eines Vergleichsverfahrens kalibriert, wenn man vom aufwendigen Kalibrieren in einem Mikrokalorimeter, d. h. einem Primärnormal für RF-Leistung, absieht (siehe Kasten 15). Beim Kalibrieren in einem Kalorimeter wird die tatsächliche Erwärmung des Sensors, verursacht durch die Hochfrequenz, als Absolutwert gemessen. Beim einfacheren Vergleichsverfahren wird der Kalibrierfaktor eines so genannten Transfornormals (Referenzsensor) auf den Prüfling übertragen.

Beim hier angewandten sequentiellen Vergleichsverfahren nach Illustration 2 wird eine konstante RF-Leis-

tung (Kalibrierleistung) mit Hilfe eines Leistungsteilers einem Prüfling (DUT, Device Under Test) bzw. einer Referenz (REF) zugeführt, die jeweils nacheinander mit dem Tor 2 des Leistungsteilers verbunden werden. Am Tor 3 verbleibt stets ein dritter Sensor (MON, Leistungsmonitor), der nur dazu dient, die relative Kalibrierleistung für beide Fälle (DUT und REF) zu kennen bzw. konstant zu halten. Aus dem Kalibrierfaktor der Referenz K_{e_REF} und aus den gemessenen Leistungsverhältnissen $R_1 = P_{DUT} / P_{MON}$ bzw. $R_2 = P_{REF} / P_{MON}$ kann anschliessend für den DUT bei jeder Frequenz der Kalibrierfaktor K_{e_DUT} berechnet werden:

$$\text{Kalibrierfaktor } K_{e_DUT} = K_{e_REF} \cdot \frac{R_1}{R_2} = K_{e_REF} \cdot \frac{P_{DUT}}{P_{MON}} \cdot \frac{P_{MON}}{P_{REF}} \quad 2$$

Diese prinzipielle Formel enthält aber noch keine störenden Einflüsse, wie sie



2: Sequentielles Vergleichsverfahren zum Kalibrieren von RF-Sensoren.

3: Paralleles Vergleichsverfahren zum Kalibrieren von RF-Sensoren.

bei nicht idealen Komponenten, also in der Praxis, immer auftreten werden [1].

Messunsicherheit und ihre dominierenden Einflussgrößen

Die von METAS mit dieser Kalibrieremethode erreichte, bestmögliche erweiterte Messunsicherheit U für Kalibrierfaktoren liegt im Frequenzbereich von 50 MHz bis 26.5 GHz im Bereich von $U = 0.4\%$ bis 1.9% (Vertrauensbereich 95 %, $k = 2$). Für unsere nachfolgenden Betrachtungen sind somit Leistungsunterschiede bzw. Einflüsse im ‰-Bereich von Interesse; als logarithmisches Leistungsverhältnis (in dB) umgerechnet bedeutet 1 ‰ einen Wert von nur 0.005 dB.

Im oben erwähnten Fall dominieren die Unsicherheiten des verwendeten Transfornormal (Kalibrierfaktor) und diejenige der entstehenden Fehlanpassungen. In vielen praktischen Anwendungen wird aber dieser optimale Fall nicht erreicht: Oft weisen die zu kalibrierenden Komponenten nur durchschnittliche Spezifikationen auf (Reflexionsfaktor, mechanische Toleranzen der Stecker) oder die Verbindungen befinden sich in einem nicht optimalen Zustand, z. B. durch Abnutzung oder durch Fehlmanipulationen. Die Messresultate unterliegen dann wesentlich größeren statistischen Schwankungen als im Normalfall, d. h. der Einfluss der Reproduzierbarkeit der RF Steckerverbindungen wird manifest.

Einfluss der Fehlanpassung

Die Fehlanpassung von koaxialen Komponenten ist definiert als Abweichung der tatsächlichen Impedanz von der Bezugsimpedanz des verwendeten Koaxialsystems (hier $50\ \Omega$). Die Fehlanpassung führt dazu, dass beim Zusammenschalten von Koaxialkomponenten (z. B. Generator und Sensor) die tatsächlich vom Generator verfügbare Hochfrequenzleistung nie vollständig vom Sensor aufgenommen werden kann; ein Teil der Energie wird, verursacht durch die Fehlanpassung, zum Generator reflektiert.

Dieser Tatsache ist bei der Berechnung des Kalibrierfaktors immer Rechnung zu tragen. Das bedeutet, dass sämtliche im System verwendeten Komponenten bezüglich ihrem Reflexionsfaktor charakterisiert sein müssen. Kennt man für jede Messfrequenz alle Reflexionen nach Betrag und Phase, kann der Einfluss auf die Leistungsübertragung (mismatch error) beim Kalibrieren genau berechnet werden. Sind jedoch nur die Beträge der Reflexionen bekannt, kann die zum Gene-

Parallele oder sequentielle Vergleichsmethode?

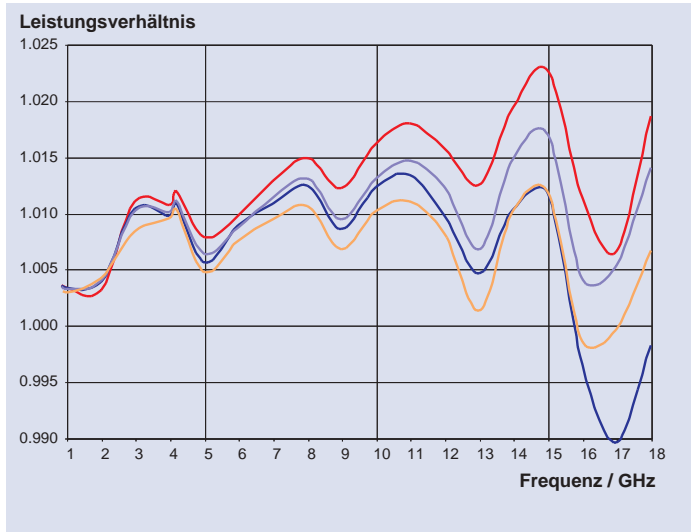
Im Gegensatz zur sequentiellen Vergleichsmethode werden Kalibrierungen oft auch mit der parallelen Vergleichsmethode (Illustration 3) durchgeführt. Bei diesem – etwas einfacher erscheinenden – Verfahren werden DUT und REF gleichzeitig mit je einem Ausgangstor des Leistungsteilers verbunden. Man kann dadurch direkt das Leistungsverhältnis erfassen, mit dem der Kalibrierfaktor der Referenz auf den Prüfling zu übertragen ist. Als Nachteil resultiert für diese Methode aber eine wesentlich grössere Messunsicherheit, verursacht durch die Asymmetrie des Leistungsteilers, die vollständig in das Endresultat eingeht. Bei der bevorzugten sequentiellen Methode entfällt dieser Anteil ganz. Zudem werden hier Referenz und Prüfling am gleichen Tor gemessen, d. h. die Reflexion der Quelle wie auch die mechanischen Eigenschaften des Tors, die wiederum die Steckerreproduzierbarkeit beeinflussen, sind für DUT und REF identisch. Deshalb können auch die entstehenden Messunsicherheitsbeiträge der Reflexion und der Steckerreproduzierbarkeit für jeden Sensor klar getrennt werden, was nicht nur für Anwendungen in der Metrologie wichtig ist.

4: RF-Sensor-Kalibrierungen.

rator zurück reflektierte Leistung nicht bestimmt werden, sondern lediglich Minimal- und Maximalwerte. Der durch Fehlanpassung von jeder Schnittstelle im System verursachte Anteil muss als Unsicherheit betrachtet werden (mismatch uncertainty), da nicht vorausgesagt werden kann, ob sich Reflexionen vektoriell addieren oder subtrahieren [2], [3].

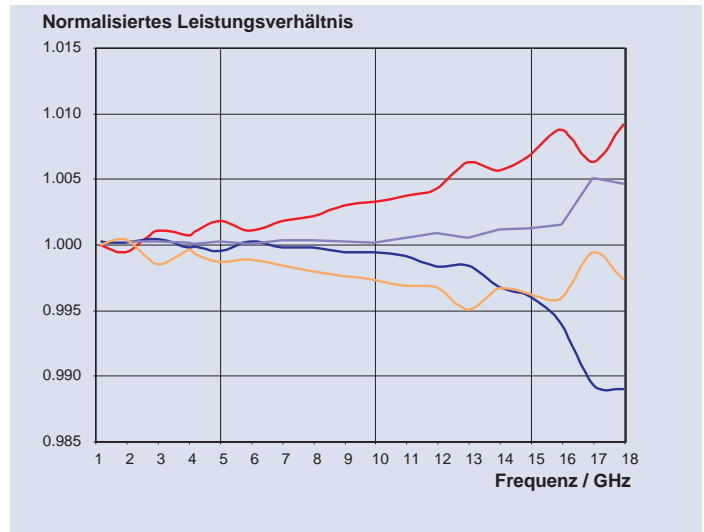
Reproduzierbarkeit von RF-Steckerverbindungen

Wird beim Kalibrieren ein Prüfling DUT mit dem Tor 2 des Messsystems (Illustration 2) verbunden,



Position 1 – Position 2 – Position 3 – Position 4 –

5: Leistungsverhältnis R für vier Steckerpositionen eines Typ-N-Sensors; dem Frequenzgang überlagert sind mit der Frequenz zunehmende Schwankungen, verursacht durch eine schlechte Steckerreproduzierbarkeit.



Position 1 – Position 2 – Position 3 – Position 4 –

6: Beispiel für eine schlechte Steckerreproduzierbarkeit eines Typ-N-Sensors (auf den Mittelwert normalisiertes Leistungsverhältnis des Diagramms 5).

wird letztlich die vom DUT aufgenommene Leistung auch von der Qualität der gerade erstellten Steckerverbindung beeinflusst. Man kann sich leicht vorstellen, dass eine mechanische Verbindung in einem Koaxialsystem zu einer zusätzlichen Dämpfung des elektrischen Signals führt. Diese ist unter anderem abhängig vom Kontaktübergangswiderstand, von der Oxydation, von mechanischen Toleranzen, vom mechanischen Abrieb der vergoldeten Kontaktelemente, vom Kontaktdruck, von der Konstruktion (des Steckers und des Sensorelements), von der Frequenz wie auch von der Verschmutzung der Stecker.

Wird die Verbindung gelöst und ein zweites Mal erstellt, ändern sich einige der vorgängig genannten Größen. Die neu entstehende Dämpfung wird deshalb variieren, d. h. die Reproduzierbarkeit jeder Verbindung ist endlich begrenzt. Im vorliegenden Beitrag bezieht sich die Steckerreproduzierbarkeit auf die entstehende Streuung der Übertragungsdämpfung (Transmission) einer Verbindung.

Es ist offensichtlich, dass die zweite notwendige Steckerverbindung zwischen der Referenz REF und dem Tor 2 genau so eine endliche Reproduzierbarkeit aufweist; zudem sind immer beide Seiten jeder Verbindung (Sensor

und Leistungsteiler) am Vorgang beteiligt. Alle weiteren Steckerreproduzierbarkeiten des Messsystems sind jedoch nicht weiter relevant; sie bleiben während der Messung konstant und entfallen somit bei der Verhältnismessung, auf der diese Kalibriermethoden für RF-Sensoren basiert.

Die Resultate – hier die gemessenen Leistungsverhältnisse – erhalten durch die Steckerreproduzierbarkeit eine zusätzliche statistische Unsicherheit.

Grenzen der Steckerreproduzierbarkeit

Der Einfluss der Steckerreproduzierbarkeit tritt sowohl in täglichen Laboranwendungen, z. B. bei einer RF-Leistungsmessung, als auch beim hier beschriebenen Kalibrieren von RF-Sensoren auf. Für präzise Messungen sind die betroffenen Stecker Schlüsselemente. Ab einem gewissen Anspruch an die Messunsicherheit kann die Reproduzierbarkeit sogar zum limitierenden Faktor werden. Deshalb sind genauere Kenntnisse und Betrachtungen mindestens für Anwendungen in der RF-Metrologie unumgänglich.

In der Literatur findet man zwar quantitative Aussagen über die Steckerreproduzierbarkeit. So wird in [4] für 7 mm- und Typ-N-Stecker ein Be-

reich von 0.005 bis 0.02 dB (Leistungsverhältnis 0.1 bis 0.5 %) genannt. Andere Stellen berichten aber, speziell bezüglich der sehr verbreiteten Typ-N-Stecker, über wesentlich schlechtere Resultate. Zudem wird die Reproduzierbarkeit als Standardabweichung spezifiziert, ausgehend von 16 Messungen (16 Positionen) an jedem Stecker. Es ist einleuchtend, dass sich solche Aufwände nur in Ausnahmefällen rechtfertigen. Welcher Aufwand ist sinnvollerweise im Normalfall zu betreiben? Um diese Frage zu beantworten, wurden die vorliegenden Untersuchungen durchgeführt.

Praktische Messungen sind entscheidend

Nur praktische Messungen erlauben letztlich quantifizierbare Aussagen bezüglich der wirklich erreichbaren Steckerreproduzierbarkeit im eigenen Labor. Die hier in bisher ca. 250 Messreihen gewonnenen Erfahrungen an Typ-N-, 7 mm- und 3.5 mm-Steckern zeigen, dass es vorerst genügt, die Steckerverbindungen für DUT und REF unter vier Positionen zu messen. Dazu werden die Sensoren bei jeder neuen Verbindung vollständig gelöst, um je ca. 90° gedreht und dann neu verschraubt. Anhand des Messresultats lässt sich sofort aussagen, ob eine Messung brauchbar ist

oder ob weiter gehende Untersuchungen bzw. mehr Messungen gemacht werden müssen, um eine relevante statistische Aussage zu machen.

Wie in Formel 2 gezeigt, ist der Kalibrierfaktor eines Sensors direkt abhängig von beiden gemessenen Leistungsverhältnissen ($R_1 = P_{DUT} / P_{MON}$ bzw. $R_2 = P_{REF} / P_{MON}$). Die nachstehend dargestellten Resultate zeigen je ein Leistungsverhältnis R für vier Steckerpositionen eines Typ-N-Sensors (Diagramm 5). Zur besseren Interpretation der Steckerreproduzierbarkeit werden die Kurven anschliessend normalisiert, d. h. der absolute Kalibrierfaktor und seine Frequenzabhängigkeit entfallen (Diagramm 6).

Erste Messresultate, Verifikation und Messgrenze

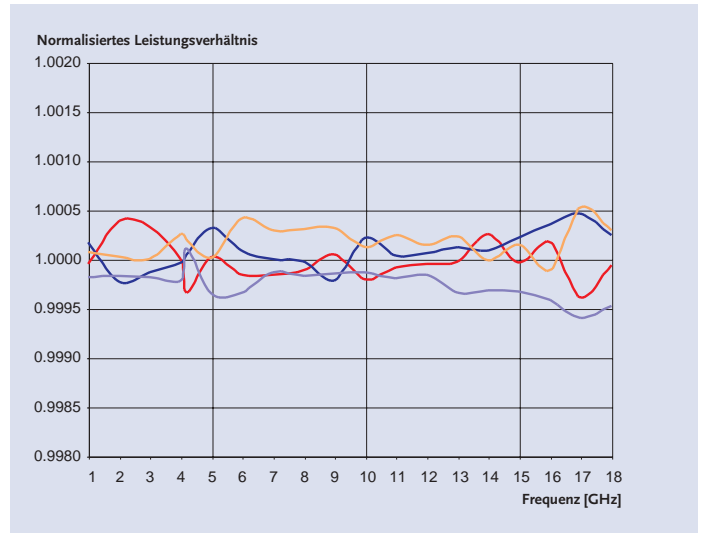
Erste Messungen der Steckerreproduzierbarkeit mit den beiden Kalibriersystemen für Typ-N- und 3.5 mm-Sensoren (18 GHz bzw. 26.5 GHz) zeigten anfänglich massiv schlechtere Resultate bei allen untersuchten Typ-N-Sensoren, was auf einen möglichen Fehler hinwies. Die postulierten Unsicherheiten wären, im Gegensatz zu den 3.5 mm-Sensoren, nie erreicht worden und der Kalibrieraufwand stände in einem schlechten Verhältnis, gemessen an den erreichten Resultaten.

Durch Austausch der beteiligten Komponenten konnte als Verursacher der verwendete Typ-N-Leistungsteiler mit defekten bzw. abgenutzten Testportsteckern lokalisiert werden. Nach dem Austausch ergaben sich für beide Steckerfamilien vergleichbare Resultate, wie die Diagramme 7 und 8 zeigen. Mehr als 50 % aller gemessenen Sensoren erreichen Steckerreproduzierbarkeiten in dieser Grössenordnung. Sie sind nur wenig schlechter als die Reproduzierbarkeit des gesamten Messsystems bei unveränderten Steckverbindungen (Diagramm 9). Damit ist auch die Messgrenze des Systems, bedingt vor allem durch Rauschen und Drift aller eingesetzten Messgeräte, definiert.

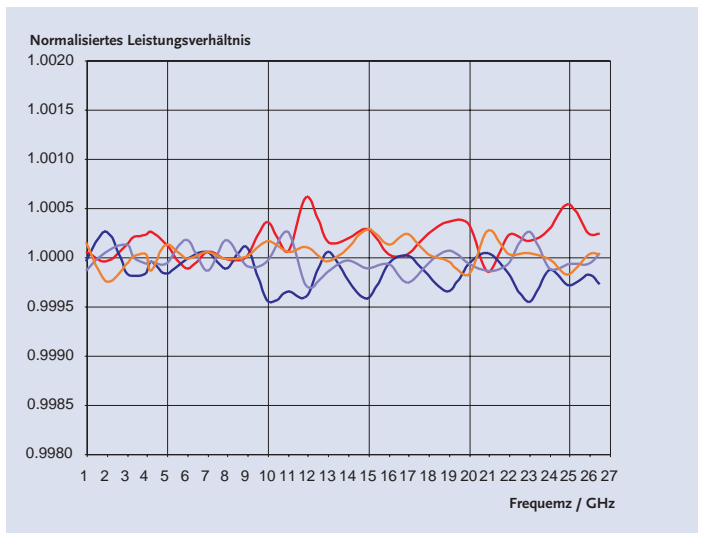
Stecker-Handling

Reproduzierbarkeit und Langlebigkeit einer Verbindung werden massgeblich vom Handling beeinflusst, d. h. es ist entscheidend, wie sorgfältig der Anwender mit den Steckern umgeht. So sollte jeder neu im Labor ankommende Stecker erst gereinigt und mechanisch überprüft werden, denn ein defekter Stecker (z. B. durch vorstehenden Innenleiter) kann das Gegenstück der Messeinrichtung durch eine einzige Manipulation unbrauchbar machen.

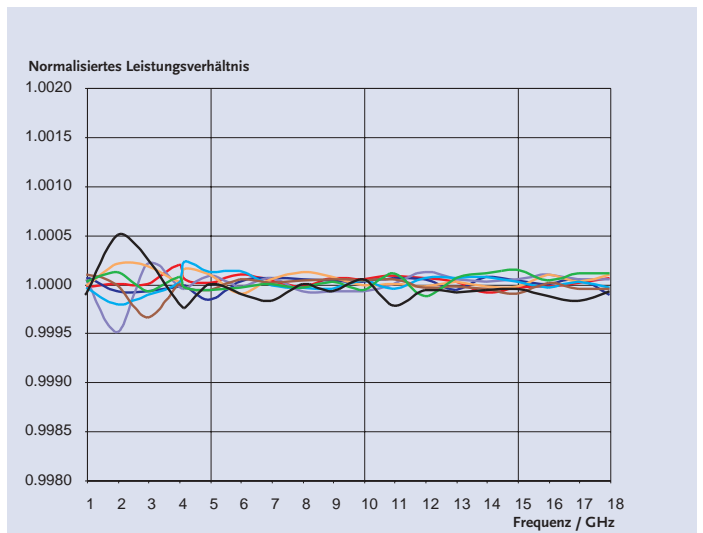
Die Kontaktierung muss mit viel Fingerspitzengefühl erfolgen: Die eigentlichen Kontaktflächen müssen letztlich absolut parallel aufeinander passen. So ist beim Verschrauben einer Koaxialverbindung darauf zu achten, dass beide Seiten jederzeit plan und zentrisch zueinander bleiben. Sie dürfen während des Anziehens auch nicht gegeneinander verdreht werden, dies einerseits wegen entstehendem Abrieb, aber auch, weil sonst die Gefahr besteht, dass der eingeschraubte Innenleiter herausgedreht wird. Ein sehr sorgfältiges Vorgehen ist dabei notwendig, denn nur so können unerwünschte Kräfte vermieden werden, die auf die Verbindungsflächen oder sogar



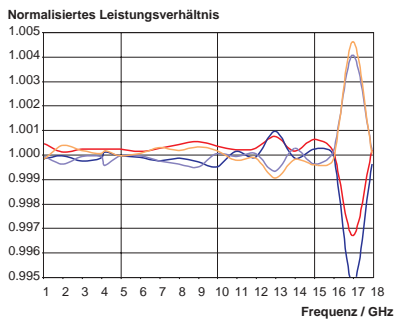
7: Typische Steckerreproduzierbarkeit bei Typ-N-Sensoren.



8: Typische Steckerreproduzierbarkeit bei 3.5 mm-Sensoren.

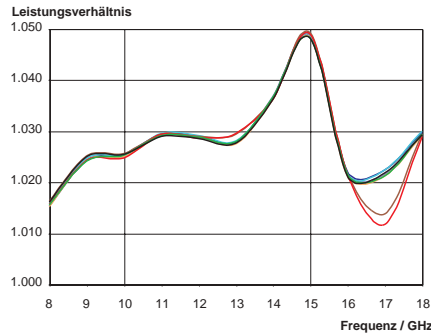


9: Typische Reproduzierbarkeit des Messsystems, jedoch ohne die Steckerreproduzierbarkeit (Rauschen und Drift des Messsystems).



Position 1 — Position 2 — Position 3 — Position 4 —

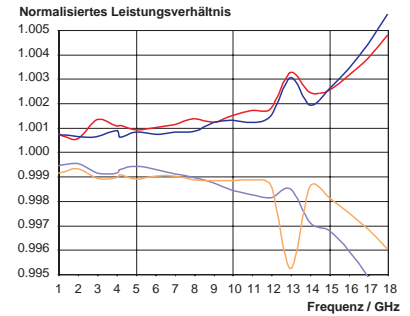
10: Typischer Resonanzeffekt, wie er bei gewissen Frequenzen bei Typ-N-Steckern auftreten kann, verursacht durch mechanische Toleranzen.



Messreihe 1: Position 1 — Position 2 — Position 3 — Position 4 —

Messreihe 2: Position 1 — Position 2 — Position 3 — Position 4 —

11: Schlechte Steckerreproduzierbarkeit bei 17 GHz (Resonanzeffekt); Vergleich der absolut gemessenen Leistungsverhältnisse, zugehörig zu den beiden Steckerreproduzierbarkeiten aus Diagrammen 7 und 10 (Messreihe 1 und 2).



Position 1 — Position 2 — Position 3 — Position 4 —

12: Schlechte Steckerreproduzierbarkeit mit frequenzunabhängigem Anteil < 12 GHz, verursacht durch störende Kräfte, die durch unsorgfältiges Verschrauben entstehen können.

auf die hinter dem Stecker liegenden Elemente wirken. Selbst unter Berücksichtigung all dieser Massnahmen wird man beim optimalen Kontaktieren von Koaxialverbindungen aber immer recht grosse Unterschiede feststellen; dies ist bedingt durch mechanische Toleranzen.

Wichtig ist zudem, dass ein Stecker mit dem richtigen (entsprechend der Steckerfamilie) und nicht etwa einem höheren Drehmoment angezogen wird. Ältere Typ-N-Stecker besitzen aber oft keine Sechskantflächen, weshalb kein Drehmomentschlüssel angewendet werden kann. Unsere Erfahrungen zeigen, dass ein äusserst sorgfältiges Positionieren während dem Festschrauben des Steckers die wichtigste Voraussetzung für eine gute Reproduzierbarkeit ist; das angewendete Drehmoment ist dann nur noch von sekundärer Bedeutung.

Erfahrungen mit der Steckerreproduzierbarkeit

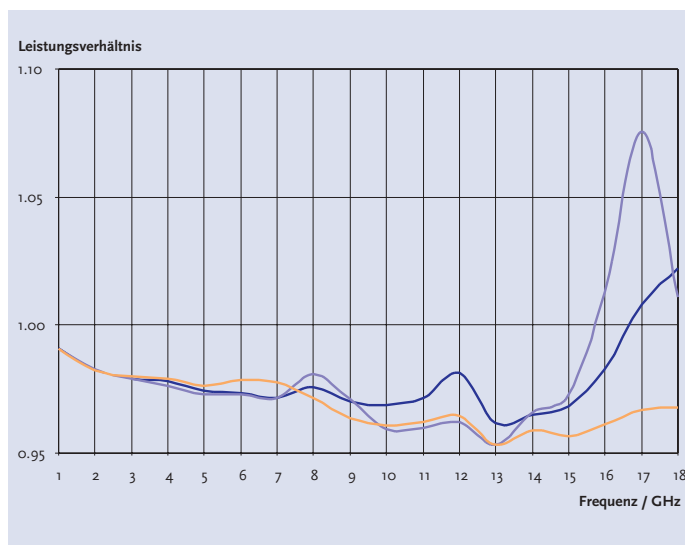
Misst man die Steckerreproduzierbarkeit eines Sensors mehrmals nacheinander, ergeben sich in einigen ungünstigen Fällen beträchtliche Abweichungen zwischen den Messreihen, während mit anderen stabile vergleichbare Resultate erzielt werden. Auf diese Weise lassen sich zuverlässige Komponenten (Sensoren) aussuchen; so macht es z. B. Sinn, einen als Referenznormal vorgesehe-

nen Sensor vorgängig einer aufwändigen und teuren Kalibrierung diesem Test zu unterziehen. Andernfalls wird seine mögliche schlechte Steckerreproduzierbarkeit die Unsicherheit jeder damit durchgeführten Messung verschlechtern.

Eine weitere Problematik soll anhand von Diagramm 10 diskutiert werden. Es zeigt eine neue Messreihe mit dem gleichen Sensor wie in Diagramm 7. Alle Parameter des Messaufbaus bleiben gleich, lediglich der Stecker des DUT wird neu positioniert, bei etwa gleichen Rotationswinkeln (0°, 90°, 180° und 270°). Bei 17 GHz entsteht offensichtlich ein Resonanzeffekt, die Reproduzierbarkeit wird etwa um einen Faktor 10 schlechter. Vergleicht man die absolut gemessenen Leistungsverhältnisse beider Reihen (Diagramm 11) stellt

man fest, dass zwei Messwerte in Diagramm 10 als «Ausreisser» deklariert werden könnten (Pos 1 und 2 bei 17 GHz), die restlichen stimmen innerhalb der sonst festgestellten Reproduzierbarkeit überein. Es entsteht also bei zwei Positionen eine stark erhöhte Dämpfung. Weitere Messreihen ergeben in der Folge immer wieder Abweichungen bei 17 GHz. Es wäre hier falsch, die ursprünglich gute Reproduzierbarkeit (Diagramm 7) anzugeben. Dieses Wissen hat man nur dank weiteren Messungen.

Diagramm 12 zeigt für einen anderen Sensor bereits ab sehr tiefen Frequenzen bis 12 GHz eine relativ konstante schlechte Reproduzierbarkeit, die im oberen Frequenzbereich noch stark ansteigt. Hierfür ist nicht nur der eigentliche Stecker verantwortlich,



13/14: 7 mm-Stecker mit schlechter Reproduzierbarkeit, verursacht durch Verunreinigung: Im Innenleiter ist eine Mikrofaser eines Reinigungstuches eingeklemmt.



Mikrokalorimeter und Thermistor

Streng genommen kann ein Mikrokalorimeter nicht direkt RF-Leistung, sondern lediglich sehr kleine Erwärmungen messen. Erst zusammen mit einem Thermistor-Sensor ergibt sich ein Primärnormal für RF-Leistung, mit dem sich diese Messgrösse auf die SI-Einheiten zurückführen lässt. Ein Mikrokalorimeter ist erforderlich zur Kalibrierung von Thermistor-Sensoren, die ihrerseits als höchstwertige Transferrnormale eingesetzt werden.

Der Thermistor-Sensor (Thermistor Mount)

Ein Thermistor-Sensor wandelt die zu messende RF-Leistung in Wärme um. Das eigentliche Thermistor-Element (mit grossem negativem Temperaturkoeffizient) dient einerseits direkt als Lastwiderstand für die RF-Leistung und stellt gleichzeitig auch den Zweig einer Brückenschaltung dar. Diese gleicht sich automatisch so ab, dass das Thermistor-Element für die Hochfrequenz eine konstant gehaltene 50 Ω Last darstellt. Zum Erreichen dieser Balance muss vom Messgerät – ohne anliegende RF-Leistung – eine bestimmte DC-Leistung aufgebracht werden. Die nun dem Thermistorelement überlagerte RF-Leistung verstimmt vorerst die Brücke; die Regelung gleicht die Brücke wieder ab, indem sie die DC-Leistung um den Betrag P_{DC_subst} reduziert (Bolometer-Prinzip). Das thermische Gleichgewicht stellt sich dabei wiederum ein. Bei Bedarf (d. h. je nach Schwankungen der Raumtemperatur) kann eine zweite, symmetrisch aufgebaute Brückenschaltung im Sensor zur Temperaturkompensation dienen.

Zur Rückführung der RF-Leistung auf die SI-Einheiten lässt sich schliesslich die Substitutionsleistung P_{DC_subst} mit externen DC-Präzisionsinstrumenten messen. Die Substitutionsleistung entspricht jedoch nur der Erwärmung, welche die RF-Leistung direkt im Thermistor-Element verursacht. Darin sind Verluste und Wirkungsgrad der RF-Wärmeumwandlung nicht enthalten, so dass eine Korrektur notwendig ist. Der interessierende Wirkungsgrad des Thermistors η_e ist definiert als

$$\text{Thermistor Wirkungsgrad } \eta_e = \frac{\text{DC Substitutionsleistung}}{\text{aufgenommene RF Leistung}} = \frac{P_{DC_subst}}{P_{RF_aufg}}$$

Kalibrieren im Mikrokalorimeter

In einem Mikrokalorimeter lässt sich nun der Wirkungsgrad des Thermistors bestimmen, weil sich damit gleichzeitig die kalori-

metrische wie auch die bolometrische Erwärmung messen lassen. Die bolometrische Messung beinhaltet nur die vom Thermistor-Element in Wärme gewandelte RF-Leistung; die Zuführungsverluste vom Stecker zum Element, der Wirkungsgrad der RF/DC-Umwandlung sowie dessen Restfehler bleiben unberücksichtigt. Dagegen wird mit der kalorimetrischen Messung die gesamte vom Sensor aufgenommene und in Wärme umgewandelte RF-Leistung erfasst. Das Verhältnis der beiden Erwärmungen ist der gesuchte Wirkungsgrad.

Der wesentliche Punkt ist nun, dass sowohl die Fehlanpassung durch die Reflexion am Eingang des Thermistor-Sensors wie auch die Leitungsverluste vom Generator zum Sensor keine Rolle spielen: Alle Verluste sind bei der kalorimetrischen wie bei der bolometrischen Erwärmung proportional enthalten und kompensieren sich deshalb. Aus diesem Grund spielen beim Kalibrieren von Thermistor-Sensoren im Mikrokalorimeter sowohl die genaue Kalibrierleistung wie auch die Reproduzierbarkeit der Steckerverbindung keine Rolle; dieser Vorteil gilt allerdings nicht mehr bei der Anwendung des Thermistors als Transferrnormal.

Im Gegensatz zu Thermistor-Sensoren enthalten übliche, thermisch messende RF-Sensoren immer aktive Schaltungen und produzieren dadurch eine gewisse Verlustwärme. Sie lassen sich deshalb nicht im Mikrokalorimeter kalibrieren.

Prinzip eines Mikrokalorimeters

Der Aufbau eines Mikrokalorimeters besteht aus einer thermisch isolierten Box, die zur Stabilisierung der Umgebungstemperatur zusätzlich von einem thermostatisierten Wasserbad umgeben ist. Die Box nimmt den zu kalibrierenden Sensor auf und über einen Fühler wird die Gesamtheit der darin produzierten Wärme als Temperaturdifferenz gemessen. Als Wärmesensor dient eine so genannte Thermosäule (Serieschaltung von Cu-CuNi-Thermoelementen), die vorgängig mit einer sehr genau messbaren DC-Substitutionsleistung im Mikrokalorimeter selbst kalibriert wird.

Da im Thermistor-Sensor mit Hilfe der Kompensationsbrücke der bolometrisch gemessene Leistungsanteil mit oder ohne RF konstant gehalten wird, entsprechen die von der Thermosäule erfassten Anteile den gesuchten Verlusten des zu kalibrierenden Sensors. Die aufwändige Messung ist naturgemäss sehr träge und benötigt ca. 24 h pro Frequenzpunkt.

15: Primärnormal für RF-Leistung.

sondern vermutlich eine direkt auf das Sensorelement bzw. auf seine Kontaktstelle wirkende störende Kraft. Der Stecker wurde beim Verschrauben verkantet. Der gleiche Sensor zeigte aber in weiteren Messreihen – unter Anwendung der notwendigen Sorgfalt – einwandfreie Resultate. Das verdeutlicht, dass sich die eigentliche Reproduzierbarkeit einer Steckerverbindung oft nicht klar von weiteren Einflüssen (hier auf das Sensorelement) trennen lässt.

Diagramm 13 und Illustration 14 zeigen, wie sich Verschmutzungen durch eine Mikrofaser (Reinigungstuch), eingeklemmt im Körbchen (Collet) des Innenleiters, auf die Reproduzierbarkeit eines 7 mm-Steckers auswirken.

Unsicherheitsberechnung

Die beiden Leistungsverhältnisse (R_1 , R_2), die bei der beschriebenen Kalibrieremethode (Formel 2) unter verschiedenen Steckerpositionen zu

messen sind, unterliegen statistischen Schwankungen. Als Eingangsgrössen zur Berechnung des Kalibrierfaktors werden ihre Standardunsicherheiten, d. h. ihre Beiträge zur gesamten Messunsicherheit als Typ A-Evaluation ermittelt. Die in Formel 2 einzusetzenden Leistungsverhältnisse ergeben sich (pro Frequenz) aus den Mittelwerten einer Messreihe. Die zugehörige experimentelle Standardabweichung ist die eigentliche Steckerreproduzierbarkeit,

Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration

Das Dokument EA-4/02 der European co-operation for Accreditation [1] beschreibt nebst der allgemein gültigen Unsicherheitsberechnung anhand von konkreten Beispielen auch zwei Kalibriermethoden in der RF-Messtechnik. Im Beispiel 6 (Calibration of a power sensor at a frequency of 18 GHz) wird ebenfalls kurz auf die Steckerreproduzierbarkeit eingegangen und gezeigt, wie diese in der Unsicherheitsberechnung berücksichtigt wird. Dies bedeutet letztlich, dass EA-konforme Kalibrierungen von RF-Sensoren die Steckerreproduzierbarkeit berücksichtigen müssen.

Wegleitung zur Bestimmung der Messunsicherheit.

definiert als Streuung der Übertragungsdämpfung (Transmission) [4]. Ein typisches Unsicherheitsbudget dazu ist in [1] zu finden.

Zusammenfassung

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass es für Metrologieanwendungen unumgänglich ist, bei der Kalibrierung von RF-Leistungsmessern die Steckerreproduzierbarkeit angemessen zu berücksichtigen; andernfalls sind die budgetierten Unsicherheiten nicht einzuhalten.

Un connecteur plein de malice

L'étalonnage de composants coaxiaux pour hautes fréquences et micro-ondes est toujours soumis à l'influence de la reproductibilité des connexions. L'objet à étalonner tout comme l'étalon de référence utilisé pour la comparaison doivent être branchés à l'installation de test par leurs connecteurs. Différents facteurs influencent la reproductibilité des contacts : les tolérances mécaniques, l'usure due à l'utilisation, les caractéristiques de construction ou l'utilisation inappropriée des connecteurs. L'erreur qui en résulte augmente avec la fréquence parce que les dimensions des connecteurs mécaniques se rapprochent toujours plus de la longueur d'onde. On ne peut donc plus négliger de telles erreurs.

Après une brève introduction, l'article de portée pratique développe, par l'étude de l'étalonnage de capteurs coaxiaux de puissance pour des fréquences allant jusqu'à 50 GHz, l'influence que peut avoir la reproductibilité des connecteurs sur les résultats. On montre comment reconnaître et éviter des erreurs lors de l'étalonnage et comment aborder la problématique de manière optimale.

Schlechte Stecker, verursacht durch normale Abnutzung oder durch unsachgemässe Anwendung, können somit identifiziert und ersetzt werden. Beim periodischen Charakterisieren von Referenznormalen lohnt sich ein Mehraufwand, indem mehrere Messreihen pro Sensor durchgeführt werden. Bei normalem Kalibrieren kommt man, unter Anwendung der gezeigten Massnahmen, mit einer Messreihe bei vier Steckerpositionen aus.

Non c'è spina senza spine

Quando si procede alla taratura di componenti coassiali ad alta frequenza o a microonde, i connettori costituiscono sempre un problema e pregiudicano la riproducibilità: infatti sia l'elemento da tarare sia il campione di riferimento impiegato per confrontare i risultati vengono collegati mediante i rispettivi connettori al dispositivo di prova. Per quanto concerne la riproducibilità, diversi fattori influiscono sul comportamento dei connettori: la tolleranza meccanica, il grado d'usura, le caratteristiche di costruzione o anche un impiego improprio. L'entità dell'errore che ne deriva aumenta insieme alla frequenza perché le dimensioni meccaniche dei connettori vengono a trovarsi sempre più vicine all'ordine di grandezza della lunghezza delle onde. Pertanto tali errori non possono più essere trascurati.

Dopo una breve introduzione, l'articolo, strettamente improntato alla pratica, mostra sull'esempio della taratura di teste coassiali di misura della potenza di frequenze radio fino a 50 GHz, come i connettori possano influire sulla riproducibilità del risultato. Inoltre viene illustrato come riconoscere ed evitare errori di taratura e come risolvere al meglio il problema posto dai connettori.

Referenzen

- [1] EA-4/02: *Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration*, European co-operation for Accreditation, 12-1999.
- [2] Meinke, Gundlach: *Taschenbuch der Hochfrequenztechnik*, Springer Verlag.
- [3] G. F. Engen: *Microwave Circuit Theory*, IEE Electrical Measurements, Series 9.
- [4] A. Fantom: *Radio Frequency and Microwave Power Measurement*, IEE Electrical Measurements, Series 7.



Jürg Furrer, Leiter des Labors Leistung und Rauschen, Sektion Hochfrequenz, EMV und Verkehr.

The problematic connector

The calibration of coaxial high frequency and microwave components is always subject to the influences of the connectors and their reproducibility: The test object and the comparison reference standard each have to be connected to the test system by means of their connector. Various factors affect the quality of reproducibility of the connection: mechanical tolerance, wear of use, constructional features or improper use of the connector. The extent of the resulting error grows with increase in frequency since the mechanical dimensions lie within the range of the wave lengths. Errors of this nature can therefore no longer be neglected.

Following a short introduction, this practice-related article illustrates how a result can be influenced by connector reproducibility, based on the calibration of coaxial RF power meter heads up to 50 GHz. It shows how to recognize and avoid errors during calibration and how the problem can be confronted most effectively.

