

# METAS-Kompetenz in der Hochfrequenz-Dämpfungsmessung bestätigt

*Unter der Leitung des National Physical Laboratory (NPL), Teddington (Grossbritannien), wurde ein weltweiter Vergleich der Hochfrequenz-Dämpfungsmessung durchgeführt. 19 nationale Metrologieinstitute (NMI), darunter METAS, nahmen an diesem Key Comparison teil, einem Messvergleich auf höchstem metrologischem Niveau. Die sehr guten Resultate bestätigen die Kompetenz des METAS auch auf diesem Gebiet.*

## JÜRIG FURRER

METAS beteiligte sich zum ersten Mal an einem Key Comparison im Bereich der Hochfrequenz-Dämpfungsmessung. Der Messvergleich steht mit dem veröffentlichten Draft B Report (CCEM.RF-K19.CL) kurz vor seinem Abschluss, die Resultate sind in der Datenbank des Internationalen Büros für Mass und Gewicht (BIPM) in Paris publiziert worden (<http://kcdb.bipm.org>).

### Stufenabschwächer als Transfornormale

Als Transfornormale wurden zwei kommerziell erhältliche Stufenabschwächer (Step Attenuator) in koaxialer 50- $\Omega$ -Ausführung mit N-Verbindern eingesetzt, die in 10-dB-Schritten einen Dämpfungsbereich von 0 dB bis 70 dB bzw. von 0 dB bis 110 dB aufweisen. Der Aufbau eines Stufenabschwächers besteht aus einzelnen Dämpfungsgliedern (10 dB, 20 dB, 40 dB), die über elektromechanische Relaischalter stufenweise bis zu einem Wert von 70 dB bzw. 110 dB kombiniert werden können. Eine Dämpfungszelle besteht aus einer Kombination von drei Widerständen (Pi- oder T-Schaltung), realisiert als hoch stabile Dünnschichtschaltung.

Entscheidend für den Einsatz eines Stufenabschwächers als Transfornormal ist nebst seiner Stabilität die Reproduzierbarkeit der enthaltenen elektromechanischen Schalter. Die Reproduzierbarkeit einer Dämpfungseinstellung wird vom Hersteller typischerweise mit 0.03 dB spezifiziert, doch können gute Ausführungen problemlos Werte von 0.001 dB erreichen. Dies ist für die geforderten Präzisionsanwendungen auch notwendig, denn sonst könnten Messunsicherheiten von 0.001 dB pro 10 dB, wie sie von guten Labors erreicht werden, nie nachgewiesen werden. Eine vorgängige, genaue Eignungsprüfung für Stufenabschwächer ist somit unumgänglich, wenn sie als Transfornormale eingesetzt werden sollen, sei es für einen Messvergleich oder für die Verwendung in einem Kalibrierlabor.

### Das METAS-Primärnormal für Hochfrequenz-Dämpfung

METAS verwendet als primäres Dämpfungsnormale einen so genannten Waveguide-Below-Cut-off-Abschwächer (WBCO), mit dem die Dämpfung bei 30 MHz direkt auf eine mechanische Längenmessung zurückgeführt wird (Bild und Illustration 1).

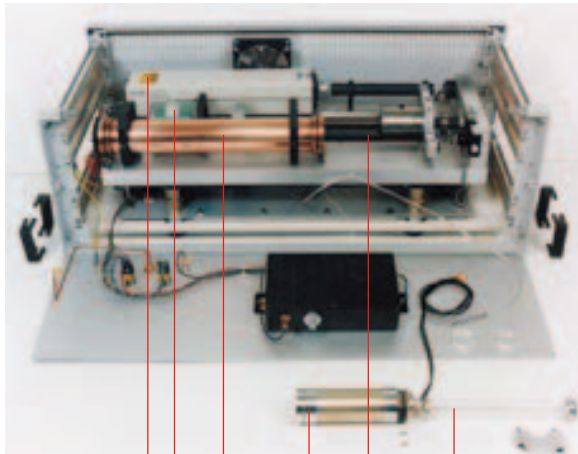
Im WBCO wird die Eigenschaft eines Wellenleiters (Hohlleiters,  $\varnothing = 50$  mm) ausgenutzt, der mit 30 MHz weit unterhalb seiner Cut-off-Frequenz von 5 GHz betrieben wird. Unter solchen Verhältnissen kann keine Wellenausbreitung stattfinden und das elektromagnetische Feld nimmt sehr rasch ab, und zwar in Funktion der Distanz zu der im Hohlleiter installierten 30-MHz-Sendeantenne.

Die distanzabhängige Feldstärke kann jedoch mathematisch genau berechnet werden, wenn sichergestellt ist, dass der Ausbreitungsmodus (hier  $TE_{11}$ ) bekannt und dominant ist. Dies wird mit einem Modelfilter erreicht. Durch präzises mechanisches Verschieben der Quelle (Piston, Bild 2) kann die Dämpfung, die definitionsgemäss ein Leistungsverhältnis  $P_1/P_2$  darstellt (Kasten 3), direkt auf eine Längenmessung (SI-Einheit, Primärnormal) zurückgeführt werden. Dazu dienen ein Schrittmotor, eine Gewindestange (bzw. Leitspindel) und ein Laserinterferometer zur Distanzmessung.

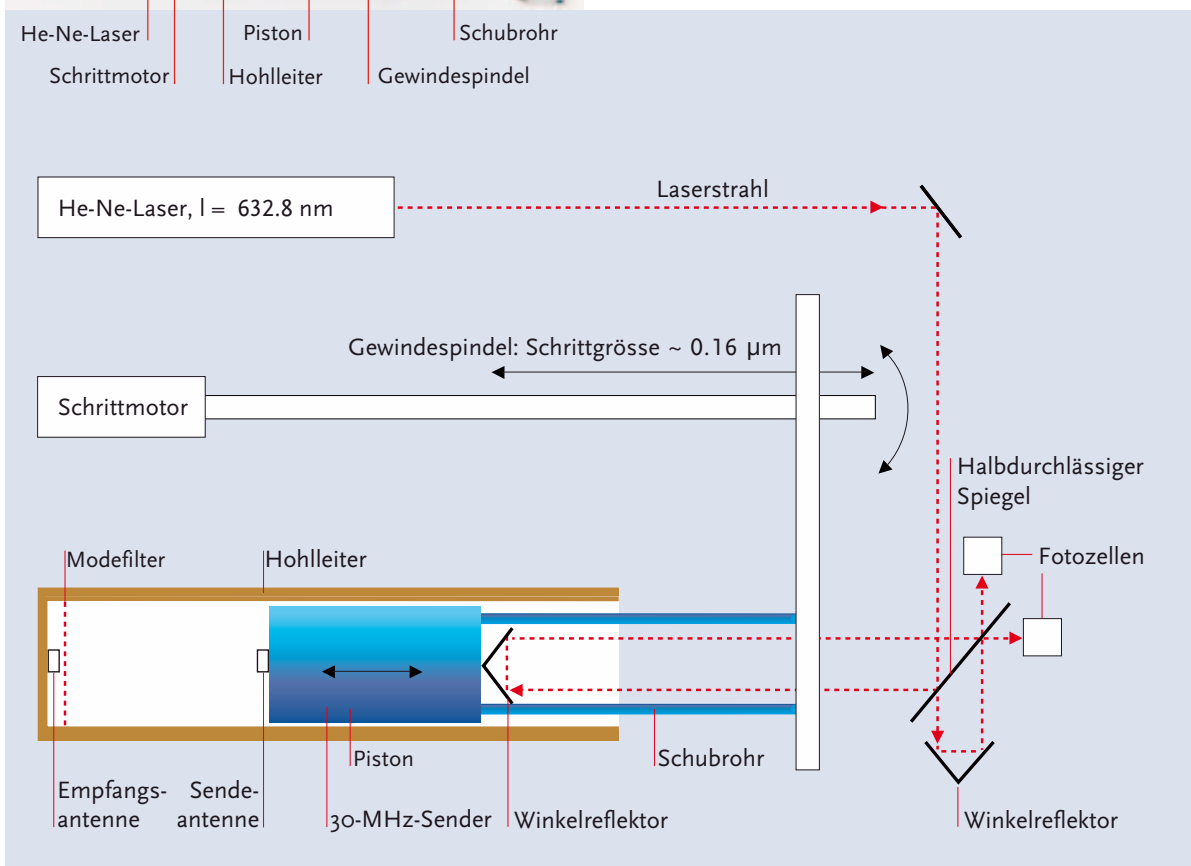
### Unterschiedliche Messmethoden

In der Vergleichsanordnung des METAS wird das vom Prüfling (Device Under Test, DUT) kommende Signal mit dem Referenzsignal des WBCO verglichen (Illustration 4). Dies wird mit einem PIN-Diodenschalter und einem Messempfänger realisiert. Der Piston im WBCO wird so lange verschoben, bis beide detektierten Pegel identisch sind. Während der Messzeit geht die Stabilität der Generatorleistung voll in das Messresultat ein; deshalb ist eine Regelschleife (ALC) via Powersplitter und Powermeter ein Muss. Da der WBCO nur bei 30 MHz arbeitet, wird das jeweilige DUT-Signal mit einem Mischer und einem Lokaloszillator auf diese Frequenz umgewandelt. Eine Software steuert die gesamte Anordnung und berücksichtigt über Sensoren die aktuelle Temperatur und die Luftfeuchtigkeit im Hohlleiter des WBCO.

Die 19 Labors wenden verschiedenste Messmethoden an. Meistens setzen sie induktive Spannungsteiler (IVD) als Primärnormale und Vektor-Netzwerk-Analysatoren (VNA) ein. Bei den VNA sind die Messunsicherheiten naturgemäss grösser, was dazu führte, dass die Auswertung in zwei Kategorien vorgenommen wurde.



1 Waveguide-Below-Cut-off-Abschwächer (WBCO), das METAS-Primärnormal für Dämpfung bei 30 MHz: Der luftgelagerte 30-MHz-Sender (Piston) im Hohlleiter wird durch den Schrittmotor verschoben; der entstehende Pegelunterschied an der Empfangsantenne kann direkt aus dem gemessenen Längenunterschied berechnet werden.



### Inkrementelle Dämpfung als Messgröße

Jedes Labor hatte die Aufgabe, die inkrementelle Dämpfung (Definition: siehe Kasten 3) beider Transferrnormale bei zehn vorbestimmten Nominalwerten zu ermitteln, und zwar bei Messfrequenzen von 60 MHz und 5 GHz. Zusätzlich waren für alle Nominalwerte und Messfrequenzen die komplexen Reflexionsfaktoren der Prüflinge zu bestimmen; diese werden für die Unsicherheitsberechnung benötigt.

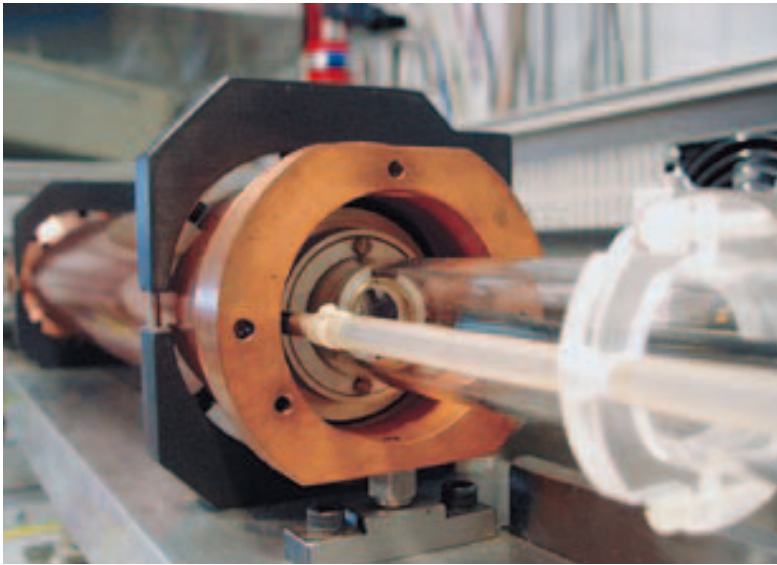
Das Pilotlabor NPL mass die beiden Transferrnormale insgesamt dreimal aus, nämlich zu Beginn des Messvergleichs, nach 24 Monaten und am Ende, um die Stabilität der Prüflinge

zu testen. Während des ganzen Ablaufs traten weder Probleme noch Defekte auf, so dass alle Resultate ohne Korrekturen vergleichbar sind.

### Wesentliche Messunsicherheitsbeiträge

#### Anpassungsfehler am DUT

Aus der Definition der Dämpfung geht hervor, dass sowohl Generator und Last ideal an die verwendete Leitungsimpedanz ( $Z_0 = 50 \Omega$ ) angepasst sind. Dazu dienen die in der Vergleichsanordnung (Illustration 4) am Ein- und Ausgang des DUT angebrachten Anpasseinheiten (Match). Bei jeder Messfrequenz sind diese mit Hilfe eines Vektor-Netzwerk-



2 Einblick in den Hohlleiter mit dem eingeführten Piston und dem Schubrohr aus Glas.

#### Einfügungsdämpfung $L$

Verbindet man einen Hochfrequenz-Generator direkt mit einer Last (z. B. einem  $50\text{-}\Omega$ -Abschlusswiderstand), wird von der Last die Leistung  $P_1$  aufgenommen. Wird nun ein 2-Tor-Netzwerk (z. B. ein Dämpfungsglied) zwischen Generator und Last eingefügt, reduziert sich die von der Last aufgenommene Leistung auf den Wert  $P_2$ . Die Einfügungsdämpfung  $L$  des 2-Tor-Netzwerks wird nun, ausgedrückt in der logarithmischen Einheit Dezibel (dB), definiert als  $L = 10 \cdot \log_{10}(P_1/P_2)$ .

#### Dämpfung $D$

Die Dämpfung  $D$  wird identisch definiert, jedoch gilt nun zusätzlich die Bedingung, dass der Generator und die Last perfekt an die verwendete Leitungsimpedanz (normalerweise  $Z_0 = 50\ \Omega$ ) angepasst ist. Die Dämpfung  $D$  hängt somit nur vom 2-Tor-Netzwerk selbst ab, im Gegensatz zur Einfügungsdämpfung  $L$ , die auch von der Generator- und Last-Impedanz abhängig ist. Das ist der Grund, warum die Einfügungsdämpfung  $L$  in der Metrologie keine Bedeutung hat.

#### Residuelle und inkrementelle Dämpfung

Ein physikalisch realisierter Stufenabschwächer weist aber, bedingt durch Zuleitungsverluste, bereits in der 0-dB-Stellung eine gewisse Dämpfung auf. Diese ist aber oft in metrologischen Anwendungen nicht von Interesse, weil Kompensationsschaltungen diesen Beitrag eliminieren. Deshalb unterscheidet man bei der Dämpfung  $D$  zwei Anteile: die residuelle Dämpfung  $D_r$  (in der 0-dB-Stellung) und die inkrementelle Dämpfung  $D_i$  (zwischen den geschalteten Werten des Stufenabschwächers).

3 Definition der Dämpfung

Analysators (VNA) zu optimieren bzw. deren Reflexionsfaktoren zu ermitteln. Weil dies sehr aufwändig sein kann und nicht immer optimal gelingt, resultieren Anpassungsfehler, die zusätzlich von den Reflexionsfaktoren des DUT abhängig sind.

#### Unsicherheitsbeiträge des WBCO

Die grössten Unsicherheitsbeiträge stammen von den mechanischen Toleranzen: einerseits des Hohlleiter-Durchmessers (Berechnung der Feldstärke) und andererseits der Parallelität zwischen der WBCO-Bewegung und deren Längenmessung; die Position der Sendeantenne im Hohlleiter bewirkt die tatsächliche Dämpfung, während deren Verschiebung mit dem Laserinterferometer bestimmt wird.

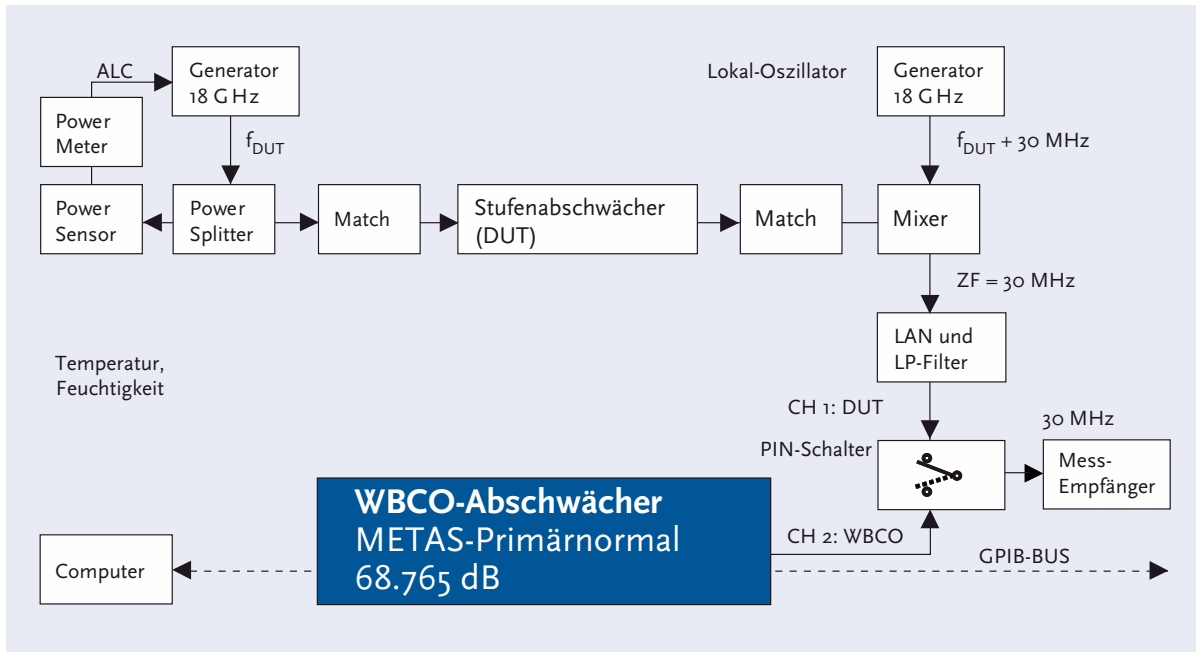
Bei Dämpfungen  $\geq 80$  dB entstehen weitere, nicht vernachlässigbare Beiträge durch den schlechteren Rauschabstand am Empfänger, durch die Signalkompression am Mischer sowie durch Signal-Nebensprechen (Leakage) rund um den DUT, weil es nie gelingt, perfekte Abschirmungen der Stecker und Koaxialleiter zu erreichen.

#### Anwendungsbereich hochgenauer Dämpfungsmessungen

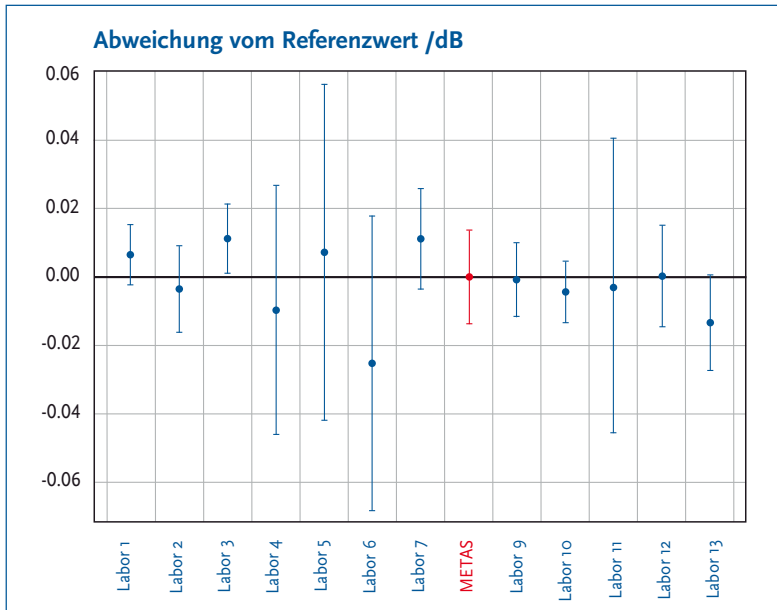
Präzise kalibrierte Stufenabschwächer werden meist zur Linearitätsbestimmung von Hochfrequenz-Messgeräten wie Netzwerk-Analysatoren (S-Parameter), Leistungsmessern, Messempfängern, Spektrum-Analysatoren und Oszilloskopen benötigt. In der Metrologie kann damit die Rückverfolgbarkeit der wichtigsten Hochfrequenz-Parameter wie Leistung, Spannung, S-Parameter und Rauschen über einen gewissen Dynamikbereich sichergestellt werden.

#### METAS erzielte hervorragende Resultate

Die Spezialisten des Hochfrequenzlabors des METAS waren sehr motiviert, an diesem Messvergleich teilzunehmen. Einerseits erhielten Sie so Einblick, wo die Dämpfungsmessung heute auf internationaler Ebene steht. Weiter ergab sich



4 Vergleichsanordnung: Mit Hilfe eines PIN-Diodenschalters, eines Messempfängers und der Steuersoftware substituiert der WBCO-Abschwächer das durch den Prüfling (DUT) verursachte Leistungsverhältnis. Dazu sind zwei Messzyklen notwendig (DUT x dB, DUT y dB).



5 Auswertung der Labors mit Primärnormalen: Differenz der Laborresultate zum Referenzwert des Vergleichs bei  $f = 5$  GHz; nominelle Dämpfung = 60 dB; 70-dB-Stufenabschwächer (Transfernormal); Unsicherheitsangabe = kombinierte Standardunsicherheit,  $k = 2$ .

– nebst den Vergleichsergebnissen – auch ein vertiefter Einblick in die unterschiedlichen Messverfahren. Zudem entstand für METAS, das die Messungen im Januar 2004 durchführte, eine ausgezeichnete Gelegenheit, den zu diesem Zeitpunkt gerade fertig gestellten Dämpfungsmessplatz ausgiebig zu verifizieren. Die sehr guten Resultate zeigen, dass sich die angewandte WBCO-Methode (Waveguide-Below-Cut-off-Abschwächer) durchaus mit andern primären Dämpfungsstandards messen kann.

Aufgrund der Vielzahl von Resultaten konnten selbst im Schlussbericht nur eine Auswahl aller Messwerte grafisch dargestellt werden. Das Diagramm 5 zeigt als Beispiel die Messresultate bei einer Frequenz von 5 GHz mit dem 70-dB-Stufenabschwächer des Transfernormalen. Die abgebildeten Messunsicherheiten widerspiegeln auch die Qualität der verschiedenen Messverfahren. Die von METAS angegebenen Messunsicherheiten lagen in jedem Fall innerhalb der beim Vergleich ermittelten Referenzwerte.