

# Kompetenz der METAS-Hochfrequenz-Leistungsmessung bis 50 GHz bestätigt

Die Resultate des weltweiten Vergleichs der Hochfrequenz-Leistungsmessung zwischen 2 GHz und 50 GHz bestätigen die Kompetenz des Hochfrequenzlabors des METAS. Der vom National Institute of Standards and Technology (NIST), USA, koordinierte Messvergleich ist der bisher einzige, der auf höchster Frequenz für Sensoren mit koaxialen Steckerverbindern (2.4 mm-Stecker) durchgeführt wurde.

JÜRGEN FURRER

Die Motivation für dieses Projekt bestand darin, einen internationalen Vergleich bei der höchsten Messfrequenz eines Kalibrierdienstes zu haben, die für HF-Leistung erhältlich ist. Bisherige Vergleiche wurden nur bis 26.5 GHz ausgeführt. Die nationalen Metrologielabors von England, Holland, Kanada, Südafrika, Australien, Japan, Südkorea, USA und der Schweiz beteiligten sich am 50 GHz-Messvergleich (CEEM. RF-S1.CL: RF Power Measurements with 2.4 mm Connectors), der kürzlich mit dem Schlussbericht abgeschlossen wurde.

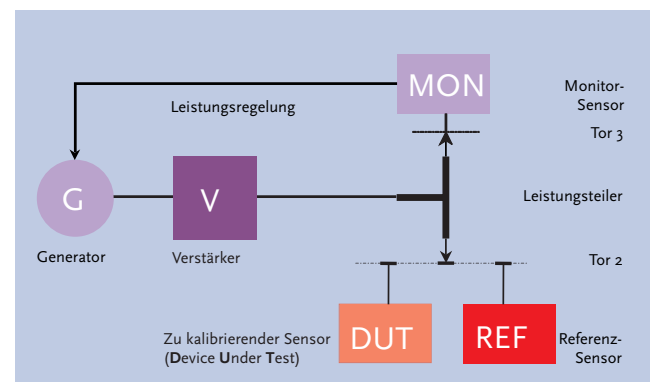
## Transfornormale und Messgrösse

Als Transfornormale wurden zwei kommerziell erhältliche 50 GHz-Leistungsmessköpfe eingesetzt (hp8487A) inklusive zugehörigem Leistungsmesser (hp437B). Die Sensoren funktionieren nach dem Prinzip eines Thermoelements: Die zu messende HF-Leistung erwärmt einen 50 Ω-Abschlusswiderstand, der mit einem Thermoelement gekoppelt ist. Dessen Ausgangsspannung ist proportional der umgesetzten HF-Leistung.

Weil solche Wandler frequenzabhängige Verluste (z. B. bedingt durch die Zuleitungen) haben, müssen sie mit einem Kalibrierfaktor charakterisiert werden. Die Aufgabe jedes beteiligten Labors bestand nun darin, diese Kalibrierfaktoren für beide Messköpfe zu bestimmen, und zwar bei acht vereinbarten Messfrequenzen zwischen 2 GHz und 50 GHz. Dazu wurden jedem Labor maximal zwei Monate Zeit eingeräumt inklusive Transport zum nächsten Institut.

Weil sich der gesamte Messvergleich über 23 Monate erstreckte, hat das Pilotlabor NIST die beiden Transfornormale nach zwölf Monaten nachgemessen, um sicherzustellen, dass sich die Prüflinge genügend stabil verhalten. Während des ganzen Vergleichs traten keinerlei Probleme oder Defekte mit den Prüflingen auf, so dass alle Resultate ohne Korrekturen verglichen werden können.

In einem «inoffiziellen Teil» war es auch möglich, zusätzliche Messpunkte bei weiteren interessierenden Frequenzen zu vergleichen, da das Pilotlabor jeweils die Messungen in Schritten von 0.2 GHz ausführte. Zusammen mit drei anderen Instituten nahm METAS diese Gelegenheit wahr, im Fre-



- 1 Direct Comparison System: Vergleichsverfahren zur Kalibrierung von RF-Sensoren. DUT und REF werden nacheinander am gleichen Tor 2 angeschlossen. Es werden zwei Leistungsverhältnisse  $P_{DUT} / P_{MON}$  bzw.  $P_{REF} / P_{MON}$  gemessen.

quenzbereich bis 50 GHz lückenlos Vergleiche vorzunehmen. Weil die Messabläufe im METAS automatisiert sind, war der Zusatzaufwand gering.

## Messmethode

Alle neun Labors verglichen die Prüflinge (Device under Test, DUT) mit ihren Referenznormalen mit Hilfe eines «Direct Comparison Systems» (Illustration 1). Im Detail unterscheiden sich die Vergleichssysteme der einzelnen Labors insofern, als wegen des grossen Frequenzbereichs zum Teil nicht nur koaxiale Komponenten, sondern auch Hohlleitersysteme zum Einsatz kamen (Referenznormale, Richtkoppler, Übergangsadapter). Das koaxiale 50 GHz-System von METAS überstreicht mit dem gleichen Aufbau den Frequenzbereich von 50 MHz bis 50 GHz.

## Referenz- und Primärnormale

Als Referenznormale für HF-Leistung dienen für höchste Ansprüche so genannte Thermistor-Mounts, die jedoch genau wie thermische Leistungsmesser kalibriert werden müssen. Dies kann mit der kleinstmöglichen Messunsicherheit in einem Mikrokalorimeter erfolgen. Damit entsteht ein Primärnormal, mit dem die gemessene HF-Leistung auf die DC-Leistung (bzw. auf die SI-Einheiten) zurückgeführt werden kann. 50 GHz-Thermistor-Mounts sind normalerweise in Hohlleitertechnik ausgeführt.

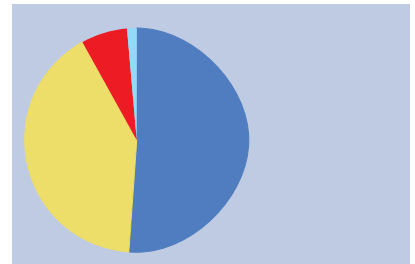
Lediglich drei der am Vergleich teilnehmenden Labors waren in der Lage, eigene 50 GHz-Primärnormale einzusetzen. Weitere drei Labors benutzten 40 GHz-Primärnormale, und die restlichen drei Labors wie METAS verwendeten thermische Leistungsmesser, die in einem andern NMI kalibriert worden waren, als Referenznormale.

### Referenzwerte

Vier der beteiligten Labors lassen – mindestens teilweise –, ihre Referenznormale bei einem der restlichen Teilnehmer-Labors kalibrieren. Das bedeutet, dass die Resultate nicht unabhängig voneinander sind. Aus diesem Grund wurde der Referenzwert nicht aus allen Teilnehmerresultaten ermittelt, sondern nur aus den Daten derjenigen Labors bestimmt, welche die Messgröße HF-Leistung durch eine unabhängige Realisierung bestimmen können.

### Resultate

In diesem Bericht werden eine Auswahl von Resultaten des Kalibrierfaktors veröffentlicht, und zwar für die Frequenzen 33 GHz und 50 GHz (Diagramme 2). Dargestellt ist die Abweichung zum ermittelten Referenzwert. Generell liegen sämtliche Resultate innerhalb der angegebenen Messunsicherheiten. Dieses Ergebnis wird vom Pilotlabor NIST als «Excellent Agreement» bezeichnet.



3 Anteile der Messunsicherheitsbeiträge: Optimierung und Korrekturen lohnen sich bei der Fehlanpassung (Instrumentierung: Elektronik, Anzeige, Stabilität, Rauschen).

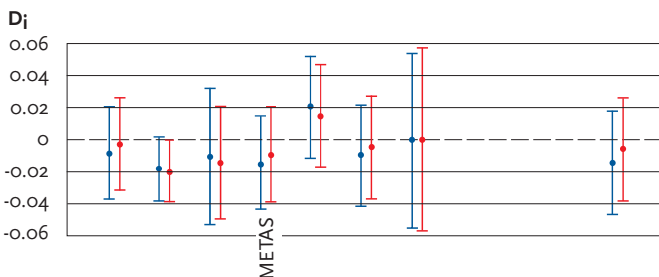
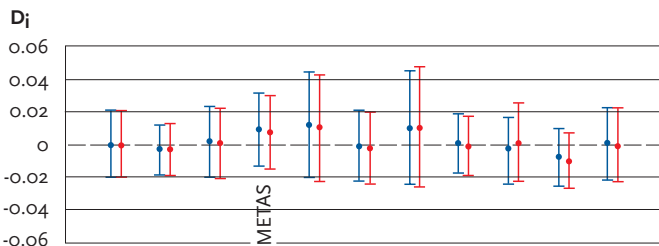
In der Praxis ist es leider gerade bei sehr hohen Frequenzen nicht möglich, ideal angepasste Komponenten aufzubauen, denn sowohl mechanische wie elektrische Toleranzen bewirken Impedanzabweichungen. Diese werden als Reflexionsfaktoren  $r$  dargestellt und können im vorliegenden 50 GHz-Frequenzbereich Werte von  $r \leq 0.2$  (20 %) erreichen.

Jede Verbindung zwischen einem HF-Generator und einem HF-Sensor reflektiert dadurch an ihrer Schnittstelle (Steckerverbinder) HF-Leistungsanteile, die ohne weiteres eine Größe von 4 % erreichen können. Kennt man die Phasenlage der Reflexionsfaktoren nicht, was beim Generator oft der Fall ist, muss in jedem Fall die reflektierte Leistung als Unsicherheitsbeitrag berücksichtigt werden.

### Berücksichtigung des Mismatch-Faktors halbiert die gesamte Messunsicherheit

Kennt man alle entscheidenden Reflexionsfaktoren (Generator, Referenznormal, DUT) nach Betrag und Phase, kann der Leistungsverlust durch die Reflexionen (Mismatch-Faktor) berechnet und im Resultat des Kalibrierfaktors berücksichtigt werden. Dazu dient das Konzept der äquivalenten Quellenanpassung (Equivalent Source Match), wo mit Hilfe eines voll charakterisierten Leistungsteilers (S-Parameter) ein virtueller Generator entsteht.

Damit kann gezeigt werden, dass dessen Reflexionsfaktor (Quellenanpassung) nur von den Eigenschaften des Leistungsteilers abhängt. Diagramm 4 zeigt die resultierende Messunsicherheit für beide Fälle, das heißt mit und ohne Korrektur des Mismatch-Faktors: Der Aufwand lohnt sich gerade beim 50 GHz-System, denn die maximale Unsicherheit kann hier halbiert werden; sie wird praktisch nur noch von der Unsicherheit des Referenznormals bestimmt.

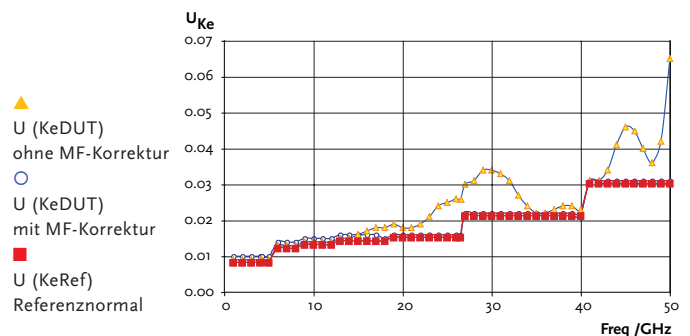


● Prüfling Nr. 3629 ● Prüfling Nr. 3815

2 Messresultat bei 33 GHz (oben) und 50 GHz (unten):  $D_i$  ist die Differenz zwischen dem gemessenen Kalibrierfaktor des Labors und dem ermittelten Referenzwert.

### Wesentliche Unsicherheitsbeiträge

Analysiert man die Messunsicherheitsbeiträge für ein «Direct Comparison System» (Diagramm 3), so stellt man fest, dass nebst der gegebenen Messunsicherheit des Referenznormals die Messunsicherheitsbeiträge der Fehlanpassungen (Mismatch) eine dominierende Rolle spielen: In einem idealen 50  $\Omega$ -System wären sowohl der Generator und die beiden zu vergleichenden HF-Sensoren exakt der 50  $\Omega$ -Impedanz angepasst. Damit würde die vom Generator erzeugte HF-Leistung zu 100 % vom jeweilig angeschlossenen Sensor aufgenommen.



4 Unsicherheit des gemessenen Kalibrierfaktors: Die Unsicherheit ( $k=2$ ) des Kalibrierfaktors  $K_e$  bei der Weitergabe am 50 GHz Direct Comparison System kann bei Berücksichtigung des Mismatch-Faktors entscheidend verbessert werden.