



43 176/8

BILD 1 Ob mit eingebautem oder mit externem Vorverstärker: Die EMI-Messempfänger R&S ESIB bieten beste Voraussetzungen für ein Gesamtmesssystem mit exzellenten HF- und Mikrowelleneigenschaften.

EMI Test Receiver R&S ESIB26 / R&S ESIB40

Bessere Systemempfindlichkeit durch Vorverstärker

Die Gesamtempfindlichkeit eines Messsystems im Mikrowellenbereich ist aufgrund der hohen Dämpfungswerte stark eingeschränkt. Erst durch den Einsatz eines breitbandigen, rauscharmen Vorverstärkers ist es möglich, die hohen Anforderungen der Standards an die Empfindlichkeit für das normgerechte Messen gestrahlter Störemissionen zu erfüllen.

Normgerechte Messungen stellen hohe Anforderungen

Die Dämpfungswerte und Wandlungsmaße von Kabeln und Antennen im Mikrowellenbereich sind so hoch, dass sie die Empfindlichkeit eines Empfangssystems und damit auch den Dynamikbereich für Messungen stark einschränken. Abhilfe schafft hier der Einsatz eines breitbandigen, rauscharmen Vorverstärkers direkt an der Antenne oder vor dem Empfängereingang, der die Gesamtempfindlichkeit eines Messsystems erheblich verbessert. Erst dadurch ist es möglich, die hohen

Anforderungen der Messstandards an die Empfindlichkeit und Performance der Messgeräte zu erfüllen.

Für normgerechte Störemissionsmessungen in kommerziellen Anwendungen oberhalb von 1 GHz gilt die Basisnorm CISPR 16-1 (1999), die u. a. auch die Anforderungen hinsichtlich Messumgebung und Messgeräteeigenschaften bis 18 GHz regelt. Für militärische Anwendungen gilt z. B. der international verbreitete MIL-STD-461E – speziell die

Teile RE 102 und RE 103 (RE: Radiated Emission) –, der Störstrahlungsmessungen bis 40 GHz verlangt.

Grenzwertlinien und Korrekturfaktoren für den ESIB fertig zum Download: siehe Seite 46.

- Die EMI-Messempfänger R&S ESIB 26 und R&S ESIB 40 (BILD 1) von Rohde & Schwarz bieten hervorragende HF-Eigenschaften bezüglich Empfindlichkeit und Dynamik [1]. Beide verfügen mit der Option R&S ESIB-B2 [2] über einen internen Vorverstärker bis 26 GHz bzw. 40 GHz, was sie für Messungen entsprechend dem anspruchsvollen MIL-Standard prädestiniert.

Berechnung von Rauschzahl und Rauschmaß

Messsysteme für gestrahlte Emissionen sind im Prinzip eine Kaskadenschaltung aus Empfangsantenne, Vorverstärker, Verbindungskabel und EMI-Messempfänger, der ggf. durch einen internen Vorverstärker erweitert wird (BILD 2). Die Gesamtrauschzahl dieser Konfiguration lässt sich berechnen, indem man die Komponenten in Einzelelemente wie Zweitore bzw. Vierpole aufteilt und deren jeweiligen Beitrag zum Gesamtergebnis ermittelt.

Die (dimensionslose) Rauschzahl F eines Zweitors ist das Verhältniss seines Signal/Rausch-Abstands am Eingang (S_1/N_1) zum Signal/Rausch-Abstand am Ausgang (S_2/N_2):

$$F = \frac{S_1/N_1}{S_2/N_2}$$

Daraus ergibt sich das Rauschmaß NF (Noise Figure) in dB:

$$NF = 10 \cdot \lg F$$

Rauschzahl und Verstärkung von Zweitoren sind zudem noch frequenzabhängig, weshalb sich die einzelnen Werte für überschlägige Berechnungen nur für diskrete Frequenzpunkte ermitteln lassen.

Die Gesamtrauschzahl mehrerer hintereinandergeschalteter Zweitore (BILD 3) ergibt sich aus der Addition der Rausch-

zahl eines Zweitors mit der Rauschzahl des nächsten Tors unter Berücksichtigung der Verstärkung G des davorliegenden Tors entsprechend der Gleichung:

$$F_{\text{ges}} = (F_1 - 1) + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 \cdot G_2} + \dots + \frac{F_n - 1}{\prod_{i=1}^{n-1} G_i}$$

mit F_i = Rauschzahl einer einzelnen Komponente
 G_i = Verstärkung einer einzelnen Komponente

Beim dritten Zewitor gehen also die eigene Rauschzahl mit F_3 und die Verstärkungen der beiden davor liegenden mit G_1 und G_2 in die Berechnung ein.

Da ein ideales, rauschfreies Zewitor ein Rauschmaß von 0 dB bzw. die Rauschzahl 1 hat, muss dessen Beitrag zur Gesamtrauschzahl Null ergeben. Dies wird durch

$$F_i = F - 1$$

in der Gleichung berücksichtigt.

Berechnung der Gesamtrauschzahl

Der folgenden beispielhaften Berechnung der Gesamtrauschzahl liegt der Aufbau in BILD 2 zugrunde. Da sich vor der Empfangsantenne kein Vorverstärker anbringen lässt, ist die erste mögliche Eingriffsstelle direkt am Antennenausgang. Der rauscharme, breitbandige Vorverstärker muss bezüglich Aussteuerungsfestigkeit so dimensioniert sein, dass er durch breitbandige Störsignalspektren nicht übersteuert werden kann und er die Antenneneingangsparameter so wenig wie möglich verändert. Daher kosten diese Geräte für Frequenzen bis 18 GHz, 26 GHz oder 40 GHz verhältnismäßig viel Geld.

Die Gesamtrauschzahl aller vier der Antenne nachgeschalteten Komponenten unter Berücksichtigung ihrer Rauschzahlen F und der Verstärkungen / Dämpfungen G errechnet sich wie folgt:

$$F_{\text{total}} = (F_1 - 1) + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 \cdot G_2} + \frac{F_4 - 1}{G_1 \cdot G_2 \cdot G_3}$$

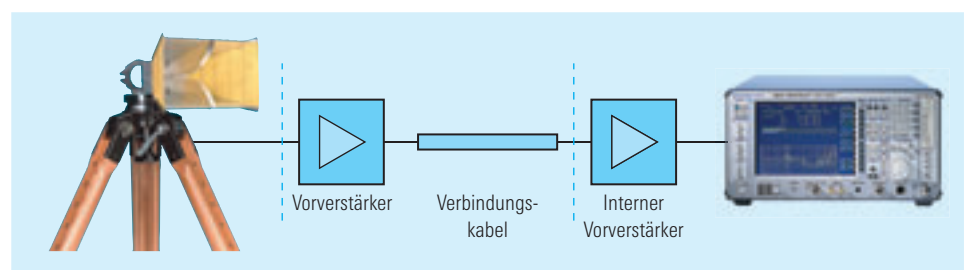


BILD 2 Praktische Anordnung der Zweitore bei Störstrahlungsmessungen.

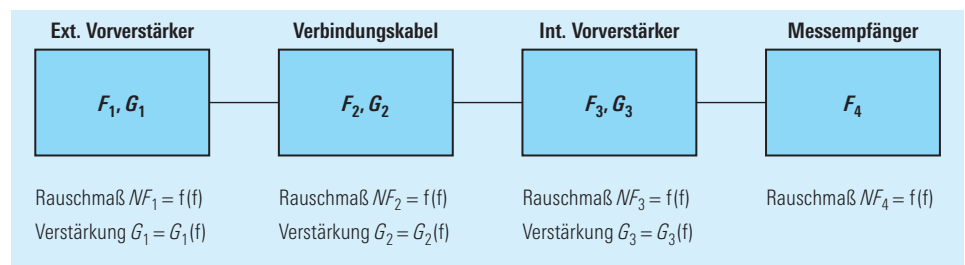


BILD 3 Kaskadenschaltung mehrerer Zweitore.

Die Zahlenwerte im folgenden Rechenbeispiel – z. B. für 18 GHz – sind auf- oder abgerundet, um einfache, einprägsame Werte zu erhalten. Die exakten Daten sind den jeweiligen Datenblättern zu entnehmen.

Vorverstärker:

$$NF_1 = 3 \text{ dB}; F_1 = 2;$$

$$\text{Verstärkung } g_1 = 30 \text{ dB } (G_1 = 1000)$$

Kabel RTK 081 (BILD 4) bei 18 GHz

$$NF_2 = 15 \text{ dB}; F_2 = 31,62;$$

$$\text{Dämpfung } a_2 = -15 \text{ dB } (G_2 = 0,03162)$$

Interner Vorverstärker

$$NF_3 = 10 \text{ dB}; F_3 = 10;$$

$$\text{Verstärkung } g_3 = 20 \text{ dB } (G_3 = 100)$$

EMI-Messempfänger

$$NF_4 = 20 \text{ dB}; F_4 = 100$$

Damit ergibt sich:

$$F_{z \text{ total}} = (2 - 1) + \frac{31,62 - 1}{1000}$$

$$+ \frac{10 - 1}{1000 \cdot 0,03162} + \frac{100 - 1}{1000 \cdot 0,03162 \cdot 100}$$

$$= 1 + 0,03062 + 0,2846 + 0,031309 = 1,3465$$

$$F_{\text{total}} = F_{z \text{ total}} + 1 = 2,3465$$

$$\text{Gesamtrauschmaß } NF_{\text{total}} = 3,704 \text{ dB}$$

Ergebnisse aus der Berechnung der Gesamtrauschzahl

Das Rechenbeispiel zeigt, dass für das Rauschverhalten der Gesamtschaltung in erster Linie die Kennwerte des Vorverstärkers von Bedeutung sind. Die nachfolgenden Komponenten sind wegen dessen Verstärkungsfaktors fast vernachlässigbar. Als Konsequenz ergibt sich, dass der Verstärker nicht überdimensioniert sein darf (siehe dazu auch die Anmerkungen zum Dynamikbereich auf Seite 46)

Ebenso kommt der Auswahl von Mikrowellenkabeln eine besondere Bedeu-

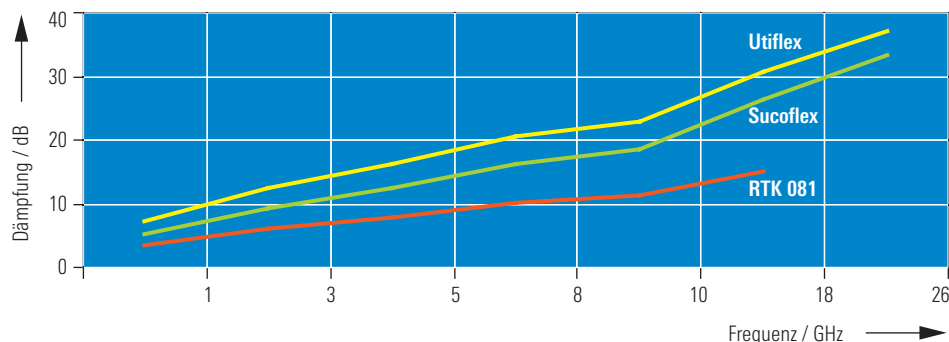


BILD 4 Dämpfung von Kabeln mit einer Länge von 20 Metern.

tung zu. Die verwendeten Kabel müssen hinsichtlich Länge und Dämpfungsverhaltens optimal gewählt werden. Lange Kabel mit hoher Dämpfung treiben die Kosten für die Empfindlichkeitssteigerung mit Vorverstärkern stark in die Höhe. Die Investition von mehreren 100 Euro bis 1000 Euro in geeignete Kabel erspart u. U. die Ausgaben für bessere Verstärker, die je nach Frequenzbereich mit bis zu 10000 Euro zu Buche schlagen können. Die Länge des Kabels lässt sich in vielen Fällen minimieren, indem man die außerhalb der Absorberkabine angeordnete Messausrüstung durch geschickte Positionierung zum Kontrollraum in die Nähe der Messantenne bringt.

Welchen Verstärker bei gegebenem Rauschmaß?

Bei gegebenem – in den Mess-Standards definiertem – Mindestrauschmaß des gesamten Messsystems lässt sich mit diesen Erkenntnissen auch die erforderliche Verstärkung des Vorverstärkers ermitteln.

Im folgenden Beispiel soll das Messsystem insgesamt ein Rauschmaß von 5 dB haben. Für den betreffenden Frequenzbereich wird ein Vorverstärker mit einem Rauschmaß von $NF_{\text{preamp}} = 3 \text{ dB}$ ($F_{\text{preamp}} = 2$) gewählt. Es stellt sich die Frage, ob ein Verstärker

mit 10 dB oder 20 dB gewählt werden muss (G_{preamp} 10 oder 100). Der nachgeschaltete Messempfänger hat z. B. ein Rauschmaß von $NF_{\text{Rx}} = 15 \text{ dB}$ bzw. $F_{\text{Rx}} = 31,62$. Eingesetzt in die vereinfachte Formel mit einem Vorverstärker vor dem Messempfänger gilt:

$$F_{z \text{ total}} = (F_{\text{preamp}} - 1) + \frac{F_{\text{Rx}} - 1}{G_{\text{preamp}}}$$

Mit $G_{\text{preamp}} = 10$ gilt:

$$F_{z \text{ total}} = (2 - 1) + \frac{31,62 - 1}{10} = 4,062$$

$$F_{\text{total}} = F_{z \text{ total}} + 1 = 5,062$$

$$NF_{\text{total}} = 7,04 \text{ dB}$$

Mit $G_{\text{preamp}} = 100$ gilt:

$$F_{z \text{ total}} = (2 - 1) + \frac{31,62 - 1}{100} = 1,3062$$

$$F_{\text{total}} = F_{z \text{ total}} + 1 = 2,3062$$

$$NF_{\text{total}} = 3,62 \text{ dB}$$

Es zeigt sich, dass ein Gesamtrauschmaß von <5 dB nur mit einem 20-dB-Verstärker zu erreichen ist.

Daraus ergeben sich Kriterien für die Anwendung und die Auswahl von Vorverstärkern:

- ◆ Die Empfindlichkeit verbessert sich durch den 20-dB-Vorverstärker von 15 dB auf 3,6 dB, d. h. es werden 11,4 dB im Dynamikbereich „nach unten“ gewonnen, jedoch verkleinert sich der Dynamikbereich an seinem

oberen Ende. Der maximal zulässige Eingangspegel mit einem 20-dB-Vorverstärker sinkt um 20 dB. Insgesamt verliert man also 8,6 dB an Dynamikbereich.

Deshalb nicht mehr Verstärkung als unbedingt notwendig wählen!

- ◆ **Verstärker mit geeignetem Linearitätsverhalten einsetzen.** Bei breitbandigen Signalen mit hohen Pegeln und großer belegter Bandbreite kann ein Vorverstärker übersteuert werden. Darum sollte ein besonderes Augenmerk auf dessen Linearitätsverhalten gelegt werden, insbesondere dann, wenn keine Vorselektionsfilter die Eingangsstufe des Messgerätes schützen können.
- ◆ **Vorverstärker direkt an der Antenne anbringen** für einen maximalen Empfindlichkeitsgewinn.
- ◆ **Verstärker mit kalibrierter Verstärkung verwenden**, um die Messunsicherheit des Gesamtsystems zu minimieren.

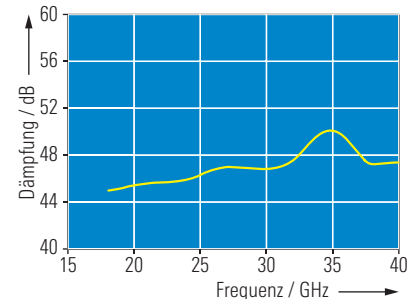
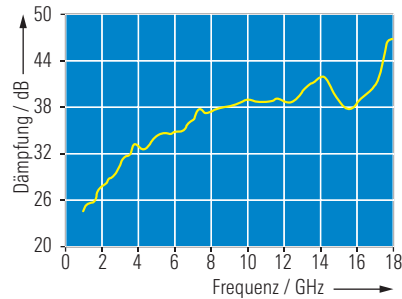


BILD 5 Typische Antennenfaktoren von Hornantennen.

Welcher Dynamikbereich steht zur Verfügung?

Bei der Mindestforderung an das Rauschmaß eines Gesamtmesssystems ist es sinnvoll, einen Blick auf den Dynamikbereich zu werfen. Bei einer Messbandbreite von beispielsweise 1 MHz erhöht sich das Grundrauschen entsprechend $10 \log \text{RBW} / 1 \text{ Hz}$ um 60 dB. Bedingt durch den Antennenfaktor verkleinert sich der Dynamikbereich weiter um ca. 45 dB (bei 18 GHz, siehe BILD 5).

BILD 6 veranschaulicht diese Verkleinerung des Dynamikbereiches bedingt durch eine Messbandbreite von 1 MHz, Einsatz eines Vorverstärkers, Berücksichtigung der Antennenkorrekturwerte und eventuell durch unterschiedlich bewertende Detektortypen (Spitzen- oder Mittelwert): Der Vorverstärker reduziert den zulässigen Pegel am Eingang des Messempfängers um 30 dB, d.h. um den Betrag seiner Verstärkung. Die Antennenkorrekturfaktoren stellen Dämpfungswerte dar, die eine erhöhte ZF-Verstär-

BILD 6 Zahlreiche Faktoren verringern den praktisch nutzbaren Dynamikbereich.

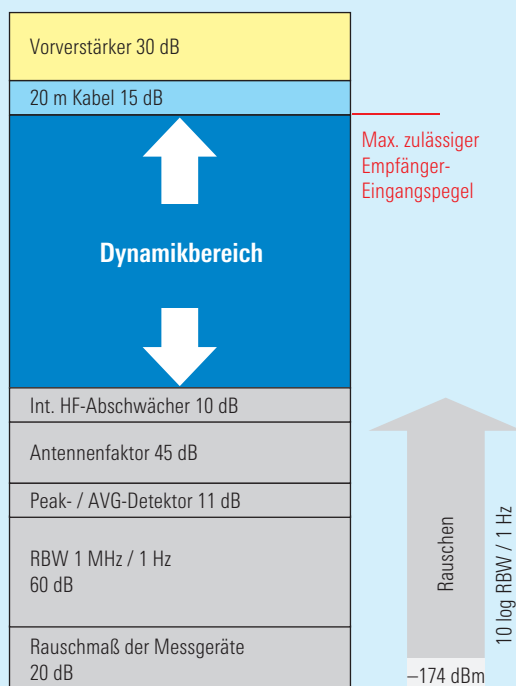
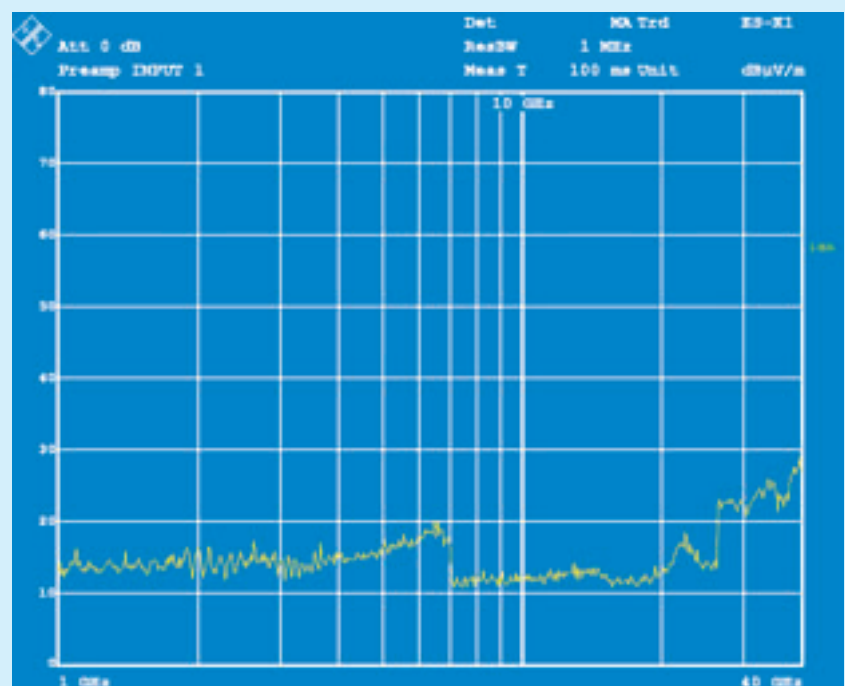


BILD 7 Rauschverhalten des EMI-Messempfängers R&S ESIB40 zwischen 1 GHz und 40 GHz.



kung erfordern und dadurch das interne Rauschen um den Betrag des Korrekturwertes vergrößern, z. B. um 45 dB.

Dies zeigt, dass für anspruchsvolle Messungen nach den Messstandards nur hochwertige Messempfänger mit einer Grunddynamik von ca. 100 dB in Frage kommen. Die Messempfänger R&S ESIB 26 und R&S ESIB 40 weisen diese Eigenschaften auf: eine große Dynamik und niedriges Eigenrauschen.

Die hohe Reproduzierbarkeit der Messwerte und die Möglichkeit zum Erzeugen von Reports macht diese Empfänger so unentbehrlich und zu Referenzmessgeräten in der Full-Compliance-Klasse, d. h. bei standardkonformen EMV-Abnahmemessungen für die Zertifizierung von elektrischen und elektronischen Baugruppen, Geräten und Systemen im zivilen und militärischen Bereich.

BILD 7 zeigt das typische Rauschverhalten des EMI-Messempfängers R&S ESIB 40 zwischen 1 GHz und 40 GHz mit eingeschaltetem 20-dB-Vorverstärker, 1 MHz Messbandbreite und Mittelwertdetektor. Werden die in BILD 5 angegebenen Korrekturwerte der unterschiedlichen Hornantennen mit einbezogen, ergibt sich die in BILD 8 dargestellte Rauschkurve, aufgenommen mit einem Spitzenwertdetektor. Die standardkonforme Messung nach MIL-STD-461E RE102-4 wird mit internem Vorverstärker nicht nur erfüllt, sondern liegt bis zu 10 dB unter der geforderten Grenzwertlinie für maximal zulässige Emissionen. Es hängt dabei von der Auswahl des Kabels ab, ob ein rauscharmer Vorverstärker mit entsprechender Verstärkung zum Einsatz kommen muss.

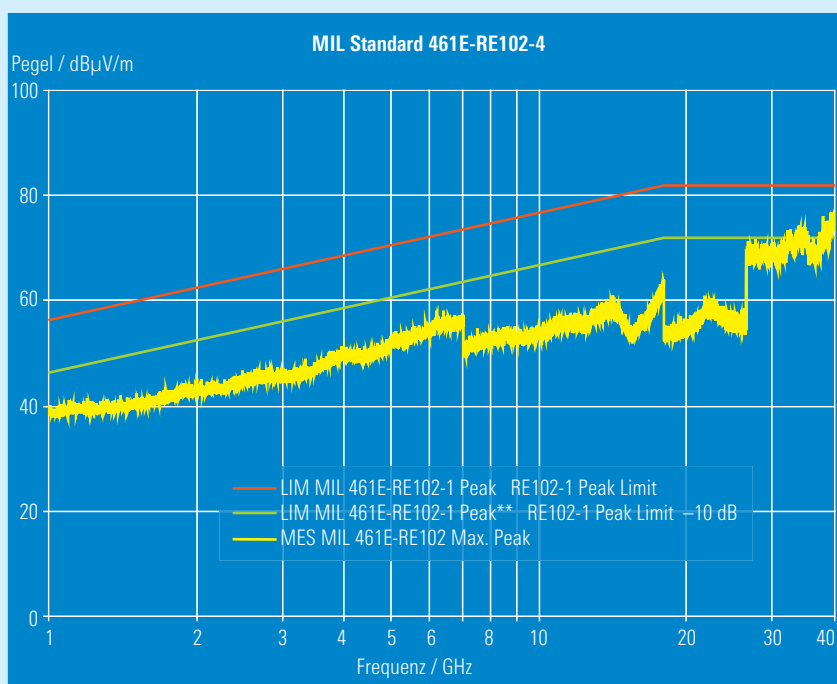
Zusammenfassung

Um die extremen Anforderungen der Standards für die Messung gestrahlter Störemissionen bis 40 GHz unter Berücksichtigung von Empfänger, Verbindungskabel und Antenne erfüllen zu können ist es notwendig, Dimensionierungsgrundlagen, wie die hier beschriebene Rauschzahlermittlung, heranzuziehen. Anhand der Parameter der verwendeten Antennen und des EMI-Messempfängers sind die Kriterien für Kabelauswahl und -dimensionierung sowie ein geeigneter Verstärker zu ermitteln.

Die EMI-Messempfänger R&S ESIB 26 und R&S ESIB 40 mit eingebauter Vorverstärkeroption R&S ESIB-B2 bis 26,5 GHz bzw. 40 GHz bieten beste Voraussetzungen für ein Gesamtmesssystem mit exzellenten HF- und Mikrowellenspezifikationen, mit dem normenkonforme Abnahmemessungen erfolgreich durchgeführt werden können.

Volker Janssen

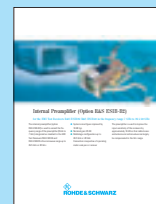
BILD 8 Rauschkurve (Peak) bei 1 MHz Messbandbreite und Antennenkorrekturfaktoren.



Weitere Informationen und Datenblatt unter www.rohde-schwarz.com (Suchbegriff: ESIB-B2)



Datenblatt
R&S ESIB



Datenblatt
R&S ESIB-B2

LITERATUR

- [1] EMI Test Receiver ESI: EMV-Profis bis 40 GHz. Neues von Rohde & Schwarz (1999) Nr. 162, S. 7–9.
- [2] EMI Test Receiver R&S ESIB 26 / R&S ESIB 40: Interne Vorverstärker für erhöhte Empfindlichkeit ab 7 GHz. Neues von Rohde & Schwarz (2002) Nr. 173, S. 28–29.