

224/2021

NEUES

ROHDE & SCHWARZ

Make ideas real



BITTE NICHT STÖREN!

Immer mehr Produkte haben Funk an Bord. Koexistenz- und klassische EMV-Tests stellen ihren störungsfreien Betrieb sicher.



Universeller Mobilfunktester
für 5G NR

Einfaches De-Embedding
bei der Netzwerkanalyse

Messlabore sicher
vernetzen

IMPRESSUM

Herausgeber:

Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG

www.rohde-schwarz.com

Mühldorfstraße 15 · 81671 München

Postfach 801469 · 81614 München

Support-Center: Tel. +49 89 4129 12345

Anfragen zu Produkten: customersupport@rohde-schwarz.com

E-Mails an die Redaktion: newsmagazine@rohde-schwarz.com

Chefredaktion: Volker Bach, Rohde & Schwarz

Redaktion und Layout: Redaktion Drexler & Knobloch GmbH (München)

Fotos: Rohde & Schwarz

Printed in Germany (G. Peschke Druckerei GmbH, Parsdorf bei München)

Auflage ca. 35 000 (deutsch, englisch und japanisch)

61. Jahrgang

Ausgabe 1/2021, Nr. 224

Erscheinungsweise: zweimal pro Jahr

ISSN 0548-3093

Bezug kostenlos über die Rohde & Schwarz-Vertretungen

Nachdruck mit Quellenangabe und gegen Beleg gern gestattet.

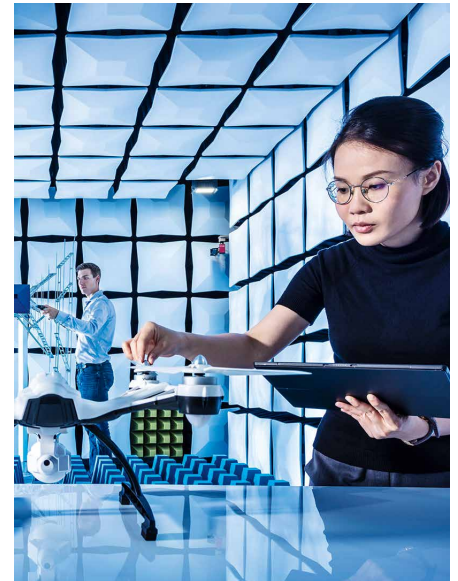
PD 3609.2981.71

R&S® ist eingetragenes Warenzeichen der Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG. Eigennamen sind Warenzeichen der jeweiligen Eigentümer. CDMA2000® ist eingetragenes Warenzeichen der Telecommunications Industry Association (TIA-USA). Die Bluetooth®-Wortmarke und -Logos sind eingetragene Warenzeichen und Eigentum von Bluetooth SIG, Inc., ihre Verwendung ist für Rohde & Schwarz lizenziert. Alle anderen Warenzeichen sind Eigentum der jeweiligen Besitzer.

TITELTHEMA

Als in den 1920er Jahren das Radiozeitalter begann, musste man feststellen, dass die gleichzeitig einsetzende allgemeine Elektrifizierung dem neuen Medium nicht zuträglich war. Heftige Störgeräusche trübten das ohnehin noch bescheidene Hörvergnügen und machten deutlich, dass es nur ein gemeinsames elektromagnetisches Spektrum für alle gibt. Deshalb kam es schon bald zu regulatorischen Vorgaben, und Funkentstörung wurde Pflicht. Allerdings hatte man noch keine Messtechnik, unter deren Kontrolle die Entstörmaßnahmen gezielt hätten durchgeführt werden können. Rohde & Schwarz nahm sich als eines der ersten Unternehmen der Aufgabe an und konnte schon kurz nach seiner Gründung mit ersten Messempfängern aufwarten (Seite 48).

Hundert Jahre nach den Anfängen des Hörfunks gibt es längst mehr Funkprodukte als Menschen auf dem Planeten. Ein umfangreiches Regelwerk sorgt dafür, dass sich Elektrogeräte aller Art mit ihrer Umwelt vertragen. Für Sender und Empfänger gelten ergänzende Vorschriften. Die (Mobil-)Funktechnik macht aber so rasante Fortschritte, dass die Gesetzgebung oft hinterherhinkt. Dann ist die Industrie gefordert, selbst Lösungen zu entwickeln und mit den Behörden abzustimmen (Seite 40). Nutz- und Störsignale sind bei der Produktentwicklung immer zusammen zu denken. Das gilt erst recht, wenn große HF-Leistungen im Spiel sind. Frei nach der Devise: „wer austeilt, muss auch einstecken können“ werden Mobilfunk-Basisstationen beim Konformitätstest mit Störsignalen traktiert, in deren Anwesenheit sie spezifikationsgemäß funktionieren müssen (Seite 30). Noch größere HF-Leistungen, die freilich nicht nach außen dringen dürfen, erzeugen Mikrowellenherde. Wie man deren EMV-Eigenschaften nun schneller als bisher feststellen kann, zeigt der Beitrag auf Seite 45.



ÜBERBLICK

NEUES 224/2021

TITELTHEMA

Funkstörmesstechnik

Leben und leben lassen

Moderne Messtechnik für störungsfreie Funkkoexistenz..... 40

Schneller zur störungsfreien Mikrowelle

Neues Messverfahren für die Störwirkung von ISM-Produkten..... 45

Die Geschichte der Störmessempfänger bei Rohde & Schwarz

Eine lange Tradition 48

WIRELESS

Testinstanz für 5G-Endgeräte

Mobilfunktester R&S®CMX500 – umfassende Testlösung für 5G..... 12

Wieder schneller

Die Konturen des nächsten WLAN-Standards 802.11be 18

Mit Turbo-Speed zur getesteten Basisstation

Schnelle Produktionstests durch serverbasierte Messdatenauswertung 22

Netzwerktests ebnen den Weg zur intelligenten Fabrik

Fabriken der Zukunft sind drahtlos vernetzt 25

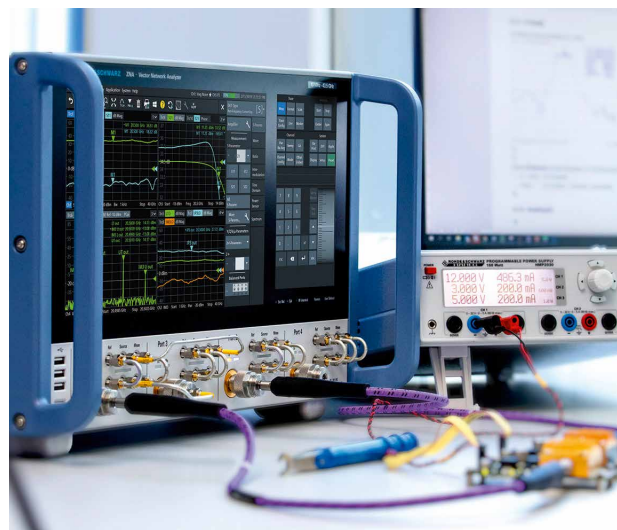
Assistent für Konformitätstests an 5G-NR-Basisstationen

Software zum Vektorsignal-generator R&S®SMW200A 30

Die verstärkte Nutzung von Augmented Reality ist nur ein Aspekt zukünftiger Fabriken. Menschen und Maschinen werden in vielfältiger Weise funkvernetzt sein (Seite 25).



Frequenzobergrenzen bis 50 GHz bzw. 67 GHz sind mit den neuen Vektornetzwerkanalysatoren R&S®ZNA 50 und R&S®ZNA 67 erreichbar (Seite 54).



Der Breitbandverstärker R&S®SAM100 für den Mikrowellenbereich ist eine perfekte Kombination aus hoher Leistung, großer Bandbreite und niedrigem Rauschen (Seite 62).



AEROSPACE & DEFENSE

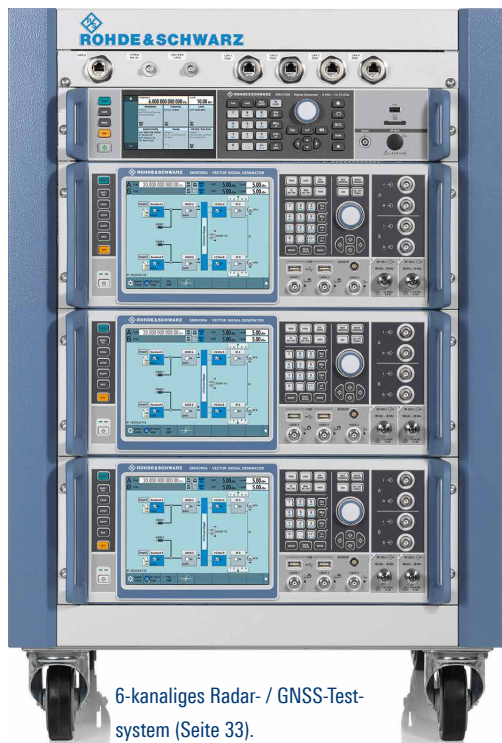
Messtechnik für mehrkanalige Radar- und GNSS-Empfänger

Aufwands-Reduktion

Testsystem für Radar-Warnempfänger und GNSS-Anti-Jam-Systeme 33

Phasenkohärente Mehrkanal-Pulsanalyse an Radarsystemen

Messungen mit den Oszilloskopen R&S®RTO und R&S®RTP 36



6-kanaliges Radar- / GNSS-Testsystem (Seite 33).

ALLGEMEINE MESSTECHNIK

Neues aus der High-End-Netzwerkanalyse

R&S®ZNA: Modelle bis 67 GHz und komfortable Rauschmessungen bis 40 GHz 54

De-Embedding leicht gemacht

Effektives Arbeiten mit dem Vektornetzwerkanalysator 56

Hoch hinaus

Mikrowellen-Zweitord-Netzwerkanalyse mit allen S-Parametern im Handheld-Format 60

Power-Riegel

Viel Leistung für den Mikrowellenbereich mit dem R&S®SAM100 62

Vernetztes Messlabor – aber sicher!

Neuer, ganzheitlicher Ansatz räumt Sicherheitsvorbehalte aus 64

WEITERE RUBRIKEN

Impressum 2

NEUES kompakt 6

Mit seinem Frequenzbereich bis zu 26,5 GHz gehören Messungen an Radar-, Richtfunk- und Satelliten-Anlagen zum Standard-Repertoire des neuen Handhelds R&S®ZNH, seien sie stationär oder auf einem Schiff oder Fahrzeug installiert (Seite 60).



NEUES KOMPAKT

AUSTRALISCHE PATROUILLENBOOTE KOMMUNIZIEREN MIT NAVICS®

Rohde&Schwarz (Australien) hat einen Vertrag mit der australischen Werft Austal Limited über die Lieferung integrierter Kommunikationssysteme für sechs Patrouillenboote der Kap-Klasse (CCPB) unterzeichnet. Diese werden derzeit für die Royal Australian Navy in der west-australischen Henderson-Werft gebaut.

Ihre Auslieferung ist ab September 2021 vorgesehen.

Kern der Vereinbarung ist die Ausstattung der Boote mit dem Kommunikationssystem NAVICS®. NAVICS® umfasst die komplette bordinterne Kommunikation wie auch die Schnittstellen zu

den Weitverkehrsfunkanlagen. Das System setzt auf verbreitete Industriestandards (VoIP, Ethernet) und handelsübliche Hardware und ist damit sowohl zukunftssicher als auch skalierbar und wartungsfreundlich. Es wird bereits auf zahlreichen Marineschiffen eingesetzt, so auf den Fregatten vom Typ 26 der britischen Royal Navy, und war auch auf der Marineausstellung IndoPacific 2019 in Sydney zu sehen. Entscheidend für die Auftragsvergabe war neben technischen Aspekten die Bereitschaft von Rohde&Schwarz, die Wertschöpfung in Australien zu halten und lokale Ressourcen einzubeziehen.



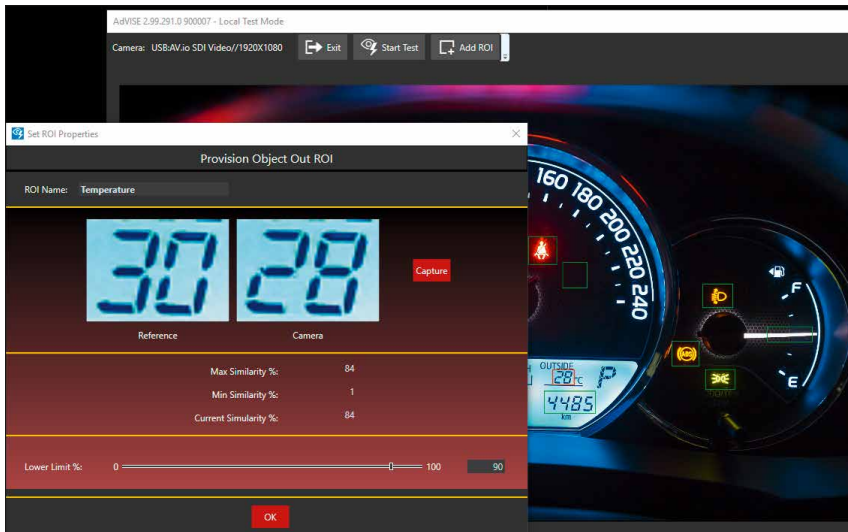
Der australische Bootstyp Cape-class patrol boat (CCPB) ist seit 2013 im Einsatz. Sechs neue Schiffe sollen die bestehende Flotte erweitern.

LEISTUNGSSENSOREN MIT NEUEM E-BAND-STECKVERBINDER

Millimeterwellen-Komponenten werden bis dato über Koaxialstecker vom Typ V (fürs V-Band zwischen 50 GHz und 70 GHz) oder W (fürs W-Band zwischen 75 GHz und 110 GHz) kontaktiert, die einen Innenleiterdurchmesser von 1,85 mm bzw. 1 mm aufweisen. Der V-Band-Stecker, der vor mehr als 30 Jahren eingeführt wurde, ist für industrielle Anwendungen geeignet und robust, aber auf eine Maximalfrequenz von 70 GHz beschränkt. Somit kommt er für neue Anwendungen wie Automotive-Radar oder WLAN 802.11ay nicht in Betracht. Der Frequenzbereich des W-Band-Verbinders beginnt für wichtige Anwendungen zu weit oben. Außerdem verlangt seine Montage feinmechanische Präzision. Auch lockert er sich schon mal ungewollt, was während des Gebrauchs ständige Aufmerksamkeit erfordert und ihn für den Großserieneinsatz disqualifiziert.

Vor diesem Hintergrund hat eine Expertengruppe aus Physikalisch-Technischer Bundesanstalt (PTB), Rosenberger Hochfrequenztechnik GmbH & Co. KG, Spinner GmbH und Rohde&Schwarz einen Konnektor entwickelt, der die Lücke zwischen den V- und W-Typen schließt. Die Kennzeichen dieses für das E-Band zwischen 60 GHz und 90 GHz spezifizierten Typs sind ein Innenleiterdurchmesser von 1,35 mm, ein metrisches Feingewinde, ein verlässlicher Innenleiterrücksprung im gesteckten Zustand und eine integrierte Einrastkontur für eine optionale Push-Pull-Kupplung zum Schutz der Verbindung. Das Design wurde 2019 für die nächste Ausgabe der Norm IEEE 287-2007 für Präzisions-Koaxialsteckverbinder angenommen und auch von der IEC akzeptiert, die es als IEC61169-65 veröffentlichen wird.

SOFTWARE ZUR VISUELLEN MESSÜBERWACHUNG



Langwierige Messungen, die eine permanente optische Kontrolle des Messobjekts oder von Messgeräten erfordern, lassen sich mit der neuen Version 5.0 der Inspektionssoftware R&S®AdVICE jetzt noch komfortabler automatisieren. Eine Hauptanwendung von R&S®AdVICE sind Störbeeinflussungs-Messungen (EMS) in der Automobilindustrie, aber auch jede andere Messung, bei der das Messobjekt sichtbare oder hörbare Reaktionen zeigt, eignet sich für den Einsatz. Zum Betrieb wird ein hinreichend leistungsfähiger PC und eine hochauflösende Videokamera benötigt, die über eine DVI-, HDMI™- oder HD-SDI-Schnittstelle verfügt. R&S®AdVICE unterstützt bis zu vier Kameras gleichzeitig, wenn deren Signal über einen Multi-Viewer zusammengeführt wird.

R&S®AdVICE 5.0 wird bei Störbeeinflussungs-Messungen (EMS) in der Automobilindustrie eingesetzt, eignet sich aber auch für jede andere Messung, bei der das Messobjekt sichtbare oder hörbare Reaktionen zeigt.

Eine typische Aufgabe für R&S®AdVICE ist die Überwachung von Fahrzeugarmaturen und -leuchten während einer EMS-Messung. Der Anwender kann dafür bis zu 32 unabhängige Regions of Interest (ROI) im Videobild definieren, deren Inhalt überwacht und mit Meldungen verknüpft wird. Die Änderungen können unterschiedlichster Art sein. R&S®AdVICE erkennt Ein- und Ausschaltvorgänge, Schwankungen von Helligkeit und Farbe, die An- oder Abwesenheit von Objekten, die Bewegung analoger Zeiger sowie über die integrierte OCR konkrete Texte und Zahlen, auch in chinesischer oder koreanischer Schrift. Darüber hinaus lassen sich Änderungsfrequenzen und -zeiten mit Sollwerten vergleichen und Motion-Freeze-Situationen detektieren. Neu in der Version 5.0 ist die Möglichkeit, Audiosignale in die Überwachung einzubeziehen. Der Anwender kann spektrale Masken definieren, die der gewünschten Signalcharakteristik entsprechen und so viel zielgerichteter arbeiten als mit einer reinen Pegelüberwachung. Zusammen mit weiteren neuen Features wie einer Vibrationskompensation und einer automatischen Rejustierung des ROI-Sets nach geänderter Kameraeinstellung ist R&S®AdVICE 5.0 das vielseitigste Tool seiner Art auf dem Markt.

Als erste Messgeräte sind die thermischen Leistungssensoren R&S®NRP90T (USB) und R&S®NRP90TN (USB und LAN) für Frequenzen bis 90 GHz mit dem neuen Verbindertyp ausgestattet. Wie die bisherigen Modelle zeichnen sie sich durch die höchste Genauigkeit und Messgeschwindigkeit aller nach diesem Prinzip arbeitenden Sensoren am Markt aus. Betrieben werden sie entweder an einem R&S®NRX-Anzeige- und Bediengerät, einem PC oder ausgewählten Rohde & Schwarz-Messgeräten.

Der Leistungssensor R&S®NRP90TN ist das erste Messgerät am Markt mit dem neuen 1,35-mm-Koaxial-Steckverbinder.

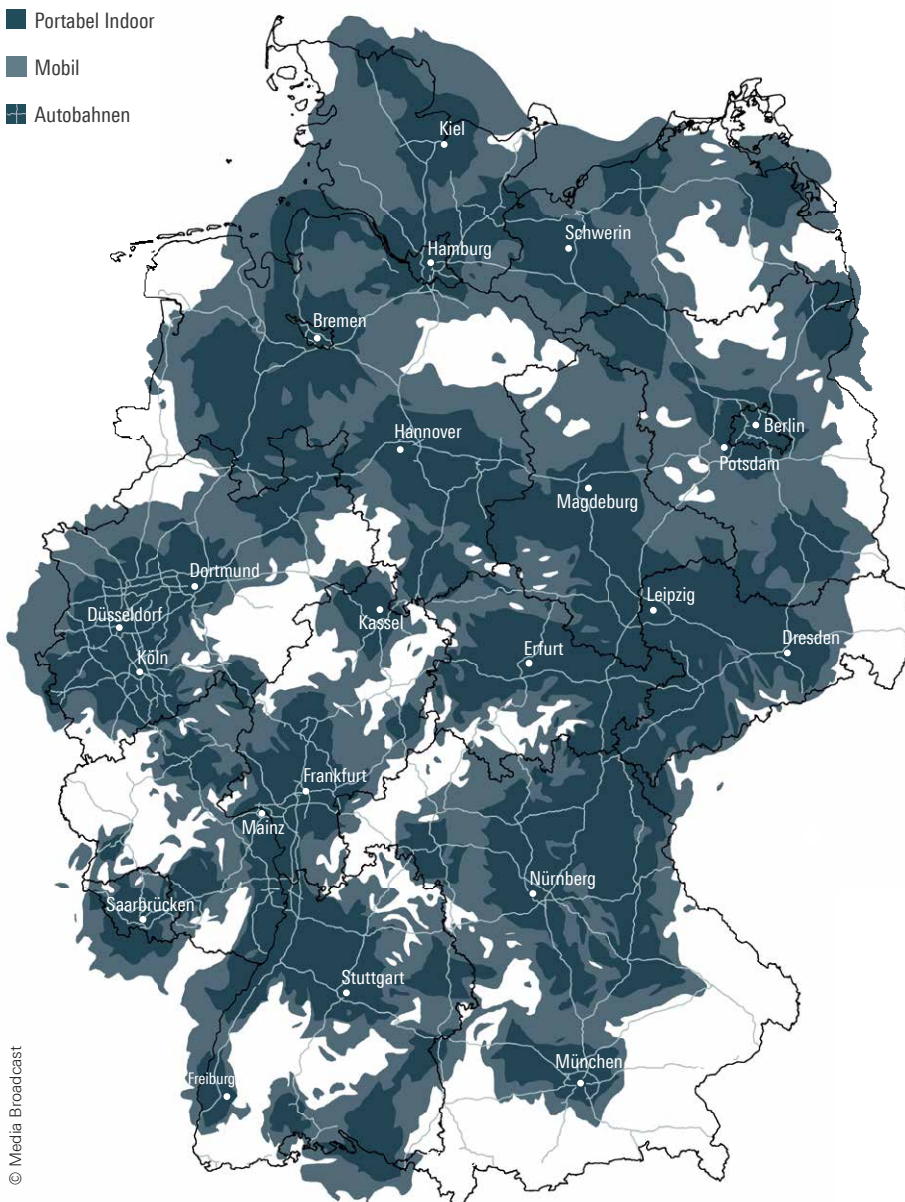


AUCH SENDER FÜR ZWEITEN DAB+-BUNDESMUX VON ROHDE & SCHWARZ

Das deutsche Digitalradio gewinnt seit Jahren an Zuspruch, nachdem es fast überall sowohl im Freien als auch in Gebäuden empfangen werden kann. 2020 stieg die Zahl der DAB+-Empfänger im Vergleich zum Vorjahr um mehr als 33 %, die Nutzung von DAB+ als primärem Hörfunk-Verbreitungsweg nahm um 26 % zu. Die seit Ende 2020 nun auch in Deutschland geltende Pflicht, nur noch DAB+-fähige Radiogeräte zu verkaufen, wird den

Umstieg von UKW weiter beschleunigen. Passend zu diesem Termin ist das Programmangebot noch einmal gewachsen, nachdem im Herbst der zweite nationale DAB+-Multiplex, kurz „Bundesmux 2“, auf Sendung ging. 16 Privatsender ergänzen das bisherige Angebot, sodass jetzt mindestens 35 DAB+-Programme landesweit empfangbar sind. Beide Bundesmuxe werden über Rohde&Schwarz-Sender ausgestrahlt.

Ursprünglich sollte der Start des zweiten Bundesmux schon Anfang 2019 erfolgen. Allerdings hatte ein unterlegener Bieter die Vergabestelle, die Sächsische Landesmedienanstalt, verklagt. Nach der Beilegung des Rechtsstreits Anfang 2020 ging der Zuschlag für den Betrieb an Antenne Deutschland*, ein Konsortium aus Media Broadcast und Absolut Radio Digital. Anfang Oktober nahm das zunächst aus 70 Sendern bestehende Netz den Betrieb auf. Die Sendeanlagen sind in Ballungsräumen und entlang des Autobahnnetzes platziert.



© Media Broadcast

Die Startabdeckung des DAB+-Bundesmux 2. In den dunklen Bereichen ist Gebäude-Empfang möglich.

Die Versorgungssimulation (Bild) zeigt, dass schon mit diesen 70 Sendern rund 83 % der Bevölkerung erreicht werden. In den dunkelgrauen Zonen ist die Feldstärke groß genug, um den Empfang in Innenräumen zu ermöglichen. Mit den 70 Sendern ist das Netz wahrscheinlich aber noch nicht komplett. Bei wirtschaftlichem Erfolg der Plattform ist die Hinzunahme weiterer Sender zu erwarten.

Antenne Deutschland hat die Beschaffung der Sender und deren Betrieb zu gleichen Teilen an die Dienstleister Media Broadcast und DIVICON Media untervergeben. Jedem der Unternehmen wurden 35 Senderstandorte zugeteilt. Was die Technik angeht, herrschte Einigkeit, obwohl das keine Vorgabe war: Beide Betreiber bestellten je 35 Sender bei Rohde&Schwarz, die ungeachtet der COVID-19-Situation pünktlich geliefert wurden.

Die eingesetzten R&S®THV9- und R&S®TMV9-Modelle sind praxiserprobte Produkte mit sehr geringer Ausfallrate, die bereits seit Jahren störungsfrei den ersten nationalen DAB+-Multiplex ausstrahlen. Letzteres war ein überzeugendes Argument, auch den zweiten Multiplex diesen Sendern anzuvertrauen.

* Antenne Deutschland GmbH & Co. KG ist ein Konsortium der Absolut Digital GmbH & Co. KG – ein Unternehmen des Radiounternehmens „Die Neue Welle“ – und der Media Broadcast GmbH – ein Tochterunternehmen der freenet AG.

5G BROADCAST EINSATZBEREIT

5G Broadcast/Multicast – die Technologie, um Broadcast- bzw. Multicast-Inhalte über TV-Sender auf Mobilfunkendgeräte zu bringen – ist sendeseitig einsatzbereit. Mit der Einführung des Broadcast Service and Control Centers R&S®BSCC2.0 und den mit entsprechender Optionierung schon länger dazu fähigen Rohde&Schwarz-TV-Sendern stehen alle Komponenten zur Verfügung, die ein TV- oder Mobilfunk-Netzbetreiber für die Einrichtung eines entsprechenden Dienstes braucht. Rohde&Schwarz geht damit in Vorleistung, denn es gibt noch keine Endgeräte, die das Verfahren beherrschen. Doch sowohl für die Entwicklung von Endgeräte-Chipsätzen wie auch für Tests mit großer Sendeleistung in der Fläche ist eine marktreife Signalerzeugungs- und Sendetechnik essenziell.

Das R&S®BSCC2.0 erweitert ein Mobilfunk-Kernnetz um die Fähigkeit, Broadcast-/Multicast-Datenströme über TV-Sender an Mobilfunkendgeräte zu schicken. Video-Content macht heute schon den Löwenanteil am Datenaufkommen der Mobilfunknetze aus und wird weiter zunehmen. Live-Ereignisse lassen sich über dedizierte Broadcast-Technologien aber viel effizienter übertragen, da der Kanal unabhängig von der Größe des Publikums nur einmal belegt wird. Zudem ist eine exzellente Quality of Experience garantiert. Inhabern von Medienrechten für attraktive Events bietet 5G Broadcast/Multicast deshalb die Möglichkeit, Live-Übertragungen

in bester, von der Mobilfunk-Versorgungslage unabhängiger Qualität auf Mobilgeräte senden – bei entsprechender App-Unterstützung verbunden mit der Option zur zeitversetzten Wiedergabe (VoD, pre-loaded content).

Video-Live-Streaming ist aber nur eine der vielen Einsatzmöglichkeiten von 5G Broadcast/Multicast. Das IP-basierte Verfahren kann Daten aller Art in der Fläche verteilen und kommt somit für jede Anwendung in Frage, die eine größere Zielgruppe oder Anzahl gleichartiger Geräte adressiert, etwa ein IoT-Sensor-Netz oder eine Fahrzeugflotte für Software-Updates. Das zu 3GPP Release 16 konforme R&S®BSCC2.0 unterstützt dafür sowohl die Streaming-Standards HLS, MPEG/3GP-DASH wie auch das Dateiübertragungsprotokoll FLUTE.

Wie vom Marktführer für TV-Sender nicht anders zu erwarten, wurde die Schnittstelle zu den Sendern mit großer Sorgfalt entwickelt. Ein R&S®BSCC2.0 kann mehrere Sender gleichzeitig mit unterschiedlichen Streams versorgen, wobei es egal ist, ob sie in einem Gleichwellen- oder Mehrfrequenznetz arbeiten. Alle aktuellen R&S-TV-Senderbaureihen lassen sich mit geringem Aufwand für 5G Broadcast/Multicast einrichten.



Das Broadcast Service and Control Center R&S®BSCC2.0 erweitert ein Mobilfunk-Kernnetz um die Fähigkeit, TV-Sender für die Übertragung von Broadcast/Multicast-Inhalten einzusetzen. Die aktuellen Rohde & Schwarz-Senderbaureihen wie R&S®THU9evo (rechts) sind dafür vorbereitet.



SAARLÄNDISCHE LANDESBEHÖRDEN VORREITER BEI DER IT-SICHERHEIT



Die saarländische Staatskanzlei.

Für die IT-Infrastrukturen der öffentlichen Verwaltung gelten hohe Anforderungen an Datenschutz und Datensicherheit. Deshalb sind nicht nur die ruhenden Daten und lokalen IT-Installationen der Behörden zu schützen, sondern auch der standortübergreifende Datenverkehr. Die saarländische Landesverwaltung

unter Federführung ihres IT-Dienstleistungszentrums (IT-DLZ) hatte deshalb ein Projekt aufgesetzt mit dem Ziel, ihre Behörden mit modernster Kryptotechnik für die sichere Standortvernetzung auszustatten. Die Umsetzung wurde in die Hände der Projektpartner T-Systems und Rohde & Schwarz Cybersecurity

gelegt. Mit dem Multi-punkt-zu-Multipunkt-Verschlüsselungssystem, das aus einer zentralen Managementkomponente und verteilten Hochgeschwindigkeits-Verschlüsselungsgeräten besteht, verfügt das Saarland jetzt als eines der ersten Bundesländer über eine moderne Layer-2-Verschlüsselungslösung, die die strikten Vorgaben des BSI für den Transfer von VS-NfD-Materialien erfüllt. In Zukunft wird jeder Standort einer Landesbehörde mit einem Gerät ausgestattet sein, das den Datenverkehr mit anderen Dienststellen in Echtzeit Ende-zu-Ende verschlüsselt. Auf der selben Technik basierende Sicherheitssysteme bereiten jetzt auch einige andere Bundesländer für den Einsatz in ihren Landesverwaltungsnetzen vor.

ROHDE & SCHWARZ CYBERSECURITY FORSCHT AN VERSCHLÜSSELUNG DER NÄCHSTEN GENERATION

Quantencomputer werden Probleme lösen können, mit denen heutige Systeme überfordert sind – und auch die asymmetrischen Verschlüsselungsverfahren unsicher machen, auf denen die aktuellen Public-Key-Verfahren basieren. Gleichzeitig bietet die Quantentechnik über Post-Quantum-Kryptografie und Quanten-Schlüsselaustausch aber Mittel und Wege, weiterhin sicher zu kommunizieren. Während Quantencomputer wohl noch ein paar Jahre davon entfernt sind, sinnvolle Aufgabenstellungen bearbeiten zu können, findet man Quantenkryptographiesysteme bereits im Einsatz. Hier gilt es, die verschiedenen Ansätze zu vertiefen und zu alltagstauglichen Produkten zu entwickeln. Rohde & Schwarz Cybersecurity stellt seine kryptologische Expertise mehreren quantentechnologischen Forschungsprojekten zur Verfügung.

In dem im Oktober 2020 beendeten, vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekt **HQS** (Hardware-basierte Quantensicherheit) ging es darum, Hardware für den quantenbasierten Schlüsselaustausch in Verbindung mit klassischen Verschlüsselungssystemen zu entwickeln und eine darauf aufbauende hochsichere Kommunikation umzusetzen.

Das europäische Projekt **OpenQKD** (QKD = Quantum Key Distribution) hat zum Ziel, Europas Position im Bereich der Quantenkommunikation zu stärken. Dazu gehört die Einrichtung von Testbeds, um die Nutzbarkeit von QKD für verschiedenste Use Cases zu evaluieren, die bessere Verzahnung von Industrie und Wissenschaft, die Schaffung eines Innovations-Ökosystems, die Förderung der Kommerzialisierung von Quantentechnologie sowie auch die Bereitstellung kleinerer Demonstratoren, um potenziellen Endnutzern und relevanten Interessengruppen Netzwerkfunktionalität und Anwendungsfälle vorzustellen.

Das im November 2019 gestartete Projekt **QuNET** baut ein Pilotnetz zur Quantenkommunikation in Deutschland auf, das der abhör- und manipulationssicheren Datenübertragung dient. Dabei werden auch Verschlüsselungsgeräte vom Typ R&S®SITLine mit einer im Projekt HQS entwickelten QKD-Schnittstelle eingesetzt. Rohde & Schwarz Cybersecurity wirkt als Mitglied des Beirats neben der Fraunhofer-Gesellschaft, der Max-Planck-Gesellschaft und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt am vom BMBF geförderten Projekt mit.

SOLITÄR

Erster vektorieller Mittelklasse-Signalgenerator bis 44 GHz

Den weiter steigenden Nutzerzahlen und Datenmengen – in Zukunft verstärkt durch IoT-Produkte – begegnet die Mobilfunkindustrie durch das Vordringen in immer höhere Frequenzbereiche. Nur dort stehen Frequenzbänder mit der nötigen Bandbreite zur Verfügung. Die Messtechnik begleitet diesen Trend über die gesamte Wertschöpfungskette, nicht zuletzt mit Vektorsignalgeneratoren. Während im F&E-Bereich Oberklassemerkmale unverzichtbar sind, braucht die Produktion weder die ausgereizten Daten noch die vielseitigen Ausstattungspakete einer Entwicklungs- und Testmaschine in ihren End-of-line-Messstationen. Der neue R&S®SMM100A ist auf diesen Bedarf zugeschnitten. Technisch mit dem R&S®SMW200A verwandt, teilt er einige von dessen hochwertigen Eigenschaften, verzichtet aber beispielsweise auf extreme Breitbandigkeit, einen zweiten Kanal oder die Möglichkeit zum Fading.

Für aktuelle und kommende Standards

Sowohl 5G als auch kommende Wi-Fi-Standards arbeiten teilweise oberhalb von 6 GHz. Der R&S®SMM100A ist mit Frequenzobergrenzen von wahlweise 6 GHz, 7,5 GHz, 12,75 GHz, 20 GHz, 31 GHz oder 44 GHz darauf vorbereitet – als derzeit einziger Mittelklassegenerator auf dem Markt. Auch die Modulationsbandbreite ist variabel und kann mittels Keycode schrittweise von 120 MHz auf 240 MHz, 500 MHz und 1 GHz erweitert werden. Ebenfalls per Keycode wird die Fähigkeit zur Echtzeitgenerierung standardkonformer Signale (internes Basisband) aktiviert, für 5G, LTE, WLAN und viele Standards mehr. Zum „Abspielen“ selbstdefinierter Wellenformen – die typische Betriebsart in der Produktion – dient ein ARB-Generator mit bis zu 2 Gsample Speichtiefe.



Standard	Frequenz	Maximale Kanalbandbreite
5G New Radio FR1	< 7,125 GHz	100 MHz
5G New Radio FR2	> 24,25 GHz	400 MHz
Wi-Fi 6E (IEEE 802.11ax)	< 7,125 GHz	160 MHz
Wi-Fi 7 (IEEE 802.11be)	< 7,125 GHz	320 MHz
HRP UWB (IEEE 802.15.4z)	< 10,6 GHz	500 MHz

Hochleistungs-Funkstandards operieren zunehmend bei Frequenzen oberhalb von 6 GHz.

Ordentliche Messreserven

Der R&S®SMM100A weist bei einer Trägerfrequenz von 1 GHz und 20 kHz Offset ein Einseitenband-Phasenrauschen von < -129 dBc auf, typisch sogar 5 dB weniger. Der gemessene Amplitudenfrequenzgang über die maximale Modulationsbandbreite von 1 GHz beträgt weniger als 0,4 dB. Diese Werte haben direkten Einfluss auf die Modulations- und Nachbarkanaleigenschaften, die sich in der EVM- und ACLR-Performance widerspiegeln. So liegt der Vektorfehler für ein 100 MHz breites 5G-NR-Signal bei 28 GHz (nach 3GPP Test Model 3.1) bei nur < -42 dB (0,8 %) und übertrifft damit deutlich die Anforderungen des Standards. Gleiches gilt für die ACLR-Performance von -69 dBc für ein 10 MHz breites LTE-Testsignal nach 3GPP Test Model TM 1.1.

Eine hohe Leistung steht aber nicht nur im übertragenen Sinne im Pflichtenheft eines Mikrowellengenerators, sondern auch im wörtlichen. Dem wird der R&S®SMM100A mit einer Ausgangsleistung bis zu +18 dBm bei 29 GHz vollauf gerecht, bei 40 GHz sind noch beachtliche +15 dBm abrufbar.

In der Summe seiner Eigenschaften ist der R&S®SMM100A in der Generatorenmittelklasse derzeit ein Solitär. Die Mobilfunkindustrie findet in ihm ein Gerät, das vieles kann – in der Produktion, aber auch auf dem Labortisch. Und das zu einem attraktiven Preis.

Michael Kaltenbach

TESTINSTANZ FÜR 5G-ENDGERÄTE

Auf seinem langen Weg vom Prototyp im Entwicklungslabor bis zur Produktionsreife durchläuft ein Mobilfunkendgerät zahlreiche Tests der unterschiedlichsten Art. 5G mit seinen vielen neuen Eigenschaften schlägt in dieser Hinsicht alle Rekorde. Die Mobilfunkindustrie wünscht sich deshalb eine leicht bedienbare Messtechnik, die ihr die Testarbeit so einfach wie möglich macht. Einen Tester wie den R&S®CMX500.

Mobilfunktester sind die hohe Schule der Mobilfunkmesstechnik. Zwar kommen auch diverse andere Messgerätegattungen entlang der Wertschöpfungskette zum Einsatz, beispielsweise Signalgeneratoren und -analysatoren, aber ein Mobilfunktester hat fast alle diese messtechnischen Funktionen ebenfalls an Bord, wenn auch nicht in der Testtiefe und -schärfe wie ein Spezialgerät. Er muss in der Lage sein, einem zu testenden Endgerät ein Mobilfunknetz mit all seinen funktionalen Verastelungen vorzuspiegeln und jede mögliche Interaktion des Smartphones oder sonstigen Teilnehmergeräts mit dem Netz zu initiieren, messtechnisch

zu erfassen und zu bewerten. Diese Tests erstrecken sich über drei ganz unterschiedliche Kategorien: die Funkphysik, die sich in engen Toleranzen zu bewegen hat, die Kommunikationslogik (Signalisierung), über die der Datenaustausch organisiert wird, und die Anwendungsschicht, die im Internetzeitalter immer wichtiger wird. Der 5G-Tester R&S®CMX500 leistet all dies, zeichnet sich darüber hinaus aber durch ein einzigartiges Bedienkonzept aus, das die Komplexität der Testaufgaben beherrschbar macht. Jeder Nutzer kann sich im Rahmen einer einheitlichen Bedienoberfläche genau die Funktionen und Anzeigen zusammenstellen, die für eine

anstehende Aufgabe benötigt werden, seien es HF-Parametermessungen, Protokolltests, Performance-Analysen, Applikationstests oder umfassende Validierungstestläufe. Das Look & Feel ist immer gleich, was die Einrichtung einer homogenen Testlandschaft entlang der Wertschöpfungskette enorm erleichtert.

Nahtloser Anschluss an die bisherige Testausstattung

Der R&S®CMX500 erweitert bestehende Testlösungen für LTE und Legacy-Standards um die Funktionalität von 5G NR. Anwender, die bereits ein R&S®CMW500- oder

Bild 1: Mit dem Tester R&S®CMX500 und der Testkammer R&S®CMQ500 lassen sich 5G-Endgeräte und -Module tiefgehend analysieren.



R&S®CMWflexx-Testsystem betreiben, können es weiter nutzen und einfach einen R&S®CMX500 samt Testkammer R&S®CMQ500 beistellen (Bild 1). Mit einem solchen Aufbau lassen sich alle 5G-NR-Anwendungsfälle im Rahmen von 3GPP Option 3x und Option 2 testen, sowohl im Non-Stand-alone-Modus (NSA), der einen LTE-Unterbau voraussetzt, als auch im reinen 5G-Modus (Stand-alone, SA) und in allen 5G-Frequenzbändern (FR1 und FR2).

Eine für alles: die Testumgebung R&S®CMSquares

Der R&S®CMX500 hat keine Bedienelemente. Seine Funktionalität wird über die Software R&S®CMSquares erschlossen, eine Browser-basierte Testumgebung, die modernste Webtechnologien nutzt. R&S®CMSquares unterstützt sowohl manuelles Testen in einem interaktiven „Callbox“-Modus als auch automatische, sequencergesteuerte Tests. Alle in der Praxis vorkommenden Aufgaben eines solchen Testprogramms werden durch Werkzeuge unterstützt, so die Konfiguration des zu emulierenden 5G-Netzes, die Messung der HF-Kenngrößen, IP-Datendurchsatzmessungen oder die Analyse von

Protokollstack-Nachrichten über alle Layer hinweg.

Einstiegspunkt in die grafische Bedienoberfläche ist der Home-screen, ein Dashboard mit direktem Zugriff auf die grundlegenden Werkzeuge und Arbeitsumgebungen, von deren rechteckiger Erscheinung die Software ihren Namen hat (Bild 2). Vom Homescreen ausgehend baut der Anwender in wenigen Schritten seine komplette Testumgebung auf. Das 5G-Wunschnetzwerk, sei es ein NSA-Netz mit LTE-Ankerzellen oder ein reines 5G-NR-Netz, entsteht als virtueller Netzplan im Network Square per Drag & Drop-Konfiguration. Rasch wechselt der Anwender dann in die Einstellmenüs der ins Leben gerufenen LTE- oder 5G-Zellen und erhält dort Zugang zu allen wichtigen Parametern wie Frequenzbänder, Bandbreiten, Antennenverschaltungen oder die Sendeleistung der Zellen (Bild 3). Im Service Square lassen sich anschließend netzwerktypische Datenserver hinzukonfigurieren, um z. B. IP-Datentests durchzuführen, IMS-VoLTE- oder VoNR-Anrufe zu simulieren oder Datenverbindungen per integriertem DNS-Server ins Internet zu ermöglichen.

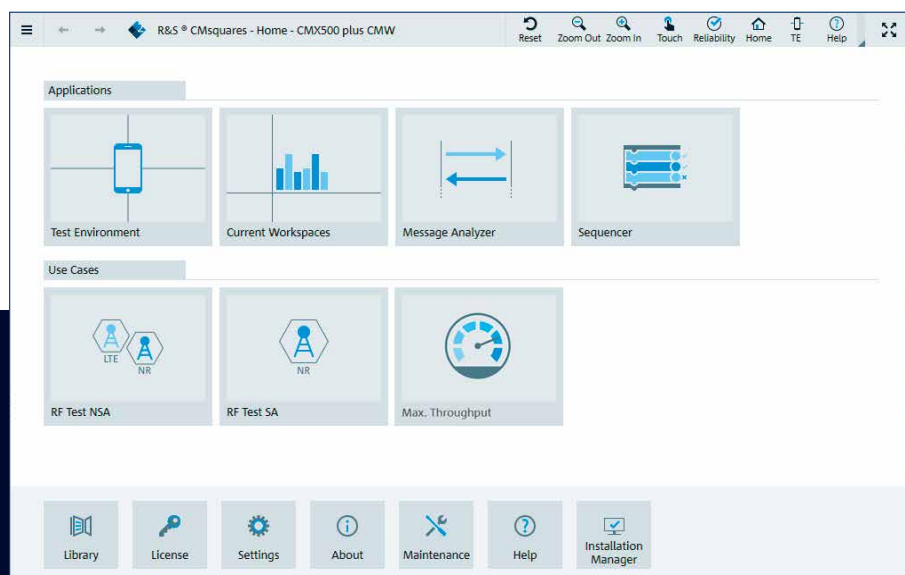
Nach dem virtuellen Netzbau gilt die Aufmerksamkeit dem zu testenden Endgerät. Im Test Environment Square steht es buchstäblich im Mittelpunkt (Bild 3). Hier lassen sich gerätespezifische Daten wie SIM-Kartenprofile oder die Antennenkonfiguration hinterlegen. Zudem zeigt der Square während laufender Tests in Echtzeit den aktuellen Verbindungszustand zwischen Endgerät und Netzwerk sowie weitere für den Anwender wichtige Informationen über das 5G-Gerät an, z. B. dessen vom Netzwerk zugewiesene IP-Adresse.

Über den Workspace gelangt der Anwender nun in die verschiedenen Messapplikationen. Moderne Webtechnologien ermöglichen eine sehr freie, zielorientierte Kombination von Messungen aus den Bereichen HF, Protokoll und Applikation. Auch die Darstellung kann wechseln und je nach gewünschtem Detaillierungsgrad grafisch oder tabellarisch erfolgen.

Ein beliebtes Testszenario ist das Überprüfen aller vom Endgerät unterstützten LTE- und 5G-Bänder sowie des 5G/LTE-Mischbetriebs (Dual Connectivity, EN-DC). Hierbei kommt der Sequencer ins Spiel, ein in R&S®CMSquares integrierter



Bild 2: Über den Homescreen von R&S®CMSquares erreicht der Anwender alle Funktionsgruppen.



WIRELESS

Kampagnenmanager, der dazu dient, vordefinierte Testszenarien ablaufen zu lassen oder eigene zu erstellen (Bild 4).

Testsequenzen können aus mitgelieferten Funktionsbausteinen grafisch zusammengestellt werden und auch selbst entwickelte Skripte

enthalten, die mit der Python-API-Umgebung von R&S®CMSquares geschrieben wurden (Bild 5). Solche Skripte lassen sich frei benannt in die

Bild 3: Im Mittelpunkt des Test Environment Squares steht das zu testende Endgerät mit seinen Kenndaten. Gleichzeitig bietet sich das konfigurierte Netz dem Zugriff dar (links oben und rechts außen). Die im Netz aktiven Server (rechts unten) und die ausgewählten Messfunktionen (links unten) ergänzen das Bild. Die Größe aller Fenster lässt sich beliebig einstellen. Ein nettes Feature hierbei: Das stilisierte Smartphone dient gleichzeitig als Anfasser, über den die Bildaufteilung mit einer knappen Mausbewegung geändert werden kann.

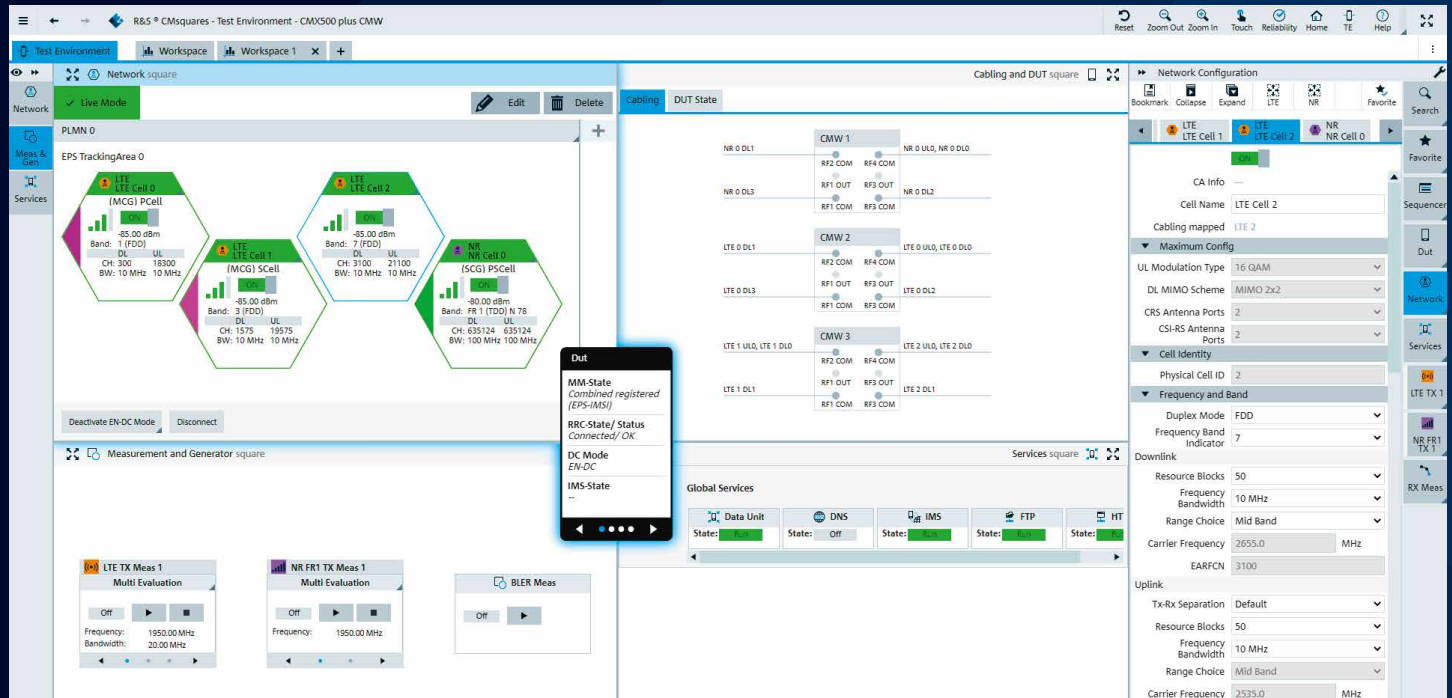
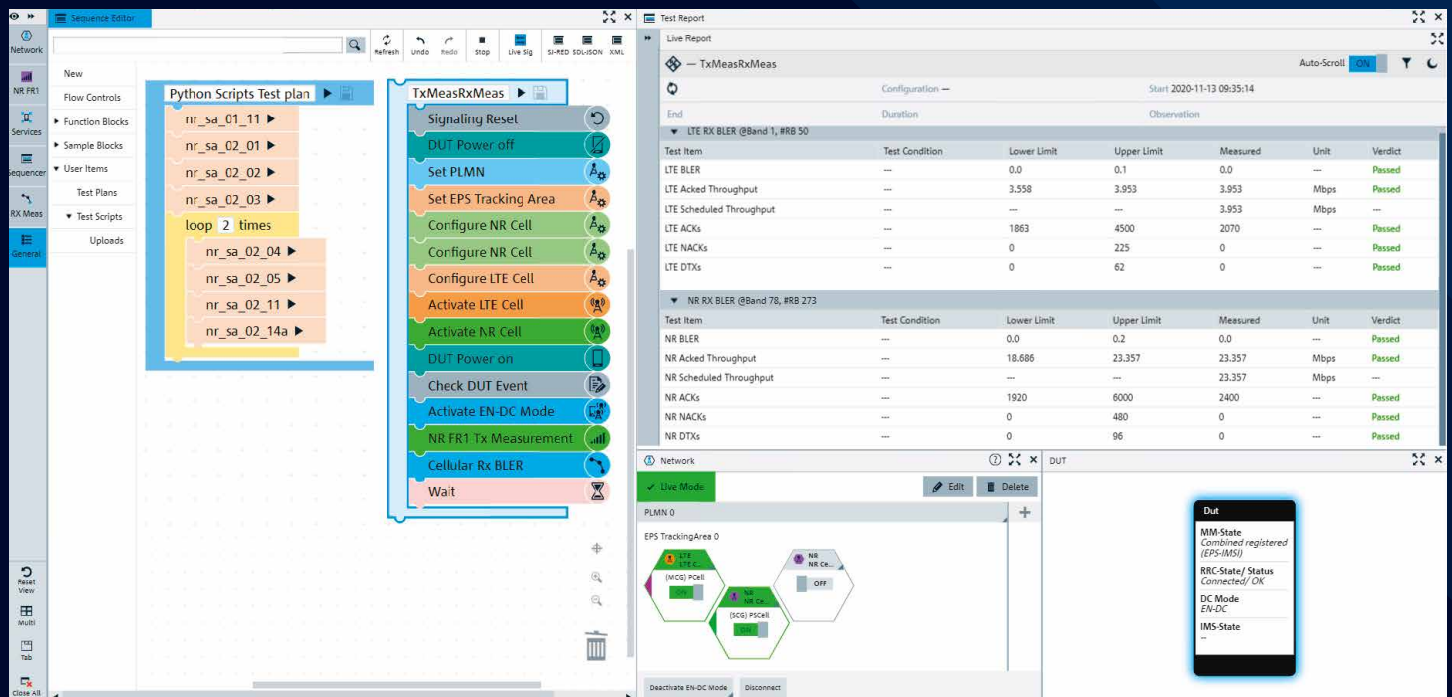


Bild 4: Der Sequencer dient zum Durchlaufen von selbst erzeugten Testprogrammen und 3GPP Test Cases.



Sequencer-Bibliothek aufnehmen und zur schnellen Benutzung auch auf Softwaretasten legen.

Sehr nützlich bei der Entwicklungsarbeit ist die Möglichkeit, fliegend zwischen skriptgesteuerten und manuell ausgelösten Aktionen hin

und her zu wechseln, denn automatischer und interaktiver Modus sind voll synchronisiert.

Bild 5: Mit der integrierten Python-Entwicklungsumgebung geschriebene Skripte können alle Gerätefunktionen ansprechen.

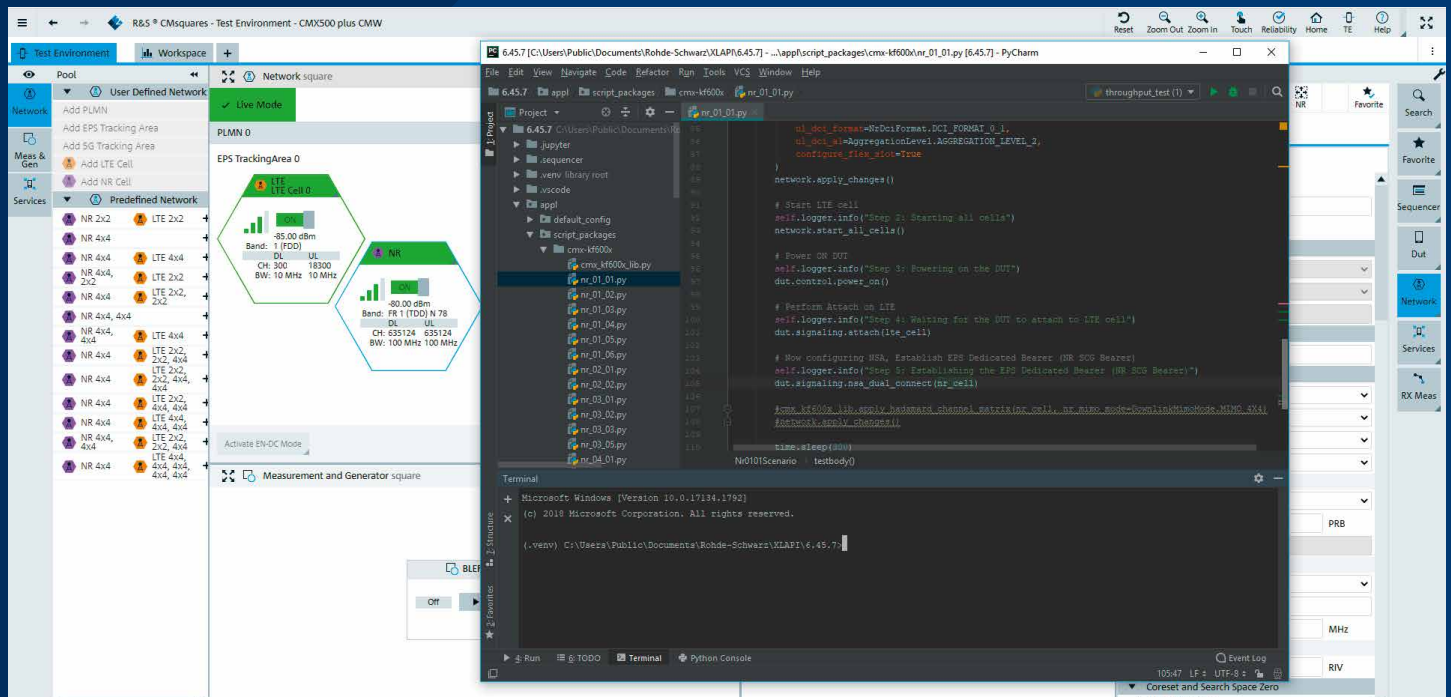
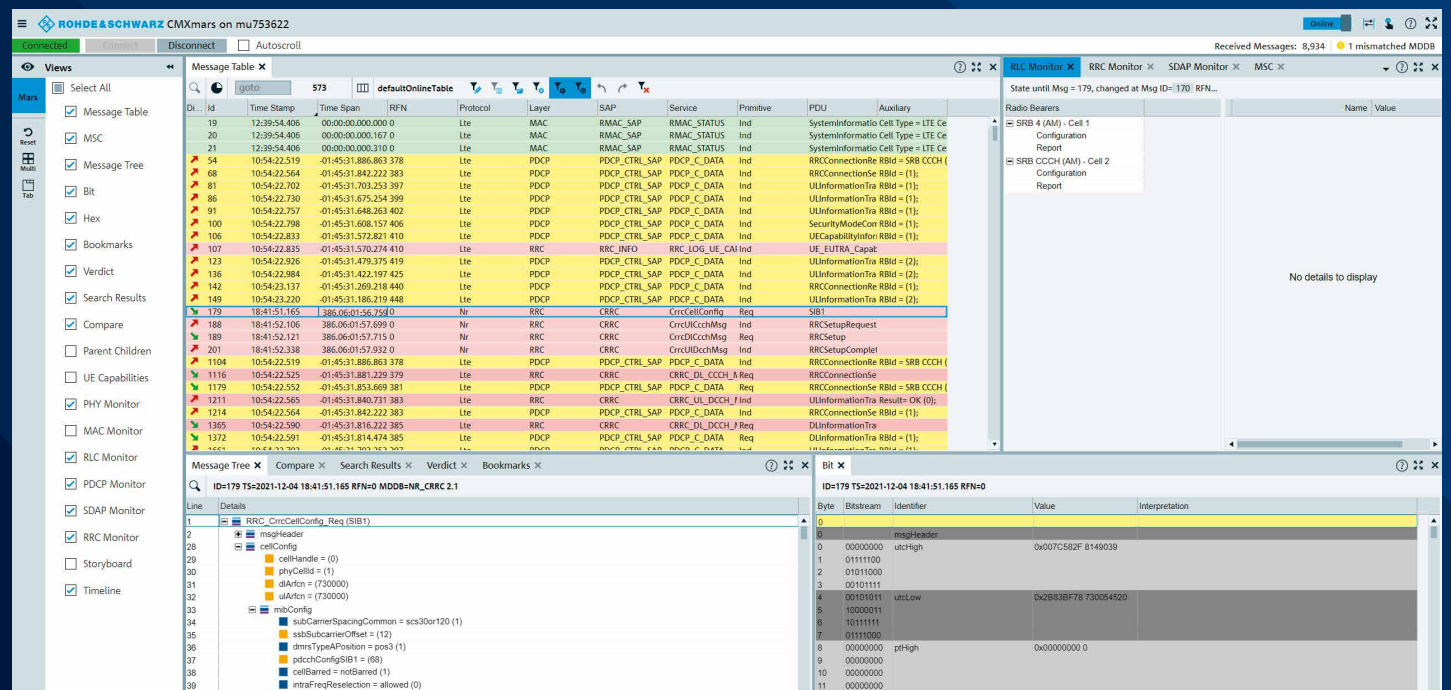


Bild 6: Im Message Analyzer lässt sich der gesamte Nachrichtenaustausch zwischen Netz und Endgerät in Echtzeit verfolgen und im Detail analysieren.



Jeder Test, egal ob interaktiv veranlasst, durch den Sequencer oder über SCPI-Fernsteuerung kontrolliert, kann durch die Echtzeitdarstellung der über die Luftschnittstelle ausgetauschten Protokollnachrichten auf Fehler analysiert werden. Der Message Analyzer Square bereitet sie in verschiedenen Detaillierungsgraden bis hin zur Bitebene auf (Bild 6). Fehler im LTE- oder 5G-Protokollstack aus allen Layern sind so schnell aufgespürt. Für eine Offline-Analyse wird der gesamte Nachrichtenaustausch zwischen emuliertem Netzwerk und dem Testobjekt in Logs gespeichert.

Die Grundlage: HF-Messungen

Einwandfreie Sende- und Empfangseigenschaften des Endgeräts sind die Voraussetzung für eine performante Datenübertragung über die Luftschnittstelle. So darf sich die Sendeleistung nur in festgelegten Grenzen bewegen und die Signalgüte muss Mindestanforderungen erfüllen

– nicht nur, um die Qualität der eigenen Verbindung sicherzustellen, sondern auch um andere Nutzer nicht zu stören.

Die wichtigsten HF-Sendermessungen des 5G-Standards wie die der Modulationsgüte, der Sendeleistung oder spektraler Kenngrößen lassen sich in allen Testmodi durchführen (Bild 7). Empfängermessungen wie BLER ergänzen die Testpalette.

3GPP schreibt in TS38.521 Kapitel 6 und 7 umfangreiche Test Cases für Sender- und Empfängermessungen vor. Diese liegen vorbereitet im Sequencer und werden dort gestartet.

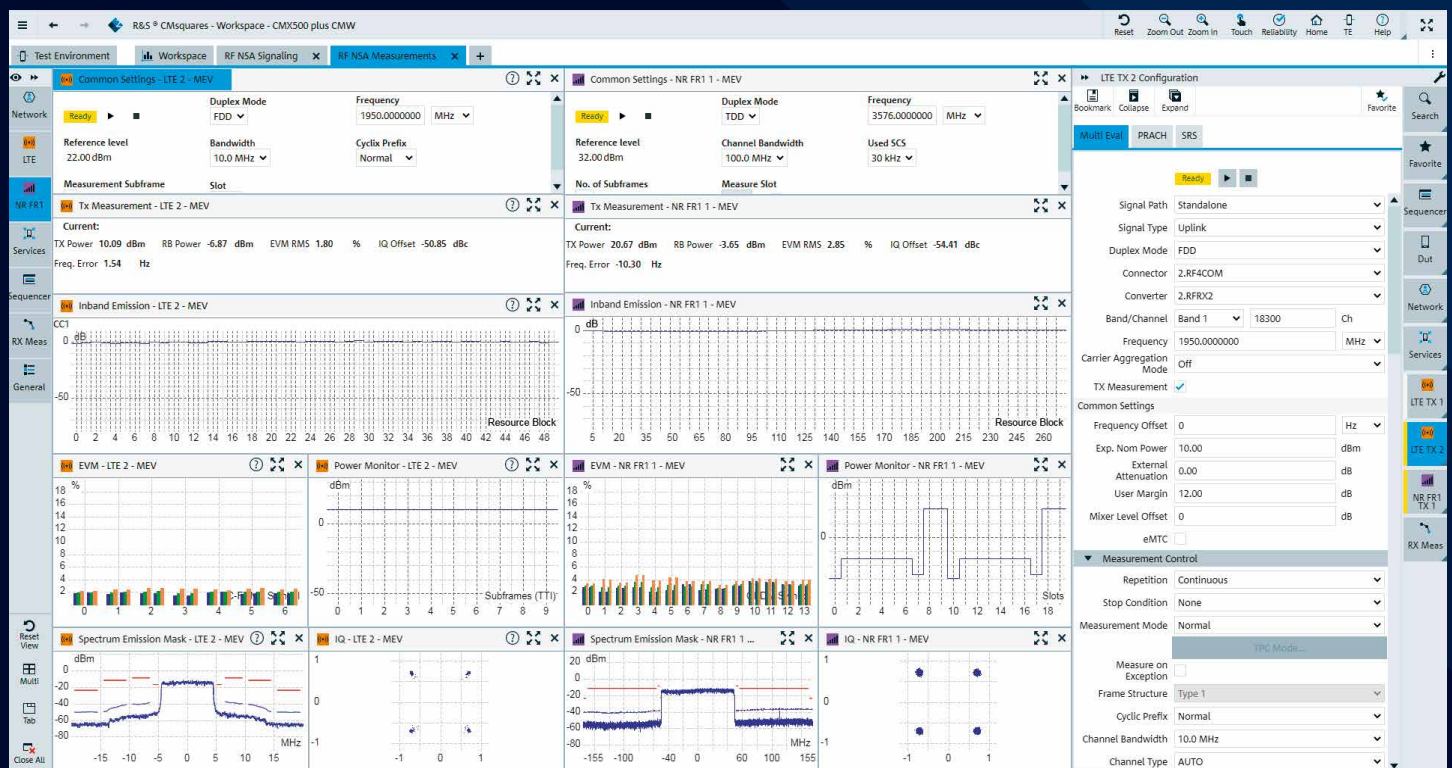
Die Kür: Applikationstests

Mobilgeräte integrieren immer mehr internetbasierte Dienste und Anwendungen. Durch seine All-IP-Architektur bietet 5G beste Voraussetzungen dafür. Die Bedeutung der IP-Dienste in der Mobilkommunikation,

zu denen bei 5G NR auch die Sprachübertragung zählt, schlägt sich zunehmend in den Endgerätetestprogrammen nieder. R&S®CMSquares beinhaltet dafür eine vollständig integrierte Ende-zu-Ende-Testumgebung.

IPv4/6-Konfiguration, Durchsatzmessungen mit iPerf und sofort einsetzbare Web-, FTP-, DNS- und IMS-Server ermöglichen umfangreiche Endgerätetests auf IP-Ebene. Die einfach zu bedienende, in einem Service Square zusammengefasste Datentestlösung verkürzt dank der Reproduzierbarkeit der Testbedingungen drastisch die Testzeiten und unterstützt effektiv das Erreichen der angestrebten Quality of Service. Letztere interessiert neben dem Gerätehersteller insbesondere den Netzbetreiber, der die Geräte in Verkehr bringen und sich von ihrer Funktionstüchtigkeit durch eigene Laboruntersuchungen überzeugen will.

Bild 7: Der Measurement Square präsentiert übersichtlich die vorher konfigurierten Messungen, wobei Setup-Änderungen jederzeit ohne Bildwechsel möglich sind.



Support für die Testwünsche der Netzbetreiber

Ein erfolgreich absolvierter Testparcour aus 3GPP Test Cases ist eine notwendige, aber nicht unbedingt hinreichende Voraussetzung für den problemlosen Gerätebetrieb in einem konkreten Netz. Die vielen Möglichkeiten, ein 5G-Netz auszugestalten (FR1, FR2, NSA, SA ...) und Services darüber anzubieten, schaffen unzählige funktionale Querverbindungen und Abhängigkeiten, die von Netz zu Netz und auch landesspezifisch differieren können und im Rahmen der Standardisierung nicht zu greifen sind. Auch sollen manchmal schon neue, zugkräftige Eigenschaften und Funktionen am Markt eingeführt werden, ehe verbindliche Tests von 3GPP dafür vorliegen. Der schnell wachsende Bereich der IP-Applikationen wird von der 5G-Standardisierung gar nicht erfasst.

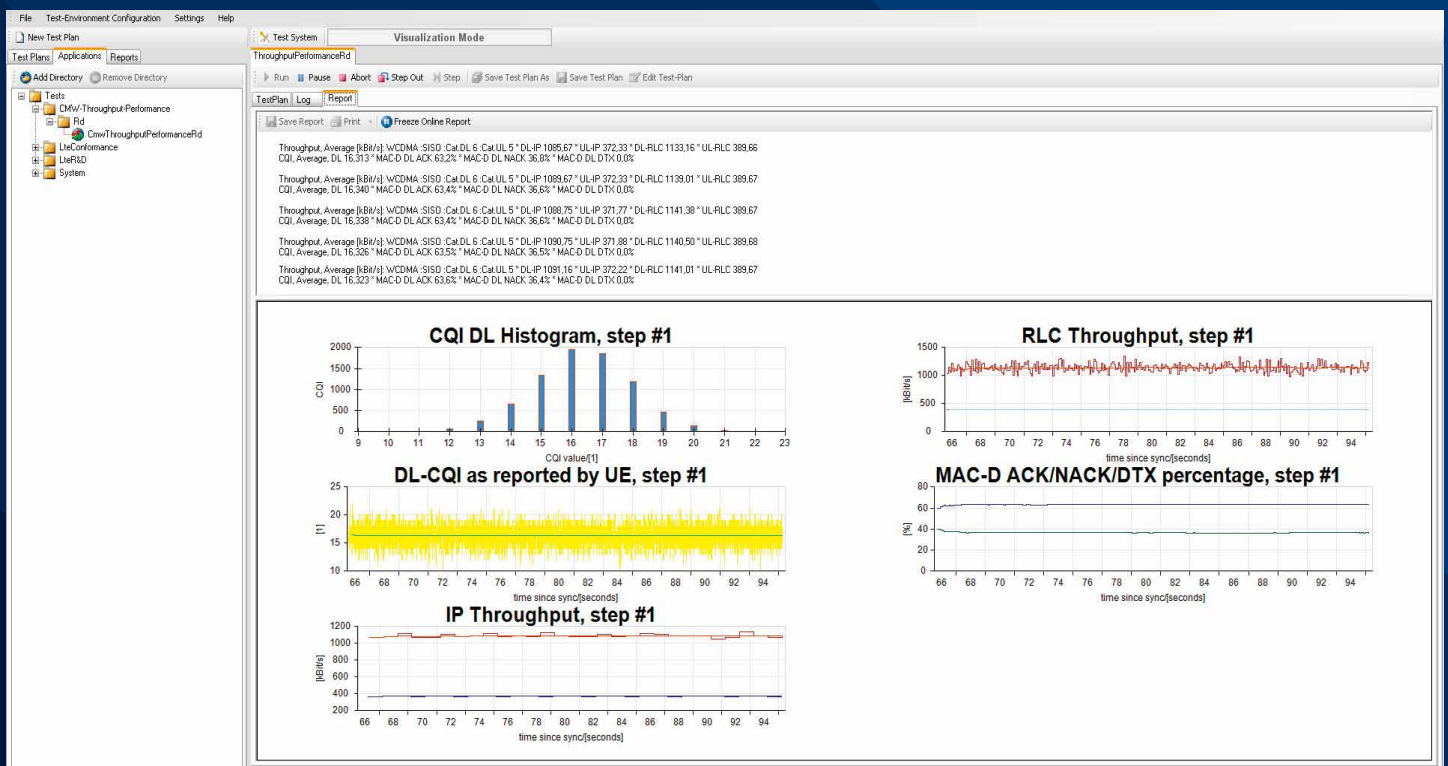
Deshalb stellen die Netzbetreiber umfangreiche eigene Testpläne auf, die ihre speziellen Bedürfnisse abdecken (Carrier Acceptance Tests). Die Gerätehersteller, die natürlich in die großen Netze hineinverkaufen wollen, unterwerfen ihre Produkte diesen Tests ebenso wie die Netzbetreiber selbst. Ein Mobilfunktester wäre funktional unvollständig, wenn er das nicht umfänglich unterstützen würde. Rohde&Schwarz arbeitet daher eng mit diversen Tier-1-Netzbetreibern zusammen, um deren Anforderungen testbar zu machen. Dazu dient die auch auf den großen Typprüfsystemen eingesetzte Testplattform R&S®CONTEST (Bild 8). Typische Tests umfassen die Funktionalität von Voice over NR (VoNR), den US-Notrufdienst E911, Location Based Services (LBS), Rich Communication Services (RCS, z. B. Group Chat, Enriched Calling, File Sharing u.a.) und Datendurchsatzmessungen mit verschiedenen MIMO-Konfigurationen.

Fazit

Der 5G-Mobilfunktester R&S®CMX500 ist eine umfassende Testlösung für die 5G-Ära. Alle marktrelevanten Ausprägungen des 5G-NR-Standards (NSA, SA, FR1, FR2) wie auch alle Testdimensionen (Funkphysik, Protokoll, Applikation) und netzbetreiberspezifischen Besonderheiten sind damit auf einfache Weise testbar. Mit besonderer Sorgfalt wurde die Testumgebung R&S®CMSquares gestaltet. Sie verbindet ein einheitliches Look & Feel über unterschiedlichste Testfunktionen hinweg mit einem hohen Grad an Individualisierbarkeit, sodass jeder Nutzer nach kurzer Einarbeitungszeit effizient damit arbeiten kann.

Aytac Kurt

Bild 8: Die Testplattform R&S®CONTEST für Carrier Acceptance Tests (R&S®NetOp) ergänzt die Testumgebung R&S®CMSquares.





WIEDER SCHNELLER

Die Konturen des nächsten WLAN-Standards 802.11be

Die Standardisierung der aktuellen WLAN-Generation 802.11ax, auch bekannt als Wi-Fi 6 oder High-Efficiency-WLAN (HE), ist nahezu abgeschlossen. Das Hauptziel von 802.11ax ist die effiziente(re) Nutzung des Spektrums, insbesondere in Szenarien mit hoher Nutzerdichte. Noch ist die Marktdurchdringung mit 11ax-Geräten relativ gering, aber längst wird schon an der Nachfolgegeneration 802.11be (auch Wi-Fi 7 oder EHT für Extremely High Throughput) gearbeitet. Stand bei 11ax die bessere Versorgung der Teilnehmer im Multi-User-Betrieb im Vordergrund, legt 802.11be jetzt wieder den Schwerpunkt auf die Erhöhung des Datendurchsatzes.

Trotz der unterschiedlichen Schwerpunkte von 11ax und 11be wird die physikalische Schicht (PHY) des neuen Standards vieles von 802.11ax übernehmen, etwa OFDMA und MU-MIMO. Bei den zentralen Parametern, von denen der Durchsatz abhängt, legt man hingegen einen Gang zu. So werden Modulationen höherer Ordnung unterstützt (bis zu 4096QAM), die Anzahl der räumlichen Ströme vergrößert (auf bis zu 16) und die Kanalbandbreite erhöht (auf bis zu 320 MHz). Darüber hinaus führt 11be weitere Verbesserungen ein. Der OFDMA-Unterträgerplan (Tone-Schema) wird im Sinne einer verbesserten Frequenzverfügbarkeit modifiziert und mehrere Unterträgerpakete (Resource Units) lassen sich auf einen Teilnehmer mit hohem

Durchsatzbedarf bündeln. Die Datenpräambel bekommt ein neues Feld, das die Kompatibilität zwischen verschiedenen WLAN-Versionen verbessert und das Datenhandling auch für zukünftige Versionen erleichtert.

Nachfolgend werden die wichtigsten Neuerungen von 802.11be umrissen.

Status und Dokumente

Die 802.11-Arbeitsgruppen veröffentlichen Status-Updates ihrer Arbeit unter [1]. Am 30. September 2020 wurde die 802.11be-Entwurfssfassung v0.1 für die stimmberechtigten Mitglieder der Arbeitsgruppe freigegeben. Es handelt sich um einen Vorentwurf mit noch vielen offenen Fragen. Die Version v1.0, in der diese beantwortet sein sollten, wird voraussichtlich im Mai 2021 fertig sein. Mit dem stabilen Entwurf v2.0 wird für März 2022 gerechnet.

Obwohl die 802.11-Entwürfe nur den stimmberechtigten Mitgliedern der Arbeitsgruppe zugänglich sind, ist das 802.11be-Spezifikations-Rahmendokument (SFD) öffentlich [2]. Es enthält die Merkmale und Anforderungen, auf die sich die Mitglieder geeinigt haben. Ein Großteil der Informationen in diesem Beitrag basiert auf der Version 15 des SFD.

Ziele und Eigenschaften von 802.11be

Das Hauptziel von 802.11be ist die Erhöhung des Durchsatzes in den nicht lizenzierten Bändern zwischen 1 GHz und 7,125 GHz. Spezifische Ziele finden sich im Antrag auf Projektgenehmigung [3]:

- Bereitstellung von mindestens einem Betriebsmodus, der einen Durchsatz von > 30 Gbit/s ermöglicht, gemessen am MAC-Zugangspunkt (SAP)
- Abwärtskompatibilität und Koexistenz mit älteren 802.11-Geräten, die in den Bändern 2,4 GHz, 5 GHz und 6 GHz betrieben werden
- Definition mindestens einer Betriebsart, die die Worst-Case-Latenz und den Jitter im Vergleich zu 802.11ax verbessert
- Erzielung eines höheren Durchsatzes bei geringerer Latenz für Anwendungsfälle wie Video, Virtual bzw. Augmented Reality, Gaming, Remote Office, Cloud-Computing

Wesentliche Parameter des Physical Layer (PHY)

802.11be-Geräte können in den Bändern bei 2,4 GHz, 5 GHz und 6 GHz betrieben werden. Ein Teilnehmergerät

muss in der Lage sein, in diesen Bändern mit Geräten zu kommunizieren, die den Physical-Layer-Spezifikationen der Vorläuferstandards entsprechen. Dementsprechend zeigt die Tabelle in Bild 1 insbesondere viele Ähnlichkeiten zwischen 11ax und 11be.

Präambel mit Versions-Kennung

Die Präambel von 802.11be ist den Präambeln früherer PHYs sehr ähnlich. Sie enthält Legacy-Felder (L-STF, L-LTF, L-SIG und RL-SIG), um Koexistenz und Rückwärtskompatibilität zu gewährleisten, sowie 11be-spezifische Felder wie EHT-SIG, EHT-STF und EHT-LTF (Bild 2).

Das neue Feld U-SIG wird auch in allen zukünftigen 802.11-Versionen vorhanden sein. Es enthält versionsabhängige und versionsunabhängige Bits. Durch die Angabe der PHY-Version als Teil der versionsunabhängigen Bits können 11be- und zukünftige Geräte leicht feststellen, um welche Art von Paket es sich handelt. Für frühere Generationen wurden immer kompliziertere automatische Erkennungsmarkierungen entwickelt, um beispielsweise ein 11ac-Paket von einem 11ax-Paket zu unterscheiden.

	802.11n	802.11ac	802.11ax	802.11be
Kanalbandbreite (MHz)	20, 40	20, 40, 80, 80 + 80, 160	20, 40, 80, 80 + 80, 160	20, 40, 80, 80 + 80, 240, 160 + 160, 320
Unterträgerabstand (kHz)	312,5	312,5	78,125	78,125
Symboldauer (µs)	3,2	3,2	12,8	12,8
Cyclic Prefix (µs)	0,8	0,8, 0,4	0,8, 1,6, 3,2	0,8, 1,6, 3,2
MU-MIMO	nein	im Downlink	im Up- und Downlink	im Up- und Downlink
Modulation	OFDM	OFDM	OFDM, OFDMA	OFDM, OFDMA
Modulation der Daten- unterträger	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM, 1024QAM	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM, 1024QAM, 4096QAM
Codierung	BCC (verpflichtend) LDPC (optional)	BCC (verpflichtend) LDPC (optional)	BCC (verpflichtend) LDPC (verpflichtend)	BCC (verpflichtend) LDPC (verpflichtend)

Bild 1: Vergleich von 802.11be mit bisherigen WLAN-Standards.

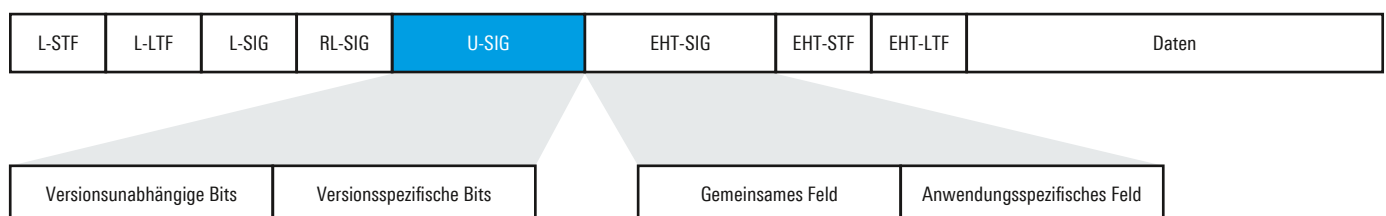


Bild 2: Die Präambel von 802.11be mit dem neuen Feld U-SIG.

Weitere Informationen in den versionsunabhängigen Bits sind:

- ▶ Downlink-/Uplink-Flag
- ▶ BSS Color
- ▶ Bandbreite
- ▶ TXOP (Zeitdauer der exklusiven Kanalnutzung durch das Teilnehmergerät)

Multiple Resource Units

In 802.11ax könnte jedem Teilnehmer nur ein Frequenzpaket (Resource Unit, RU) innerhalb der Dienstbandbreite zugewiesen werden. Bei 11be dürfen es mehrere sein (Multiple Resource Units, MRU). Ein Vorteil der MRU besteht darin, dass sie mehr Flexibilität für eine effizientere Nutzung des Spektrums bieten. Allerdings muss die MRU-Zuweisung dem Endgerät signalisiert werden, was den Overhead vergrößert, und eine große Auswahl möglicher RU-Kombinationen würde auch eine höhere Komplexität in den Access Points und Endgeräten mit sich bringen. Daher begrenzt 11be die Anzahl. Große RU mit 242 oder mehr Trägern (RU 242, RU 484, RU 996) können nur mit anderen großen RUs kombiniert werden, kleine mit weniger als 242 Trägern (RU 26, RU 52 und RU 106) nur mit anderen kleinen. Zusätzlich zu dieser RU-Kombinationsbeschränkung unterstützt 11be nur eine Teilmenge der möglichen Kombinationen kleiner RU-Sets. Bild 3 zeigt in der mit RU 78 gekennzeichneten Zeile die zulässigen Kombinationen von RU 26 + RU 52 in einem 80-MHz-Kanal.

Breite, aus mehreren RU zusammengesetzte RU-Aggregate sind besonders vorteilhaft in dem schon aus ax bekannten Betriebsfall „Preamble Puncturing“, der zum Tragen kommt, wenn einem anderen Dienst, z. B. einem Flugsicherungsradar im 5-GHz-Band, ausgewichen werden muss. Die betroffenen Resource Units innerhalb des RU-Aggregats – und nur diese – werden dann einfach vorübergehend stillgelegt, sodass die Kommunikation mit nur geringer Performance-Einbuße ungestört fortgesetzt werden kann.

BW	RU-Kombinationen	Verpflichtend in Non-OFDMA für:	Verpflichtend in OFDMA für:
80 MHz	484 + 242	AP, STA	Uplink: nur Non-AP STA
160 MHz	996 + 484	AP, STA	Uplink: nur Non-AP STA
	996 + (484 + 242)	AP, STA	Nicht unterstützt
240 MHz	3 × 996, 2 × 996 + 484, 2 × 996	AP, STA	Uplink: nur Non-AP STA
320 MHz	4 × 996, 3 × 996 + 484, 3 × 996	AP, STA	Uplink: nur Non-AP STA

Bild 4: Obligatorisch zu unterstützende Kombinationen von Multiple Resource Units (MRU) für Access Points (AP) und Endgeräte (STA).

Wegen ihrer Bedeutung für die Koexistenz mit anderen Technologien und der effizienten Nutzung der Frequenzressourcen schreibt 11be die Unterstützung breiter MRU-Kombinationen vor (abhängig von der BW-Übertragungsfähigkeit des Geräts, siehe Bild 4).

Unterträgerplan (tone plan)

Der 802.11be-Unterträgerplan basiert auf dem von 802.11ax, weist aber einige Unterschiede auf. Der Unterträgerabstand ist in beiden Standards identisch. Gleiches gilt für die Schemata der 20 MHz und 40 MHz breiten Kanäle im OFDMA-Modus. Beim 80-MHz-Mapping dagegen unterscheidet sich be von ax (Bild 5).

Diese leichte Modifikation löst potenzielle Probleme, die das ax-Schema bereiten konnte:

- Regulatorische Änderungen der Anforderungen an die Frequenzmaske durch ETSI. ETSI hat für 802.11 vor kurzem strengere Maskenanforderungen für den Up- und Downlink eingeführt, wonach der Pegel in 1 MHz Abstand von der Außengrenze eines 20-MHz-Kanals

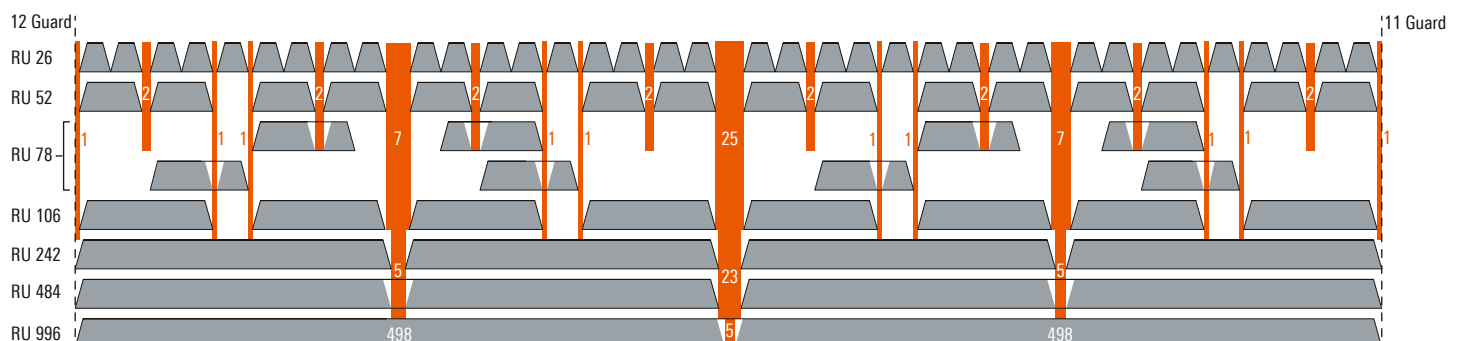


Bild 3: Die Resource Units in einem 80-MHz-Kanal. Endgeräte (STA) müssen außerdem die Kombination RU 26 + RU 52 (RU 78) unterstützen.

höchstens noch –20 dBr betragen darf. Simulationen zeigten, dass eine RU 242 möglicherweise unbenutzt bleiben muss, um diese neue Maskenvorgabe zu erfüllen.

- Einige der RU 26-Blöcke im ax-Unterträgerplan liegen in der Nähe von DC-Trägern oder einer Bandgrenze. In der Praxis bleiben diese RU 26 jedoch oft ungenutzt, weil es für einen OFDMA-Scheduler einfacher ist, sie zu ignorieren.

11be beschreibt einen einheitlichen Unterträgerplan wie folgt:

- Der 80-MHz-OFDMA-Plan gilt in jeder RU < 996 für alle Übertragungsarten: SU, DL MU, TB PPDU, mit und ohne Segment Puncturing.
- Ein für Non-OFDMA genutzter 80-MHz-Kanal verwendet generell das 996-RU-Design.
- Jedes 80-MHz-Segment, für das der Punctured-Modus signalisiert wird, verwendet den OFDMA-Unterträgerplan.

Fazit

Obwohl WLAN-Geräte nach dem Standard 802.11ax gerade erst am Markt erscheinen, wird für Mai 2021 bereits die erste vollständige Beschreibung des Nachfolgestandards 11be erwartet. Im Gegensatz zu 802.11ax, bei dem der effektive Multi-User-Betrieb im Vordergrund stand, zielt 11be wieder auf höhere Datenraten ab. Er nutzt dazu größere Bandbreiten, höherwertige Modulationen, eine zukunftsorientierte Signalisierung und eine flexiblere Handhabung der Frequenzblöcke. Rohde&Schwarz wird

die nötige Messtechnik in allen Produktgruppen wie schon für die bisherigen Standards der 802.11-Gruppe rechtzeitig bereitstellen.

Werner Dürport, Lisa Ward

Referenzen

- [1] www.ieee802.org/11/Reports/tgbe_update.htm
 - [2] mentor.ieee.org/802.11/dcn/19/11-19-1262-15-00be-specification-framework-for-tgbe.docx
 - [3] development.standards.ieee.org/myproject-web/public/view.html#pardetail/6886
- Rohde & Schwarz White Paper IEEE 802.11ax technology introduction (Suchbegriff 1MA192)

Abkürzungen

AP	Access Point
BSS	Basic Service Set
BW	Bandwidth
DC	DC Carrier (nicht genutzter Unterträger)
DL MU	Down Link Multi User
LTF	Long Training Field
MAC	Medium Access Control
MRU	Multiple Resource Unit
MU-MIMO	Multi-user MIMO
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access
PPDU	Protocol Packet Data Unit
PHY	Physical layer
RU	Resource Unit
SAP	Service Access Point
SIG	Signal Field
STA	Station (Endgerät)
STF	Short Training Field
SU	Single User
TB	Trigger-based
Tone	Unterträger
TXOP	Transmission Opportunity

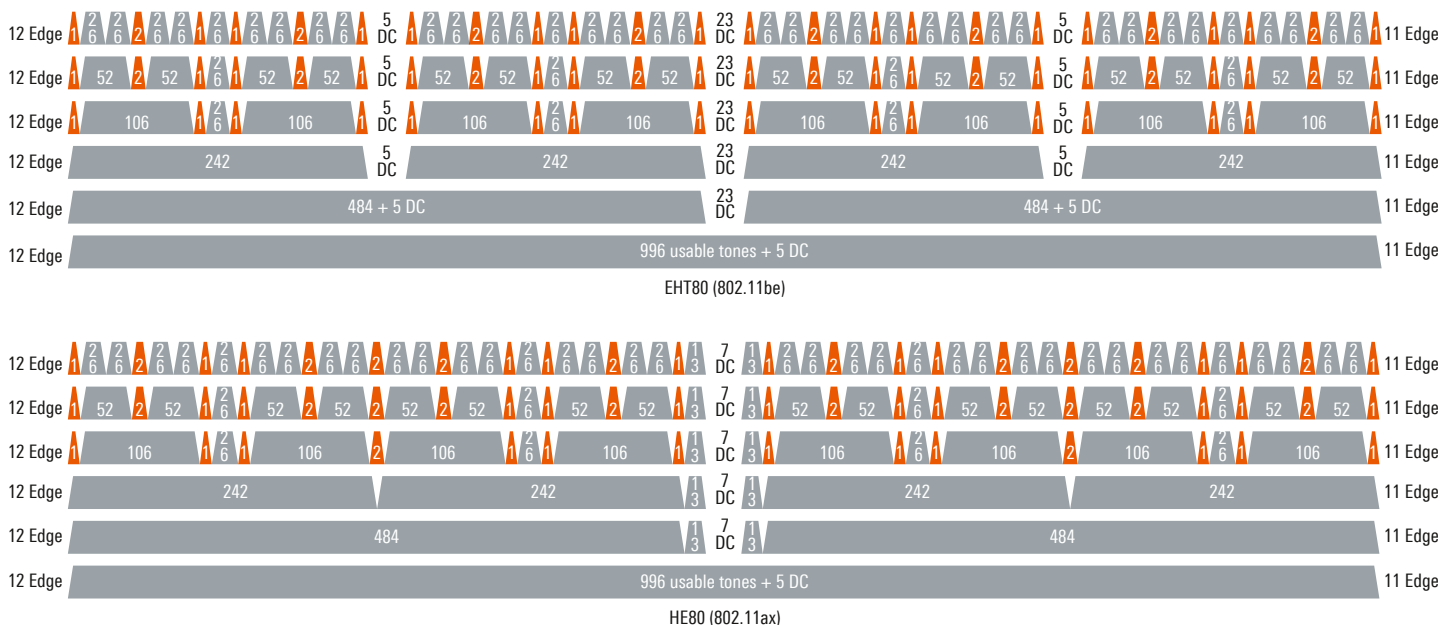


Bild 5: Vergleich der Unterträgerpläne für 80-MHz-Kanäle in 802.11ax (HE80) und be (EHT80). Die orangenen Unterträger bleiben ungenutzt.

MIT TURBO-SPEED ZUR

Schnelle Produktionstests durch serverbasierte Messdatenauswertung

Die eng tolerierten Spezifikationen moderner Hochfrequenzprodukte wie Mobilfunk-Basisstationen lassen sich nur einhalten, wenn die Geräte in der Fertigung exemplarweise vermessen und kalibriert werden. Der Aufwand dafür nimmt erfahrungsgemäß mit jedem Technologiesprung zu. Bei 5G treiben nicht nur die zusätzlichen Frequenzbereiche, breiteren Frequenzbänder und die Anzahl der wegen Massive MIMO zu kalibrierenden Antennenpfade den Testaufwand, sondern auch die höhere Installationsdichte der Stationen. Um die hoch gesteckten Abdeckungsvorgaben zu erfüllen, sind mehr Standorte als bisher auszurüsten und entsprechend viele Basisstationen zu produzieren. Die Hersteller begrüßen daher jede Möglichkeit zur Verkürzung der Taktzeit in der Linie.

Zur Vermessung der Hochfrequenzparameter dienen Signal- und Spektrumanalysatoren. Die Arbeitsgeschwindigkeit der Geräte konnte über die Jahre analog zum Fortschritt in der Datentechnik kontinuierlich gesteigert werden. Der zunehmende Testaufwand gerade auch in der Produktion hat diesen Performance-Zuwachs aber wieder aufgezehrt, sodass weiterhin ein Interesse an verkürzten Testzeiten besteht. Die Struktur des Messablaufs eröffnet eine Möglichkeit, diesen Wunsch zu erfüllen, ohne immer schnellere Messgeräte einsetzen zu müssen.

Getrennt marschieren, vereint messen

Die Signalanalyse lässt sich grob in die Phasen Signalerfassung und Signalauswertung gliedern. Bei der Signalerfassung wird die Basisbandinformation aus dem interessierenden HF-Frequenzbereich zurückgewonnen und in Form von I/Q-Daten an die Analysesektion weitergereicht bzw. in einen Speicher geschrieben. Die Auswertung der I/Q-Daten erfolgt rechnerisch, erfordert also kein

Messgerät im engeren Sinne. Signal- und Spektrumanalysatoren erfüllen beide Aufgaben, weil sie in der Regel als Universalmessgerät im Labor dienen, wo das Messergebnis unmittelbar am Bildschirm dargestellt werden soll. „Unmittelbar“ ist durchaus wörtlich zu verstehen, denn die Messgeschwindigkeit moderner Geräte ist derart hoch, dass selbst anspruchsvolle Analysen quasi in Echtzeit ablaufen und Parameteränderungen langsamstenfalls in Sekunden zu einer neuen Anzeige führen.

Die Sekunde ist aber eine Einheit, die in der Massenproduktion Gewicht hat, zumal dann, wenn die komplette Vermessung aus einer vielstufigen Sequenz von Einzelmessungen besteht, deren Zeiten sich addieren, wie es zum Beispiel bei einer Basisstationsvermessung der Fall ist. Der entscheidende Ansatzpunkt für eine Effizienzsteigerung

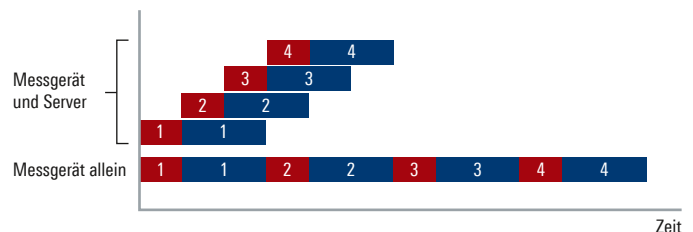


Bild 1: Üblicherweise laufen beide Messschritte – die Datenaufnahme (rot) und die Datenanalyse (blau) – sequenziell im Signalanalysator ab. Während der Analyse werden keine neuen Daten aufgenommen, weil der Puffer schnell überlaufen würde. Überträgt man die Messdaten zur Auswertung aber in Echtzeit an einen hinreichend leistungsfähigen Server, kann das Messgerät permanent Daten aufnehmen und seine volle Erfassungsgeschwindigkeit nutzen. Das hier beispielhaft angenommene Verhältnis von 2:1 zwischen der Verarbeitungs- und Aufnahmezeit kann in der Praxis noch wesentlich größer ausfallen, was die Trennung der Aufgaben umso sinnvoller macht.

GETESTETEN BASISSTATION

© 3d_vicka / Shutterstock.com

ist die Tatsache, dass die Berechnung der Messergebnisse jeweils deutlich mehr Zeit in Anspruch nimmt als die Messdatenaufnahme. Diese ist während der Analyse pausiert, das teure Messgerät nicht ausgelastet. Es bietet sich daher an, Datenerfassung und -verarbeitung getrennten Instanzen zuzuweisen, um den Flaschenhals Auswertung zu beseitigen (Bild 1).

Serverbasiertes Testen

Mit dem Produkt R&S®Server Based Testing (SBT) bietet Rohde&Schwarz eine Lösung an, die genau das leistet. Sie richtet sich speziell an Hersteller von 5G-Basisstationen und HF-Komponenten, die einen hohen Testdurchsatz benötigen, und verbessert die Geschwindigkeit von sich wiederholenden automatisierten Tests erheblich.

Bild 2 zeigt das Zeitprotokoll einer Messsequenz aus 59 Testschritten, wie sie typischerweise bei der Charakterisierung von 5G-NR-Leistungsverstärkern anfällt. Jeder Schritt besteht aus mehreren Teilaufgaben: einer Vorbereitungs-, einer Datenerfassungs-, einer Datenübertragungs- und einer Fehler-Vektor(EVM)-Berechnungsphase. Um das Messgerät – etwa den Signal- und Spektrumanalysator R&S®FSVA3000 (Bild 3) – mit maximaler Erfassungsgeschwindigkeit betreiben zu können, ohne einen Datenüberhang zu produzieren, musste der Server 16 Analyseaufträge parallel bearbeiten. Die Testausführungszeit verkürzte sich dadurch um den Faktor 5,5 gegenüber dem sequenziellen Betrieb. Eine noch weitergehende Steigerung ist durchaus möglich.

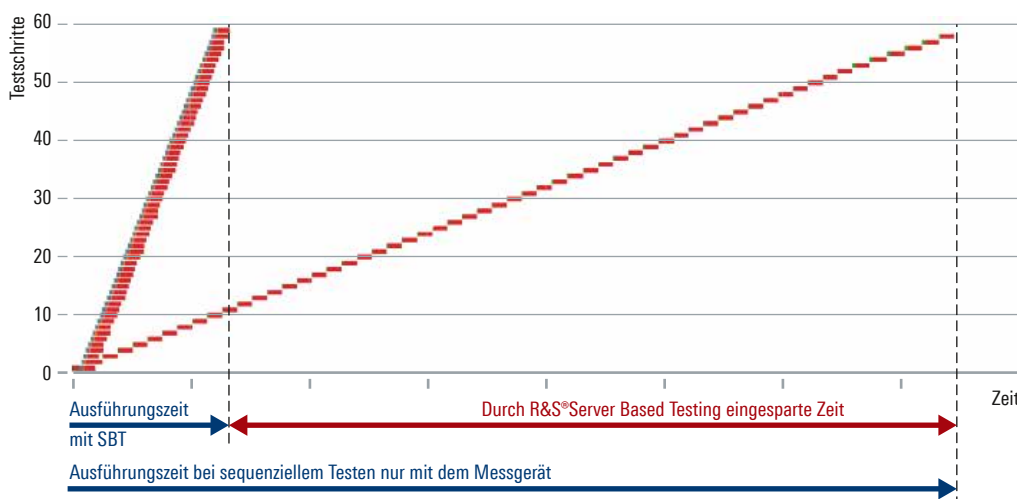


Bild 2: Diese aus 59 Testschritten bestehende EVM-Messung an einem Basisstations-Leistungsverstärker konnte durch Auslagerung der Berechnungen auf einen Server um den Faktor 5,5 beschleunigt werden.

Die Umsetzung

SBT ist eine modulare Softwareplattform auf Linux-Basis, die je nach Parallelisierungsbedarf und Leistungsfähigkeit der Rechnerhardware skaliert werden kann. Der Parallelisierungsgrad lässt sich zur Laufzeit festlegen. Die Berechnung übernehmen sogenannte SBT-Microservices, die quasi die granularen Recheneinheiten der Plattform darstellen. Server-Hardwarearchitekturen, die hunderte von Messaufträgen nahezu gleichzeitig verarbeiten können, sind zu einem vernünftigen Preis erhältlich. Damit lässt sich der Datenstrom mehrerer I/Q-Quellen bzw. Teststationen parallel bewältigen.

Die Echtzeitdatenübertragung zwischen Messgerät und Server erfolgt über Ethernet. Dafür kann der R&S®FSVA3000 mit einer 10-Gbit/s-LAN-Schnittstelle ausgestattet werden. Alternativ kommen auch andere Messgeräte als Datenlieferant in Frage. Die Wahl hängt von der notwendigen HF-Performance und dem gewünschten Testdurchsatz ab.

Gegenwärtig besteht R&S®Server Based Testing aus Komponenten, die für typische Szenarien in der Produktion von 5G- und LTE/4G-Basisstationen gemäß 3GPP-Standards erforderlich sind. Neben der normspezifischen Analyse der Modulationsqualität (Error Vector Magnitude, EVM) in den Up- und Downlink-Kanälen kann SBT auch spektrale Parameter wie ACLR und SEM effizient berechnen. Weitere Metriken lassen sich bei Bedarf schnell und kostengünstig implementieren.

Die Einbindung von R&S®Server Based Testing in existierende Test-Ökosysteme ist denkbar einfach: Durch ein REST-konformes Interface werden sogenannte Jobs abgesetzt, die die konkrete Messanweisung beinhalten. Durch

asynchrone parallele Verarbeitung kann die zur Verfügung stehende Hardwareplattform bestmöglich genutzt werden. Die Messergebnisse werden über die gleiche Schnittstelle an das Frontend zurückübertragen.

Fazit

Die Messgeräte-Performance nimmt mit jeder Produktgeneration spürbar zu. Gleiches gilt aber auch für die Anforderungen neuer Technologien, die den Zugewinn nicht selten wieder zunichte machen. Die weit fortgeschrittene Digitalisierung der Messtechnik eröffnet allerdings einen Weg, besonders leistungshungrige Messungen durch Parallelisierung zu beschleunigen. Die Analyse der Messdaten, die im I/Q-Format vorliegen, wird fragmentiert und einem nahezu beliebig skalierbaren Server übergeben. So kann die hohe Signalerfassungsrate moderner HF-Messgeräte in vollem Umfang ausgeschöpft werden. Insbesondere die Hersteller anspruchsvoller Produkte wie Mobilfunkbasisstationen profitieren davon. Sie können durch überschaubare Investitionen in ihre Server-Landschaft den Messdurchsatz in der Linie drastisch erhöhen, ohne zusätzliche Messgeräte beschaffen zu müssen.

Die Aufteilung von Datenerfassung und -analyse auf verschiedene technische Instanzen ist der absehbare Weg, den die Produktionsmesstechnik einschlagen wird. Aber auch der Entwicklungsingenieur zieht Vorteile daraus. So ermöglicht der SaaS-Dienst R&S®Cloud4Testing die zeitversetzte Messdatenauswertung übers Internet (siehe NEUES 223).

Sascha Laumann

Weitere Informationen finden sich auf www.rohde-schwarz.com/serverbasedtesting

Bild 3: Bilden die Basis für eine höchst performante Charakterisierung von Basisstationsverstärkern: Vektorsignalgenerator R&S®SMBV100B als Stimulus-Quelle, Signal- und Spektrumanalysator R&S®FSVA3000 als I/Q-Datenlieferant sowie ein Standard-PC für die Kommunikation mit dem Server, der die Messergebnisse berechnet.





Die verstärkte Nutzung von Augmented Reality ist nur ein Aspekt zukünftiger Fabriken. Menschen und Maschinen werden in vielfältiger Weise funkvernetzt sein.

NETZWERKTESTS EBENEN DEN WEG ZUR INTELLIGENTEN FABRIK

Der 5G-Mobilfunk bringt alle Voraussetzungen mit, um die intelligente Fabrik der Zukunft drahtlos zu vernetzen. Doch damit das gelingt, sind Netzwerktests unabdingbar.

Die 5G-Technologie wurde in 3GPP Release 15 standardisiert, das die Grundlage der aktuellen 5G-Netze bildet. Vom Release 16, das stark von der 5G Automotive Association (5GAA) und der 5G Alliance for Connected Industries and Automation (5G-ACIA) beeinflusst wird, sind weitere deutliche Verbesserungen bei der Latenzzeit, der Netzwerksynchronisierung und der Integration in industrielle Ethernet-Netzwerke zu erwarten. Damit entwickelt sich 5G zu einer geeigneten Technologie, um die Anforderungen intelligenter Fabriken (Industrie 4.0) zu erfüllen. Diese zeichnen sich durch eine datengetriebene Echtzeitsteuerung aller Prozesse aus sowie durch

die Möglichkeit, Produktionslinien schnell und flexibel umzugestalten. Voraussetzung dafür ist eine so umfassende Vernetzung der Maschinen, Menschen, Anlagen, Logistik und Produkte, wie sie nur über Funk machbar ist. Schnelle Funkstrecken auf 5G-Basis werden deshalb das Adergeflecht bilden, das den komplexen Fabrikorganismus am Leben erhält. Da eine auch nur kurzzeitige Beeinträchtigung des Datenflusses gravierende Folgen – und Kosten – nach sich ziehen kann, ist das Funknetz mit großer Sorgfalt zu konzipieren, einzurichten und zu überwachen. Das geschieht in mehreren (Test-)Phasen, die nachfolgend erläutert werden.

Die wichtigsten KPIs von Mobilfunknetzen in der funkvernetzten Fabrik

Eine intelligente Fabrik ist eine kritische Umgebung, die strenge Anforderungen an die Konnektivität und Zuverlässigkeit der Maschinen sowie an die Daten- und Mitarbeitersicherheit erfüllen muss, insbesondere wenn die Konnektivität durch Drahtlos-Technologien bereitgestellt wird.

Ein probates Mittel zur Erhöhung der Zuverlässigkeit ist Redundanz. Jeder Standort in der funkvernetzten Fabrik sollte von mindestens vier drahtlosen Zugangspunkten aus versorgt werden können. Ob das gewährleistet ist,

kann nur ein Test vor Ort klären, und zwar nicht nur bei der Erstinstallation, sondern nach jeder Umgestaltung des Maschinen- oder Gebäude-Lay-outs, da bauliche Veränderungen sich auf die Ausbreitungsbedingungen der Funkwellen auswirken können.

Die zuverlässige drahtlose Erreichbarkeit jeder Stelle ist eine notwendige, aber noch keine hinreichende

Voraussetzung für den reibungslosen Betrieb. Zusätzlich muss die Performance stimmen, die sich nicht nur nach dem erzielbaren Datendurchsatz bemisst, sondern – in vielen Fällen wichtiger – auch nach der Latenzzeit, also der Zeit, die ein Signal benötigt, um das System zu durchlaufen. Die Latenzen bisheriger Mobilfunktechnologien bis hin zu 4G waren nicht kurz genug, um den Anforderungen einer

Echtzeitsteuerung zu genügen. Dieser Hinderungsgrund ist mit 5G entfallen, das Latenzen von wenigen Millisekunden ermöglicht.

Man unterscheidet zwischen Umlauf- (Round-Trip-) und Einweg-Latenz (Bild 1). Augmented- bzw. Virtual-Reality-Anwendungsfälle benötigen beispielsweise eine kurze Umlauf-Latenzzeit, denn wenn der Techniker mit

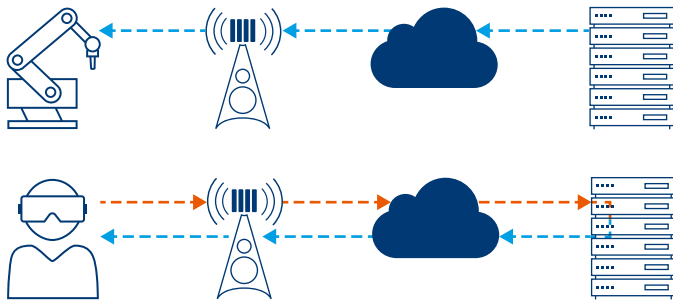
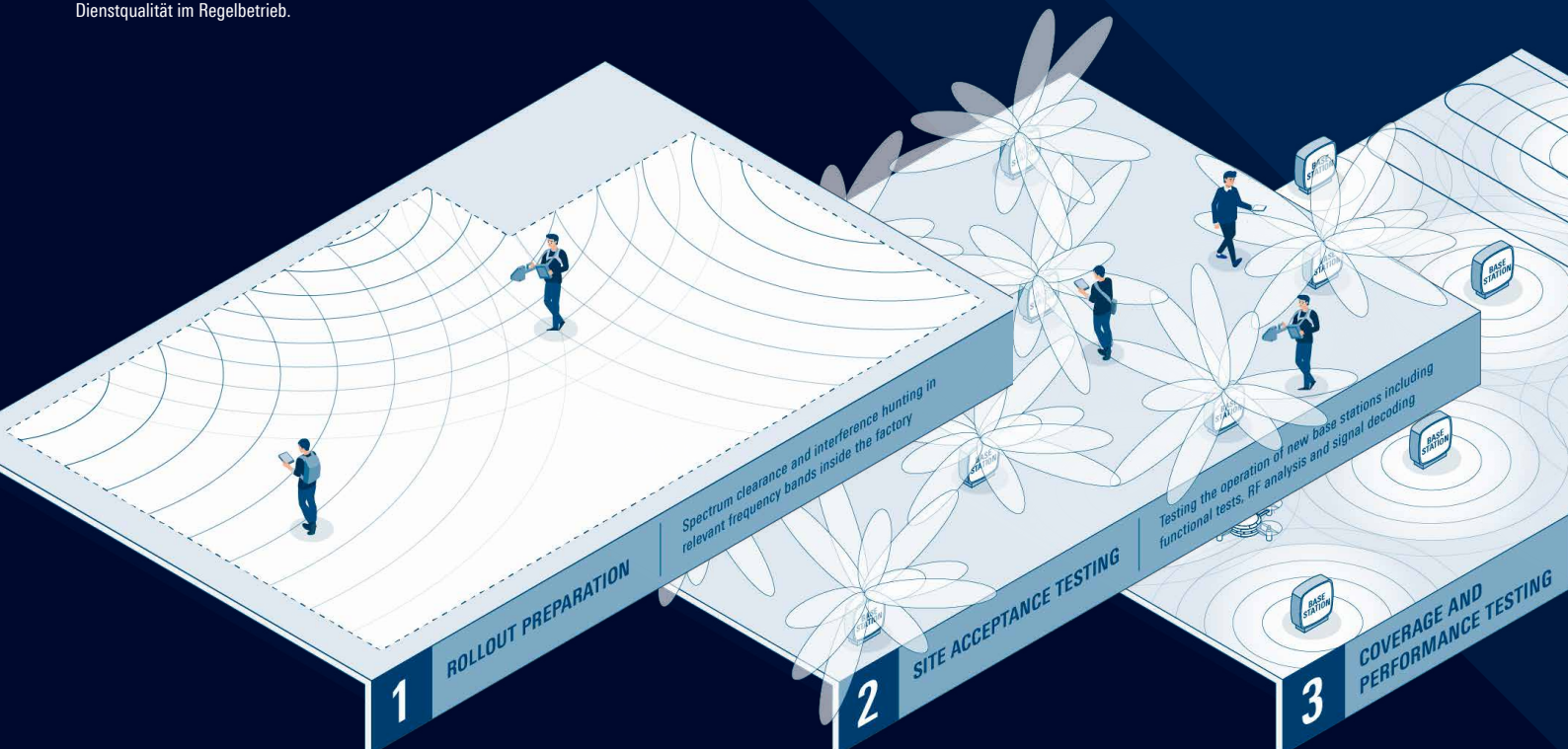


Bild 1: Die Einweg-Latenz ist die Signallaufzeit vom Sender zum Empfänger (oberes Bild), während die Umlauf-Latenz, Round-Trip- oder Antwortzeit die Verarbeitungsdauer durch den Empfänger und die Rücklaufzeit beinhaltet.

Bild 2: Netzwerktestphasen 1 bis 4 von der Vorbereitung bis zur 24/7-Überwachung der Dienstqualität im Regelbetrieb.



AR/VR-Brille seinen Kopf bewegt, muss der Bildinhalt sehr schnell aktualisiert werden, um die eingeblendeten Daten mit dem Live-Bild konsistent zu halten. Die Echtzeit-Steuerung einer nicht autonomen Maschine erfordert hingegen eine niedrige Eingew-Latenzzeit. Die Steuerbefehle müssen hier unmittelbar zur Aktion führen, etwa der Haltebefehl an einen Roboter.

Die fünf Phasen des Netzwerktests

Wie die Fabrikplanung als Ganzes folgt auch die Implementierung eines Funknetzes einem Phasenmodell. Dieses beinhaltet einen fünfstufigen Testplan. Bild 2 zeigt die ersten vier Stufen, die verifizieren sollen, dass das Netz die strengen Zuverlässigkeits- und Performance-Anforderungen erfüllt.

Phase 1: Vorbereitung der Einführung

In manchen Ländern, so in Deutschland, sind 5G-Frequenzen für Campus- bzw. private Netze reserviert, deren Nutzung von Fabrikbetreibern beantragt werden kann. Auch die Errichtung und der Betrieb des Netzes sind dann privat zu organisieren, werden in der Regel aber an Dienstleister ausgelagert. In Ländern ohne dedizierte Campus-Frequenzen führt der Weg zur Fabrikvernetzung über die Buchung von Ressourcen bei einem der großen Netzbetreiber, der sein Basisstationsnetz um die Fabrik herum verdichten oder zusätzliche Basisstationen in der Fabrik installieren wird, um den Anforderungen gerecht zu werden.

Soll das Netz auf Basis eines Campus-Frequenzbands aufgebaut werden, ist zunächst festzustellen, ob

das Spektrum frei von Interferenzen ist. Die Erfahrung zeigt, dass das für neu zugewiesenes, bisher unbewirtschaftetes Spektrum nicht vorausgesetzt werden kann. Bei den fälligen Messungen kommen Netzwerkscanner (R&S®TSMx6), Handheld-Spektrumanalysatoren (R&S®FPH/FSH) oder tragbare Funkmessempfänger (R&S®MNT100, R&S®PR200) zum Einsatz.

Phase 2: Abnahmeprüfung vor Ort

In der zweiten Phase wird der Betrieb der neu aufgestellten Basisstationen getestet und validiert. Das umfasst einfache Funktionstests wie Download/Upload-Tests und Umlauf-Latenz-Messungen, ferner HF-Spektrumanalysen over the air (OTA) sowie die Decodierung der Signale zur Verifizierung von PCI-, SSB- und SIB-Informationen für 5G- und LTE-Ankersignale.

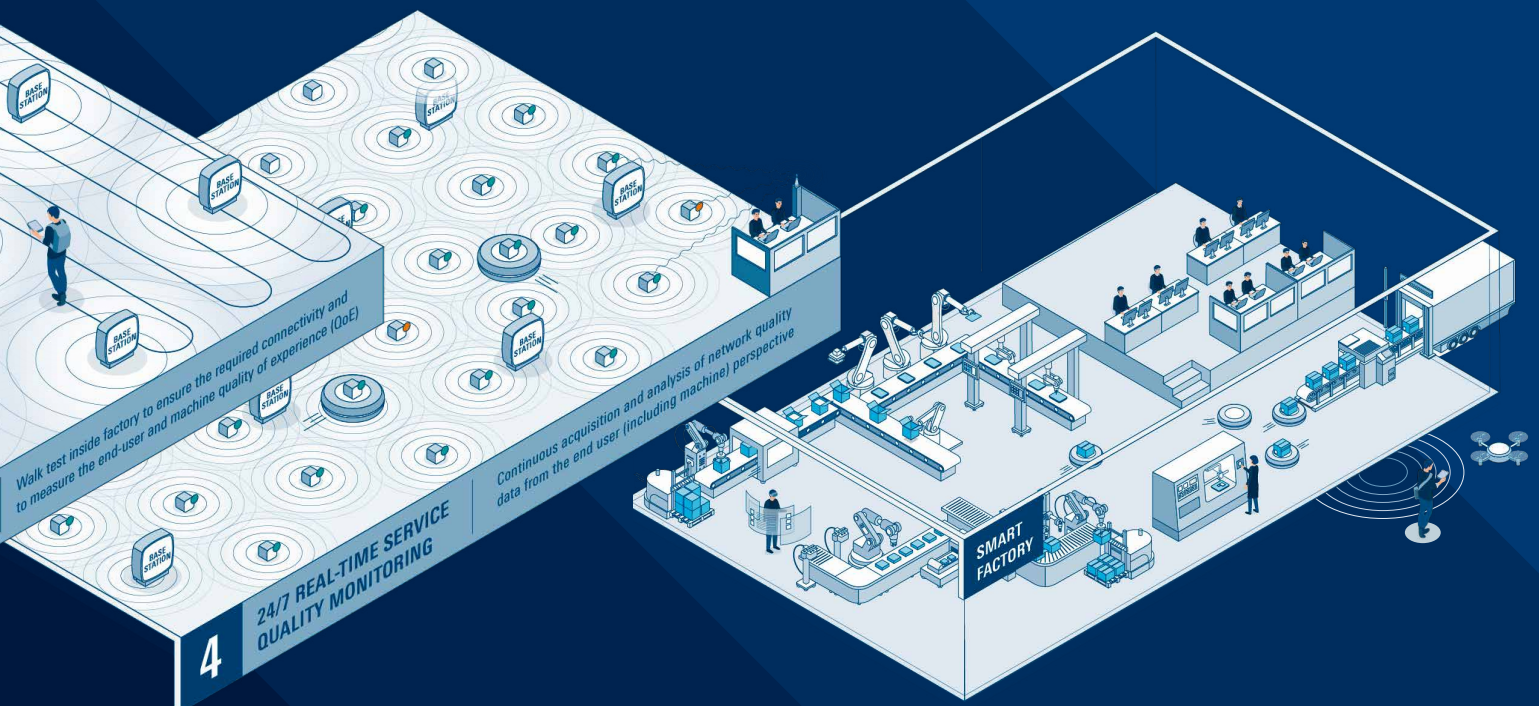


Bild 3: Die Umgebung des funkvernetzten Werks muss periodisch auf Störaussendungen hin untersucht werden, die unter Umständen von der eigenen Installation ausgehen.

Die Signaldecodierung hilft außerdem bei der Fehlersuche bei bestimmten Parametern im Falle von Problemen oder unerwarteten Ergebnissen.

Auch für diesen Aufgabenkreis hält das Rohde&Schwarz-Produktportfolio die passenden Messgeräte bereit. Für die Funktionstests (DL, UL, Ping/TWAMP) bietet sich QualiPoc Android an, eine Smartphone-basierte Messsoftware, die die Mobilfunkversorgung aus der Nutzerperspektive bewertet. Für OTA-Spektrummessungen empfiehlt sich der Handheld-Spektrumanalysator R&S®FPH (SpectrumRider), während die 5G Site Testing Solution R&S®5G STS ein umfassendes mobilfunktechnisches Lagebild liefert, mit dem etwaige Schwachstellen und Problemfelder schnell aufgedeckt werden können.

Phase 3: Abdeckungs- und Leistungstest

Jetzt folgt die Probe aufs Exempel. Es gilt sicherzustellen, dass das Netz im gesamten Werkbereich die geforderten Leistungsdaten erbringt.

Mit Netzwerk-Scannern (R&S®TSMx6) misst man flächendeckend über das ganze Fabrikareal, wie viele verschiedene Netzwerk-Zugangspunkte mit gutem Empfangssignalpegel (RSRP) und guter Qualität (SINR) an jedem Ort empfangen werden können. Wie oben schon erwähnt, ist eine mindestens vierfache Redundanz wünschenswert.

QualiPoc Android kann die Echtzeitfähigkeit der Verbindung testen, indem es das emulierte Verkehrsverhalten, die Latenzmessung und die Übertragungsqualität in einem

einigen Interaktivitätstest kombiniert (siehe Kasten unten).

Mit der Echtzeit-Optimierungssoftware R&S®SmartONE lassen sich die Messergebnisse unmittelbar visualisieren und Problembereiche gezielt verbessern.

Phase 4: Überwachung der Dienstqualität

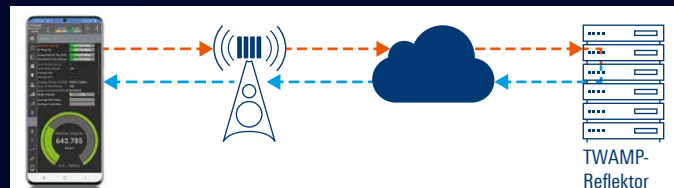
Die Messungen der Phase 4 sind in Fabriken notwendig, in denen das Funknetz eine kritische Infrastruktur darstellt, deren Dysfunktion einen hohen Verlust an Rentabilität und Produktivität bedeuten würde. Der Fabrikeigner wird deshalb ein eng toleriertes Service Level Agreement (SLA) mit seinem Netzbetreiber abschließen – und kontrollieren wollen, ob es auch eingehalten wird. Zu diesem Zweck verteilt man speziell zugeschnittene HF-Sonden überall

Exkurs: Ein neues Verfahren zur Messung der Netzwerk-Performance

Die Sicherstellung einer flächendeckend hohen Netzwerk-Performance ist für Fabrikfunknetze essenziell. Latenz und Datendurchsatz müssen an allen Stellen des Abdeckungsbereichs die Mindestanforderungen erfüllen. Ein neues in der Smartphone-basierten QualiPoc-Android-Software implementiertes Verfahren macht entsprechende Messungen einfach und verlässlich.

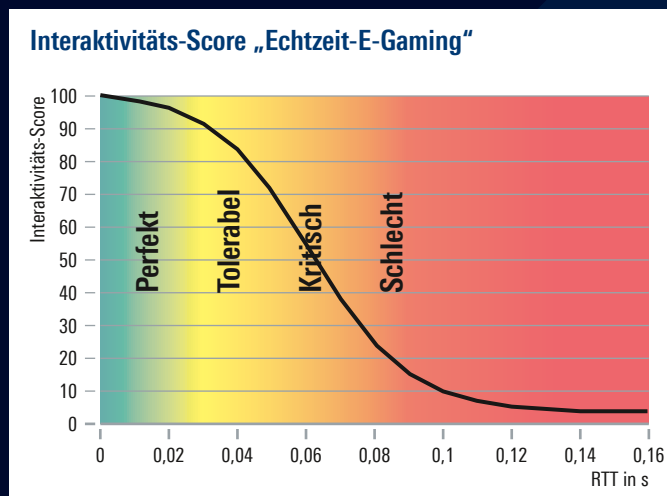
Latenzzeiten werden traditionell über Ping-Echos gemessen. Ping ist ein Bestandteil des Internet Control Message Protocol (ICMP), das zum Austausch von Diagnose- und Fehlermeldungen in Rechnernetzen dient. Ping hat aber inhärente Nachteile, wenn es um die Genauigkeit geht, was sich insbesondere bei den niedrigen Latenzen auswirkt, wie sie für ein 5G-Fabriknetz gefordert sind. Für präzise Messungen ist es ungeeignet. Ein besseres Verfahren basiert auf dem Protokoll TWAMP (Two Way Active Measurement Protocol), das von

Bild 4: Mit dem auf TWAMP basierenden Interaktivitäts-Test (Two Way Active Measurement Protocol) lässt sich nicht nur die Laufzeit (Latenz) zwischen zwei IP-Knoten präzise ermitteln, sondern auch andere Performance-KPIs wie Paketverluste.



der Internet Engineering Task Force spezifiziert wurde, um die Ende-zu-Ende-Performance zwischen zwei Knoten eines IP-Netzwerks zu messen. Was TWAMP in einer Messapplikation leistet, hängt stark von seiner Implementierung ab. Die Rohde&Schwarz-Lösung als Bestandteil der QualiPoc-Android-Mess-Software bildet aus mehreren Metriken einen aussagefähigen Gesamt-Score. Das Verfahren ist in dieser Form neu und wurde zur Standardisierung vorgeschlagen.

Bild 5: Interaktivitäts-Score für verschiedene Anwendungsklassen. Die S-förmige Kurve über der Latenzzeit durchläuft ein Band von Qualitätszonen, deren Lage und Breite von Anwendung zu Anwendung variiert.



in der Fabrik und in den AGVs (Automated Guided Vehicles) und AMRs (Automatic Mobile Robots). Sie messen regelmäßig die Verbindungsqualität inklusive der Latenzzeit an jeder Position und melden die Ergebnisse an die Überwachungszentrale, wo sie auf einem Echtzeit-Dashboard visualisiert werden. Eine tiefer gehende Offline-Datenanalyse bieten Tools wie SmartAnalytics. Die Software identifiziert Trends und Anomalien mit Methoden des maschinellen Lernens und weist rechtzeitig auf Fehlentwicklungen hin, sodass präventiv Verbesserungsmaßnahmen ergriffen werden können, bevor der Fehlerfall tatsächlich eintritt.

Phase 5: Überprüfung der vorgeschriebenen Verträglichkeit mit der Außenwelt

Mit eingeschwungener Phase 4 ist der Aufbauprozess abgeschlossen

und das Netz operativ. Als Letztes bleibt sicherzustellen, dass es die Lizenzbedingungen für private Netzwerke einhält, die insbesondere fordern, dass Lecksignale außerhalb des vorgesehenen Abdeckungsbereichs unter den festgelegten Limits bleiben. Schließlich sollen potenzielle Nachbarn, die das gleiche oder ein benachbartes Frequenzband nutzen, nicht gestört werden. Den Nachweis hat der Fabrikeigentümer zu führen, der sich zu diesem Zweck einer Walk-Test-Lösung wie dem R&S®Freerider 4 oder einem an einer Drohne montierten Netzwerk-Scanner bedient (Bild 3).

Fazit

Die Umwandlung heutiger Fabriken in intelligente Fabriken wird in einigen Branchen schon bald zu einer kommerziellen Notwendigkeit. Traditionell

organisierte Betriebe werden mit den Flexibilitäts- und Kostenvorteilen der neuen Fabrikgeneration nur noch schwer konkurrieren können. Einer ihrer Merkmale ist die vollständige Vernetzung der Betriebsmittel über latenzarmen (5G-)Funk. Errichtung und Betrieb dieser Netze sind mit der passenden messtechnischen Begleitung kein Hexenwerk. Netzbetreiber finden im Rohde&Schwarz-Portfolio alle dafür notwendigen Produkte.

Arnd Sibila

Lehrvideos und weitere Informationen bietet eine spezielle Smart-Factory-Webseite:

www.rohde-schwarz.com/mnt/smart-factory

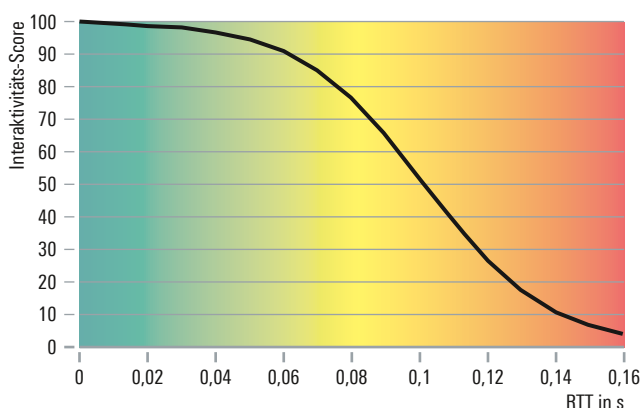
Das QualiPoc-Smartphone sendet über das UDP-Transportprotokoll einen Strom von applikationsspezifischen Datenpaketen, die ein realistisches Verkehrsprofil emulieren, an einen TWAMP-fähigen Server (TWAMP-Reflektor), der ihn umgehend zurückschickt (Bild 4).

Aus den reflektierten Daten ermittelt die QualiPoc-Software die Umlauf-Latenz, deren Variationsspanne (minimaler und maximaler Messwert) sowie die Paketfehlerrate und verknüpft diese drei KPIs zu einem Interaktivitäts-Score. Dieser repräsentiert ein skalierbares QoE-

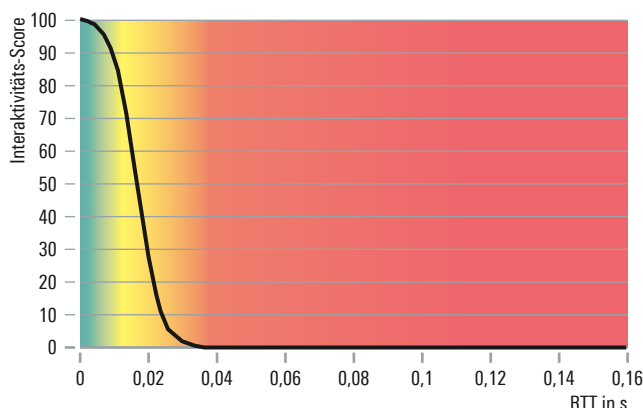
Modell, das auf verschiedene Anwendungsklassen zugeschnitten werden kann. Bild 5 zeigt den Score-Verlauf für beispielhafte Anwendungsfälle.

Die Software ist also nicht nur für Versorgungsmessungen in der Fläche interessant, sondern für jede Echtzeitanwendung über Funk. Passende Profile werden zusammen mit der einschlägigen Industrie erarbeitet.

Interaktivitäts-Score „VR-Shopping“



Interaktivitäts-Score „Roboter-Steuerung“



ASSISTENT FÜR KONFORMITÄTS-TESTS AN 5G-NR-BASISSTATIONEN

Mit der neuen Version der 5G-NR-Software zum Vektorsignalgenerator R&S®SMW200A sind mit wenigen Schritten alle erforderlichen Parameter für Konformitätstests an 5G-NR-Basisstationen eingerichtet.

Die von 3GPP spezifizierten Konformitätstests für 5G NR sind in TS38.141-1 für leitungsgeführte und in TS38.141-2 für OTA-Messungen festgelegt. Sie umfassen Tests für die Beurteilung der Sendereigenschaften und der Empfängerleistung unter Rausch- und Fading-Bedingungen. Bevor Basisstationen im Feld in Betrieb genommen werden dürfen, müssen sie die für die jeweilige Einsatzregion geltenden Konformitätstests bestehen.

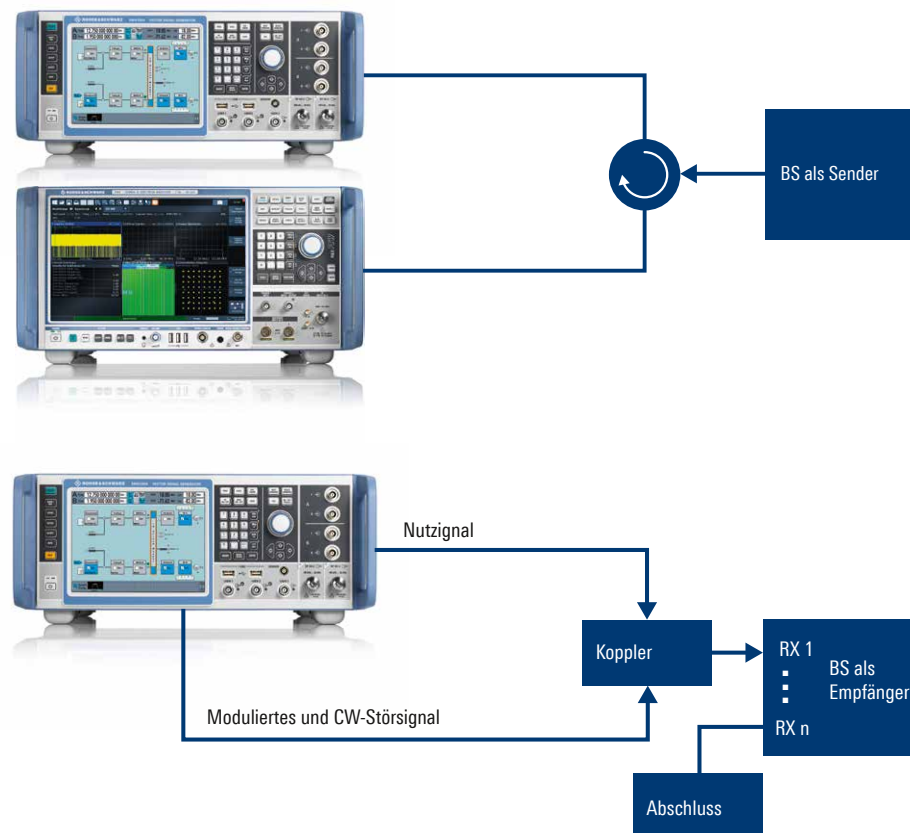
Der Signal- und Spektrumanalysator R&S®FSW und der Vektorsignalgenerator R&S®SMW200A sind führende Hardwarelösungen u. a. auch für Basisstationstests (Bild 1). Der Signalgenerator muss meist mehrere definierte Signale bereitstellen, teilweise mit überlagertem Rauschen oder Fading (Bild 2). Zudem werden Basisstationen typischerweise mit vielen unterschiedlichen

Einstellungen (z. B. Bandbreiten) getestet, wodurch sich die Gesamtzahl der durchzuführenden Einzeltests auf mehrere Hundert summieren kann. Die korrekte Einstellung der jeweiligen Testsignale kann sehr aufwendig sein und viel Zeit in Anspruch nehmen.

Schneller mit Assistenz

Mit der Option R&S®SMW-K144 steht für den R&S®SMW200A eine umfassende Lösung zum Generieren von 5G-NR-Signalen bereit. Komfortabler Bestandteil dieser Option ist der Test Case Wizard (Bild 3), der die Anwender bei der spezifikationskonformen Konfiguration der Signale unterstützt. Sowohl die Konformitätstests für die leitungsgeführten als auch für die drahtlosen Tests sind vollständig hinterlegt.

Bild 1: Typische Messaufbauten für Sender- (oben) und Empfängertests an Basisstationen.



Testfall gemäß 3GPP TS 38.141	Nutzsignal	AWGN	Modulierter Störer	CW-Störer	Fading	HARQ- und Timing-Anpassung in Echtzeit
6.7 (6.8 OTA) Transmitter intermodulation	—	—	■	—	—	—
7.7 Receiver intermodulation	■	■	■	■	—	—
8.2.1 Performance requirements for PUSCH	■	■	—	—	■	■

Bild 2: Erforderliche Signale für ausgewählte Testfälle nach TS 38.141.

Nach Aufruf des jeweiligen Testfalls lassen sich die zum Teil komplexen Testszenarien in nur wenigen Schritten konfigurieren. In einem übersichtlichen Menü stellt der Anwender lediglich noch spezifische Signalparameter wie Bandbreite oder User ID ein. Die grafische Darstellung der resultierenden Testsignale gibt anschließend eine gute Übersicht über die Signalkonfiguration.

Akkurate Signale bei minimalem Kalibrierungsaufwand

Entscheidend für genaue Empfängeremessungen ist ein exakter Ausgangspegel der Nutz- und

Störsignale. Der R&S®SMW200A bietet die einzigartige Möglichkeit, alle Signale intern zu generieren und im Zusammenspiel mit bis zu sechs verbundenen Generatoren R&S®SGT100A über bis zu acht HF-Ausgänge auszugeben. Dies gilt auch für Signale mit beaufschlagtem Fading, da der Generator mit internen Fading-Simulatoren ausgestattet werden kann. Im Vergleich mit einem konventionellen Setup mit einzelnen Signalgeneratoren und externen Fading-Simulatoren bietet diese vollintegrierte Lösung den Vorteil hochpräziser Ausgangssignale bei minimalem Kalibrierungsaufwand.

Matthias Weilhammer

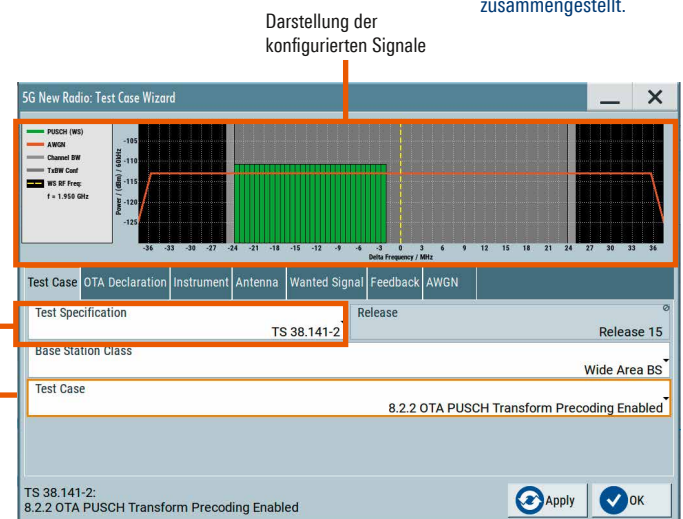
Bild 3: Details des Test Case Wizards. In wenigen Schritten werden komplexe Signale für die Tests zusammengestellt.

Testspezifikation

Test Specification
TS 38.141-1
TS 38.141-2

Testfälle

Test Case
6 Radiated Transmitter Characteristics
7 Radiated Receiver Characteristics
7.2 OTA Sensitivity
7.3 OTA Reference Sensitivity Level
7.4 OTA Dynamic Range
7.5.1 OTA Adjacent Channel Selectivity (ACS)
7.5.2A OTA In-band General Blocking
7.5.2B OTA In-band Narrowband Blocking
7.6 OTA Out-of-band Blocking
7.8 OTA Receiver Intermodulation
7.9 OTA In-channel Selectivity
8 Radiated Performance Characteristics
8.2.1 OTA PUSCH Transform Precoding Disabled
8.2.2 OTA PUSCH Transform Precoding Enabled
8.2.3 OTA UCI multiplexed on PUSCH



Parameter der OTA-Deklaration

Test Case	OTA Declaration	Instrument	Antenna	Wanted Signal	Feedback	AWGN
Base Station Type	2-0	Declared Direction	OTA REFSENS Reference Direction			
Minimum EIS	-101.0 dBm	EIS 50M	-96.0 dBm			
BeW(φ REFSENS)	300.0 deg	BeW(φ REFSENS)	300.0 deg			

MESSTECHNIK FÜR MEHRKANALIGE RADAR- UND GNSS-EMPFÄNGER

Mehrkanalige Empfänger werden sowohl in militärischen Radar-Warnsystemen als auch für den sicherheitskritischen GNSS-Empfang eingesetzt. Ihr Test erfordert spezielle Lösungen zur Signalgenerierung und -analyse – wie die hier vorgestellten.

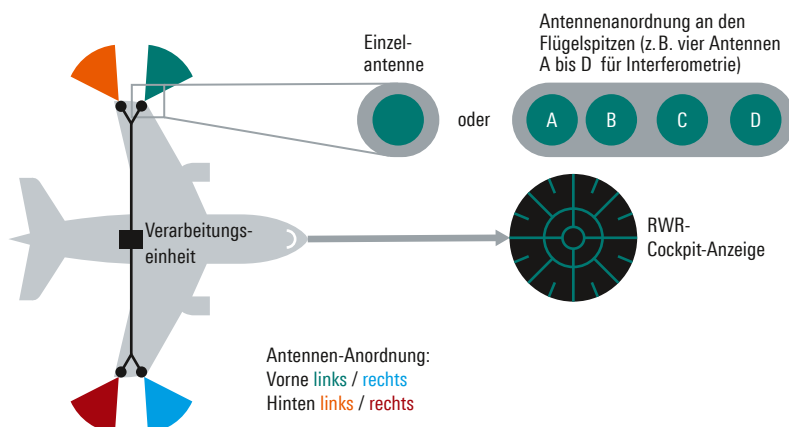
AUFWANDS-REDUKTION

Radar-Warnempfänger und GNSS-Anti-Jam-Systeme nutzen oft mehrere phasenkohärente Antennen zur Bestimmung der Signaleinfallsrichtung. Ein neues Testsystem bedient erstmalig beide Anwendungen.

Mehrkanalempfänger können Signale mehrerer verteilter Empfangsantennen bzw. eines Antennen-Arrays gleichzeitig verarbeiten. Das lässt sich nutzen, um mit Signalanalysemethoden Rückschlüsse auf die Richtung der einfallenden Signale zu ziehen. Dieses Wissen ist in mehreren Szenarien hilfreich. So können beim Empfang von Satelliten-Navigationssignalen (GNSS) Jamming- oder Spoofing-Signale, die vom Boden oder aus der Luft ausgehen, von echten Satellitensignalen unterschieden und unterdrückt werden. Radar-Warnanlagen wiederum haben in der Regel mehrere Empfangszüge, um neben dem Signalfingerabdruck (Freund-Feind-Erkennung) auch die Richtung zu den Emittlern bestimmen zu können. Zur Erhöhung der Winkelauflösung sind die Empfängerkanäle oft phasenkohärent verbunden.

Grundsätzlich werden die angeschlossenen Antennen streng geometrisch angeordnet, entweder plan auf einer Ebene oder verteilt auf einer Plattform (z. B. einem Flugzeug), um eine 360°-Abdeckung der Empfangsrichtungen zu erreichen.

Bild 1: Flugzeug mit mehrkanaliger Radar-Warnanlage aus mehreren Empfangszügen, zentraler Verarbeitungseinheit und Display.



Mehrkanalige Radar-Warnempfänger (RWR)

Radar-Warnempfänger werden u. a. in Flugzeugen zur Detektion, Identifizierung, Klassifizierung und Positionsfindung eintreffender Radarsignale bzw. ihrer Quellen eingesetzt. Die für die Richtungsbestimmung erforderliche Antennenkonfiguration (Bild 1) hängt von den auszuwertenden Signaleigenschaften ab:

- Zeitliche Differenz (Time Difference Of Arrival, TDOA)
- Amplitudenunterschiede
- Phasenunterschiede (Interferometrie)

Das Ergebnis der Analyse wird dem Piloten akustisch und optisch signalisiert und bildet die Grundlage für automatisierte Selbstschutzmaßnahmen. Da Radare je nach Aufgabe HF-Frequenzen von einigen 100 MHz bis zu 40 GHz nutzen, müssen Radarwarner – und damit auch Testsysteme dafür – diese Bandbreite abdecken.

Mehrkanalige GNSS-Empfänger

Ähnlich wie RWR arbeiten mehrkanalige GNSS-Empfänger. Zur Unterdrückung ungewollter Signale nutzen sie eine CRPA-Antennenarchitektur (Controlled Radiation Pattern Antenna). Durch geeignete Gewichtung der Signale der Einzelantennen lässt sich die Gesamtempfangscharakteristik des Antennen-Arrays verändern (Bild 2). So werden Störsignale entweder gezielt ausgeblendet (Nulling) oder der Empfang der gewünschten GNSS-Signale in deren Einfallrichtungen verstärkt (Beam-forming). Eine Kombination beider Methoden ist ebenfalls machbar. Die Antennen-Arrays bestehen typisch aus vier bis sieben Antennenelementen. Je mehr Elemente, umso mehr Störsignale können gleichzeitig unterdrückt werden.

Wurde die Technologie bisher vor allem für militärische Anwendungen eingesetzt, so ist zu erwarten, dass sie künftig einen wichtigen Beitrag zur robusten Navigation beim autonomen Fahren und Fliegen liefern wird.

Gemeinsame Anforderungen an ein Testsystem

Obwohl ganz unterschiedliche Applikationen, stellen mehrkanalige Radar- und GNSS-Systeme teilweise identische Anforderungen an das Testsystem:

- ▶ Die HF-Ausgänge des Testsystems werden mit den Antenneneingängen des Empfängers verbunden. Da für jeden Eingang individuelle Signale bereitzustellen sind, muss das Testsystem für jede simulierte Antenne mit einer unabhängigen Signalquelle ausgestattet sein.
- ▶ Um die relativen Amplituden und Phasen zwischen den Kanälen exakt einzuhalten, muss das System an der HF-Schnittstelle kalibriert sein.
- ▶ Die Phasenbeziehungen zwischen den simulierten Signalen müssen für den Simulationszeitraum relativ zueinander stabil bleiben (Phasenkohärenz).

- ▶ Testsysteme für Mehrkanalanwendungen werden oft in einer Hardware-in-the-Loop-(HiL-)Umgebung betrieben. Wesentliche Anforderungen dabei sind hohe Update-Raten und geringe Latenzzeiten, da ein Rechner die Signaldaten mit hoher Geschwindigkeit in das Testsystem streamt.

Applikationsspezifische Anforderungen

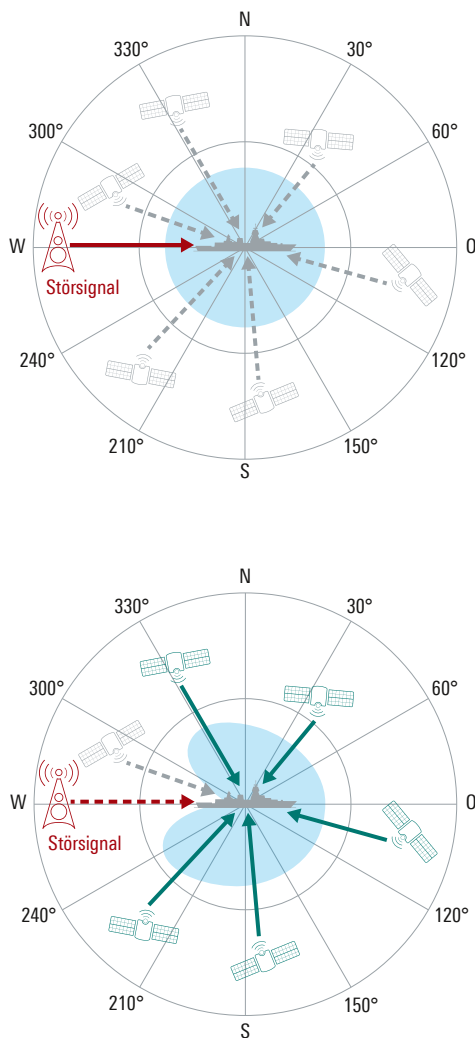
Darüber hinaus gibt es applikationsspezifische Testanforderungen:

Um einen Radarwarnempfänger mit realitätsnahen Signalen zu versorgen, ist ein komplexes HF-Umfeld auf allen Empfangskanälen nachzubilden. Eine Vielzahl unterschiedlicher Radar- und Störsignale muss darin enthalten sein. Außerdem gilt es, lange Simulationszeiten, bewegte Sender und Empfänger sowie elektronisch änderbare Antennendiagramme und Antennenabtastungen (antenna scans) zu unterstützen. Zum Test von mehrkanaligen interferometrischen Empfängern sind die Phasenlagen der Kanäle für jeden Puls in Abhängigkeit von Signalfrequenz, Antennenanordnung und Position von Sendern und Empfängern im dreidimensionalen Raum zu berechnen und einzustellen.

Für Tests an GNSS-CRPA-Empfängern hat das Testsystem die Funktion eines mehrkanaligen GNSS-Simulators zu übernehmen und alle Aspekte eines Satellitennavigationssystems zu berücksichtigen. So müssen die Signale aller gängigen Satellitensysteme in allen GNSS-Frequenzbändern erzeugt werden, unter Berücksichtigung von korrekten Satellitenorbits, der Signalausbreitungseigenschaften sowie einer realistischen Modellierung der sich dynamisch ändernden Empfangsumgebung. Des Weiteren ist die Konfiguration des Antennen-Arrays hinsichtlich Geometrie und Empfangseigenschaften der Einzelantennen einzubeziehen. Neben den GNSS-Signalen sind gleichzeitig Störsignale zu generieren, um die Störunterdrückungsfunktionen des DUTs prüfen zu können.

Bild 2: Die GNSS-Empfangsantenne im oberen Beispiel hat nur ein Element, ihre Charakteristik lässt sich also nicht modifizieren. Ein Störsignal ausreichender Stärke kann dazu führen, dass der Empfänger die Signale nicht mehr verarbeitet und satellitenbasiertes Navigieren nicht mehr möglich ist.

Unten: Im Gegensatz zur Einzelantenne lässt sich die Charakteristik von Antennen-Arrays durch Kombination und Gewichtung der GNSS-Signale anpassen. Das Störsignal wird in der Einfallsrichtung unterdrückt und die GNSS-Signale können empfangen werden. Nachteil: GNSS-Signale aus der Richtung des Störsignals werden ebenfalls unterdrückt.



Zwei Applikationen, ein System

Radar-Warnempfänger und CRPA-Systeme werden im A&D-Umfeld oft auf schwimmenden oder fliegenden Plattformen nebeneinander betrieben. Zum Testen beider Systeme waren bisher zwei separate Testsysteme erforderlich. Die hier vorgestellte Lösung deckt die Testanforderungen beider Applikationen ab.

Alle nötigen Signale inklusive der für GNSS werden intern generiert. Das übernimmt der modulare, softwaredefinierte Vektorsignalgenerator R&S®SMW200A. Zum Testen mehrkanaliger Empfänger betreibt man mehrere Generatoren

gemeinsam. Jeweils zweikanalig ausgerüstet, genügen drei Geräte zum Aufbau eines sechskanaligen Systems (Bild 3). Dank einer RF-Port-Alignment-Software kann das komplette System an der HF-Schnittstelle kalibriert werden, sodass die Eigenschaften des Testsystems nicht die simulierten Signalunterschiede zwischen den HF-Anschlüssen verfälschen.

Ein analoger High-End-HF-Signalgenerator R&S®SMA100B liefert das gemeinsame LO-Signal für die Vektorsignalgeneratoren mit ausreichendem Pegel und äußerst niedrigem Phasenrauschen.

Das System lässt sich sogar in eine HiL-Umgebung einbetten, die in Echtzeit Signaldaten hinein streamt, sei es das Bewegungsprofil (Position, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Fahrzeuglageinformationen) des zu simulierenden GNSS-Empfängers oder ein Radar-Szenario in Form von Pulse Descriptor Words (PDW).

Fazit

Verglichen mit zwei separaten Testsystemen – nicht selten von verschiedenen Herstellern – ist die Komplettlösung kompakter, kostengünstiger und in vielerlei Hinsicht von Vorteil, sei es durch kürzere Testvorbereitungszeiten, geringeren Aufwand für Einarbeitung und Inbetriebnahme oder einfachere Bedienung. Support, Wartung und Service kommen aus einer Hand und zusätzliche HF-Kanäle oder Simulationsfeatures können später einfach durch Zukauf von Hardwarekomponenten oder Softwarelizenzen nachgerüstet werden.

Dr. Markus Irsigler, Robert Vielhuber

Bild 3: 6-kanaliges Radar- / GNSS-Testsystem aus drei Vektorsignalgeneratoren R&S®SMW200A und einem Analogsignalgenerator R&S®SMA100B für das LO-Signal.



PHASENKOHÄRENTE MEHRKANAL-PULSANALYSE AN RADARSYSTEMEN

Die Oszilloskope R&S®RTO und R&S®RTP kombinieren phasenkohärente mehrkanalige HF-Signalanalysen mit einer Vielzahl von Funktionen für Signalintegritätsmessungen und den Test digitaler Schnittstellen. Sie eignen sich daher bestens für die Untersuchung von Radarmodulen.

Mehrkanalige Analyse eines Digital Radio Frequency Memory

Oszilloskope verfügen über mehrere Messkanäle und können deren Signale zueinander in Beziehung setzen. Damit sind sie prädestiniert für die Mehrkanalanalyse an Digital Radio Frequency Memories (DRFM), die in Jammern für wehrtechnische Plattformen eingesetzt werden. Moderne Jammer versuchen nicht nur,

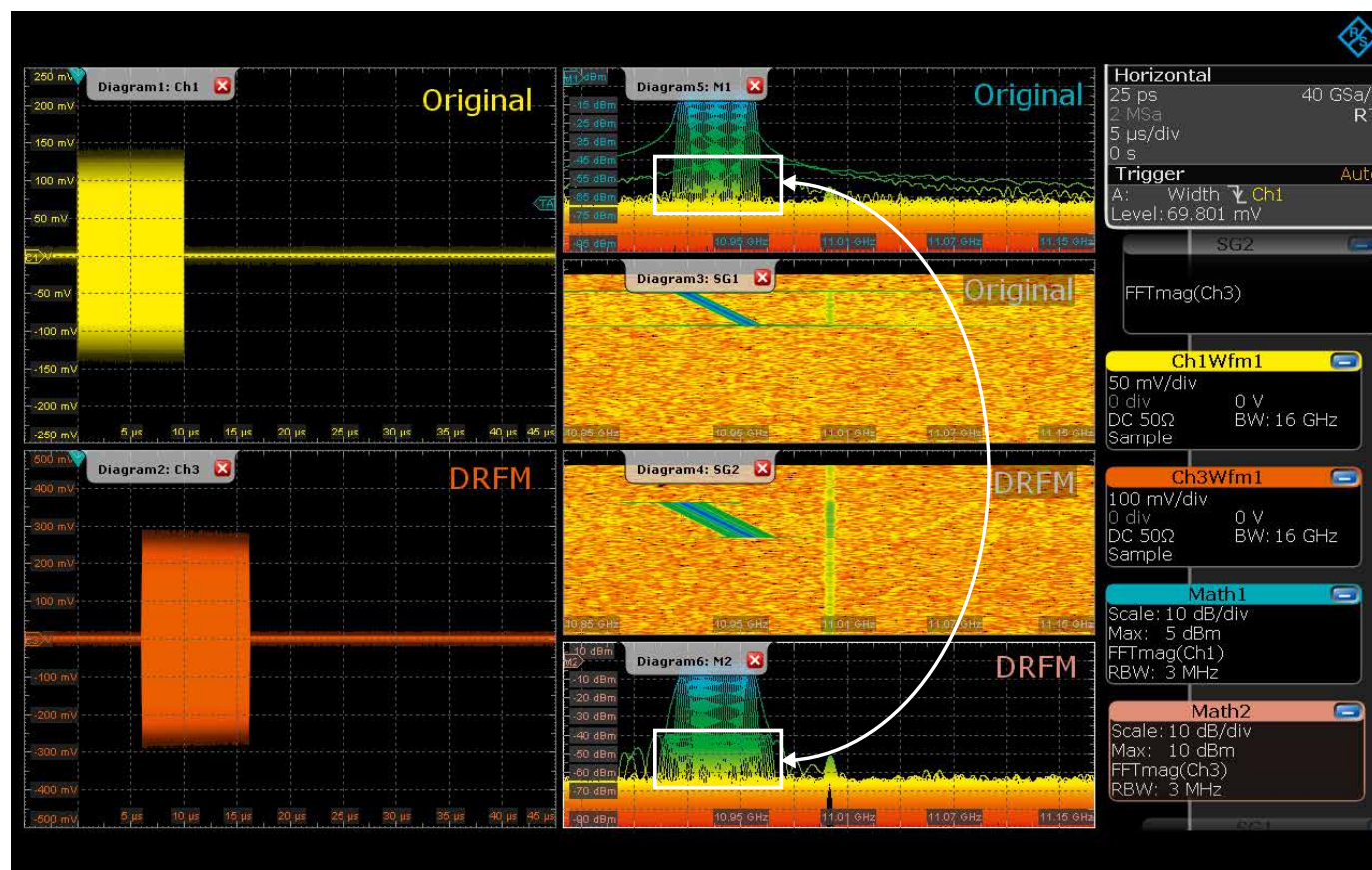
gegnerische Radarsysteme zu stören und zu überlasten, sondern erzeugen dort auch falsche Ziele. Kernelement in Jammern ist ein DRFM, das ein digitales Abbild der gegnerischen Radarsignale speichert und mit veränderten Parametern neu aussendet.

Zum Charakterisieren solcher Systeme werden Empfängereingang und Senderausgang des DRFM-Moduls simultan betrachtet. Ein wichtiger

Parameter ist der zeitliche Versatz zwischen einem eingehenden Radarsignal und dem Zeitpunkt, an dem eine Kopie am Senderausgang bereitsteht.

Oszilloskope können auch in höheren Frequenzlagen Radarsignale direkt erfassen. Das R&S®RTP beispielsweise hat eine Bandbreite von 16 GHz, womit es fast den kompletten Bereich des Ku-Bands und das militärisch wichtige X-Band vollständig abdeckt.

Bild 1: Simuliertes DRFM-Szenario. Der DRFM-Puls (orange) ist zum Originalpuls (gelb) um $6\ \mu\text{s}$ verzögert und hat nahezu eine doppelt so große Amplitude. Im Spektrogramm ist zu sehen, dass Frequenz und Chirp gut übereinstimmen, das DRFM-Signal aber einige Störungen aufweist (weiße Pfeile).



Damit ist es direkt an die Empfangsstufe anschließbar und erfordert keine heruntergemischten Signale.

Bereits die Standardwerkzeuge des R&S®RTP erlauben umfangreiche Analysen im Zeit- und Frequenzbereich. Die simultane Erfassung des Ein- und Ausgangssignals eines simulierten DRFM mit Analyse des Frequenzsprings zeigt Bild 1. Im Spektrogramm ist zu sehen, dass Original und Kopie im DRFM zwar gut übereinstimmen, im manipulierten Chirp sind jedoch leichte Störungen vorhanden. Die zeitliche Differenz von 6 μ s (links im Bild gut zu sehen) ist in diesem Fall beabsichtigt, da hier explizit ein Range-Gate-Pull-Off-Szenario simuliert wird, bei dem der Jammer die ausgesendete Kopie verzögert aussendet, um eine falsche Entfernung vorzutäuschen.

In den Fällen, in denen die Pulse jedes Pulse Repetition Interval (PRI) nur um einen kleinen zeitlichen Versatz verschoben werden, ist es sinnvoll zu prüfen, ob alle ausgesendeten Pulse innerhalb der geforderten Parameter liegen. Das R&S®RTP hat dafür einen geeigneten Aufnahmemodus. Im normalen Modus kann das Gerät während der Analyse der erfassten Daten durch den Prozessor keine Pulse detektieren. Im Fast-Segmentation-Modus (auch Segmented Capture genannt) dagegen wird der Speicher des Oszilloskops zuerst mit den erfassten Daten gefüllt und erst dann deren Analyse gestartet. Dies reduziert die Blindzeit des Oszilloskops im Vergleich zum normalen Aufnahmemodus auf weniger als 350 ns.

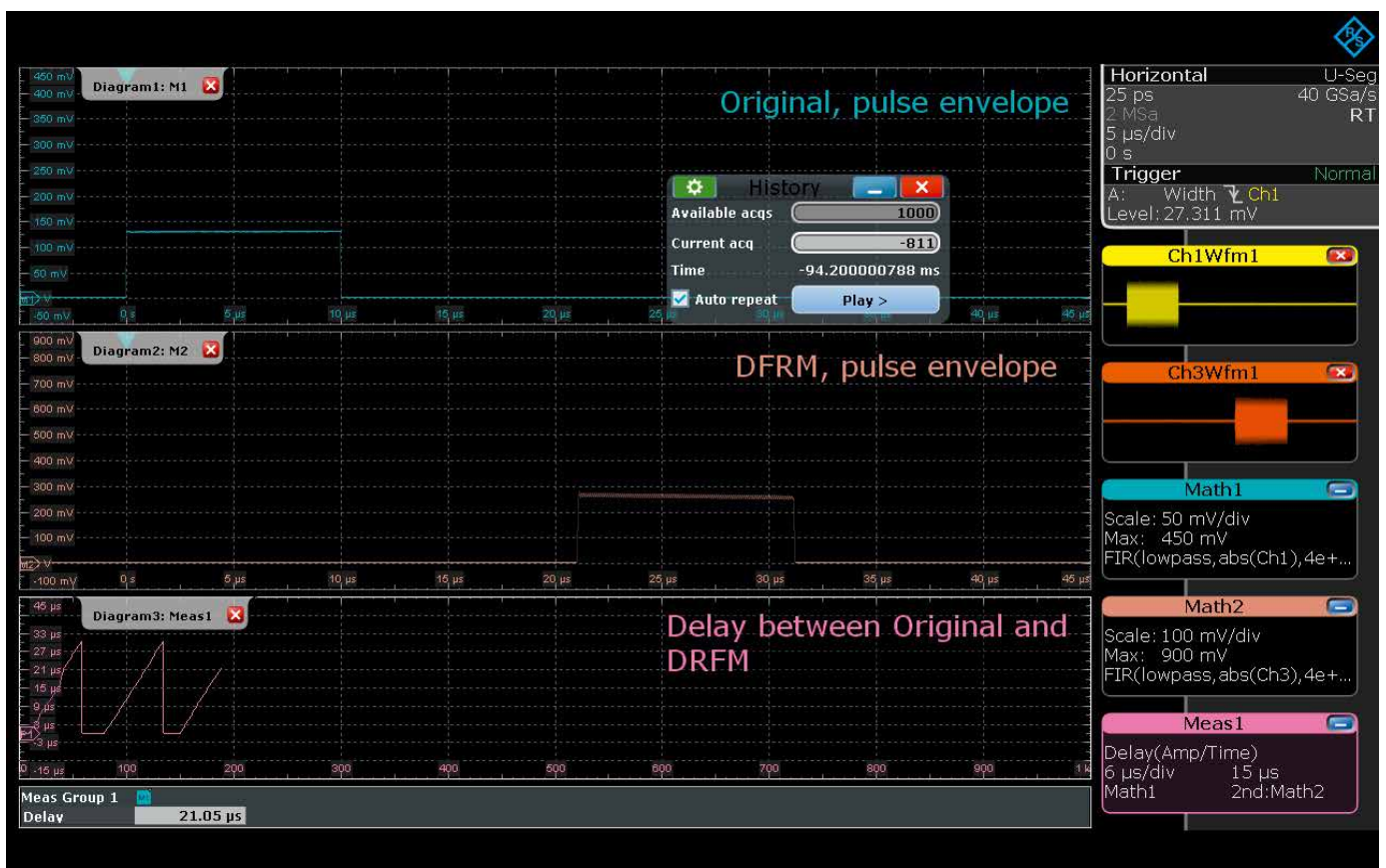
Sind alle erfassten Daten im Speicher des Oszilloskops abgelegt, können

Messungen über deren zeitlichen Verlauf dargestellt werden. In Bild 2 wurde zuerst per Mathematikfunktion die Einhüllende der Pulse errechnet, anschließend mit der Delay-Messfunktion der zeitliche Abstand zwischen den Pulsen bestimmt.

Analyse eines Radar-Warnempfängers

Die Triggereinheit des Oszilloskops erlaubt es, auf ein komplett anderes als das zu untersuchende Signal zu triggern. So kann ein serieller Bus, der die Ansteuerung eines TR-Moduls übernimmt, decodiert und als Triggerquelle herangezogen werden. Eine andere nützliche Triggeranwendung ist die Isolation eines bestimmten Radarsignals in einem Szenario, in dem mehrere Radare senden. Ein solches mit der Software R&S®Pulse Sequencer generiertes

Bild 2: Simuliertes DRFM-Szenario. Per Mathematikfunktion wird die Einhüllende von ursprünglichem und verzögertem Puls gebildet. Die Delay-Messfunktion ermittelt nun über alle Erfassungen (hier 1000) den Zeitversatz und stellt ihn über dem Messzeitraum dar. Die Sägezahnkurve zeigt ein sich entfernendes Objekt an.



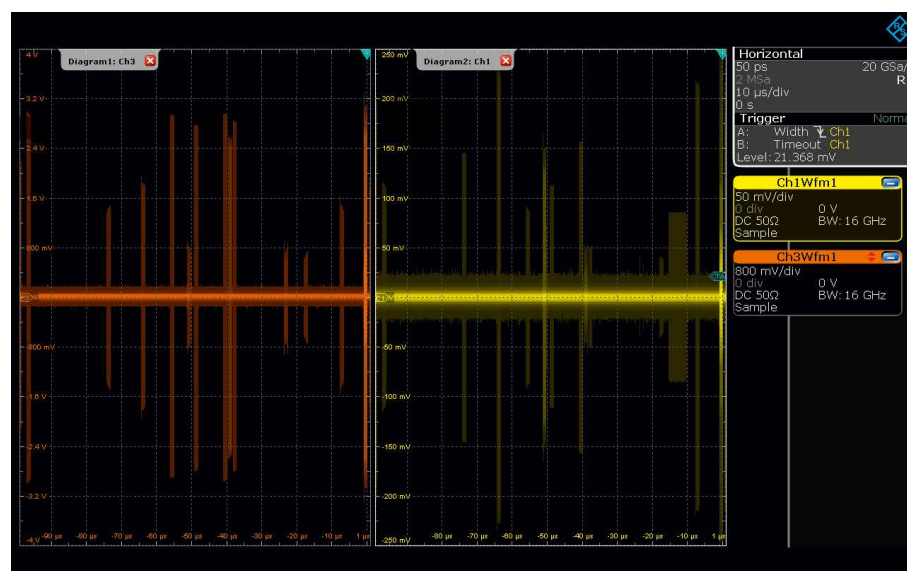
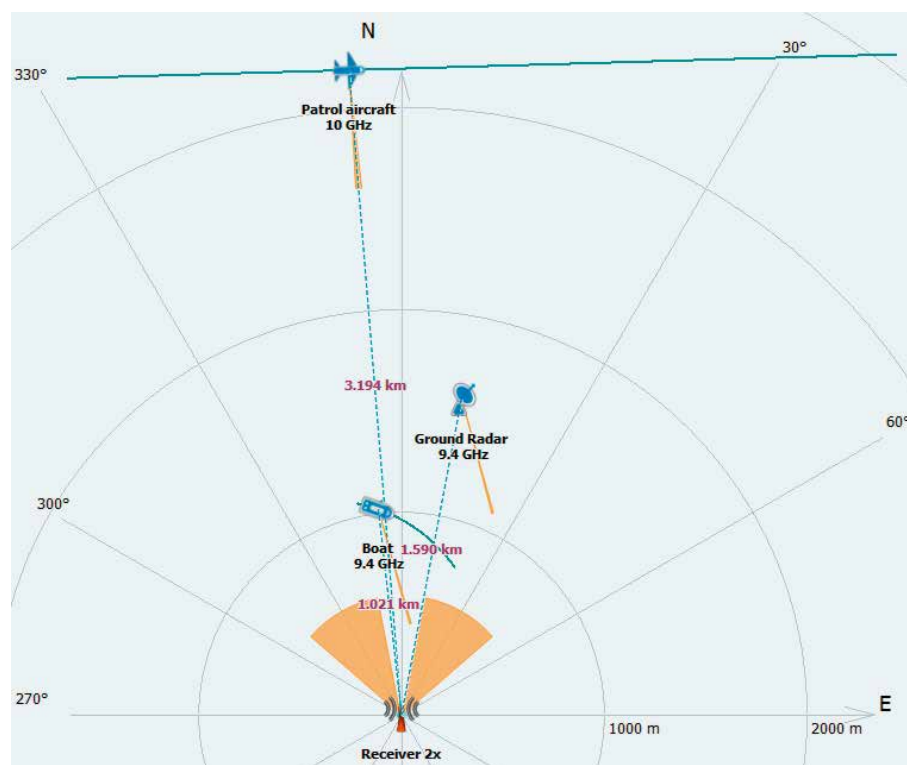
Szenario zeigen die Bilder 3 und 4. Ein Flugzeugradar hat sich auf ein Ziel fokussiert (Track-Modus) und bewegt

sich lateral zu diesem. Ein gedachtes Patrouillenboot und ein stationäres Luftraumüberwachungsradar

Bild 3: Beispiel für Messungen an einem Radar-Warnempfänger. Das Radarszenario wurde mit der Software R&S®Pulse Sequencer erstellt.

Typ	Pulsdauer (μ s)	PRI (μ s)	Modulation
Patrouillenflugzeug	1	100	Keine
Stationäres Radar	5	20	Barker 13
Patrouillenboot	5	16	Up-Chirp

Bild 4: Von der Software R&S®Pulse Sequencer simuliertes Szenario in der programmeigenen Darstellung. Der Radar-Warnempfänger bzw. das Oszilloskop sieht bei diesem Szenario eine Vielzahl an Pulsformen (Bild unten).



steuern weitere Radar-Emitter bei. Ein zweikanaliger Signalgenerator R&S®SMW200A gibt dieses Signalgemisch so aus, als wenn es von zwei Empfangszügen eines mehrkanaligen Radar-Warnempfängers (RWR) käme. Im Beispiel geht es darum, das Flugzeugradar isoliert zu analysieren.

Mit der Triggereinheit des Oszilloskops lassen sich die Pulseigenschaften der Signale getrennt betrachten. Die erforderlichen Triggereinstellungen sind in einer Applikationsschrift* detailliert beschrieben. An dieser Stelle sei nur erwähnt, dass im A-B-R-Triggermodus die Pulse nach zeitlichen Kriterien ausgewählt werden. Der A-B-R-Trigger löst nur die Erfassung von Pulsen mit 1 μ s Dauer aus (Bild 5).

Eine weitere Analysemöglichkeit ist der bereits erwähnte Fast-Segmentation-Modus. Sendet das Flugzeug mit einem PRI von 100 μ s, so müsste für den Simulationszeitraum von 1 s ein Speicher von 40 Gsample/s $\times$ 1 s $\times$ 1 Byte/Sample = 40 GByte vorgehalten werden. Mit dem A-B-R-Trigger dagegen wird die Aufnahmezeit pro Erfassung auf 1,2 μ s reduziert (48 ksample) und im vorhandenen segmentierten 2-Gsample-Speicher ein Zeitraum von 4,16 s unterbrechungsfrei aufgezeichnet.

Dedizierte Lösung für fortgeschrittene Mehrkanal-Pulsanalyse

Radarentwickler müssen oft spezifische Parameter wie Pulsdauer, Droop, PRI usw. messen. Dafür empfiehlt sich die Verwendung einer spezialisierten Software, die diese Parameter automatisch bestimmen kann. Die zur Software Vector Signal Explorer R&S®VSE erhältliche Pulsanalyseoption R&S®VSE-K6A unterstützt nun auch die phasenkohärente Analyse an mehreren Kanälen. Dabei ist die Triggereinheit des Oszilloskops vollständig nutzbar und die stabile und präzise Detektion der zu analysierenden Pulse sichergestellt.

Neben dem Vergleich der Ein- und Ausgangsseite eines DRFM-Moduls können mit der Software R&S®VSE auch Untersuchungen an RWR vorgenommen werden. Basierend auf den A-B-R-Triggereinstellungen wird das Flugzeugradar im RWR in der R&S®VSE detailliert vermessen (Bild 6). Mit den Analyseroutinen dieser Software lässt sich die Phasendifferenz der beiden Empfänger bestimmen, entweder über Marker oder aus tabellarischen Werten. Die Ergebnisse können z. B. zur Untersuchung der Langzeitstabilität des RWR verwendet werden, indem der Trend oder die Verteilung der Phase beobachtet wird.

Ezer Bennour, Dr. Andreas Ritter

* Applikationsschrift „Triggern auf Radar-HF-Pulse mit einem Oszilloskop“,
Suchbegriff: PD 3609.2000.92

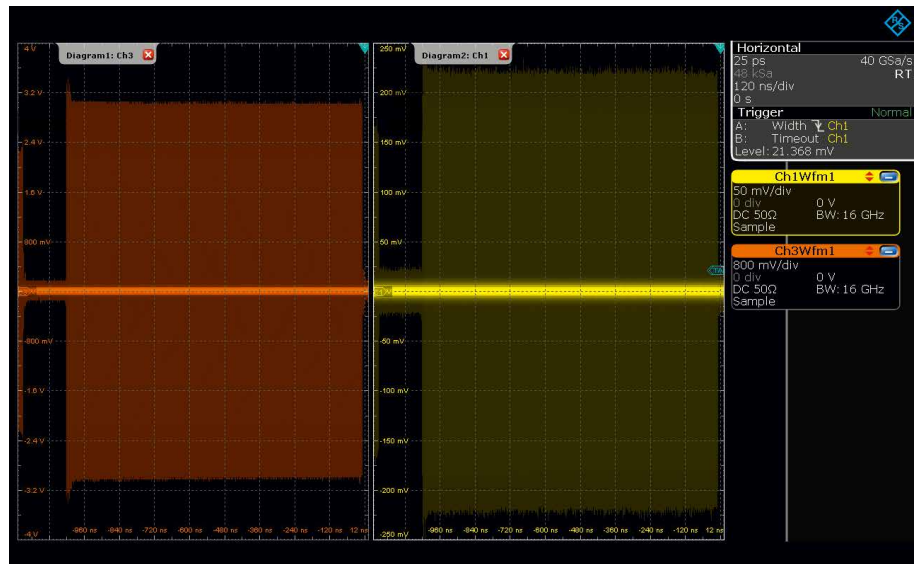
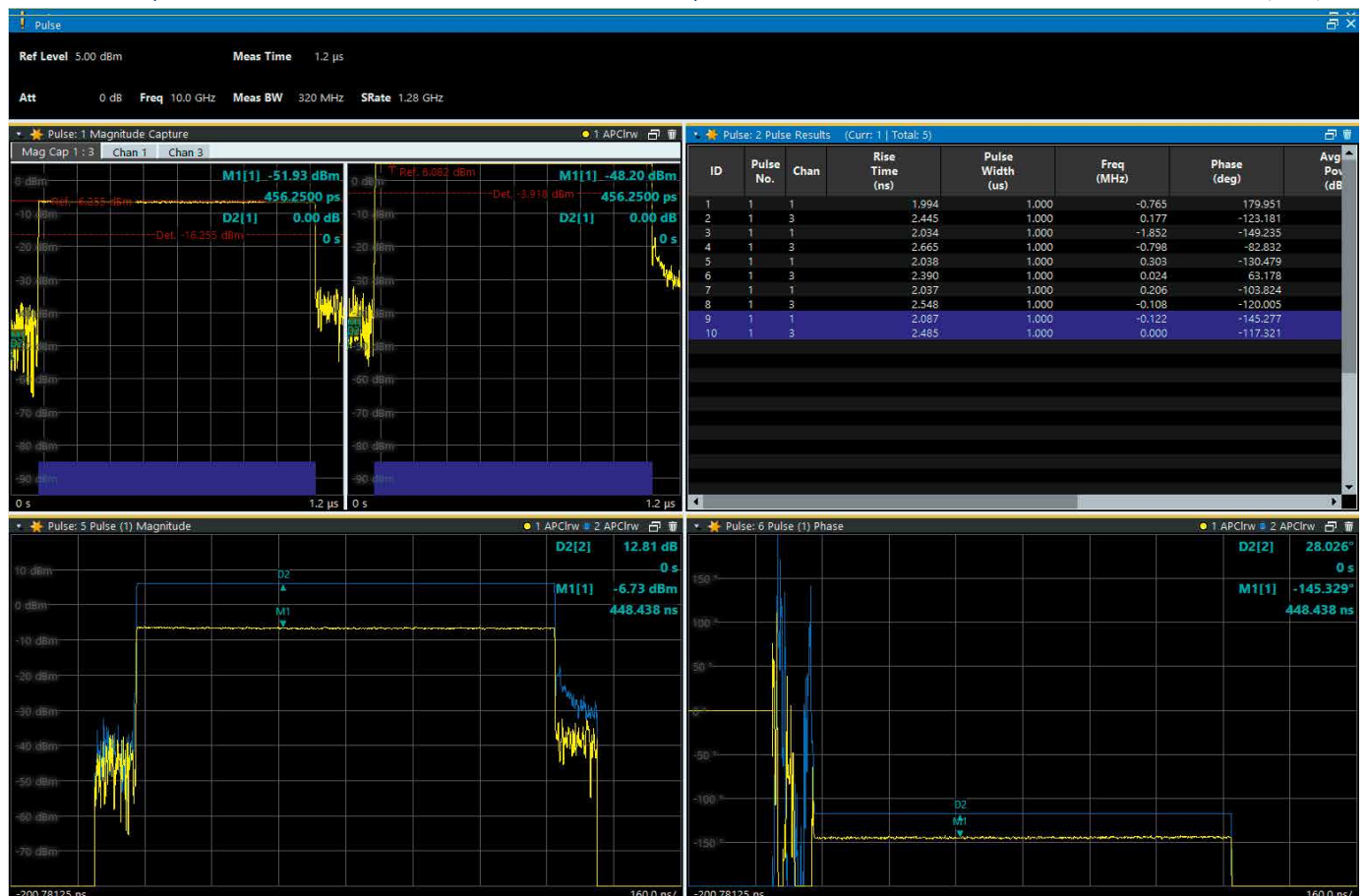


Bild 5: Mittels A-B-R-Trigger auf den hier dem „gelben Kanal“ zugewiesenen Empfangszug des Radar-Warnempfängers wird das Radar des Patrouillenflugzeugs aus dem Szenario isoliert.

Bild 6: Analyse des beispielhaften Flugzeugradarsignals an den simulierten Ausgängen eines zweikanaligen Warnempfängers mit der Software R&S®VSE. Die Software ermittelt die Radarparameter automatisch und stellt sie tabellarisch dar. Phasen- und Amplitudenunterschiede können mittels Marker detailliert vermessen werden (unten).





LEBEN UND LEBEN LASSEN

Die Menge der Funkprodukte übersteigt schon längst um ein Mehrfaches die Zahl der Erdbewohner. Und wächst rasant weiter. Damit wird ihre störungsfreie Koexistenz zu einer Herausforderung. Doch mit moderner Messtechnik lässt sich das Problem beherrschen.

Ein Produkt darf seine Umgebung weder elektromagnetisch stören noch durch äußere elektromagnetische Einflüsse in seiner Funktion beeinträchtigt werden. Internationale EMV-Normen stellen die Einhaltung dieser Forderungen sicher.

Welche Testvorschriften auf ein bestimmtes Produkt anzuwenden sind, ist produktgruppen- und branchenabhängig. So gibt es unterschiedliche Teststandards für medizinische Geräte, Consumer-Artikel, militärische Ausrüstung, die Automobilindustrie, die Luft- und Raumfahrt und viele andere Kategorien. Das CE-Kennzeichen am Produkt signalisiert in Europa die Konformität mit den einschlägigen Normen. Eine entsprechende FCC-Kennzeichnung in den USA ist optional, allerdings muss auch hier die Einhaltung produktbegleitend dokumentiert sein.

Für alle Produkte mit integriertem (Rund-)Funkteil gilt in Europa ergänzend die Funkrichtlinie Radio Equipment Directive (RED). Sie erweitert die EMV-Regeln um zusätzliche Anforderungen an sende- und empfangsfähige Geräte. RED soll insbesondere erreichen, dass sich Funkprodukte nicht störend in die Quere kommen (Koexistenz). Die Umsetzung der allgemein formulierten RED-Vorgaben in konkrete Testvorschriften obliegt Standardisierungsgremien wie ETSI, die sie in harmonisierte Normen einfließen lassen.

Eine Frage der Koexistenz

EMV-Tests sind eine seit Jahrzehnten geübte Praxis auf der Basis von Normen und Standards, die nur behutsam weiterentwickelt werden. Die Messgrößen, mit denen man umgeht, sind elektrische Basisgrößen wie

(Stör-)Feldstärken, Ströme und Spannungen. Die Signalform, in der diese Größen auftreten, spielt keine große Rolle. Deshalb werden Störbeeinflussungsmessungen mit sehr einfachen Signalen durchgeführt (CW, AM, Puls).

Allerdings hat sich die Produktlandschaft in den letzten Jahren stark verändert. Immer mehr Produkte enthalten Funkmodule, die sie mit dem Internet verbinden. Derzeit soll es weltweit bereits über 20 Milliarden internetfähige Einheiten geben, mit rasch steigender Tendenz. Für diese gelten jeweils die produktgruppenspezifischen EMV-Standards. Für ein störungsfreies Funktionieren in elektromagnetisch rauer Umgebung reichen die klassischen EMV-Maßnahmen und -Tests aber nicht mehr aus. Den zusätzlichen durch RED und vergleichbare Vorschriften initiierten Koexistenztests kommt deshalb eine immer größere Bedeutung zu.

Diese verlangen den Nachweis der Verträglichkeit eines funkenden Geräts mit anderen Drahtlosdiensten im vorgesehenen Einsatzbereich. Letzteres ist eine nicht zu vernachlässigende Konkretisierung, die erheblichen Einfluss auf die Testausgestaltung haben kann. So reicht es unter Umständen nicht aus, pro forma einem Standard zu genügen, wenn dieser die Einsatzbedingungen des konkreten Produkts nicht angemessen berücksichtigt. Der Hersteller muss sich dann – etwa, wenn das Produkt im Medizinbereich eingesetzt wird – mit der zuständigen Behörde abstimmen, um einer möglichen Haftung aus Produktmängeln vorzubeugen oder überhaupt erst eine Marktzulassung zu erhalten.

Die Sache mit dem Blocking-Test

Als ein geeignetes Mittel zur Prüfung der Koexistenzfähigkeit wurde der Blocking-Test identifiziert und in die mit RED assoziierten europäischen Normen übernommen. Dazu baut man zwischen dem Messobjekt und einem Funkkommunikationstester eine reguläre Verbindung mit vorgegebenen Parametern (Frequenz, Pegel) auf. Diese wird mit einem definierten Störsignal überlagert, das ein Signalgenerator erzeugt. Ein robuster Empfänger kann auch bei Anwesenheit stärkerer Störsignale noch bestimmungsgemäß arbeiten. Andernfalls muss nachgebessert werden.

Es zeigt sich allerdings, dass die nach Standard vorgenommenen Tests keine Garantie dafür sind, dass sich ein Produkt im regulären Einsatz tatsächlich als so störfest erweist, wie es das Testergebnis suggeriert. Der Grund ist einfach der, dass die Standards mit der Marktentwicklung und den stürmischen Fortschritten in der Funktechnologie nicht Schritt halten und deshalb nur eine Basisabsicherung bieten. Ein bestandener, ordentlich dokumentierter Test

mag im Fall eines folgenreichen Produktversagens juristisch wertvoll sein, den Markt, der das Produkt aufnehmen soll, wird er aber nicht beeindrucken. Am Ende zählt nur die tatsächliche Produktleistung.

Ein Beispiel für eine in dieser Hinsicht verbesserungsfähige harmonisierte europäische Norm ist ETSI EN 300 328 V2.2.2 für Produkte, die im 2,4-GHz-ISM-Band arbeiten. In diesem extrem dicht belegten Band, in dem sich unter anderem WLAN, Bluetooth und die Haushalts-Mikrowelle drängeln, stellt sich die Koexistenzfrage besonders nachdrücklich. Der normgerechte Blocking-Test ist jedoch weit davon entfernt, die reale Situation abzubilden und recht mühelos zu bestehen. Das idealisierte Störszenario besteht aus einem CW-Störer mit konstantem Pegel und einem auf die doppelte Nutzkanalbandbreite begrenzten Rauschhintergrund. Nun sind aber CW-Störer in der Realität nicht anzutreffen und die tatsächlich vorgefundenen breitbandig modulierten Signale können die gewünschte Empfangsqualität schon bei niedrigeren Pegeln verschlechtern. Ein völliges Unterbinden der Kommunikation („Blocking“) durch Störer ist indes unwahrscheinlich. Vielmehr verringert sich der Datendurchsatz, weil einzelne Datenpakete verloren gehen und neu angefordert werden müssen. Ein Produkt kann also trotz bestandener Koexistenzprüfung eine mangelhafte Funkstör-Robustheit aufweisen (Bild 2).

	LTE800	LTE2600	WLAN	Bluetooth
LTE800				
LTE2600				
WLAN				
Bluetooth				

Bild 1: Koexistenz-Szenario mit typischen Funkdiensten. Kritisch sind Funkdienst-Paarungen im selben oder benachbarten Frequenzband (rot, orange). Hier setzt der Koexistenz-Test an.

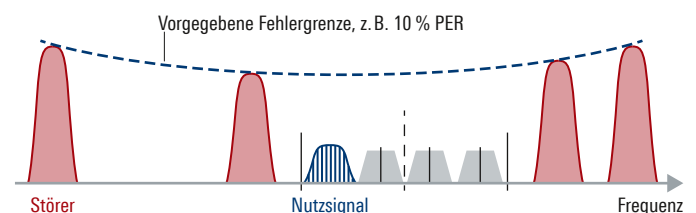


Bild 2: Je weiter die Frequenzablage des Störers vom Nutzsignal, umso größer der zulässige Störpegel, hier am Beispiel eines Störers mit Rauschcharakteristik (AWGN).

Realitätsnähere Ansätze

Nicht alle Standards hinken den aktuellen Erfordernissen hinterher. Ein Beispiel ist die Norm EN303 340 Ver. 1.1.2. für DVB-T- und DVB-T2-Rundfunkempfänger. Sie verlangt als Störer verschiedene Signaltypen einschließlich der Simulation eines voll belegten LTE-Basisstationssignals. Störerseitig ist die Norm also ganz auf der Höhe der Zeit, hat dafür aber andere Schwächen.

Nur anhand eines bestandenen Tests nach dieser Norm lässt sich kaum beurteilen, wie gut sich der betreffende Empfänger tatsächlich in der Praxis schlägt, denn als Maß für die Verschlechterung (KPI) dient die Häufigkeit von Bildfehlern; treten solche aufgrund der applizierten Störungen höchstens alle 15 Sekunden auf, ist die Norm erfüllt und das Gerät darf verkauft werden. Ob der Kunde mit dieser Qualität schon zufrieden ist, muss sich dann noch erweisen.

Koexistenzsicherung in der IoT-Ära

Durch die künftige Allgegenwart funkender Produkte wird Koexistenz zu einem Schlüsselthema der Industrie (Bild 3). Allerdings kann man nicht alle Produkte über einen Kamm scheren, sondern muss differenzieren. Ein über Funk

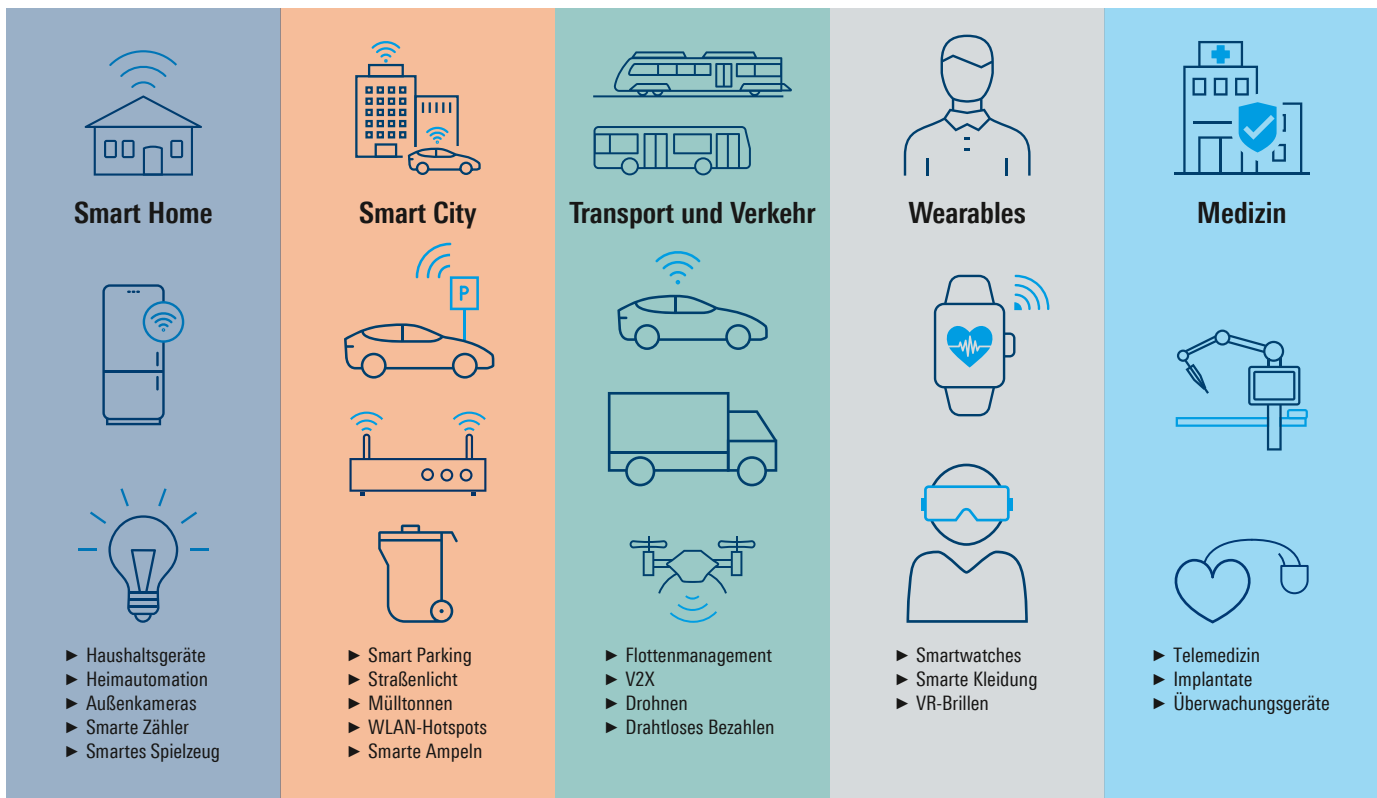
erreichbarer Herzschrittmacher oder ein Auto-Notrufsystem erfordern eine ganz andere Testschärfe und Qualitätsgewissheit als ein über WLAN steuerbares Spielzeug.

Ein anderer Aspekt, der in den aktuellen Normen zu kurz kommt, ist die Nutzererfahrung. Viele funkvernetzte Produkte verfügen über Bildschirm und Lautsprecher. Wenn sich Störungen durch mangelhaftes Koexistenzverhalten über diese Schnittstellen bemerkbar machen, sollte die Zertifizierung dem Rechnung tragen.

Standardisierung ist ein langwieriges Unterfangen, weil viele Parteien gehört, Interessen abgewogen und unterschiedlichste Aspekte berücksichtigt werden müssen. Die Dringlichkeit praktikabler Lösungen legt der Industrie deshalb nahe, initiativ zu werden und im eigenen Interesse Testverfahren zu entwickeln, die ein verlässliches Funktionieren ihrer Produkte unter Einsatzbedingungen garantieren. Sie gewinnt dadurch nicht nur mehr Sicherheit im Sinne der Produkthaftung, sondern kann so auch Pluspunkte über die Endnutzererfahrung sammeln und sich Wettbewerbsvorteile erarbeiten.

Ein zeitgemäßes Koexistenzsicherungs-Testverfahren sollte vier Aspekte einbeziehen:

Bild 3: Funkkommunikation dringt in nahezu alle Lebensbereiche ein. Das Thema Koexistenz wird daher immer wichtiger.



Vernachlässigbares Risiko	Minderes Risiko	Moderates Risiko	Hohes Risiko
▶ Waschmaschine ▶ Kühlschrank ▶ Intelligenter Zähler	▶ Navigationsgerät ▶ Smarte Beleuchtung ▶ Saugroboter	▶ Herd ▶ Kaffeemaschine ▶ Mikrowelle	▶ Medizinische Implantate ▶ Telemedizin ▶ Automotive Infotainment
		▶ Baby-Monitor ▶ Haustier-Tracker	

Bild 4: Beispielhafte vierstufige Risiko-Kategorisierung funknetzter Produkte in Anlehnung an ISO 14971 (dort fünfstufig). Produkteinstufung durch Autoren.

1. Risiko einschätzen

Die Testanforderungen hängen stark von der Produktgruppe und den Einsatzbedingungen ab (Bild 4). Je größer der potenzielle Schaden bei einem Produktversagen insbesondere für Leben und Gesundheit, desto schärfer die Testbedingungen.

Besonders hoch sind die Anforderungen in der Medizintechnik. In den USA legt ausnahmsweise nicht die Funkregulierungsbehörde FCC die Zulassungsregeln dafür fest, sondern die Food and Drug Administration (FDA). Sie verlangt eine Konformitätserklärung gemäß dem ANSI-Standard C63.27 für die Koexistenz von Funkprodukten. Dieser verweist auf die ISO-Norm 14971 zum Risikomanagement von Medizinprodukten, die den Herstellern mit einer Bewertungsmatrix dabei hilft, die Risikoeinschätzung für ihr Produkt selbst vorzunehmen. Auch was die Testprozedur betrifft, schreiben FDA und ANSI nicht im einzelnen vor, wie der Konformitätsnachweis zu führen ist, sondern überlassen die Aufstellung der Testkriterien (KPIs) und die Entwicklung eines adäquaten Testverfahrens dem Hersteller, dem damit eine große Verantwortung übertragen wird. Allerdings sind alle herstellereitigen Einschätzungen und Maßnahmen der Behörde plausibel darzulegen und zusammen mit der Risikobewertung, dem ausführlichen Testprotokoll und einer Unsicherheitsanalyse einzureichen.

Um das Rad nicht mit jedem Produkt neu erfinden zu müssen, ist die Industrie natürlich daran interessiert, Testprozeduren zu entwickeln, die ganze Produktklassen abdecken. Rohde&Schwarz entwickelt derzeit zusammen mit einem Testhaus entsprechende Tests für einen Medizintechnikhersteller.

2. Nutzererfahrung berücksichtigen

Die Koexistenzqualität sollte nicht nur an funkphysikalischen Leistungskriterien festgemacht werden, sondern die Anwendungsschicht, sprich: die Nutzererfahrung einbeziehen. Gerade bei Produkten mit einer optischen und/oder akustischen Nutzerschnittstelle machen sich Koexistenzprobleme unter Umständen direkt bemerkbar. Da der Nutzer ein Produkt nicht nach seiner Datenblattleistung, sondern nach seiner Alltagstauglichkeit beurteilt, ist

eine ganzheitliche Betrachtung der Produktqualität schon im Rahmen des Koexistenztests sinnvoll. Jedes irreguläre Verhalten, das sich in optischen oder akustischen Signalen äußert, lässt sich automatisiert erfassen, zum Beispiel mit der Inspektionssoftware R&S®AdVISE (Vorstellung auf Seite 7). Auch die Messung der Audio- und Videoqualität ist messtechnische Routine.

3. Einbausituation des Funkmoduls beachten

Ein Produkt mit eingebautem Funkmodul verhält sich in der Regel funktechnisch anders als das Modul allein, da Gehäuse und Einbaulage die Funkeigenschaften beeinflussen. Noch wird nicht in allen Ländern ein Koexistenztest am fertig montierten Produkt gefordert. Außerdem spielt es eine Rolle, aus welcher Richtung Nutz- und Störsignal auf das Testobjekt einwirken. Zu einem aussagefähigen Test gehört deshalb auch die Variation der Einfallswinkel über DUT- und Antennenpositionierer.

4. Angemessene Störsignale wählen

Wie oben schon erwähnt, stressen die von manchen Normen vorgegebenen Störsignale das Messobjekt nicht hinreichend, um Koexistenzprobleme im realen Einsatz auszuschließen. Deshalb sollte mit Störsignalen gearbeitet werden, die den Worst Case nachbilden. HF-Leistung, Störfrequenz, -spektrum und -bandbreite sind entsprechend zu bemessen.

Werden all diese Faktoren beim Blocking-Test berücksichtigt, sollte einem störungsfreien Produktbetrieb nichts im Wege stehen.

Ein typischer Koexistenz-Testaufbau

Bild 5 zeigt einen Testaufbau für Objekte mit geringerer Risikoeinstufung, der allen genannten Kriterien gerecht wird. Er umfasst einen Funkkommunikationstester, einen Vektorsignalgenerator, einen Spektrumanalysator, eine Echtzeit-Inspektionssoftware und einen optionalen Leistungsverstärker. Die Messung erfolgt in einem vollständig reflexionsfreien, elektromagnetisch abgeschirmten Raum. Für Hochrisikoprodukte würde man die Störseite noch deutlich ausbauen, indem man weitere Signalgeneratoren

und Antennen hinzunimmt, um komplexe Signalszenarien zu modellieren.

Der Funkkommunikationstester stellt zunächst eine Ende-zu-Ende-Verbindung mit normalem Signalpegel zum DUT her, indem er dessen Funkschnittstelle emuliert, sei es ein Nahbereichsstandard wie WLAN oder ein zellulares Netzwerk (2G/3G/4G/5G). Der Leistungsverstärker kann notwendig sein, um den Signalpegel zu erhöhen.

Zunächst wird ein Funktionstest ohne Störeinwirkung durchgeführt und die Ergebnisse für alle relevanten KPIs der physikalischen und der Anwendungsschicht (Daten-durchsatz, PER, BLER, Video- und Audioleistung) aufgezeichnet. Dann wird der Leistungspegel des Nutzsignals auf einen Wert reduziert, bei dem gerade noch eine Kommunikation möglich ist, um das Worst-Case-Szenario zu reproduzieren. Nach dem Aufschalten des Störsignals wiederholt man die Messungen.

Sofern das Messobjekt optische und/oder akustische Ausgaben erzeugt, überprüft eine Inspektionsoftware, die über Webcam und Mikrofon das DUT überwacht, ob diese die gewünschte Qualität haben. Abweichungen werden mit Zeitstempel und Beweisdaten dokumentiert.

Messbegleitend stellt ein Spektrumanalysator das HF-Spektrum dar. Mit ihm lässt sich kontrollieren, ob die Nutz- und Störsignale die richtigen Frequenzlagen und Pegel haben und ob nicht irgendwelche Fremdsignale auftreten, die das Testergebnis in Frage stellen würden.

Fazit

Die Sicherstellung der ungestörten Koexistenz funkender Produkte wird im IoT-Zeitalter immer wichtiger. Aktuelle Koexistenz-Teststandards bilden aufgrund der schnellen Entwicklung von Technologie und Markt die Einsatzwirklichkeit der Produkte oft nicht mehr hinreichend gut ab. Deshalb sind die Hersteller insbesondere risikobehafteter Produkte gut beraten, über die vorgeschriebenen Tests hinaus zusammen mit Testhäusern realistischere Tests zu entwickeln und durchzuführen. Sie mindern dadurch einerseits ihre Haftungsrisiken und steigern andererseits die Nutzerzufriedenheit und das Qualitätsimage ihrer Produkte. Unter Beachtung weniger Testgrundsätze lassen sich adäquate Tests mit aktueller Messtechnik problemlos umsetzen.

Mahmud Naseef, Christian Reimer

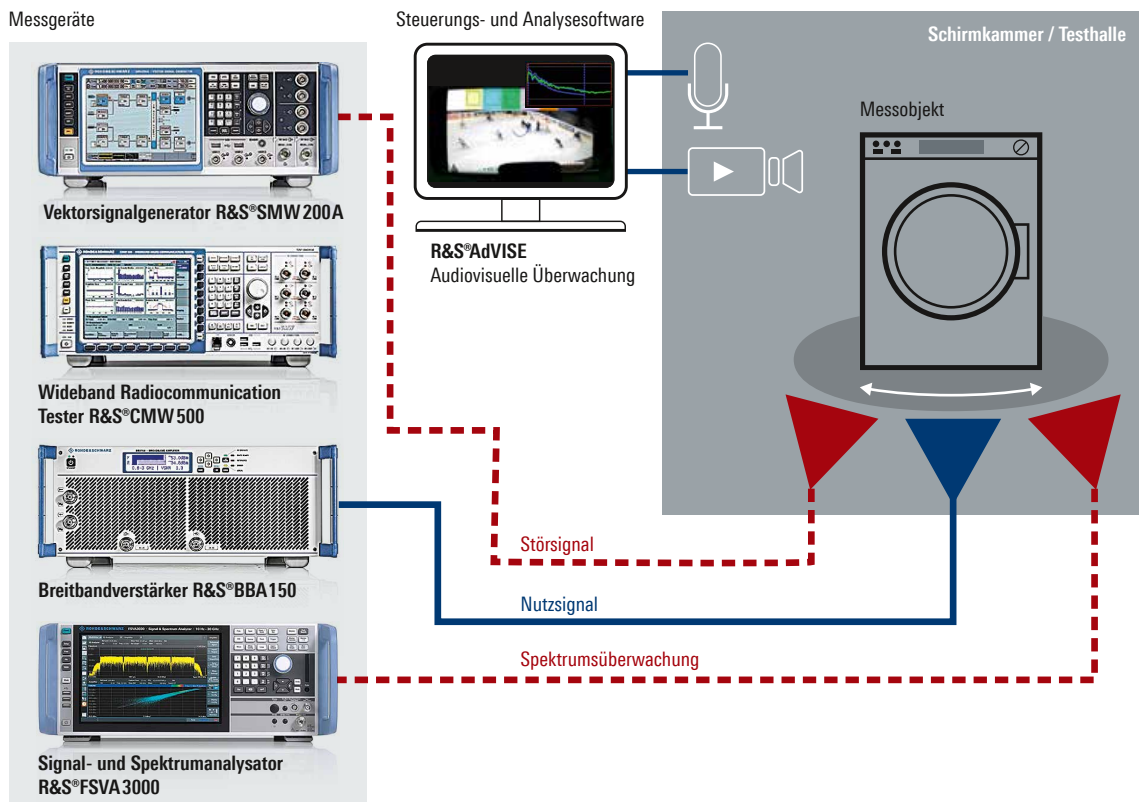


Bild 5: Mit einem Testaufbau wie diesem lässt sich das Koexistenzverhalten einer Vielzahl von Produktklassen analysieren.



SCHNELLER ZUR STÖRUNGS-FREIEN MIKROWELLE

Viele Produkte erzeugen Frequenzen im Gigahertzbereich, sind aber keine Funkgeräte. Sie müssen international standardisierte Grenzwerte einhalten, um die etablierten Funkdienste nicht zu stören. Mit einer neuen Messfunktion lässt sich der Nachweis schneller als bisher führen.

Der moderne Funkverkehr im Mobil- und Nahbereichsfunk spielt sich zunehmend bei Frequenzen oberhalb von 1 GHz ab. Deshalb ist es besonders wichtig, diesen Bereich störungsfrei zu halten. Nicht nur die Funkgeräte selbst müssen strenge Auflagen bezüglich der spektralen Reinheit ihrer Aussendungen einhalten, sondern auch für alle anderen Produkte, die hohe Frequenzen erzeugen, ist Sorge zu tragen, dass sie das Spektrum nicht mit Störsignalen belasten. Die EMV-Testnormen, die das sicherstellen sollen, haben sich lange Zeit auf den Bereich unterhalb von 1 GHz konzentriert, mussten aber aufgrund der stürmischen Entwicklung des Mikrowellenfunks immer wieder nachgeschärft werden. So definiert der Standard CISPR 11 die Funkstörgrenzwerte und Messverfahren für Geräte, die Energie im Hochfrequenzbereich für industrielle, wissenschaftliche, medizinische

und häusliche Zwecke erzeugen – wie die Haushalts-Mikrowelle, die im lizenzfreien ISM-Band um 2,4 GHz arbeitet, aber hochfrequente Störsignale bis hin zu 18 GHz erzeugt.

Um die Störwirkung von ISM-Produkten auf die lizenzierten Funkdienste außerhalb des 2,4-GHz-Bandes besser bewerten zu können, hat die Standardisierungsgruppe CISPR vor wenigen Jahren ein neues Messverfahren in ihren Standard CISPR 11 aufgenommen. Das Verfahren misst die Amplituden-Wahrscheinlichkeitsverteilung (Amplitude Probability Distribution, APD) im beobachteten Spektrum. Die APD beschreibt die kumulierte Verteilung der Amplitudenwerte einer Störgröße innerhalb einer definierten Zeit und Bandbreite [1] und gibt Aufschluss darüber, wie stark das Messobjekt digitale Kommunikationssysteme stört.

[1] CISPR 16-1-1:2019 (Ed. 5) Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 1-1: Radio disturbance and immunity measuring apparatus – Measuring apparatus.

Eine APD-Messfunktion war für den Funkstör-Messem Empfänger R&S®ESW schon länger erhältlich, ein weltweit anerkanntes Referenzgerät für normenkonforme EMI-Messungen (Bild 1). Mit der neuen Software-Option R&S®ESW-K58 wird die Messung mehrkanalig und damit deutlich schneller. Vorteilhaft ist das vor allem bei zeit-aufwendigen Messabläufen mit hohem Wiederholcharakter in der Typ- und Qualitätsprüfung.

Die APD-Mehrkanal-Messfunktion soll beispielhaft anhand der Funkstörfeldstärke-Messung an Mikrowellenherden zwischen 1 GHz und 18 GHz gemäß CISPR 11 vorgestellt werden [2]. Mikrowellenherde arbeiten zeitlich gepulst und prinzipbedingt mit driftender Frequenz. Ihre Störsignale werden zunächst in einer Vormessung mit dem Spitzenwertdetektor erfasst (Bild 2). Da dieser nur den Maximalwert und nicht das zeitliche Verhalten innerhalb des Messzeit erfasst, spiegelt er nicht den wahren Störeinfluss wider und ist für die Bewertung ungeeignet. Studien haben gezeigt, dass der Einfluss einer Störung auf die Bitfehlerrate mithilfe der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Störampplitude deutlich präziser bewertet werden kann.

Deshalb fordert CISPR 11 eine Bewertungsmessung an den Pulsen, die den Grenzwert überschreiten. Hierfür kommt die APD-Messfunktion zum Einsatz. Wegen der bei Mikrowellenherden driftenden Arbeitsfrequenz und damit auch driftenden Oberwellen legt die aktuelle Ausgabe

der CISPR 11 [2] einen Erfassungsbereich von 20 MHz fest. Abgebildet wird dieser durch fünf Messkanäle, die symmetrisch um die kritische Frequenz herum mit Abständen von 0, ± 5 MHz und ± 10 MHz gelagert sind. Der APD-Grenzwert definiert eine maximale Wahrscheinlichkeit von 10^{-1} für Amplituden größer als 70 dB ($\mu\text{V/m}$). Das bedeutet, dass die erfasste Störampplitude den Grenzwert während der festgelegten Erfassungszeit von 30 s mit höchstens 10 % Wahrscheinlichkeit überschreiten darf. Erfüllt der Prüfling diese Anforderung, ist das finale Testergebnis PASS.

Die R&S®ESW-K58 erfasst die fünf geforderten Kanäle parallel und stellt sie im 2D-Diagramm mit farbcodierter Wahrscheinlichkeitsverteilung zusammen mit dem Testergebnis PASS, MARGIN bzw. FAIL dar (Bild 3).

Die Software leistet aber mehr als von der Norm gefordert. Für entwicklungsbegleitende Messungen lassen sich Kanalzahl, Erfassungsbandbreite, minimale Amplitudenwahrscheinlichkeit und Erfassungszeit in Grenzen frei wählen. So können bis zu 21 Kanäle mit einer Analysebandbreite von je 1 MHz parallel gemessen und der 20-MHz-Bereich somit lückenlos überwacht werden. Damit ist garantiert, dass auch ein schmalbandiger driftender Störer sofort in mindestens einem der Kanäle erfasst wird. Bei einer Erfassungsbandbreite von ≤ 300 kHz sind sogar 67 Kanäle möglich.

[2] CISPR 11:2019 (Ed. 6.2) Industrial, scientific and medical equipment – Radio-frequency disturbance characteristics – Limits and methods of measurement.

Bild 1: Funkstörmess-empfänger R&S®ESW mit APD-Mehrkanal-Messfunktion.





Bild 2: Vormessung an einem Mikrowellenherd mit dem Spitzenwertdetektor im Subband 3 (6,125 GHz bis 8,575 GHz). Die FAIL-Anzeige signalisiert, dass das Messergebnis den Grenzwert überschreitet. Um die kritische Frequenz herum – hier bei 7,39 GHz – muss deshalb mit der APD-Messfunktion nachgemessen werden.



Bild 3: Nachmessung an der kritischen Frequenz mit der APD-Mehrkanal-Messung. Aus dem 2D-Diagramm lässt sich das Messergebnis qualitativ und quantitativ auf einen Blick ablesen.

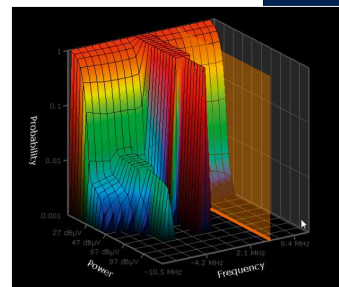


Bild 4: 3D-Darstellung einer 20 MHz breiten, lückenlosen APD-Messung über 21 Kanäle.

Für eine detaillierte Störsignalanalyse lässt sich eine 3D-Darstellung aufrufen, die mit Touch-Gesten gedreht und vergrößert werden kann (BILD 4).

Die Messfunktion R&S®ESW-K58 bringt in Summe also deutliche Vorteile sowohl gegenüber „klassischen“ Messverfahren als auch gegenüber der einkanaligen Variante:

- ▶ Alternative Methode zum Log-AV-Verfahren zur Funkstörfeldstärkemessung an Mikrowellenherden gemäß CISPR 11, mit dem Vorteil, auch den wahren (linearen) Mittelwert bestimmen zu können

- ▶ Mindestens um Faktor 5 schneller als eine einkanalige APD-Messung
- ▶ Höhere Genauigkeit und Reproduzierbarkeit gegenüber Verfahren mit logarithmischem Mittelwert auf einem Spektrumanalysator (Log-AV-Verfahren mit Videobandbreite 10 Hz)
- ▶ Schnelle PASS/FAIL-Visualisierung über alle Kanäle gleichzeitig im 2D-Diagramm
- ▶ Detaillierte Störsignalanalyse mittels touchgesteuerter Dreh- und Zoom-Funktionen im 3D-Diagramm

Jens Medler

Kurzdaten der APD-Mehrkanal-Messfunktion R&S®ESW-K58

- ▶ Maximale Anzahl der Kanäle:
67 (ABW ≤ 300 kHz),
21 (ABW = 1 MHz)
- ▶ Erfassungsbandbreite (−6 dB):
1 Hz ≤ ABW ≤ 1 MHz
- ▶ Minimale Amplituden-Wahrscheinlichkeit: 10^{−7}
- ▶ Maximale Erfassungszeit: 120 s
- ▶ Normenkonform mit CISPR 16-1-1

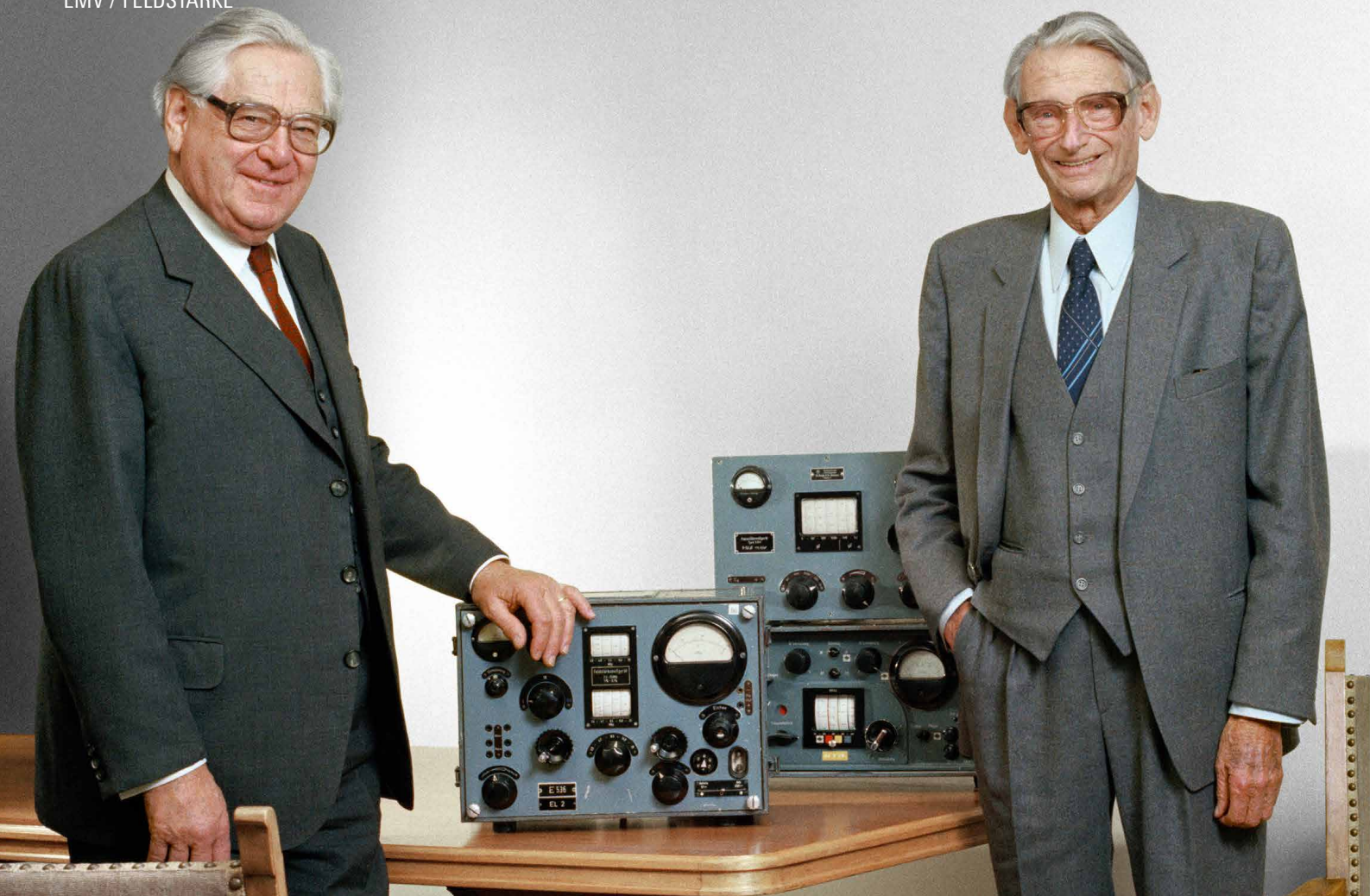


Bild 1: Dr. Lothar Rohde (rechts) und Dr. Hermann Schwarz vor Entwicklungen aus dem ersten Firmenjahrzehnt. Im Vordergrund der Fernfeldmesser HHF. Dieser entstand im Jahr 1937, quasi dem Geburtsjahr der Messempfänger bei Rohde & Schwarz.

DIE GESCHICHTE DER STÖRMESSEMPFÄNGER BEI ROHDE & SCHWARZ

Der Bau von Störmessempfängern hat bei Rohde & Schwarz eine lange Tradition. Bereits in den 1930er-Jahren wurden erste Feldstärkemessgeräte zur Erfassung elektromagnetischer Störaussendungen gebaut. Heute ist Rohde & Schwarz Weltmarktführer für diese Gerätegattung.

Der Bedarf für Funkstörmessgeräte ist mit der Einführung des AM-Rundfunks in den 1920er-Jahren entstanden. Die zahlreichen Störmeldungen von Rundfunkhörern machten erstmals eine Funkentstörung an den vorhandenen Elektrogeräten und -einrichtungen nötig. Messverfahren und Messgeräte waren jedoch noch nicht

entwickelt. Erst mit der Gründung des internationalen Sonderkomitees für Funkstörungen CISPR (Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques) im Jahr 1933 wurden systematische Untersuchungen gestartet, um einheitliche Messverfahren zum Schutz des Rundfunks zu definieren.

Dabei wurde früh erkannt, dass die Auswirkung auf den Rundfunk vom Typ der Störung (breitbandig oder schmalbandig) und dem jeweiligen Funkdienst abhängt. Insbesondere die Abhängigkeit von der Pulsfrequenz führte schließlich zur Definition und Einführung des bekannten Quasi-Peak-Detektors. Denn es galt, den Aufwand für die Funkentstörung aus Kostengründen gering zu halten, die Entstörung also nur so gut wie gerade nötig durchzuführen. Die Messtechnik sollte deshalb nur bei den Frequenzen Handlungsbedarf anzeigen, bei denen er subjektiv begründet war. Da niedrige Pulsfrequenzen deutlich weniger störend empfunden werden als höhere (so entspricht die Wirkung einer 100-Hz-Pulsstörung auf den Mittelwellenempfang der einer um 10 dB stärkeren 10-Hz-Störung), konnte man sie bei der Messung schwächer gewichten, und genau das leistet der Quasi-Peak-Detektor. Bei der Quasi-Peak-Bewertung spricht man daher auch von einer Nachbildung des AM-Radio-Empfängers einschließlich des subjektiven Störempfindens.

Der Verband Deutscher Elektrotechniker (VDE) veröffentlichte schließlich 1941 die Normenentwürfe VDE 0876 „Vorschriften für Störspannungsmessgeräte“ und VDE 0877 „Leitsätze für die Messung von Funkstörspannungen“.

Diese Nomenklatur ist heute noch gültig. So spiegelt die VDE 0876 die Basisnormenreihe CISPR 16-1-x (Geräte und Einrichtungen zur Messung der hochfrequenten Störaussendung) und die VDE 0877 die Basisnormenreihe CISPR 16-2-x (Verfahren zur Messung der hochfrequenten Störaussendung).

Erste Epoche: Die frühen Anfänge

Bereits in den 1930er-Jahren begann Rohde&Schwarz mit der Entwicklung und dem Bau von Feldstärkemessgeräten. Den Anfang machten 1937 der Feldstärkemesser HHK und der Fernfeldmesser HHF (Bild 1). Der HHK war in zwei Varianten für die Frequenzbereiche 2,3 MHz bis 23 MHz und 23 MHz bis 107 MHz erhältlich. Der HHF deckte mit drei Gerätevarianten insgesamt den Frequenzbereich 100 kHz bis 100 MHz ab und ermöglichte Feldstärkemessungen von 1 $\mu\text{V/m}$ bis 0,1 V/m. 1938 folgte schließlich der Nahfeldmesser HHN, der ebenfalls in drei Gerätevarianten für den Frequenzbereich 100 kHz bis 100 MHz verfügbar war.

In der Nachkriegszeit sah sich Deutschland in Bezug auf den Rundfunk mit einer neuen Situation konfrontiert. Der 1948 in Kraft getretene Kopenhagener Wellenplan gestand den

Dieser Beitrag ist ein Auszug aus einer Gesamtdarstellung der Messempfängergeschichte bei Rohde&Schwarz, die bis in die Gegenwart reicht. Sie steht unter www.rohde-schwarz.com zum Download bereit, Suchbegriff [Messempfänger-Story](#).

Bild 2: Erst der aufkommende Rundfunk machte die Funkentstörung von Elektrogeräten nötig. Dieser bronzene Amerikaner lauscht einer Radioansprache seines Präsidenten Franklin D. Roosevelt in dessen Memorial in Washington, DC.



© NPS / Victoria Stauffenberg

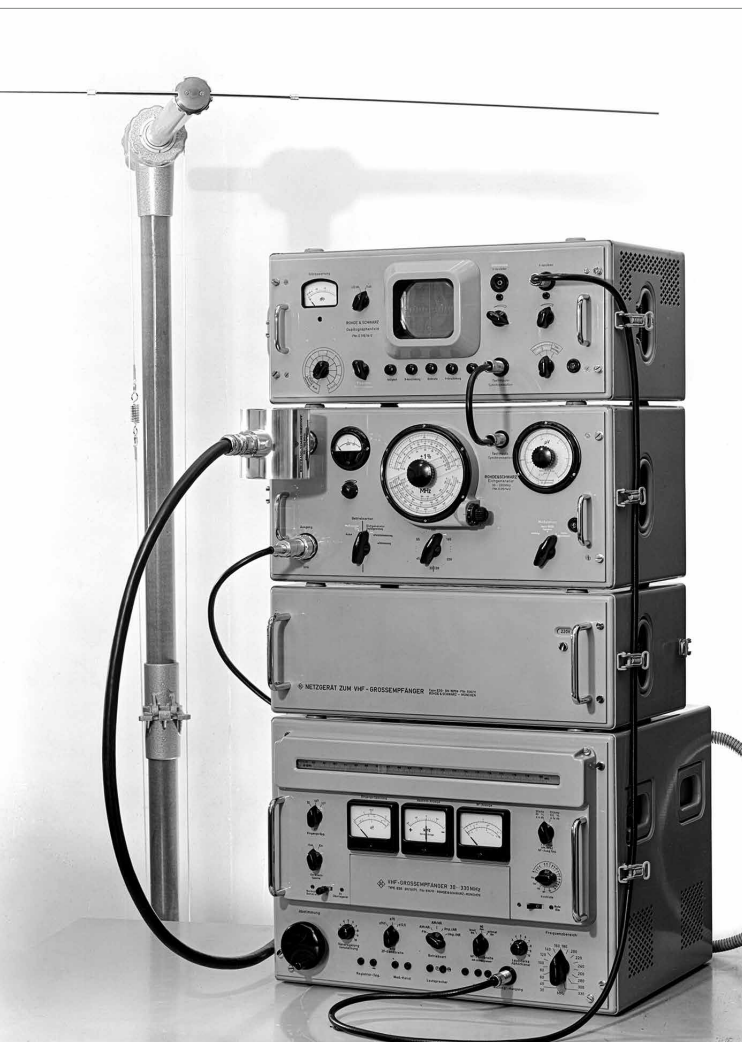
Verliererstaaten des Zweiten Weltkriegs nur sehr wenige und zudem ungünstige Frequenzen im Mittelwellenbereich zu. Dies hatte zur Folge, dass Deutschland die Erschließung des UKW- und VHF-Bereichs für den Rundfunk forcierte. Ein Meilenstein dieser Entwicklung war der von Rohde & Schwarz gebaute erste europäische UKW-Sender (90,1 MHz), der vom Bayerischen Rundfunk am 28. Februar 1949 in München-Freimann in Betrieb genommen wurde. Für die Planung der Senderstandorte und die Überwachung des Sendebetriebs brauchte es Feldstärkemesser. Daher war es nur folgerichtig, dass Rohde & Schwarz im Jahr 1949 das Feldstärkemessgerät HFD für den Frequenzbereich 87 bis 470 MHz als Anschlussgerät zum

HHF einführte. Kernstück des HFD war der Messempfänger ESD, ein Überlagerungsempfänger mit eingebautem 100-MHz-Eichgenerator. Die gute Reproduzierbarkeit der Spannungseichung ermöglichte eine sehr genaue Vergleichsmessung im linearen Messbereich auch bei kleinen Änderungen der Feldstärke, während die logarithmischen Messbereiche die Messung und Aufzeichnung stark schwankender Feldstärken gewährleistete. Zudem war der Empfang von frequenz- oder amplitudenmodulierten Sendern möglich.

Mit der Erschließung des VHF-Bereichs von 30 bis 300 MHz für den Hör- und Fernseh-Rundfunk entstanden neue Anforderungen an die Funkstörmesstechnik. Auch die Normen mussten weiterentwickelt werden, von der Störspannungsmessung bis 20 MHz hin zur Störfeldstärkemessung bis 300 MHz. Ferner verlangte CISPR die Messung der vom Prüfling am Netzanschluss abgegebenen Störspannung unterhalb von 30 MHz und der abgestrahlten Störfeldstärke oberhalb dieser Frequenz. Rohde & Schwarz begleitete diesen Prozess mit der Entwicklung eines UKW-Störmessplatzes, der vom Fernmeldetechnischen Zentralamt (FTZ) in Darmstadt und den Störmessstellen der Post eingesetzt wurde, um die Störwirkung auf die UKW-Rundfunkdienste zu untersuchen.

Die Geräuschwirkung elektrischer Störungen auf den AM-Hörrundfunk war durch ältere Untersuchungen bekannt. Dagegen war die Störwirkung auf das Fernsehen und den frequenzmodulierten FM-Hörrundfunk weitestgehend unerforscht. Man glaubte zunächst, dass man der Störwirkung am besten durch Erfassen des Spitzenwerts der Störimpulse gerecht wird. Es wurde daher eine reine von der Pulsfolgefrequenz unabhängige Spitzenwertanzeige ohne Bewertung gewählt. Für die qualitative Beurteilung der Störimpulse nach Form und Breite sowie zum Vergleich von Stör- und Messimpuls wurde ein Oszillograph, wie die Geräte damals noch hießen, als Anzeigegerät eingesetzt. Es zeigte sich, dass deutlich ausgeprägte Einzelimpulse recht selten auftreten. Meist sieht man Impulspakete mit mehr oder weniger Abstand zueinander, z. B. von prellenden Kontakten, Zündfunken von Verbrennungsmotoren, feuern den Kollektoren von Elektromotoren, aber auch Sprühererscheinungen an Hochspannungsleitungen. Die oszillographische Messmethode zur

Bild 3: UKW-Störmessplatz (neue Variante ab 1957) mit VHF-Messempfänger ESG (unten) und Störmesszusatz EZS (oben).



Erfassung und Bewertung von Impulspaketen erwies sich dabei als nachteilig. So schwankte der Ablesewert beträchtlich, je nachdem, ob man beim Impulsvergleich mit dem Messimpuls am Eichgenerator die seltenen ganz hohen Impulse der Störaussendung berücksichtigte oder einen häufig auftretenden mittleren Wert annahm. Zudem brauchte man ein Messverfahren, das die Störwirkung auf den Fernsehempfang direkt abbildet.

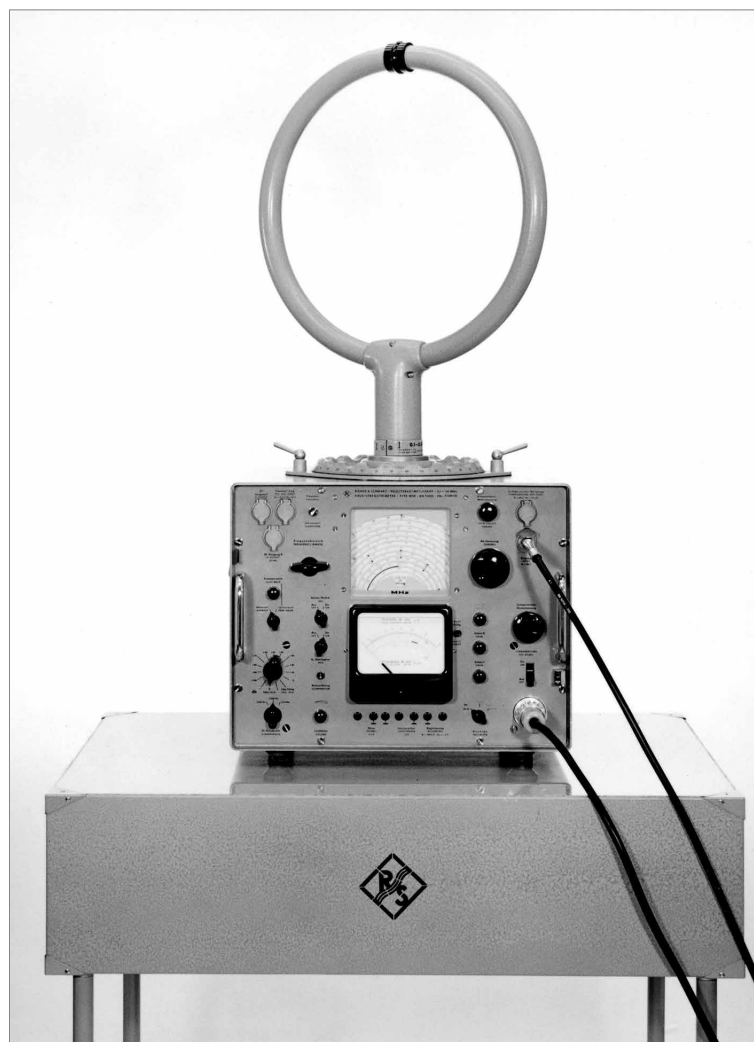
Man fand heraus, dass auch das subjektive Empfinden von Bildstörungen von der Pulsfolgefrequenz der Störimpulse abhängt – allerdings mit einem steileren Abfall gegenüber dem Störimpfinden des Ohrs beim Hörrundfunk. Wollte man die Bewertung bis herunter zum Einzelimpuls vollständig abbilden, müssten Messempfänger in der Lage sein, Amplitudenunterschiede von mehr als 50 dB ohne Übersteuerung zu verarbeiten. Dies war seinerzeit nicht möglich und würde selbst heute eine außerordentlich hohe Anforderung an die Messgeräte bedeuten. Vom CISPR wurde daher eine abgeflachte Bewertungskurve für die Quasi-Peak-Anzeige im CISPR-Band C (30 bis 300 MHz) vorgeschlagen und umgesetzt, die noch heute Bestandteil der CISPR 16-1-1 ist. Diese schreibt eine Abwertung von 43,5 dB für Einzelimpulse gegenüber dem Spitzenwert vor. Um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten, definierte CISPR für die Gleichrichterschaltung eine Ladezeitkonstante von 1 ms sowie eine Entladezeitkonstante von 550 ms. Letztendlich musste auch die Messbandbreite an die neuen Rundfunkdienste angepasst werden. War diese im UKW-Störmessplatz zunächst auf 200 kHz festgelegt, folgte man später der CISPR-Empfehlung von 120 kHz. All dies wurde im Störmesszusatz EZS integriert und damit die oszillographische Messmethode durch eine Instrumentenanzeige abgelöst. In der Folge wurde das Messsystem ab 1957 als Standardmessplatz bei der Deutschen Bundespost und bei den zuständigen Verwaltungen anderer europäischer Länder eingeführt. Als Messempfänger dienten anfangs (ab 1953) die VHF-Geräte ESM 180 (30 bis 180 MHz) und ESM300 (85 bis 300 MHz), die ab 1955 vom VHF-Messempfänger ESG (Bild 3) (30 bis 330 MHz) abgelöst wurden.

In diese Zeit fällt auch die Einführung des VHF-Feldstärkezeigers HUZ für den Frequenzbereich 47 bis 225 MHz. Dieser hat eine

Spitzenspannungsanzeige mit Bewertung nach CISPR. Auch wenn das Gerät die hohen Anforderungen der CISPR-Empfehlung No. 305 bzw. der überarbeiteten VDE-Vorschrift 0876 bezüglich der Absolutgenauigkeit und Übersteuerungsfestigkeit nicht erfüllte, war der tragbare HUZ für orientierende Messungen im Feld vielseitig einsetzbar, zum Beispiel für die Untersuchung von Zündstörungen bei der Entstörung von Kraftfahrzeugen.

1959 wurde schließlich der altbewährte Fernfeldmesser HHF durch das Feldstärkemessgerät HFH (Bild 4) ersetzt. Im Gegensatz zu den noch separaten Gerätevarianten beim Vorgänger HHF vereinte der HFH den Frequenzbereich von

Bild 4: Feldstärkemessgerät HFH mit aufgesteckter Rahmenantenne zur direkten Feldstärkeablesung im Frequenzbereich 100 kHz bis 30 MHz. Als Messtisch dient der umgebaute Transportkoffer.



100 kHz bis 30 MHz in einem einzigen Gerät, das zur unmittelbaren Messung der Feldstärke wahlweise mit drei Rahmenantennen für die Bereiche 0,1 bis 0,4 MHz, 0,4 bis 1,6 MHz und 1,6 bis 30 MHz oder einer abgesetzten Stabantenne und später auch einer abgesetzten Rahmenantenne betrieben werden konnte. Ein Novum war der mitlaufende Eichgenerator. Dieser ermöglichte die Eichung einschließlich der Rahmenantenne bei jeder Messfrequenz und damit eine direkte Ablesung von Feldstärkewerten ohne Verwendung von Eichkurven. Für Störspannungsmessungen konnte die Anzeige von Mittelwert- auf Spitzenspannungsmessung umgeschaltet werden. Der Lieferumfang umfasste auch eine induktive und eine kapazitive Tastantenne, um beispielsweise die Wirksamkeit von Abschirmungen zu prüfen. Eine Besonderheit: Der Rahmen-Transportkoffer konnte zum Messtisch umgebaut

werden. Zudem ließ sich der Frequenzbereich mit dem zusätzlich lieferbaren Längstwellenvorsatz HFHL bis hinab zu 10 kHz erweitern.

Zweite Epoche:

Das Zeitalter der analogen Überlagerungsempfänger mit Bewertungsdetektoren nach CISPR

1961 wurde der VHF-UHF-Messempfänger ESU (Bild 5) eingeführt. Mit drei wechselbaren Einschüben: HF-Teil I (25 bis 225 MHz), HF-Teil II (160 bis 475 MHz) und HF-Teil III (460 bis 900 MHz) deckte er den Frequenzbereich von 25 bis 900 MHz ab. 1969 kam das HF-Teil IV (900 bis 1300 MHz) hinzu. Der ESU war ein röhrenbestückter Doppel-Überlagerungsempfänger mit spiralig verlaufender Analogskala zur Frequenzanzeige. Mit seinem robusten Metallgehäuse bringt er 30 kg auf die Waage und hat einen für die 1960er-Jahre typischen

Bild 5: Der VHF-UHF-Messempfänger ESU hatte wechselbare HF-Einschübe und einen für die 1960er-Jahre typischen Messeingang nach Defifix-B-Norm – ein Anschlusstyp, den Rohde & Schwarz entwickelt hatte.



Messeingang nach Dezifix-B-Norm – ein Verbindungstyp, den Rohde & Schwarz entwickelt hatte.

Einen wesentlichen Fortschritt stellte der mitlaufende Eichgenerator dar, der bei jeder Messfrequenz zur Eichung des Geräts herangezogen werden konnte. Erleichtert wurde die Handhabung auch durch wählbare Anzeigebereiche (linear 20 dB, logarithmisch 40 bzw. 60 dB), die umschaltbare Mittelwert- oder Spitzenwertanzeige, eine variable Durchlassbandbreite (25 kHz und 120 kHz) und wahlweise eine automatische Frequenznachstimmung.

Der ESU war das Kernstück des VHF-UHF-Feldstärkemessgeräts HFU, das außerdem einen Breitbanddipol für 25 bis 80 MHz, eine logarithmisch-periodische Breitbandantenne für 80 bis 1000 MHz, Stativ und Mast, Kabel mit Dezifix-Anschlüssen sowie einen Transportkoffer umfasste. Der HFU war als Anschlussgerät (Frequenzerweiterung) zum HFH gedacht und ersetzte die früheren Feldstärkemessgeräte HHF und HFD.

Der ESU besaß noch keine eingebaute Bewertungsfunktion für die Störfeldstärkemessung nach VDE 0876. Hierfür musste der separate Störmesszusatz EZS am ZF-Ausgang (2 MHz) angeschlossen werden. Nach erfolgter Frequenzabstimmung und Eichung war dann mittels ESU-Pegelschalter und EZS-Teiler eine Anzeige von etwa 0 dB am EZS einzustellen. Das Messergebnis in dB über 1 μ V ergab sich dann aus der Summe der dB-Werte des EZS-Teilers, der ESU-Pegelschalterstellung und der Abweichung von 0 dB am EZS-Instrument. Addierte man schließlich noch den Antennenfaktor, erhielt man die Störfeldstärke in dB über 1 μ V/m. Dieser aufwendige manuelle Prozess führte immerhin zu validen Resultaten. Die Nachfolgegeräte machten es dem Anwender dann aber dank automatischer Bewertung deutlich leichter.

Für die Erschließung des UHF-Bereichs brauchte es auch portable Geräte. Dies führte 1964 zur Einführung des UHF-Feldstärkezeigers HUZE für den Frequenzbereich 470 bis 850 MHz, quasi die Erweiterung des bewährten HUZ. Mit Spitzenwertgleichrichtung und einer ZF-Bandbreite von 500 kHz war der HUZE bestens geeignet, um die

Ausbreitungsbedingungen von Fernsehsignalen im UHF-Bereich zu ermitteln.

1970 folgte der tragbare VHF-Feldstärkemesser HFV (Bild 6). Das Gerät diente zum Messen der Nutz- und Störfeldstärke im Frequenzbereich von 25 bis 300 MHz. Der gesamte Bereich konnte ohne Umschaltung durchgestimmt werden. Die umschaltbare Mittelwert- und Spitzenwert-Anzeige, der große Messbereich von 130 dB, AM- und FM-Demodulation sowie die Möglichkeit zur Störbewertung nach VDE und CISPR bei genormter Messbandbreite von 120 kHz prädestinierten das handliche Gerät für verschiedenste Funkkontroll- und Störmessungen. Der HFV war der erste Rohde & Schwarz-Funkstörmessempfänger mit normenkonformer Bewertung. Viele Generationen bis in die Gegenwart sollten ihm folgen.

Matthias Keller, Jens Medler

Bild 6: Mobiler VHF-Feldstärkemesser HFV mit Dipolantenne. Das Modell war nicht nur der erste volltransistorierte Rohde & Schwarz-Messempfänger, sondern auch der erste, der eine automatische Störbewertung gemäß VDE 0876 durchführen konnte.



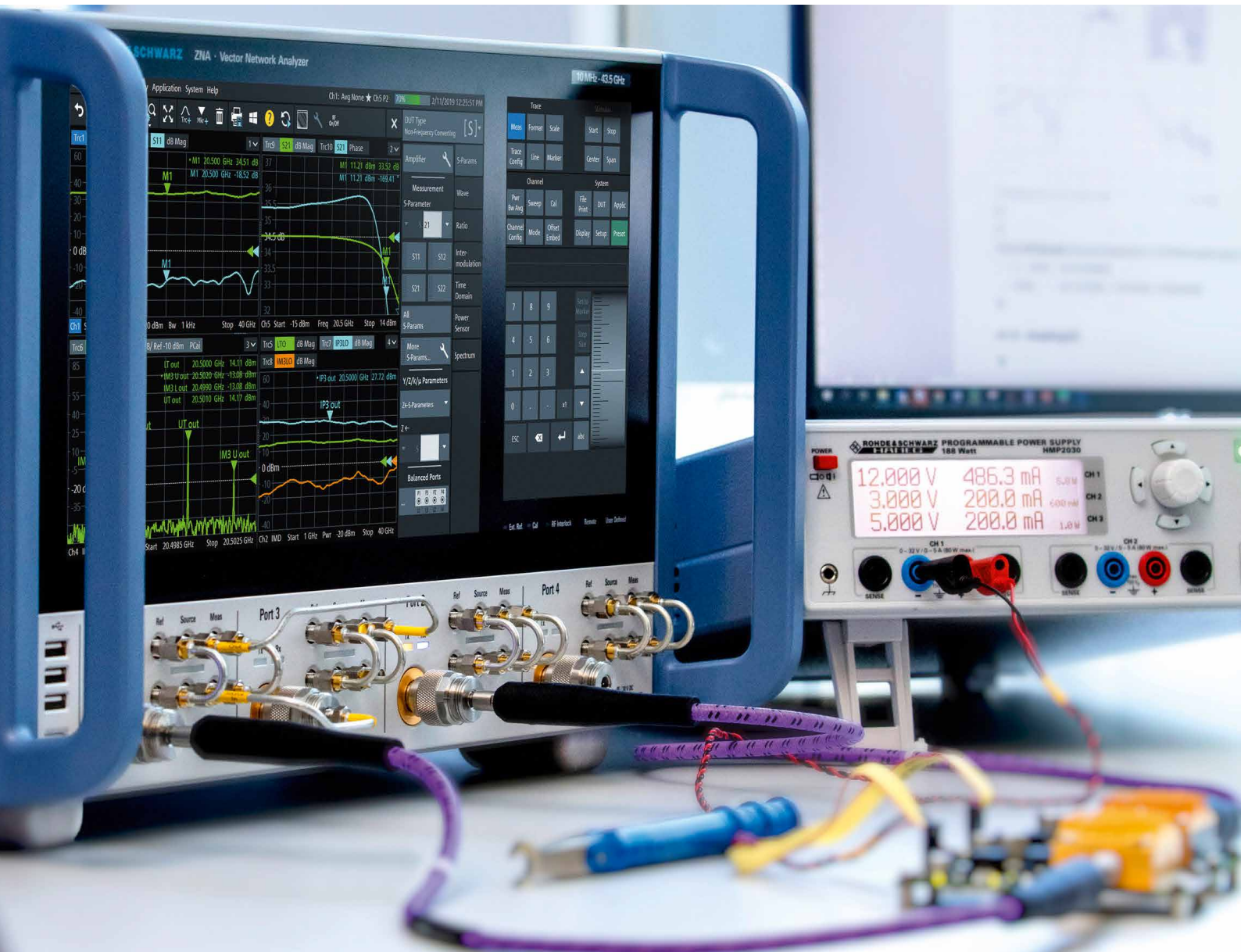
NEUES AUS DER HIGH-END-NETZWERKANALYSE

Modelle bis 67 GHz, komfortable Rauschmessungen bis 40 GHz

Die vor rund zwei Jahren eingeführte Modellreihe R&S®ZNA hat neue Maßstäbe in der vektoriellen Netzwerkanalyse gesetzt. Seither wurde der Funktionsumfang der Geräte kontinuierlich vergrößert. Die neueste Erweiterung betrifft den Frequenzbereich. Die jetzt auf den Markt kommenden Modelle

R&S®ZNA50 und R&S®ZNA67 dehnen die Frequenzobergrenze auf 50 GHz bzw. 67 GHz aus. Mit Frequenzkonvertern der Serie R&S®ZCx dringt der R&S®ZNA sogar in den THz-Bereich vor, was auch schon mit den bisherigen Modellen möglich war (siehe NEUES 223).

Die einzigartige Hardwareplattform ist mit bis zu vier internen kohärenten Signalquellen ausgestattet, plus einer fünften, die als Lokalszillator für Messungen mit Frequenzkonvertern und Mischern dient. In Kombination mit bis zu acht echt parallelen Messempfängern ist diese



Hardwarearchitektur die ideale Basis für anspruchsvolle Messungen an Komponenten und Modulen im Aerospace&Defense-Sektor und im Mobilfunk (5G, 6G). Auch Signalintegritätsmessungen an differenziellen Leitungen bis 67 GHz – mit vier angeschlossenen R&S®ZCx-Konvertern auch darüber hinaus – sind ein Anwendungsfeld der neuen Modelle.

Rauschzahlmessung leicht gemacht

Die Charakterisierung von Low-Noise-Verstärkern (LNA) erfordert neben der Messung der S-Parameter auch die Ermittlung der Rauschzahl. Vor allem wenn die Messung mit einem Wafer Prober erfolgt, ist die Ermittlung aller Messgrößen mit der gleichen Kontaktierung der Messspitzen sinnvoll. Die Rauschzahl wird dann mit dem Netzwerkanalysator in der Kalibrierebene direkt am DUT ermittelt. Eine neue Firmware-Erweiterung für die Modelle R&S®ZNA26 und R&S®ZNA43 unterstützt diese Messung (Bilder 1 und 2). Sie führt den Anwender durch Kalibrierung und Messablauf und nimmt alle erforderlichen Einstellungen weitgehend automatisch vor. Die Rauscheigenschaften des Analysators, die für die Messung bekannt sein müssen, sind in der Gerätefirmware hinterlegt. Nach Eingabe eines Schätzwerts für die LNA-Verstärkung hat der R&S®ZNA alle Informationen, die er für die Messung braucht.

Diese lässt sich durch ergänzende Maßnahmen und Ausstattungsoptionen an das Messobjekt anpassen. So ist oft ein Vorverstärker notwendig, vor allem bei kleinem LNA-Verstärkungsfaktor und niedriger Rauschzahl. Wurde ein solcher zusammen mit den eventuell notwendigen Filtern eingerüstet, kann die Firmware darauf zugreifen.

Die Option Source Monitor erlaubt den internen Abgriff des Sendesignals vor der Quelltoreichleitung, was zu einem besseren

Signal-Rausch-Abstand und dadurch zu einer kürzeren Messzeit führt. Empfangsseitig lässt sich durch Umstecken der Metallbügel an der Gerätefrontseite der interne Koppler „drehen“, was eine Verbesserung der Empfängerrauschzahl des Analysators um 10 dB zur Folge hat. Insbesondere bei niedrigen Frequenzen wird so außerdem die erhöhte Kopplerdämpfung (roll-off) umgangen.

Entscheidend ist, dass während der Kalibrierung und auch der Messung alle Komponenten in der Signalkette im linearen Bereich sind und keine

Kompressionseffekte auftreten. Die Firmware-Erweiterung stellt das durch Berechnung eines „Link-Budgets“ und Berechnung der richtigen Quelltorleistung sicher. Auch gibt sie Empfehlungen für einen optimierten Messaufbau, falls dadurch Geschwindigkeitsvorteile erzielt werden. Zusätzlich kann der Anwender ein toleriertes Messkurvenrauschen vorgeben und darüber die Messzeit beeinflussen, wofür der Netzwerkanalysator die passenden Detektorzeiten ermittelt.

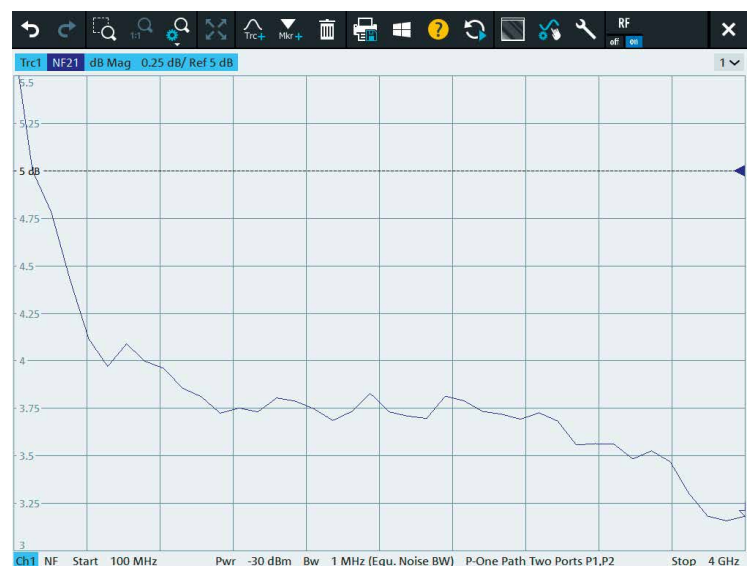
So wird Rauschzahlmessung leicht gemacht.

Andreas Henkel

Bild 1: Einstellmenü der Rauschmessung. Sind wie in diesem Fall Optionen wie Vorverstärker und Source Monitor installiert, werden sie eingebunden.



Bild 2: Ergebnis einer Rauschzahlmessung mit dem R&S®ZNA26 oder R&S®ZNA43.



DE-EMBEDDING LEICHT GEMACHT

Effektives Arbeiten mit dem Vektornetzwerkanalysator

De-Embedding, das Herausrechnen von Steckern, Zuleitungen und Adaptern aus einem Messaufbau, ist ein seit langem gängiges Verfahren. Im Mikrowellenbereich, wo sich solche nicht zum Messobjekt gehörenden Komponenten besonders störend bemerkbar machen, wird das Verfahren immer wichtiger. Gleich vier alternative Algorithmen für Netzwerkanalysatoren von Rohde & Schwarz erleichtern die Arbeit des Schaltungsdesigners jetzt wesentlich.

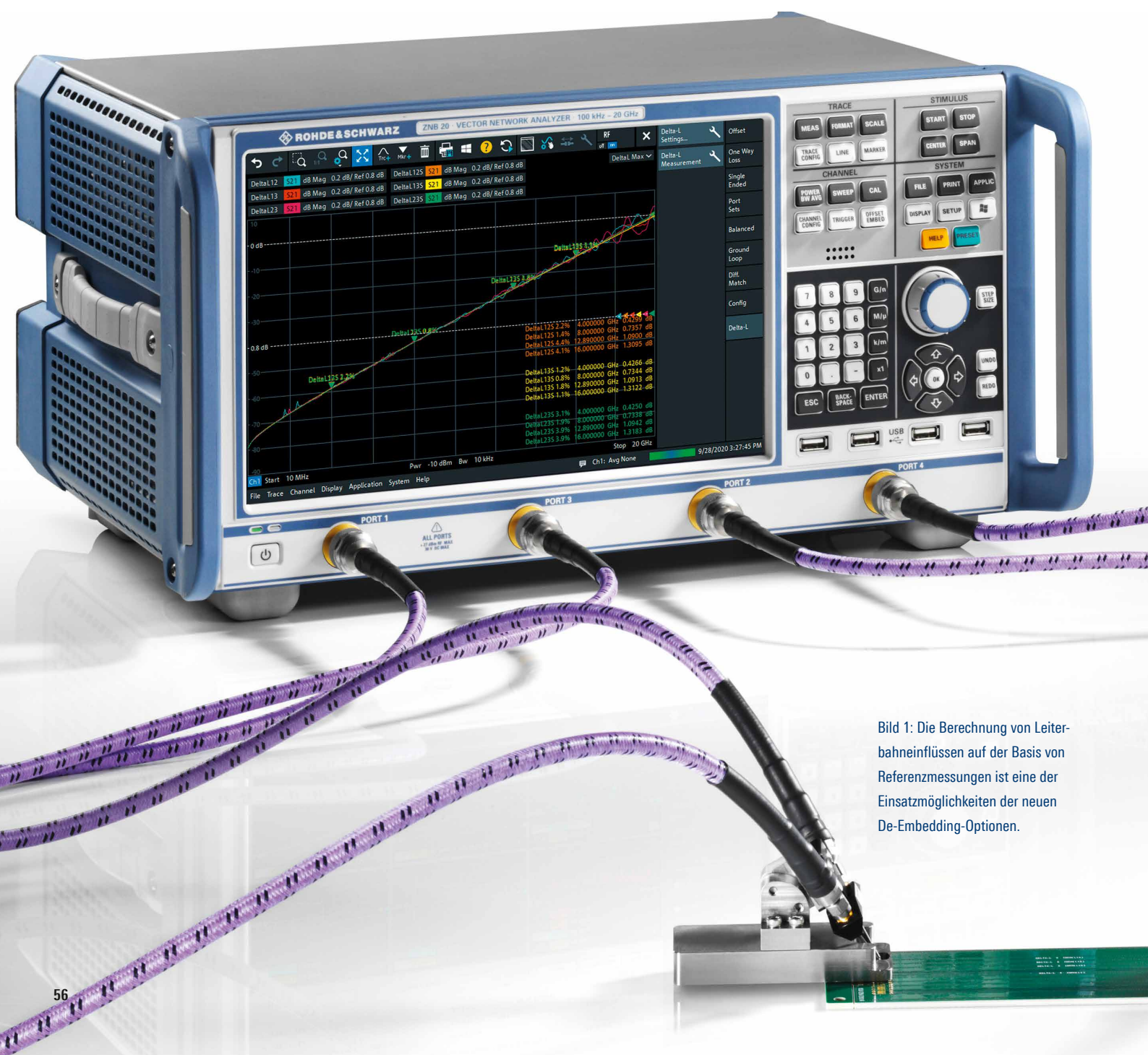


Bild 1: Die Berechnung von Leiterbahneinflüssen auf der Basis von Referenzmessungen ist eine der Einsatzmöglichkeiten der neuen De-Embedding-Optionen.

Die HF-Kommunikationssysteme der nächsten Generation werden Datenraten im mehrstelligen Gigabit/Sekunde-Bereich und Frequenzen weit jenseits von 20 GHz verarbeiten. Bei derart hochfrequenten Signalen sind die Baugruppenspezifikationen eng toleriert. Zusätzlich verursachen die Mikrowellenfrequenzen mit ihrer Wellenlänge in der Größenordnung der Komponentenabmessungen Störeffekte in nicht vernachlässigbarer Höhe an Messadaptern, Kabeln, Steckern und Leitungsbahnen. Wie kann dem messtechnisch begegnet werden?

De-Embedding mit Software-Algorithmen

Vektornetzwerkanalysatoren (VNA) sind das bevorzugte Mittel, um das Übertragungsverhalten von HF-Komponenten präzise zu messen und in Form von S-Parametern zu beschreiben. Präzise Messungen setzen aber voraus, dass die gesamte Messvorrichtung bis hin zum Messobjekt übertragungstechnisch

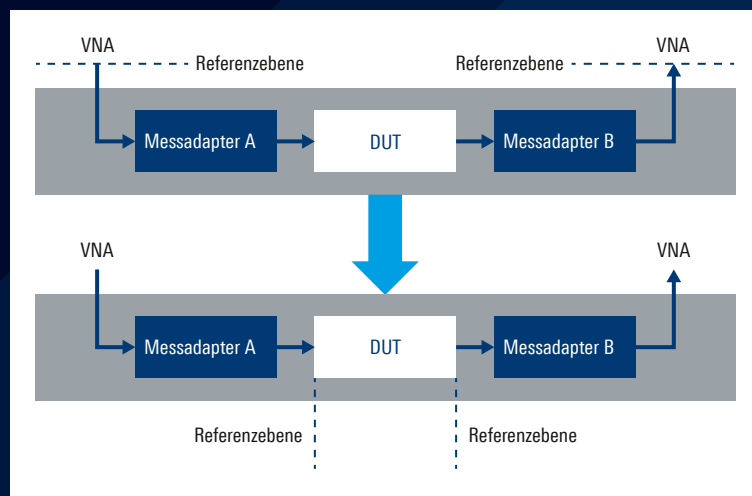
charakterisiert ist, weil nur dann die isolierten Eigenschaften des DUTs korrekt erfasst werden können. Insbesondere bei integrierten Schaltungen ist das nicht trivial, etwa bei einem Analogbaustein, der nicht direkt kontaktiert werden kann, weil er auf eine Leiterplatte gelötet ist. Die Verbindung zum VNA erfolgt dann, sofern die Platine nicht über Koaxialanschlüsse verfügt, über einen Messadapter (Test fixture). Deswegen HF-Übertragungseigenschaften sowie die Eigenschaften der Signalleitungen auf der Platine bis zum DUT sind aus der Messung rechnerisch zu eliminieren. Dazu dienen die neuen Software-Optionen.



Was ist De-Embedding?

Bei der Charakterisierung des HF-Übertragungsverhaltens eines Messobjekts muss sichergestellt sein, dass alle Bestandteile des Messaufbaus zwischen dem Netzwerkanalysator (VNA) und dem Messobjekt messtechnisch neutralisiert werden, damit sie die Messung nicht verfälschen. Dazu wird die Referenzebene des VNA, bis zu der dieser vollständig kalibriert ist und die physisch am Außenleiterende seiner Koaxialanschlüsse liegt, rechnerisch zum Messobjekt hin verschoben. Um den Messaufbau außerhalb des VNA in die Kalibrierung einbeziehen zu können, müssen seine S-Parameter bekannt sein. Sofern alle Teile durchgehend über Koaxialleitungen und -anschlüsse verbunden sind, ist deren Messung kein Problem. Anders verhält es sich, wenn der Leitungstyp wechselt oder die letzte Teilstrecke bis zum DUT nicht zugänglich ist. Dann sind auf Referenzmessungen gestützte gute Schätzungen nötig, wie sie die vorgestellten De-Embedding-Algorithmen liefern.

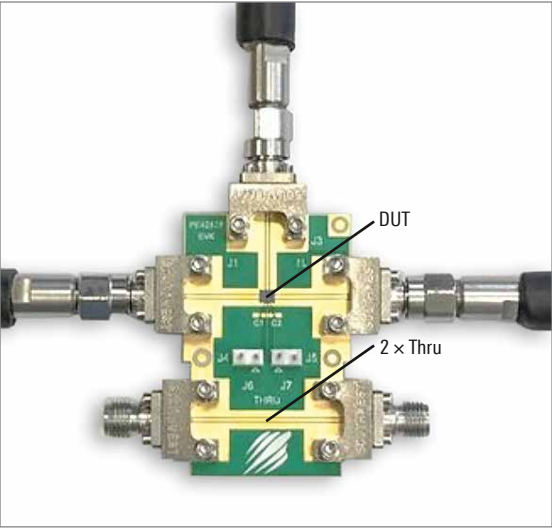
Verschiebung der kalibrierten Referenzebene im De-Embedding-Prozess.



Die Vorgehensweise ist wie folgt:

Der Testingenieur misst zunächst die S-Parameter der Referenzstrecke auf einem sogenannten Test-Coupon (Bild 2 unten), der die zu de-embeddenden Komponenten enthält, beispielsweise den Koaxial-auf-Koplanar-Übergang und ein Stück Leitung. In der Regel, weil für die Messgenauigkeit vorteilhaft, konstruiert man einen 2 × Thru-Standard aus symmetrischer

Bild 2: Musterhafter Test-Coupon mit 2 × Thru-Aufbau. Die zu de-embeddenden DUT-Zu- und Ableitungen sind als Referenzstrecken auf der selben Platine wie das eigentliche Messobjekt angeordnet, sodass übertragungstechnisch identische Verhältnisse gegeben sind – eine Voraussetzung für genaues De-Embedding.



Zu- (Fixture A) und Ableitung (Fixture B) zum und vom DUT. Anschließend werden im zweiten Schritt die S-Parameter der Strecke inklusive DUT gemessen (Bild 2 oben). Beide Messergebnisse werden einem Softwarealgorithmus übergeben, der daraus die Übertragungseigenschaften des „nackten“ DUTs berechnet.

Die Qualität des De-Embedding-Prozesses ist nur so gut wie die der Messvorrichtung und des Test-Coupons. Auch setzt der Algorithmus voraus, dass die elektrischen Eigenschaften von Referenzstrecke und Messstrecke mit DUT identisch sind. Auf einer Leiterplatte lässt sich das einfach einrichten (Bild 2).

Einfacher Workflow voll integriert in die VNA-Bedienoberfläche

Bei den mit den Softwareoptionen verbundenen Algorithmen handelt es sich um industrieweit anerkannte Verfahren (Bild 3). Während die drei ersten Optionen im Wesentlichen funktionsgleich sind und alternativ verwendet werden können, charakterisiert das Delta-L-Verfahren die frequenzabhängige Dämpfung von Hochfrequenzleiterplatten in dB pro Inch und berechnet

Bild 3: Leistungsumfang der Optionen.

	Eazy De-Embedding (EZD) Option R&S®ZNx-K210	In-Situ De-Embedding (ISD) Option R&S®ZNx-K220	Smart Fixture De-Embedding (SFD) Option R&S®ZNx-K230	Delta-L PCB Characterizing (Delta-L) Option R&S®ZNx-K231
Unterstützte Messobjekte				
Alle DUTs mit nicht standardisierten Anschlüssen (ohne Cal-Kit) und anschlusslose DUTs	•	•	•	–
Workflow ohne / mit Impedanzkorrektur	• / –	Geplant / •	Geplant / •	– / –
Zwei- und Viertor-Topologien	•	•	•	–
PCB-Leitungen (quasi-ideal, keine Durchkontaktierung)	•	•	•	•
Unterstützte Testcoupon-Strukturen (unsymmetrisch und differenziell)				
2 × Thru	•	•	•	–
1 × Open + 1 × Short	–	•	•	–
1 × Open	–	•	•	–
Delta-L-Coupons mit 1 L, 2 L oder 3 L	–	–	–	•
Methoden und Ergebnisse				
Messungen	Alle	Alle	Alle	Loss / inch
Volles De-Embedding	•	•	•	–

im Gegensatz zu den anderen Optionen nicht alle Streuparameter des Einbettungsnetzwerks. Intel empfiehlt diese Vorgehensweise bei Messungen an Leiterplatten für seine Hochgeschwindigkeitsbausteine (Bilder 1 und 5).

Alle Optionen verwenden einen einfach zu bedienenden Workflow (Bild 4), der in die Bedienoberfläche des VNA integriert ist. Der Anwender wird schnell und zielgerichtet durch die notwendigen Messschritte geführt. Nicht nötig sind der Export oder Import der

ermittelten De-Embedding-S-Parameter, ein großer Anwendungsvorteil der integrierten Lösung.

Die De-Embedding-Optionen sind auf allen Top- und Mittelklasse-VNA-Modellen von Rohde & Schwarz lauffähig: R&S®ZNA, R&S®ZNB, R&S®ZNB-T und R&S®ZND. Mit ihnen lassen sich nun auch die Einflüsse von Messvorrichtungen eliminieren, die das Messobjekt über nicht koaxiale Anschlüsse kontaktieren. Sie eignen sich sowohl für unsymmetrische als auch für differenzielle Messobjekte.

Mathias Leutiger

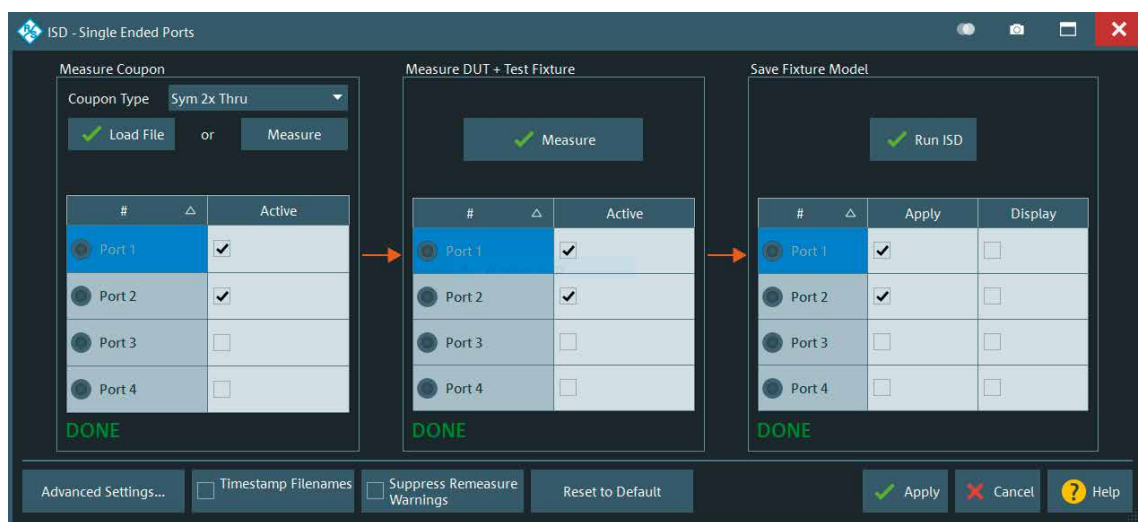


Bild 4: Menü einer De-Embedding-Option am Beispiel der R&S®ZNB-K220. Nach einem nur dreistufigen Ablauf ist der Vorgang durchgeführt.

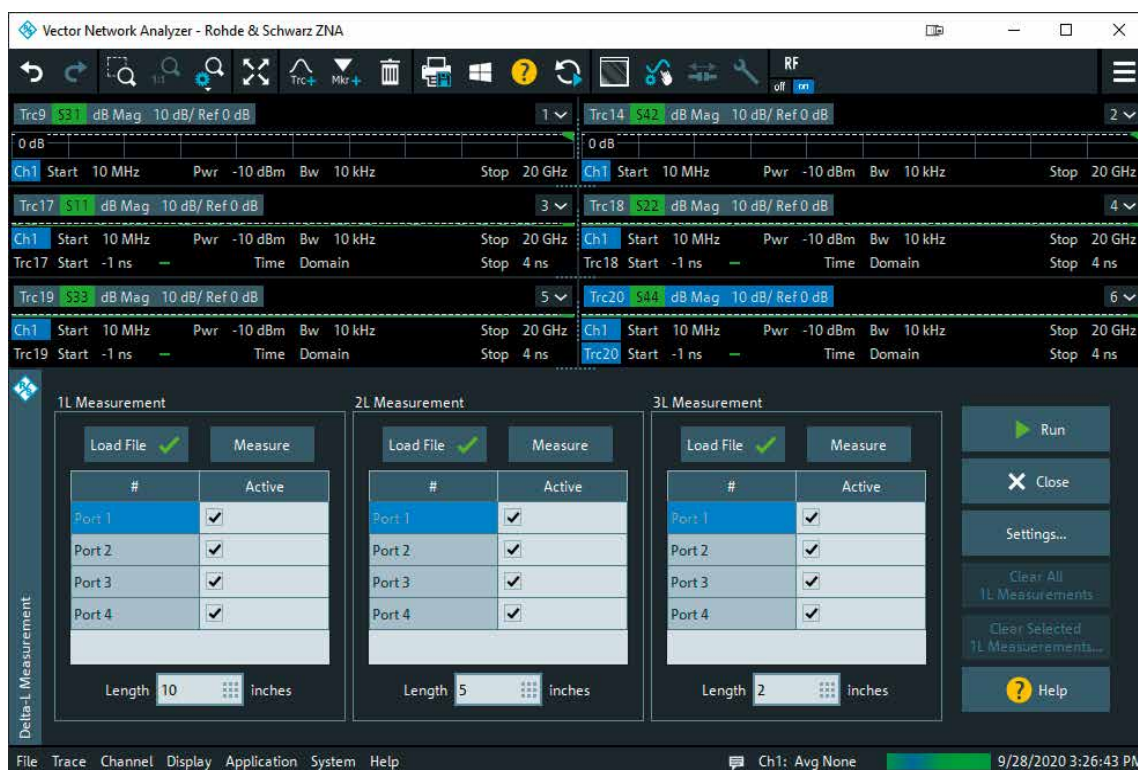


Bild 5: Das von Intel empfohlene Verfahren Delta-L PCB Characterizing (Option R&S®ZNB-K231) dient zum Vermessen und De-Embedden von Leitungstrecken auf Platinen.

HOCH HINAUS

Mikrowellen-Zweitor-
Netzwerkanalyse mit
allen S-Parametern
im Handheld-Format

Für den Außeneinsatz an HF-Sende- und Empfangsanlagen bot das Rohde&Schwarz-Programm bisher die Wahl zwischen den Modellen R&S®ZPH (bis 4 GHz) und R&S®ZVH (bis 8 GHz)*. Der R&S®ZNH erweitert das Duo zum Tripel. Und den messbaren Frequenzbereich auf bis zu 26,5 GHz. Damit gehören Messungen an Radar-, Richtfunk- und Satelliten-Anlagen zum Standard-Repertoire des neuen Handhelds, seien sie stationär oder auf einem Schiff oder Fahrzeug installiert. Aufgrund seiner herausragenden HF-Eigenschaften wie einem Dynamikbereich von typ. 100 dB, einer Ausgangsleistung bis 0 dBm und einem Nebenaussendungspegel von nur 0,0025 dB RMS fallen auch diverse Aufgaben in einer Entwicklungs-, Produktions- oder Serviceumgebung in seine Lösungskompetenz.

Der R&S®ZNH ist der erste Zweitor-Vektornetzwerkanalysator der Handheld-Modellreihe. Mit seiner Vier-Empfänger-Architektur kann er nicht nur alle vier S-Parameter messen, sondern auch fortschrittliche Kalibrierverfahren wie UOSM (Unknown Through, Open, Short, Match) nutzen, was sich zum Beispiel bei unterschiedlichen Anschlusstypen am Ein- und Ausgang des Messobjekts als hilfreich erweist. Alle üblichen Eintor-Messungen an Antennen und Kabeln wie die Kabelfehlstellen-Ortung sind natürlich ebenfalls möglich.

Produktivität im Fokus

Ein Gerät für den mobilen Produktiveinsatz muss handlich und schnell konfigurierbar sein. Der R&S®ZNH kommt im selben Kompaktgehäuse wie seine Geschwister und teilt deren bewährte Bedienung, die wahlweise über den kapazitiven 7"-Touchscreen, der auch Gesten versteht, oder Hardwaretasten erfolgt. Ein Messassistent verhilft unerfahrenen Nutzern zu korrekten Einstellungen, die sich zu automatisch ablaufenden, standardisierten Testsequenzen kombinieren lassen.

Ein wichtiger Aspekt beim Feldeinsatz ist die Fernbedienbarkeit. Nicht alle qualifizierten Ingenieure sind auch qualifizierte Kletterer. Möglicherweise muss ein Ingenieur am Boden dem Helfer am Mast oder Turm für jeden Messschritt Anweisungen geben. Solche Workarounds sind bei der Arbeit mit dem R&S®ZNH überflüssig. Angeschlossen an einen (mobilen) WLAN-Router lässt sich das Gerät über Browser auf einem Tablet genauso bedienen wie am Gerät selbst.

* Die Modelle werden ergänzt durch die Handheld-Spektrumanalysatoren R&S®FPH und R&S®FSH. Letzterer ermöglicht zusätzlich auch Messungen an modulierten Signalen.

Individuelle Ausstattung

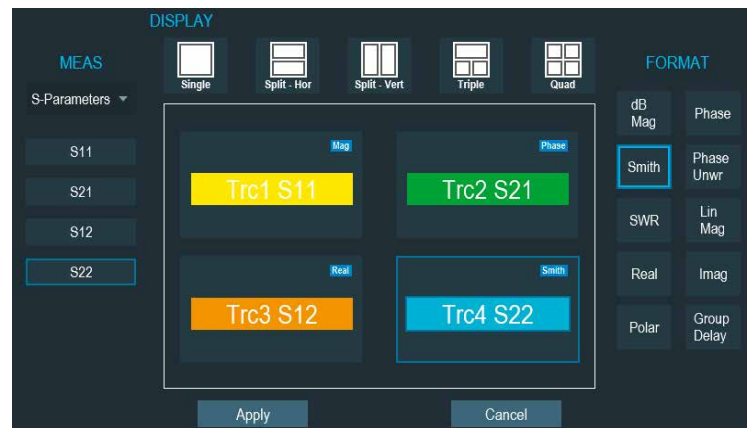
Da vor Ort in der Regel nicht nur die Antennen und Kabel zu testen sind, sondern auch Filter, Weichen und Verstärker, bringt der R&S®ZNH alles mit, was dafür benötigt wird. Funktionen, die über die standardmäßige Zweitor-VNA-Ausstattung hinausgehen, sind unabhängig voneinander bestell- und per Keycode freischaltbar:

- Unterstützung von Abschluss-, Durchgangs- und optischen Leistungsmessern. Mit deren Hilfe lassen sich Sendeleistung und Anpassung bzw. die optische Signalzuführung zum CPRI einer Basisstation untersuchen.
- Eine Pulsmessoption ermöglicht detaillierte Analysen an Radar- und Richtfunkanlagen.
- Am Mast montierte Verstärker (TMA) werden üblicherweise über das HF-Kabel mit Strom versorgt. Das kann der R&S®ZNH übernehmen.
- Ein Vektorvoltmeter liefert Amplitude und Phase auf einer festen Frequenz – eine Messfunktion, die beispielsweise bei Arbeiten an phasengesteuerten Gruppenantennen zum Einsatz kommt; Signalquelle und Messbrücke dafür sind aktivierbar an Bord.
- Die vier phasenkohärenten Empfänger des R&S®ZNH können dazu genutzt werden, über die S-Parameter hinaus zwei weitere Parametersätze über Wellengrößen und deren Verhältnisse zu ermitteln. Auf ihrer Basis kann der R&S®ZNH etwa als frequenzselektiver Leistungsmesser arbeiten oder zum Justieren zweier Kanäle einer Phasenantenne dienen.

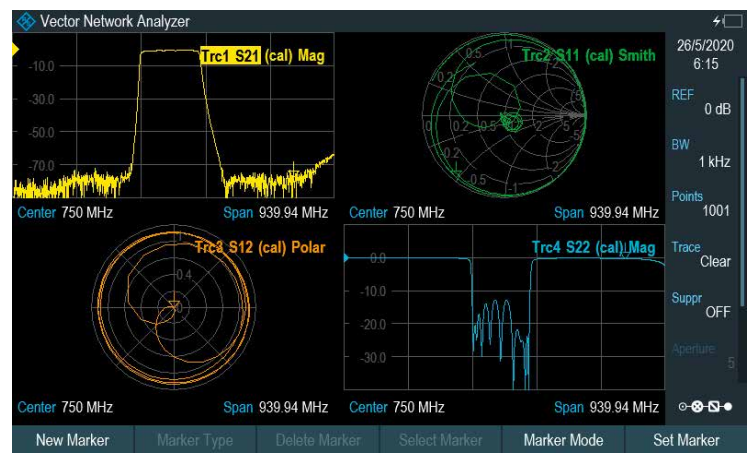
Mit dem R&S®ZNH gehen alle Installations- und Wartungsarbeiten an Antennenanlagen bis in den Mikrowellenbereich leicht von der Hand. Aber auch als Labor-Allrounder kann das Handheld-Gerät in vielen Fällen einen stationären Netzwerkanalysator ersetzen.

Stefan Stahuber

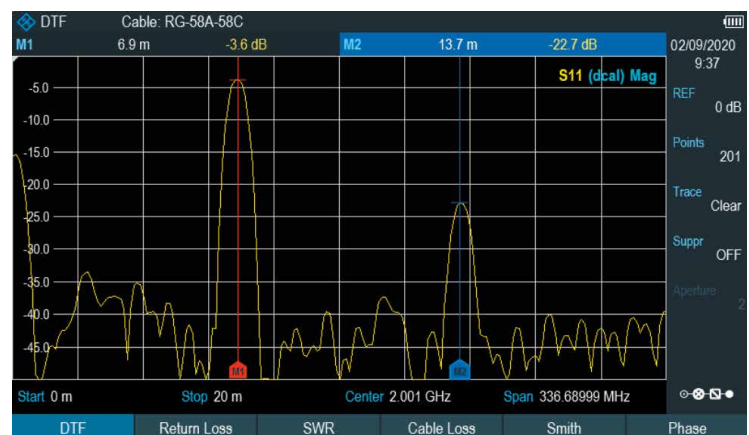
Komfortable Einstellung der S-Parameter und deren Darstellung.



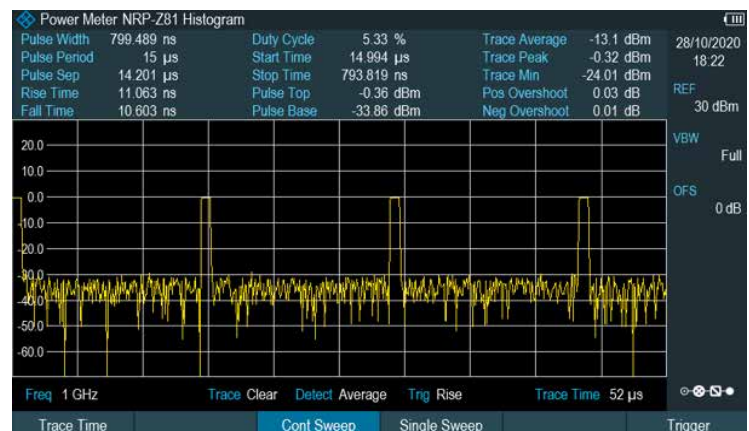
Das Quad-Display zeigt alle S-Parameter gleichzeitig.



Natürlich gehört auch die Fehlstellenortung zu den Kabelmessfunktionen.



Mit der Pulsmessoption lässt sich die Pulscharakteristik und Ausgangsleistung von Radarsendern kontrollieren.



POWER-RIEGEL

Leistung ist im Mikrowellenbereich ein Dauerthema. Oft hat man zu wenig davon. Wie gut, dass es handliche Universal-Booster wie den neuen R&S®SAM100 gibt.

In Messaufbauten für den Mikrowellenbereich, insbesondere solche mit langen Kabelstrecken und vielen Koaxialübergängen im Signalweg, geht zwischen Quelle und Senke oft mehr Leistung verloren, als es dem Messingenieur lieb ist. Dann müssen Workarounds gefunden werden, um den Aufbau mit genügend Reserve betreiben zu können. Solche Kniffe sind zukünftig in den meisten Fällen überflüssig. Dafür sorgt der kleine Breitbandverstärker R&S®SAM100. Mit seiner Ausgangsleistung von bis zu 20 W kann er den Signalpegel zwischen 2 GHz und 20 GHz so weit anheben, dass auch für komplexe Setups genügend HF-Leistung zur Verfügung steht. Dank herausragender Linearität und sehr guten Rauscheigenschaften eignet er sich als kompakter Systemverstärker in allen

möglichen Messaufbauten und Systemkonfigurationen. Er ist eine hochwertige Alternative zu Röhrenverstärkern und zu Multifrequenzbandsystemen aus parallel geschalteten Einzelverstärkern.

Unzählige Anwendungen

Entwicklungsingenieure setzen den R&S®SAM100 für Produkt- und Design-Validierungstests (PVT / DVT) im Labor ein, um beispielsweise Mikrowellenmischer, Filter, Empfänger und Antennen zu entwickeln, zu testen und zu spezifizieren. In Messschaltungen mit Generatoren, Spektrum- oder Netzwerkanalysatoren wirkt die kleine Box als Booster für die Messsignale. Systemintegratoren und

Der Breitbandverstärker R&S®SAM100 ist eine perfekte Kombination aus hoher Leistung, großer Bandbreite und niedrigem Rauschen.



Testingenieure integrieren die Einschubversion in automatische Produktionstestsysteme, wo bis zu drei Exemplare nebeneinander im 19"-Gestell Platz finden. Der Einbau in PXI-Rahmen ist ebenfalls möglich. Dank seiner Kompaktheit ist der R&S®SAM100 aber nicht auf den stationären Betrieb festgelegt. In der Desktop-Version mit abgesetztem Netzteil ergeben sich beliebige weitere Anwendungen mit dem Vorteil, die HF-Leistung mit kurzen Kabellängen direkt an das Testobjekt bringen zu können.

Modernste Technologie

Das Schaltungsdesign auf Basis neuester GaN-HEMT-Technologie sowie Hochleistungskühlkörper mit Heatpipe ermöglichen Leistungen bis 20 W mit einer sehr geringen Rauschleistungsdichte von < -110 dBm (1 Hz) bei einer Bandbreite von einer Dekade. Direkt auf die Leiterplatten gebondete Halbleiter-Dies führen zu einer hohen Leistungsausbeute und vermeiden parasitäre Effekte. Ein optimaler Class-A-Arbeitspunkt sorgt für ausgezeichnete Linearität über den gesamten Frequenzbereich. Mit seiner niedrigen Rauschzahl im Verhältnis zur Bandbreite und der hohen Verstärkung verbessert der R&S®SAM100 die Rauschzahl und den Dynamikbereich des Systems, in dem er eingesetzt wird, erheblich.

Hohe Betriebssicherheit

Integrierte Schutzschaltungen schützen vor Übertemperatur und Fehlanpassung am HF-Ausgang. Bis zu einem VSWR von 2 steht die volle Ausgangsleistung zur Verfügung, darüber regelt der Verstärker zum Selbstschutz schrittweise ab. Um konstante Anschlussbedingungen zu gewährleisten, sind die HF-Ein- und -Ausgänge als Opferadapter ausgeführt, die bei Verschleiß einfach ausgetauscht werden können. Die Buchsen ermöglichen den Anschluss von 2,92-mm- und 3,5-mm-Steckverbindern.

Latenzarmer Schaltbetrieb

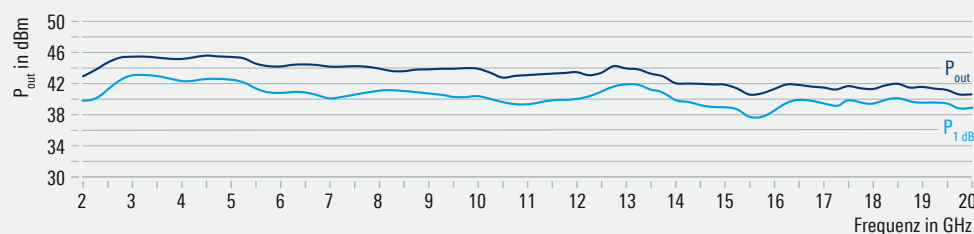
Für den Laboreinsatz genügt der Netzschalter am Gerät. Status-LEDs signalisieren den Betriebszustand. Die Fernsteuerung im Systembetrieb erfolgt über eine digitale Schnittstelle, die über einen 9-poligen Sub-D-Stecker kontaktiert wird. Sie übermittelt alle relevanten Steuer- und Statussignale und enthält auch Leitungen für die Interlock- und Mute-Funktionen. Ist der R&S®SAM100 in eine Interlock-Schutzschleife eingebunden, wird das HF-Signal im Unterbrechungsfall innerhalb von Mikrosekunden deaktiviert. Im Gegensatz dazu dient der Mute-Kontakt zur gewollten schnellen An- und Abschaltung über ansteigende bzw. fallende Signalfanken.

Der R&S®SAM100 ist das erste Modell der neuen Systemverstärker-Familie R&S®SAM, weitere Modelle sind in Vorbereitung.

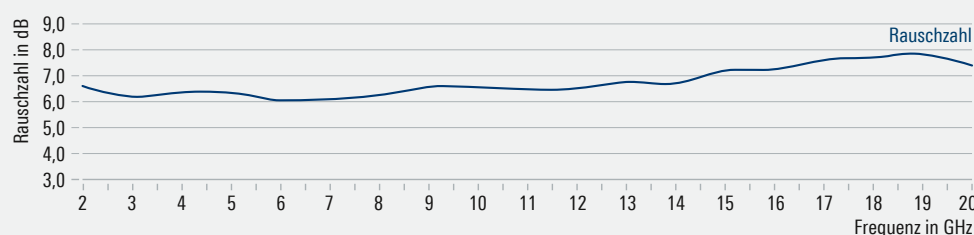
Michael Hempel, Harald Specker



HF-Ausgangsleistung in dBm



Rauschzahl in dB





VERNETZTES MESSLABOR – ABER SICHER!

Laborübergreifende Vernetzung und der Fernzugriff auf Messapplikationen sind nicht erst seit Corona zu Merkmalen einer modernen Entwicklungsumgebung geworden. Mögliche Sicherheitsvorbehalte, die einer größeren Verbreitung bisher entgegenstanden, werden durch einen neuen, ganzheitlichen Ansatz ausgeräumt.

OT vs. IT

Messgeräte und Testsysteme bieten schon seit Jahrzehnten Schnittstellen zur Fernsteuerung und Messdatenübertragung. In den letzten Jahren hat sich die IP-basierte Ethernet-Vernetzung als Industriestandard etabliert, sodass die vorhandene Unternehmens-IT-Infrastruktur dafür genutzt werden kann. Moderne Messtechnikprotokolle wie VXI-11 und HiSLIP setzen darauf auf.

Was nun aus OT-Sicht (Operation Technology) durch die problemlose Handhabung Vorteile bringt, bereitet der Unternehmens-IT unter Sicherheitsaspekten Kopfzerbrechen. Denn als gängige Praxis wird eine Messtechnik-Applikation an das normale Liegenschaftsnetz angeschlossen. Über die vorhandene IT-Infrastruktur erhalten die Geräte IP-Adresse und Netzwerkzugriff, ohne dass darüber

hinaus besondere Sicherheitsvorkehrungen getroffen würden. Natürlich sind die Hausnetze größerer Unternehmen in der Regel professionell aufgesetzt und durch Virens Scanner und Firewalls geschützt. Dass die Schutzwirkung solcher Maßnahmen aber Grenzen hat, zeigen erfolgreiche Angriffe mit Cyberschädlingen wie WannaCry, Conficker und NotPetya. Ein einzelner befallener Datenträger oder eine infizierte Maschine, die in das System eingebracht wird, genügen, um die Misere auszulösen. Die Folgen können bedrohlich sein, wenn Compliance-Messsysteme oder Produktionsumgebungen betroffen sind und ein Unternehmen deshalb keinen Output mehr erzielt. Totale Abschottung ist aber keine Lösung, zumal der Bedarf nach standortübergreifender Vernetzung auch für messtechnische Einrichtungen und Applikationen stetig zunimmt. Die Lösung läuft deshalb auf eine strikte Datenflusskontrolle

hinaus, bei der die Kommunikation aller vernetzten Komponenten permanent und Datenpaket für Datenpaket auf Regelkonformität überwacht wird. Das gelingt nur mit einem ganzheitlichen Ansatz über alle Netzwerk- und Protokollschichten hinweg. Und führt zur Unified Firewall der neuesten Generation als Secure Application Gateway, das speziell für den Einsatz im T&M-Umfeld entworfen wurde.

Die Unified Firewall als zentrale Datenfluss-Kontrollinstanz im vernetzten Messlabor

In der Industrie steht die Stabilität und Ausfallsicherheit der betriebswichtigen Mess- und Steuerungstechnik im Vordergrund. Die IT-Sicherheit wurde demgegenüber in der Vergangenheit oft nachrangig behandelt oder hielt einer kritischen Prüfung nicht stand. Nachdem das OT-Personal, das an isolierte, proprietäre Mess- und Steuerungssysteme gewöhnt war, sich

aufgrund der technischen Entwicklung mit IP-basierter Netzwerktechnik auseinandersetzen musste, konnten kulturelle Irritationen nicht ausbleiben. Entweder hatte sich ein Netzwerkexperte mit unbekannten Maschinen und Applikationen vertraut zu machen oder ein Testprofi mit fremdartigen Netzwerkarchitekturen und IT-Sicherheitskonzepten. Da die Betriebsmittel in der Regel nicht über ausgeprägte Sicherheitsarchitekturmerkmale verfügten, musste die IT-Sicherheit durch externe Maßnahmen nachgerüstet werden, im Zweifel mit einer veralteten oder aufwendig zu konfigurierenden Firewall.

Frühere Paketfilter-Firewalls nutzten lediglich den Header des Datenpakets, um anhand der Zieladresse den Zugang über Ports zu erlauben oder zu blockieren. Anwendungen wurden also nicht über ihren Inhalt, sondern lediglich über den Zielport der Pakete identifiziert. Deshalb ließen sich Software-Applikationen nicht ohne Weiteres von Trojanern unterscheiden.

Auch die Administration solcher Legacy-Firewalls über ein komplexes tabellarisches Regelwerk ist aufwendig, fehleranfällig und erfordert eine kundige Hand.

Firewalls der neuesten Generation (Bild 5) hingegen sind auch gegen perfide Angriffsmuster gewappnet. Nach dem Motto „Vertrauen ist gut, Kontrolle ist besser“ werten sie nicht nur den Header aus, sondern filtern mittels Deep Packet Inspection Informationen aus den transportierten Daten und dem Kommunikationsmuster der aufgebauten Verbindung. Damit nutzen sie den Datenstrom ganzheitlich, um die Zielapplikation verlässlich zu identifizieren.

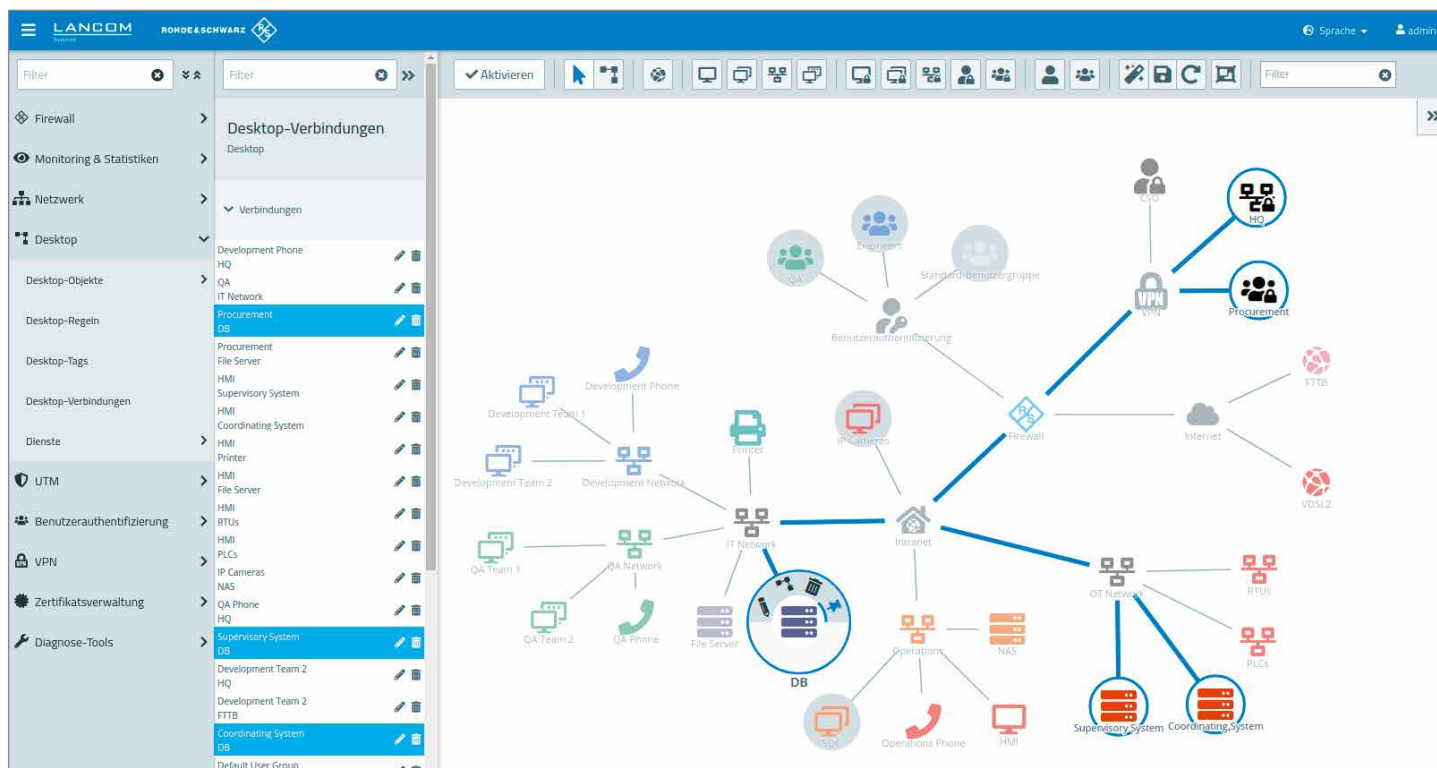
Jedes Datenpaket wird zudem einer aktiven Session zugeordnet (Stateful-Firewall-Prinzip) und verworfen, wenn es Anzeichen für ein inkonsistentes Kommunikationsverhalten gibt. Darüber hinaus lassen sich Standarddateien (pdf, docx, etc.) sowie Makros und Executables, die einen

Zero-Day-Exploit ausnutzen könnten, zunächst in einer abgeschlossenen Testumgebung ausführen und analysieren (Sandboxing), sodass Schadsoftware nicht ins Produktivnetz gelangt.

Das applikationsbasierte Filtern und Routen der Datenströme durch eine moderne Firewall macht es möglich, Netze für dedizierte Anwendungen sehr sicher auszulegen. Denn je besser sich die zu übertragenden Datenstrukturen und -inhalte kategorisieren lassen, desto leichter ist es, alle übrigen auszugrenzen und zu verbieten. In einem konsequent für Messtechnik ausgelegten Netz sind nur Datenverkehre möglich, die auf messtechnischen Protokollen und typischen Daten wie SCPI-Fernsteuerbefehlen basieren.

Ein solches messtechnisches (Sub-)Netz ist durch Unbefugte selbst bei bekannter IP-Adresse und offenem Internet-Zugang nicht korrumpierbar. Der operative und administrative

Bild 1: Die Bedienoberfläche der Unified Firewall visualisiert sämtliche Funktionen zur Netzkonfiguration und Definition der Filterregeln. Befehlszeilen und Tabellen haben ausgedient.



Zugriff auf die Netzwerkkomponenten unterliegt sicheren Authentifizierungs-Mechanismen. Für die lokale rollenbasierte Nutzerauthentifizierung wie auch für den Fernzugriff über einen VPN-On-Demand-Tunnel können vorhandene AD-LDAP-Server problemlos angebunden und genutzt werden.

Dank der zentralen Rolle der Firewall als „Türhüter“ ist das messtechnische Teilnetz vom Unternehmensnetzwerk leicht isolierbar. Je nach Konfiguration nimmt die Firewall eine weitergehende Segmentierung in kleinere Einheiten vor, etwa in ein Geräte-Subnetz, das nur Messgeräte umfasst, und ein Applikations-Subnetz mit den Rechnern, auf denen messtechnische Software läuft. Diese Segmentierungstechnik erlaubt es auch, ein Gerät für die Zeit einer Fernwartung in ein Quarantäne-Netz zu verschieben, und das innerhalb von Sekunden!

Der Weg zum sicheren Netz

Die Einrichtung der Unified Firewall erfolgt offline über ein modernes

Web-Interface und einen aktuellen Webbrowser (Bild 1). Dank der grafischen Abstraktion von Netz und Regelwerk auf einem Dashboard geht die Konfiguration schnell und sicher von der Hand.

Bild 2 zeigt den grundlegenden Aufbau eines so vernetzten Messlabors. In dieser Referenzkonfiguration sind das messtechnische Gerätenetz, das Netz für Labor-PCs und Applikationsdienste sowie das übergeordnete Hausnetz strikt voneinander getrennt. Alle Datenverbindungen sowohl innerhalb des Messtechnik-Subnetzes wie auch nach außen laufen über die Firewall und das dort hinterlegte Regelwerk. Um das zu gewährleisten, folgt der Netzaufbau einer Sterntopologie. Alle Komponenten sind entweder direkt oder indirekt (z. B. über einen Switch) mit der und über die Firewall als zentralem Knotenpunkt verbunden.

Das Regelwerk umfasst statische und dynamische Verbindungsregeln. Eine statische Regel wäre zum Beispiel die Festlegung, dass der Laborrechner

einen Ping ins Gerätenetz senden und die Antwort empfangen darf. Ping-Anfragen von anderen Quellen, insbesondere von außerhalb des Messgerätenetzes, würden abgewiesen.

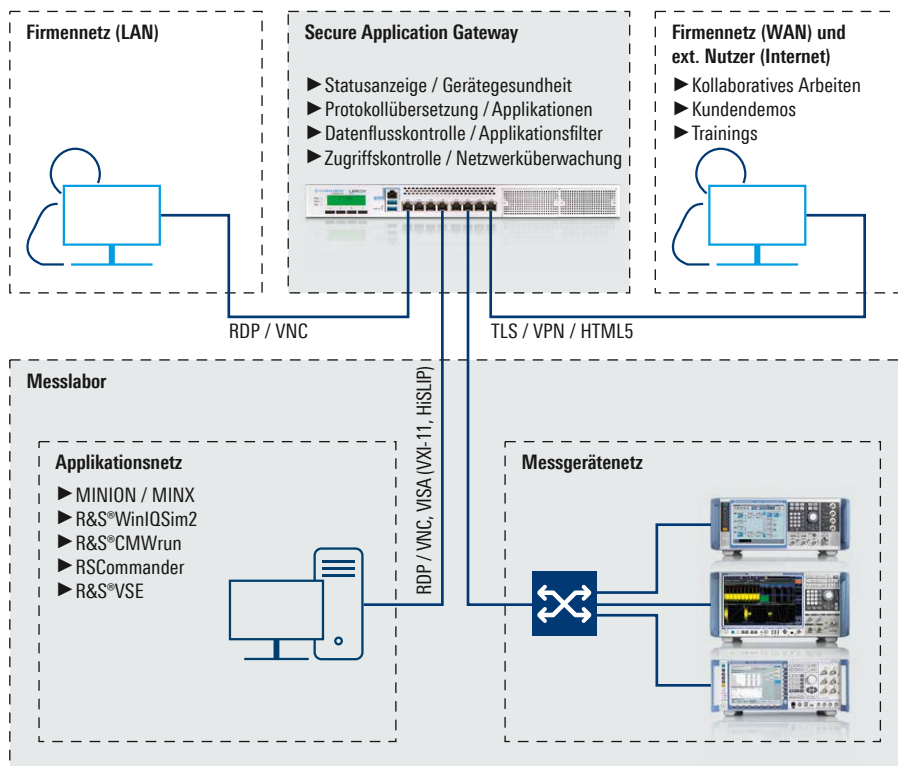
Anspruchsvoller als eine solche statische Regel ist das Managen und Echtzeit-Filtern von Fernsteuerverbindungen, was zum Tragen kommt, wenn ein Nutzer von außerhalb des Messlabors dessen Ressourcen nutzen möchte, sei es vom selben Standort aus oder übers Internet. Dann greift die Datenkontrolle durch den dynamischen Applikationsfilter der Firewall. Typische Protokolle, die das Regelwerk einbeziehen und überwachen muss, sind die Remote-Desktop-Protokolle VNC und RDP sowie die messtechnischen LAN-Protokolle VXI-11 und HiSLIP, über die SCPI-Fernsteuerkommandos übertragen werden.

Besonders VXI-11 ist aufgrund der dem Protokoll eigenen dynamischen Portzuweisung über statische Regeln kaum sicher in den Griff zu bekommen. Der für die Fernsteuerverbindung zu nutzende Port des adressierten Messgeräts wird per Remote Procedure Call (RCP) für jede Sitzung vom Portmapper-Dienst des Messgeräte-Betriebssystems neu zugewiesen. Der Applikationsfilter der Firewall extrahiert diese Information aus dem Datenstrom und gibt den Port nur für diese eine Session frei. Die Sicherheits- und Handhabungsprobleme bei permanenter Öffnung aller für VXI-11 in Frage kommenden Ports (die sich herstellerabhängig unterscheiden und bei geändertem Gerätepark u.U. nachgeführt werden müssen) sind damit passé.

Der letzte Baustein zum Secure Application Gateway

Woher weiß der Nutzer des Messlabors überhaupt, welche Ressourcen dort gerade zur Verfügung stehen? Diese Information liefert ein

Bild 2: Aufbau eines Messtechniknetzes mit getrennten Teilnetzen für Geräte und Applikationsrechner.



T&M-spezifisches Device-Discovery- and-Management-System. Es besteht aus den R&S-Softwaretools MINX¹ und MINION². MINION ist ein Netzwerkscanner, der alle Messgeräte in einem Netz findet und listet. Weil solche Scans aus Sicherheitsgründen von außerhalb des Messlabors nicht erlaubt sind, läuft der Service innerhalb des geschützten Bereichs auf dem Applikationsrechner des Labors. MINX, auf dem Arbeitsplatzrechner des Nutzers installiert, holt sich diese Information und stellt sie auf einem Dashboard dar, wo weitere Aktionen stattfinden können und insbesondere der Messgerätefernzugriff über den MINION-Service gestartet wird (Bilder 3 und 4).

Außerdem kann der authentifizierte Nutzer über MINX auch auf den Laborrechner zugreifen (per RDP, VNC oder HTML5-basiert) und die darauf installierten messtechnischen Software-Suiten wie R&S®CMWrun, R&S®WinIQSim2 oder R&S®VSE wie gewohnt einsetzen. Ob und welche Daten aus dem Labor aber nach außen transferiert werden dürfen, lässt sich wie vieles andere im Regelwerk genau einstellen.

Damit ist das sichere fernbediente Messlabor Realität und der räumlich verteilten Projektarbeit steht nichts mehr im Wege. Weitere naheliegende Anwendungen sind Kundendemos und Schulungen, die nun auch in Pandemie-Zeiten ohne persönlichen Kontakt gehaltvoll durchgeführt werden können.

Fazit

Die Digitalisierung der Arbeitsmittel schreitet rasant voran und gibt inzwischen auch dem Elektronik-Ingenieur Instrumente für eine effiziente Projektarbeit an verteilten Standorten an die Hand. Wer bislang ein vernetztes Messlabor für den externen Zugriff öffnen wollte, musste ein hohes IT-Sicherheitsrisiko in Kauf nehmen oder einen beachtlichen Schutzaufwand treiben. Mit dem Secure Application Gateway von Rohde&Schwarz hat das Dilemma ein Ende. Hinter dem Schutzschild einer modernen Unified Firewall, die mit Applikationsfiltern alle Datenverkehre ausschließt, die nicht messtechnisch motiviert sind, lassen sich Geräteparks und Messapplikationen für autorisierte Nutzer von beliebigen Standorten aus zugänglich

machen. Dabei ist die Firewall dank ihrer Wizard-unterstützten grafischen Bedienoberfläche, die keine fehleranfälligen Texteingaben mehr kennt, auch für Labor-Ingenieure „wasser-dicht“ konfigurierbar. Ein weiterer Vorzug dieser Lösung liegt in der einfachen, leicht änderbaren Segmentierung eines Messlabors in Teilnetze, für die ein jeweils eigenes Regelwerk gilt. Ohne Hardware-Umbau folgt das Laborkonzept so den sich wandelnden Anforderungen des Betreibers.

Katja Hohrath, Christian Wicke

- 1) MINX: Measurement Instrument Network eXplorer.
- 2) MINION: Measurement Instrument Network Interactive Organisational Node.



Bild 5: Die Familie der LANCOM R&S®Unified Firewalls deckt mit aktuell sechs Modellen jeden Durchsatzbedarf ab. Die Bedienung ist bei allen Modellen gleich.

Bild 3: Das MINX-Dashboard ist die Informations- und Schaltzentrale für die Fernbedienung des Geräteparks, der hier aus vier Einheiten besteht.

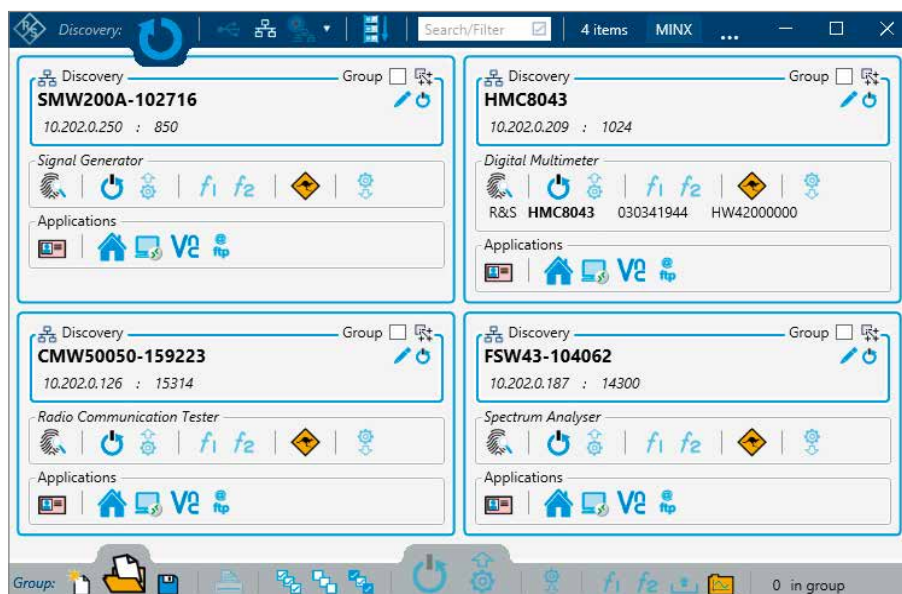


Bild 4: Die Fingerabdruck-Funktion in einer MINX-Kachel generiert eine Liste aller auf dem betreffenden Gerät installierten Optionen. Über das Känguru („Skippy“ / SCPI) und frei belegbare Funktionstasten lassen sich Fernsteuerbefehlssätze speichern und ausführen, die das Gerät auf Knopfdruck nach den Bedürfnissen des Nutzers konfigurieren.

