

226/2023

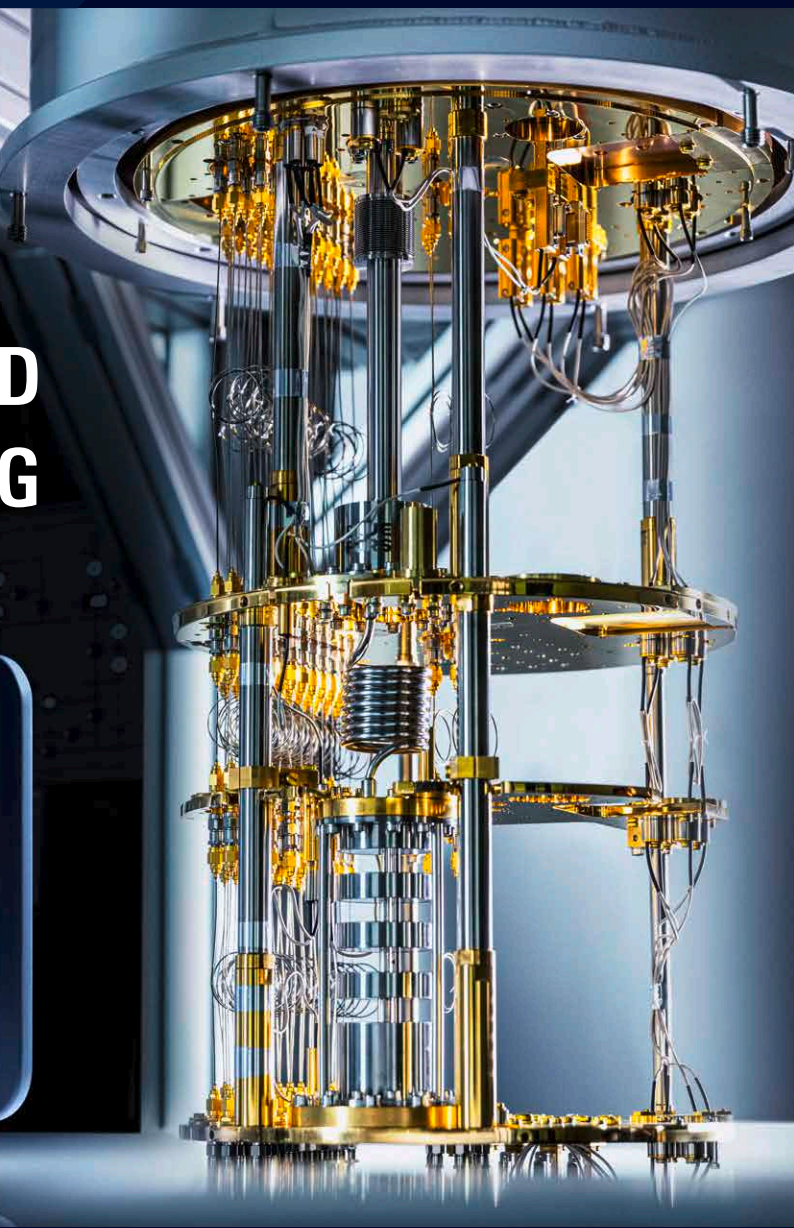
# NEUES

**ROHDE & SCHWARZ**

Make ideas real



## HF-MESSTECHNIK UND QUANTENFORSCHUNG



HF-Messtechnik und  
Quantencomputerforschung

6G: Alles wird Netz

5 kW Kurzwellensendeleistung  
für die Flugsicherung

Rohde & Schwarz steht für Spitzentechnologie an der Grenze des technisch Machbaren. Mit unseren Produkten und Lösungen gestalten Unternehmen und Länder ihre digitale und technologische Souveränität –

**TO ENSURE A SAFER AND CONNECTED WORLD.**

## IMPRESSUM

### HERAUSGEBER

Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG  
Mühldorfstraße 15 · 81671 München  
Postfach 801469 · 81614 München  
[www.rohde-schwarz.com](http://www.rohde-schwarz.com)

### KONTAKT

Tel. +49 89 4129-0  
[info@rohde-schwarz.com](mailto:info@rohde-schwarz.com)

### REDAKTION

Rohde & Schwarz  
[newsmagazine@rohde-schwarz.com](mailto:newsmagazine@rohde-schwarz.com)

### GRAFIK, LAYOUT UND FOTOGRAFIE

Rohde & Schwarz

### ÜBERSETZUNG

Rohde & Schwarz

### DRUCK

Blueprint AG, München

### AUSGABE

Auflage ca. 12 000 (deutsch, englisch)  
63. Jahrgang  
Ausgabe 1/2023, Nr. 226  
Erscheinungsweise: einmal pro Jahr  
ISSN 0548-3093

PD 3609.7477.71

Bezug kostenlos über die Rohde & Schwarz-Vertretungen  
Nachdruck mit Quellenangabe und gegen Beleg gern gestattet.

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

# TITELTHEMA

Liebe Leserinnen, liebe Leser,

welches Bild haben Sie beim Wort Quantentechnologie vor Augen? Wenn ich einen Tipp abgeben darf: Es sind bestimmt die Quantencomputer mit ihrem spektakulären Rechenpotenzial. In ihnen sehen Unternehmen und Regierungen eine Schlüsseltechnologie und treiben die Entwicklung energisch voran. Geschickt ausgenutzte Quanteneffekte sollen aber nicht allein Computern ungeahnte Leistungsfähigkeit verleihen. Geforscht wird auch an einer neuen Generation von quantenbasierten Sensoren sowie an quantenbasierter Datenverschlüsselung. All das ist natürlich noch Zukunftsmusik, nimmt aber immer konkretere Formen an.

Weil Quantentechnologie auch für Rohde & Schwarz ein wichtiges Thema ist, möchten wir es Ihnen in dieser Ausgabe näher vorstellen – und auch das Technik-Herz ein bisschen höherschlagen lassen. Wenn Sie schon viel über Quantenbits gehört, aber noch nie eines gesehen haben, empfehle ich Ihnen den Beitrag von Fabian Kronowetter zu quantenbasierter Radartechnik ab Seite 24. Dort finden Sie eine Mikroskopaufnahme, die das Walther-Meißner-Institut freundlicherweise zur Verfügung gestellt hat. Der Name ist Ihnen vielleicht schon bekannt. Das Institut ist eine renommierte Größe in der Quantenforschung und mit zwei Gastbeiträgen in dieser Ausgabe vertreten. Institutsdirektor Prof. Dr. Rudolf Gross wirft einen Blick auf die beiden Forschungsfelder Quantensensorik und Quantenmetrologie (Seite 20) und nach der Lektüre des Beitrags von Max Werninghaus (Seite 12) ist klar, weshalb für Quantencomputerforschung HF-Messtechnik nötig ist. Ein wahres Katz-und-Maus-Spiel findet gerade in der Quantenkryptografie statt. Ob in ein paar Jahren zuerst die Quantencomputer großflächig Verschlüsselungsmechanismen aushebeln oder rechtzeitig quantensichere Verschlüsselungen installiert sind, lässt sich aus heutiger Sicht natürlich nicht seriös beantworten. Stattdessen liefern Ihnen unsere Kollegen von der Rohde & Schwarz Cybersecurity lieber einen fundierten Einblick in diese spannende Thematik (Seite 30).

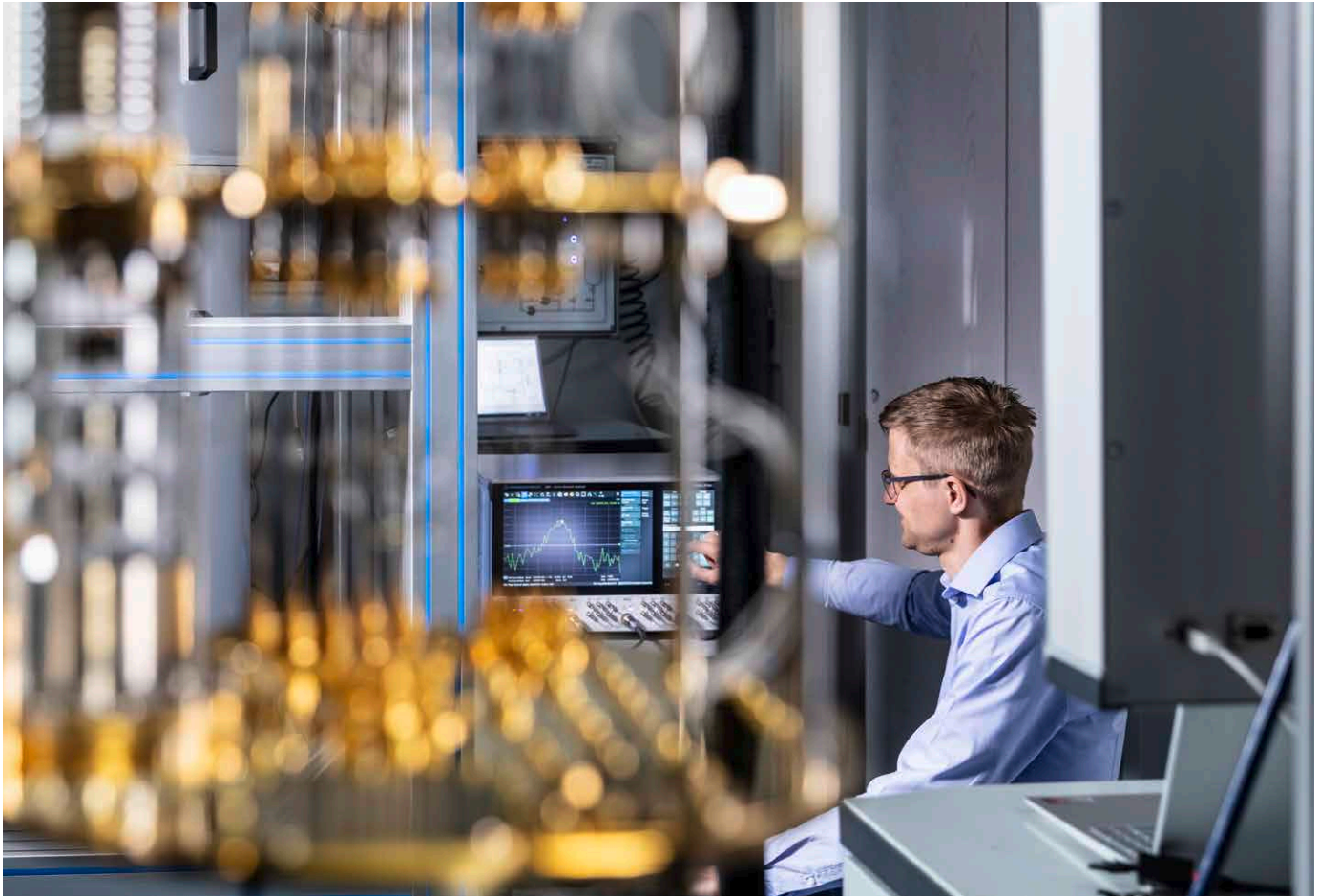
Ich wünsche Ihnen viel Vergnügen mit dieser NEUES-Ausgabe.

Ihr



Christian Reiter,  
Vice President Corporate Marketing and Communications





## 12 HF-MESSTECHNIK UND QUANTENCOMPUTERFORSCHUNG

Hochgradig phasen- und amplitudenstabile Signalgeneratoren erleichtern die Forschungsarbeit.



## 50 6G: ALLES WIRD NETZ

Werden die Zukunftsvisionen rund um 6G Realität, erwartet uns in den 2030er Jahren ein Wunderland der Kommunikation.

## TITELTHEMA

### QUANTENTECHNOLOGIE

#### 12 HF-Messtechnik und Quantencomputerforschung

Hochgradig phasen- und amplitudenstabile Signalgeneratoren erleichtern die Forschungsarbeit.

#### 20 Quantensensorik und Quantenmetrologie machen gewaltige Fortschritte

Quantensysteme lassen sich heute maßgeschneidert herstellen – und werden für Sensoren der nächsten Generation erprobt.

#### 24 Quantenkorrelation verbessert Radartechnik

Potenzielle Anwendungsfelder reichen von der Luftfahrt bis hin zur Medizintechnik.

#### 30 Sicher verschlüsseln im Quantenzeitalter

Quantencomputer stellen heutige Verschlüsselungsverfahren in Frage. An der Entwicklung von quantensicheren Alternativen beteiligt sich auch Rohde & Schwarz.

#### 34 Quantum Key Distribution (QKD)

Grundlagenwissen zum quantensicheren Kryptografieverfahren.



Die kritische Stelle vieler kryptografischer Verfahren ist die Schlüsselverteilung. Mit QKD wird dafür eine quantensichere Methode entwickelt (Seite 30).

### ALLGEMEINE MESSTECHNIK



Das neue R&S®MXO 4 Oszilloskop mit Mixed-Signal-Option (MSO) und DUT (Seite 38).

#### 38 Neue Maßstäbe in der Mittelklasse

Vorgestellt: Das R&S®MXO 4 Oszilloskop mit Digitaltrigger, höchster Aktualisierungsrate und neuem ASIC.

#### 44 Augen auf bei der Signalintegrität

Um Augendiagramme zu berechnen, nutzt das R&S®RTP Oszilloskop erstmals einen hardwarebasierten Ansatz.

#### 46 Impedanzverhalten zuverlässig messen

Mit den R&S®LCX LCR-Metern betritt Rohde & Schwarz den Markt für hochpräzise Impedanzmessungen.

### MOBILFUNK

#### 50 6G: Alles wird Netz

Der 5G-Mobilfunk steht noch am Anfang, aber bereits jetzt werden 6G-Szenarien entworfen.

#### 57 Das vernetzte Fahrzeug kommt

Die Mobilfunktester von Rohde & Schwarz bringen für den C-V2X-Test alle nötigen Funktionen mit.



Der R&S®SK4105 HF-Hochleistungssender eignet sich bestens für die Flugverkehrskontrolle unter rauen Standortbedingungen wie in Grönland (Seite 70).

### FLUGSICHERHEIT

#### 62 Die Digitalisierung des Flugfunks schreitet voran

Rohde & Schwarz entwickelt zusammen mit Forschungspartnern das digitale Datenübertragungsverfahren LDACS.

#### 66 „Das war das Ende des Henne-Ei-Problems“

Interview mit Thomas Bögl, Director of Technology and Studies.

#### 70 5 kW Kurzwellensendeleistung für die Flugsicherung

Der R&S®SK4105 vereint kleine Standfläche, hohe Sendeleistung und höchste Zuverlässigkeit.

#### 2 IMPRESSUM

#### 6 NEUES KOMPAKT

# NEUES KOMPAKT



## ERFOLGREICHES GESCHÄFTSJAHR 2021 | 2022

Mit einem Umsatz von 2,53 Milliarden Euro hat Rohde&Schwarz wieder das Vor-Corona-Niveau erreicht und liegt mit 2,84 Milliarden Euro Auftragseingang sogar noch über diesem Level. An der positiven Entwicklung hatten alle drei Divisionen, Messtechnik, Technology Systems und Networks&Cybersecurity, ihren Anteil. Sie wuchsen jeweils im zweistelligen Prozentbereich. Zu den Wachstumstreibern gehörte der weltweite Ausbau der 5G-Netze, die Forschung an Zukunftstechnologien wie Quantencomputer und 6G sowie Großaufträge aus dem Bereich Sicherheit und Verteidigung. Von der britischen Royal Navy erhielt Rohde&Schwarz den Zuschlag, auch die zweite Charge der neuen Fregatten der City-Klasse mit einem Kommunikationssystem auszustatten und

aus Deutschland kam erstmals der Auftrag über eine komplette Rohde&Schwarz Naval Communications Suite. Für die Zukunft wurden bereits wichtige Weichen gestellt. Dazu gehört die Einführung der neuen Mittelklasse-Oszilloskope R&S®MXO 4, der Funkgeräte für den zivilen Flugverkehr R&S®Series 5200 und des neuen Hochleistungssenders für Rundfunknetzbetreiber R&S®TH1. Durch die Akquise des Analytics-Anbieters Schönhofer Sales and Engineering wurde das Angebot an Aufklärungstechnik sinnvoll erweitert. Gute Perspektiven für den US-amerikanischen Markt eröffnen sich für den Sicherheitsscanner R&S®QPS201, den die amerikanische Transportsicherheitsbehörde TSA in die Liste der Qualified Products aufgenommen hat.

# JENSEITS DES FLUGHAFENS

Seit vielen Jahren vereinfachen die Sicherheitsscanner R&S®QPS die Personenkontrollen an Flughäfen weltweit. Die ersten Modelle wurden im Jahr 2014 eingeführt und brachten vor allem mehr Bewegung in die obligatorischen Warteschlangen. Mehrere Tausend Millimeterwellen-Sensoren erfassen eine Person in kürzester Zeit in 360 Grad und eine Detektionssoftware mit künstlicher Intelligenz erkennt zuverlässig auch nicht-metallische Gefahrengegenstände. Dafür müssen Personen nur kurz im Scanner stehenbleiben und eine natürliche Pose

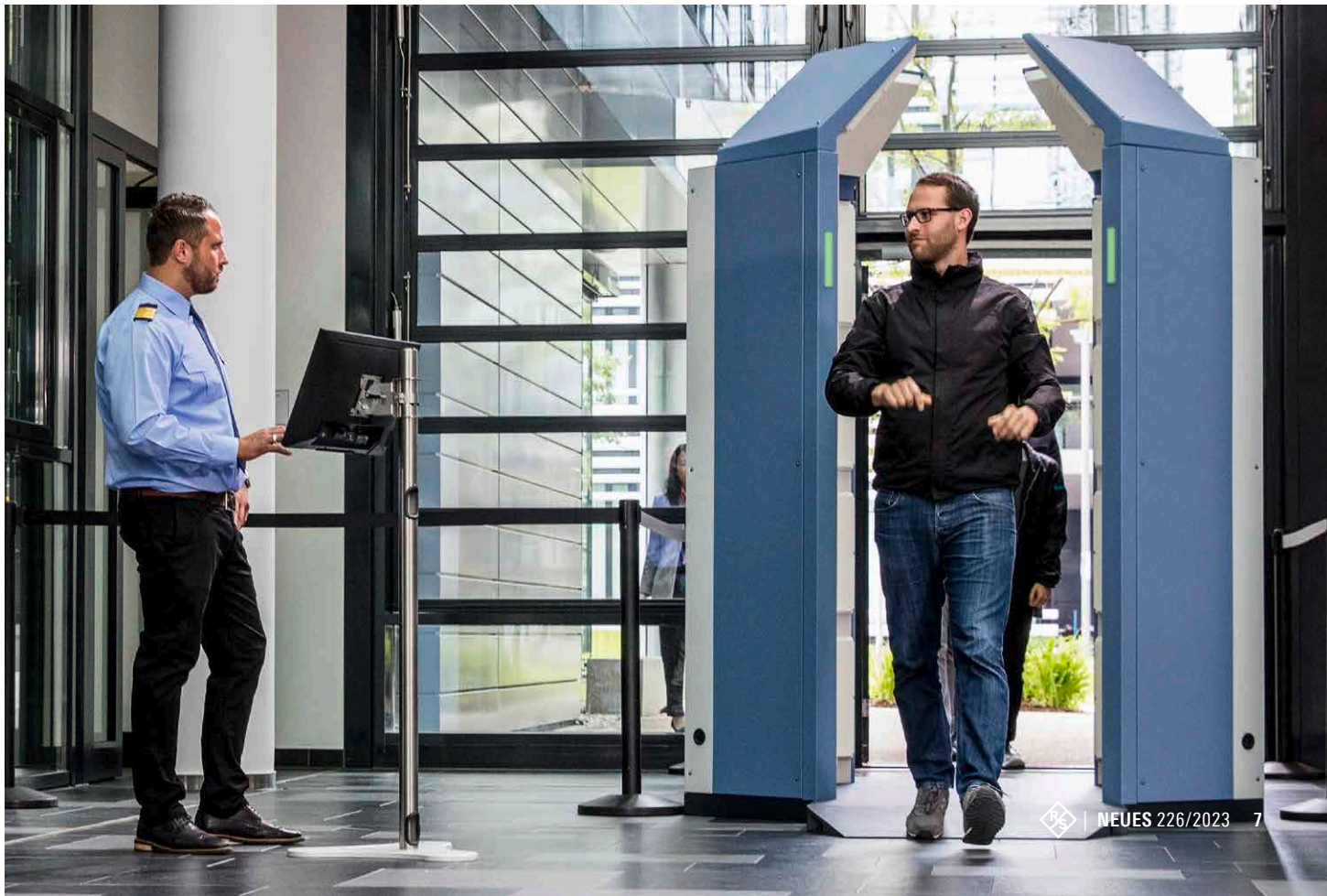
einnehmen. Noch mehr Geschwindigkeit kommt mit dem R&S®QPS Walk2000. Der Name deutet schon an, dass Personen diesen Sicherheitsscanner in normalem Gehtempo passieren können. Eine weitere Besonderheit ist, dass Jacken, Mäntel oder Schuhe nicht ausgezogen werden müssen. Die Sensoren durchdringen auch mehrere Kleidungsschichten und erfordern dazu lediglich eine Sendeleistung, die mehrere Größenordnungen unter einem gewöhnlichen Smartphone liegt. Bis zu 750 Personen pro Stunde können mit einem R&S®QPS Walk2000 abgefertigt



Im September 2022 wurde der R&S®QPS Walk2000 zum ersten Mal auf der Security Essen vorgestellt, der wichtigsten zivilen Sicherheitsmesse in Deutschland.

werden. Interesse an einer schnellen und unkomplizierten Sicherheitskontrolle gibt es auch jenseits des Flughafenbetriebs reichlich: beim Zutritt von kritischer Infrastruktur, zu großen Events oder zum Vorbeugen von Materialschwind in produzierenden Unternehmen. Den erfolgreichen Feldeinsatz hat der R&S®QPS Walk2000 bereits bestanden. Der französische Sicherheitsanbieter BEHM setzte den Sicherheitsscanner auf dem Rockhal-Festival in Luxemburg ein und zeigte sich über den reibungslosen Ablauf äußerst zufrieden.

Der R&S®QPS Walk2000 visualisiert potenziell gefährliche Gegenstände als Symbol an einem neutralen Avatar. Die Körperform einer Person wird bei der Kontrolle nicht erfasst oder dargestellt.



# INNOVATIV UND NACHHALTIG AUF SENDUNG

R&S®TH1 Hochleistungssender: Sender und Verstärker sind als Einschübe modular tauschbar, der Pumpenstand für die Flüssigkeitskühlung ist im Fuß untergebracht.

Streaminganbieter erfreuen sich aktuell großer Beliebtheit, aber auch traditionelles Fernsehen und Rundfunk bleiben gefragt. 5G Broadcast vereint die Vorteile beider Welten und gilt als zukunftsweisende Medientechnik. An ihrer Entwicklung ist Rohde&Schwarz als treibende Kraft maßgeblich beteiligt und hat bereits im Jahr 2019 Sender und Netzwerkkomponenten für die 5G-Broadcast-Feldversuche im Vorfeld der Olympischen Winterspiele 2022 in Peking geliefert. Die weltweite Einführung der Technik erwarten Branchenkenner ab dem Jahr 2025. Bereits heute können sich Medienanbieter und Netzbetreiber zukunfts-fähig aufstellen: Der neue Hochleistungssender R&S®TH1 arbeitet im UHF-Band zwischen 470 MHz und 700 MHz und sendet, in der höchsten Ausbaustufe, mit 9,6 kW Leistung. Ein software-definierter Steuersender unterstützt die aktuellen digitalen TV-Standards DVB-T und DVB-T2 und lässt sich ohne Änderungen an der Hardware auf 5G Broadcast erweitern. Die effiziente Wärmeabfuhr durch Flüssigkeitskühlung erhöht die Zuverlässigkeit des Senders, reduziert deutlich den Energiebedarf des Gesamtsystems und damit auch den CO<sub>2</sub>-Abdruck von Sender-Netzwerken. Damit eröffnet sich für Rundfunk-Netzbetreiber ein attraktiver Weg, um am Einhalten von Klimazielen mitzuwirken. Neben dem Ausspielen von Medieninhalten bietet sich 5G Broadcast auch für ein zuverlässiges und barrierefreies Verteilen von öffentlichen Notfallwarnungen, Verkehrsdaten oder Software-Updates für IoT-Geräte und autonome Fahrzeuge an. Der R&S®TH1 ist der erste Vertreter einer neuen Senderfamilie, die Rohde&Schwarz in den nächsten Jahren um weitere Modelle ergänzen wird.

In der Grundausstattung lässt sich der R&S®TH1 Hochleistungssender über eine HTML5-Weboberfläche steuern. Hier ist er mit optionalem Touch-Display gezeigt.







# BESTENS GERÜSTET FÜR DIE JAGD NACH DER STÖRQUELLE

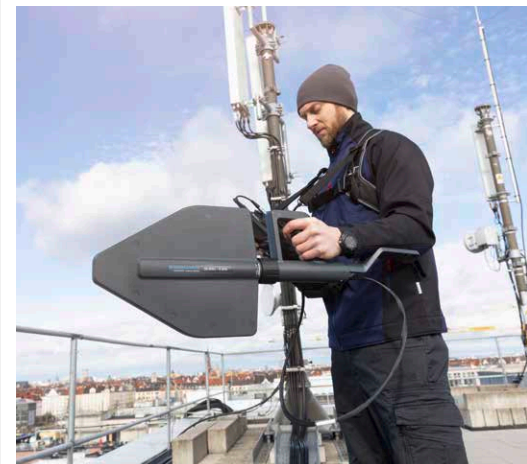
Meldet ein Mobilfunknetzanbieter eine Beeinträchtigung im Betrieb durch unbekannte Störquellen, geht Fachpersonal der Bundesnetzagentur auf Ursachenforschung. Die führt nicht selten auf Hausdächer, schmale Fußwege und andere, nur fußläufig erreichbare Orte.

Um die Störquellen aufzuspüren, setzt die Bundesbehörde auf die tragbaren Funkerfassungsempfänger R&S®PR200. Nach einer ersten Bestellung über 62 Geräte hat Rohde & Schwarz im November 2022 weitere zwölf geliefert. Gegenüber dem Vorgängermodell R&S®PR100, das die Bundesnetzagentur bereits nutzte, ist die Bedienlogik grundsätzlich die gleiche. Umschulen ist damit unnötig. Neu ist, dass neben Messungen im Frequenzbereich nun auch Zeitbereichsmessungen durchführbar sind. Damit eröffnen sich ganz neue Möglichkeiten bei der mobilen Spektrumüberwachung. Manche Störsignale können in der Frequenzdarstellung nicht von den Nutzsignalen unterschieden werden, lassen sich dafür aber im Zeitbereich klar trennen. Das gilt besonders für LTE- und

5G-Signale, die auf zeitlichen Multiplexverfahren (Time Division Duplex, TDD) basieren. Sie sind so getaktet, dass Senden (Uplink) und Empfangen (Downlink) über denselben Kanal geschieht und damit auch im selben Frequenzbereich. In einer reinen Frequenzdarstellung kann es passieren, dass Störsignale im signalschwächeren Uplink von den starken Nutzsignalen im Downlink überlagert und maskiert werden. Rohde & Schwarz hat in seine Funkerfassungsempfänger eine Gated-Spektrum-Funktion integriert. Mit ihr kann ein Signalausschnitt im Zeitbereich ausgewählt und in einer parallelen Ansicht als bis zu 40 MHz breites Signalspektrum angezeigt werden. So lassen sich mit tragbaren Funkerfassungsempfängern Störer in modernen Mobilfunksignalen aufspüren, für die bisher aufwendigeres

und weniger mobiles Equipment nötig war. Diese Möglichkeit spielte auch für die Bundesnetzagentur eine wichtige Rolle.

Mit der Richtantenne R&S®HE400DC erweitert sich die Bandbreite des R&S®PR200 von ursprünglich 8 kHz bis 8 GHz auf 20 GHz.



# ISO 27001 AUCH FÜR BENELUX-STANDORT

Oft sind Hersteller auf sensible Informationen von ihren Kunden angewiesen, etwa Konstruktionspläne oder Testdatensätze. Um den verantwortungsvollen Umgang damit nachzuweisen, können sie ihre Prozesse nach ISO 27001 zertifizieren lassen. Es ist die weltweit wichtigste Norm für Informationssicherheit. Nachdem im Jahr 2021 bereits die fünf deutschen Rohde & Schwarz Standorte in München, Stuttgart, Teisnach, Berlin und Hamburg diese Zertifizierung erhielten, folgte im August 2022 die Rohde & Schwarz Benelux B.V. in Utrecht. Geprüft hatte der niederländische TÜV. Dabei wird nicht das gesamte Informationsmanagement betrachtet, sondern die relevanten Prozesse der zur Prüfung angemeldeten Applikationssegmente sowie der Betrieb und die Verwaltung der internen IT-Services und weitere Support-Prozesse. Zertifiziert wurde die Rohde & Schwarz Benelux unter anderem für Ingenieurleistungen für Industrieelektronik sowie deren Wartung und Kalibrierung. Die ISO 27001 spielt vor allem für Kunden aus den Bereichen Kritische Infrastruktur und Sichere Kommunikation eine immer wichtigere Rolle bei der Lieferantenauswahl.



ISO 27001 Zertifizierungsurkunde für Rohde & Schwarz Benelux.



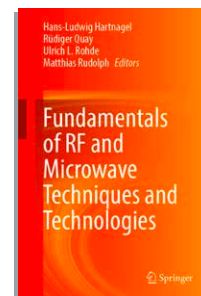
Das IEEE hat Prof. Rohde mit dem Photonics Society Engineering Achievement Award ausgezeichnet.

## IEEE-AUSZEICHNUNG FÜR PROFESSOR ROHDE

Das Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) hat Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. mult. Ulrich L. Rohde für seine herausragenden Ingenieursleistungen auf dem Gebiet der optoelektronischen Signalerzeugung und der optischen Messtechnik für intelligente optische Netze der nächsten Generation mit dem Photonics Society Engineering Achievement Award geehrt. Die Auszeichnung wird verliehen, um einen außergewöhnlichen technischen Beitrag anzuerkennen, der in den letzten zehn Jahren einen bedeutenden Einfluss auf die Entwicklung der Laser- oder elektro-optischen Technologie oder die kommerzielle Anwendung der Technologie hatte. Die Auszeichnung aus Preisgeld und Medaille wurde Prof. Rohde auf der IEEE Photonics Conference im November 2022 in Vancouver in Kanada überreicht.

## NEUES LEHRBUCH VON PROFESSOR ROHDE

Zusammen mit drei weiteren Autoren hat Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. mult. Ulrich L. Rohde ein Lehrbuch zu Hochfrequenz- und Mikrowellentechnik herausgebracht. Es trägt den Titel Fundamentals of RF and Microwave Techniques and Technologies und ist auf der Grundlage des 1965 auf Deutsch erschienenen Lehrbuchs der Hochfrequenztechnik entstanden. Neben aktuellen und industrienahen Methoden zur Analyse und den Entwurf von HF- und Mikrowellenschaltungen wird auch die zugrunde liegende Theorie ausführlich beschrieben. Damit richtet sich das 1576 Seiten starke Werk aus dem Springer Verlag sowohl an Studierende und Lehrkräfte als auch an Ingenieurinnen und Ingenieure.



Das neue Buch zu Theorie und Praxis von Hochfrequenz- und Mikrowellentechnik ist sowohl für Lehre und Wissenschaft als auch für die Arbeit von Ingenieurinnen und Ingenieuren geeignet.

# LOCK-IN-VERSTÄRKER BIS 8,5 GHz



Mikrowellensignale oberhalb von 1 GHz erzeugen und vermessen, das war bisher die Aufgabe von Netzwerk- und Spektrumanalysatoren, Oszilloskopen und Signalgeneratoren. Dieser Kreis von klassischer HF-Messtechnik erhält nun Zuwachs durch zwei Lock-in-Verstärker von Zurich Instruments. Die Modelle GHFLI und SHFLI messen und generieren Signale bis 1,8 GHz und 8,5 GHz. Es sind die ersten kommerziellen Lock-in-Verstärker mit Frequenzbereichen jenseits der 600 MHz. Anfragen dazu erreichten das Schweizer Unternehmen, das seit Sommer 2021 zu Rohde&Schwarz gehört, sowohl aus der Produktentwicklung als auch aus der Grundlagen- und angewandten Forschung. Generell eignen sich Lock-in-Verstärker hervorragend zum Messen schwacher Signale vor starkem Rauschhintergrund. Mit den beiden Modellen von Zurich Instruments stehen diese Vorzüge nun

einem größeren Anwendungsgebiet offen, zum Beispiel in Entwicklungsabteilungen für MEMS-Sensoren oder zum Auslesen von Quantenbits in der Quantencomputerforschung. Praktisch und zeitsparend: Mit dem GHFLI und dem SHFLI lassen sich bis zu acht Frequenzen gleichzeitig messen. Die Bedienung erfolgt über Zurich Instruments eigene Steuersoftware LabOne® mit grafischer Oberfläche oder über branchenübliche Programmierschnittstellen. Ein Zweikanal-Oszilloskop und ein Spektrumanalysator sind bereits mit integriert und verschlanken den Messaufbau im Labor. Weitere Produktdetails inklusive eines sehenswerten Webinars sind auf der Website von Zurich Instruments zu finden.



## MESSTECHNIK FÜR TEILCHENBESCHLEUNIGER IN SÜDKOREA

Südkoreas offizielle Hauptstadt ist Seoul, seine heimliche Hauptstadt ist Sejong. Neben zahlreichen Ministerien und Verwaltungen, die mittlerweile von Seoul umgezogen wurden, ist die 2012 eröffnete Planstadt auch die Heimat des ersten Instituts für Beschleunigerphysik des Landes. Hier erhalten Studierende auch schon in jüngeren Semestern Zugang zu Teilchenbeschleunigern und können Praxiserfahrung sammeln. Ab dem Frühjahr 2023 kommen sie dabei mit HF-Messtechnik von Rohde&Schwarz in Berührung. Sie wird zur Überwachung des Teilchenstrahls eingesetzt. Dafür müssen HF-Signale im Gigahertzbereich präzise erzeugt und ausgelesen werden. Die Universität Korea hat sich dafür für die Signalgeneratoren R&S®SMB100B und R&S®SMA100B entschieden, die Signale bis 6 GHz und 20 GHz erzeugen. S-Parametermessungen werden in Zukunft mit dem Netzwerkanalysator R&S®ZNL20 durchgeführt, dem kompaktesten Gerät in seiner Klasse, und Signalmessungen mit den Oszilloskopen R&S®RTO6 und R&S®RTM3004. Das Institut für Beschleunigerphysik ist Teil des Sejong-Campus der Universität Korea, die zu den Top 50 Universitäten in Asien zählt.



R&S®RTO6 Oszilloskop mit 15,6" Touchscreen (oben) und R&S®SMA100B Signalgenerator (unten)

# HF-MESSTECHNIK UND QUANTENCOMPUTER- FORSCHUNG

Ohne hochgradig phasen- und amplitudenstabile Signalgeneratoren wäre die heutige Forschung an Quantencomputern nicht möglich. Einige Gerätehersteller arbeiten eng mit der Wissenschaftsgemeinde zusammen. Sie wollen besser verstehen, wie Quantenbits präpariert und ausgelesen werden und welche Gerätefunktionen die Forschungsarbeit erleichtern.





Um hochkomplexe Problemstellungen zu lösen, machen sich Quantencomputer die Quanteneigenschaften der Natur zu eigen. Analog zum klassischen Bit werden dabei logische Zustände in Qubits (kurz für Quantenbits) repräsentiert und verarbeitet. Aber während sich ein klassisches Bit gerade durch seine binäre Natur auszeichnet, kann ein Qubit auch simultan in Kombinationen von zwei Zuständen existieren. Dieses Phänomen ist als Superposition bekannt und kann mit den Gesetzen der klassischen Physik nicht erklärt werden. Superposition ist eine rein quantenmechanische Eigenschaft. Auf ihr fußt das enorme Rechenleistungspotenzial von Quantencomputern.

#### Supraleitende Qubits

Wie sich Qubits technisch umsetzen lassen, ist Gegenstand aktueller Forschung. Ein vielversprechender Ansatz sind supraleitende Qubits. Sie basieren auf elektrischen Schwingkreisen, die aufgrund der verlustfreien Supraleitung elektromagnetische Felder mit sehr langer Halbwertszeit speichern können. Ein Schwingkreis wird so konstruiert, dass effektiv ein kontrollierbares Zweizustandssystem entsteht. Die Resonanzfrequenz eines solchen Schwingkreises liegt typischerweise im

Mikrowellenbereich bei etwa 5 GHz. Der Grundzustand des Schwingkreises wird als Rechenzustand null definiert, der erste angeregte Zustand als Rechenzustand eins.

Ohne weitere konstruktive Maßnahmen lassen sich diese beiden Zustände aber noch nicht gezielt ansteuern. Bei einem harmonischen Oszillator, beispielsweise einem LC-Schwingkreis, ist der Abstand zwischen benachbarten Energiezuständen immer gleich groß (Harmonizität). Eine unerwünschte Folge ist, dass sich nicht kontrollieren lässt, ob ein resonantes Mikrowellensignal den Schaltkreis vom Grundzustand in den ersten angeregten Zustand versetzt oder von einem beliebigen angeregten in den nächsthöheren. Nichtlineare Induktivitäten können die Harmonizität aufheben. Um zwei bestimmte Energiezustände als kontrollierbares Qubit zu verwenden, arbeitet man in der Praxis mit sogenannten Josephson-Kontakten. Sie verleihen dem Übergang vom Grundzustand in den ersten angeregten Zustand eine charakteristische Frequenz, mit der exklusiv nur dieser Übergang adressiert werden kann. Weil diese Eigenschaft die von energetischen Atomübergängen nachahmt, werden supraleitende Qubits auch künstliche Atome genannt.



Die R&S®SGS100A SGMA HF-Quelle wird in Forschungseinrichtungen zur hochpräzisen Ansteuerung von Quantencomputern genutzt.

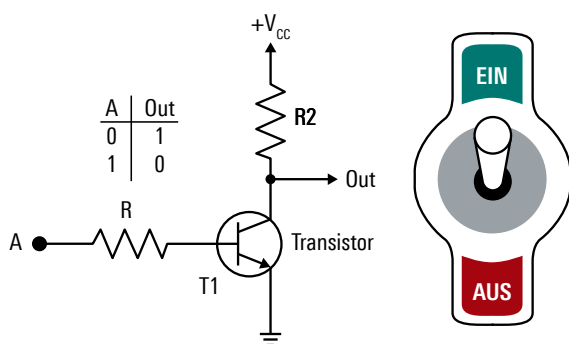
Ein Quantenzustand ist extrem fragil. Entsprechend liegt die Betriebstemperatur eines supraleitenden Qubits bei etwa 10 Millikelvin. Das entspricht rund minus 273 Grad Celsius und liegt nahe am absoluten Temperaturnullpunkt. Nur so bleibt das thermische Hintergrundrauschen niedrig genug, um den Quantenzustand nicht unkontrolliert zu stimulieren. Dafür muss auch das thermische Rauschen

der Kontroll- und Steuersignale berücksichtigt werden (siehe Infobox „Thermisches Rauschen im Kontrollsignal unterdrücken“ am Ende des Artikels).

### Kontrolle von Quantenzuständen durch Mikrowellensignale

Kontrollieren lässt sich der Energiezustand eines Qubits durch externe Mikrowellensignale. Mit Hilfe der sogenannten Bloch-Kugel wird dieser Prozess dargestellt (Bild 1, rechts). An Nord- und Südpol der Bloch-Kugel liegen die Rechenzustände eins und null. Jeder andere Punkt auf der Kugeloberfläche entspricht einem Superpositionszustand. Ohne das Einwirken externer Kontrollsignale befindet sich das

#### Klassisches Bit



#### Qubit

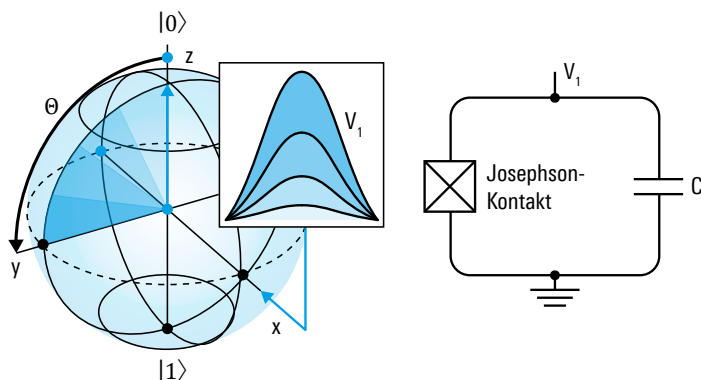
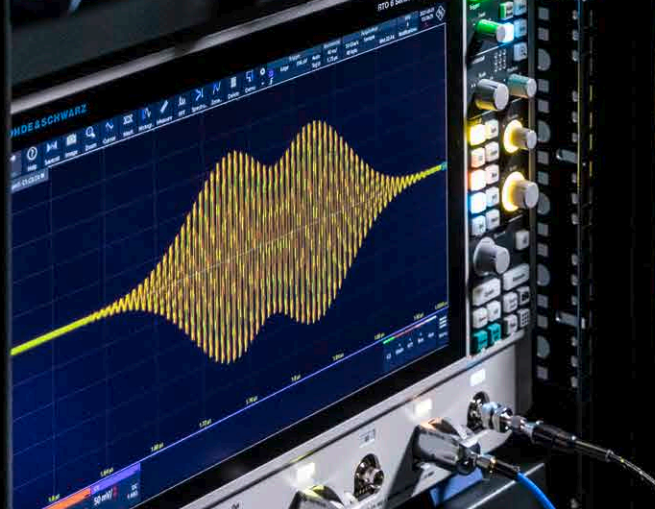


Bild 1: Ein klassisches Bit arbeitet mit einem festen Zustand (A) und führt immer die gleiche Operation aus, in diesem Beispiel eine Inversoperation. Damit gleicht es einem klassischen Schalter. Im Gegensatz dazu hängt der Zustand des Qubits vom internen Zustand des Schaltkreises ab und über das Steuersignal lassen sich verschiedene Rechenoperationen induzieren. Das resonante Mikrowellensignal  $V_1$  erzeugt zum Beispiel eine Rotation des Zustandsvektors um die x-Achse der Bloch-Kugel. Die Dauer und Intensität des Signals bestimmen dabei den Rotationswinkel.





Qubit im Grundzustand. Die Wechselwirkung mit einem resonanten Mikrowellensignal lässt den Zustandsvektor in der Bloch-Kugel rotieren. Sollen verlässliche Rechenoperationen mit Qubits ausgeführt werden, muss diese Rotation sehr präzise gesteuert werden. Das geschieht über die Pulslänge, die Amplitude des Mikrowellensignals und die Einhüllende des Kontrollpulses. Letztere ist gaußförmig, muss im Detail aber auf die spezifischen Eigenschaften des jeweiligen Qubits abgestimmt werden. Eine weitere wichtige Eigenschaft des Kontrollsignals ist die relative Phase der Kontrollpulse. Sie beeinflusst die Rotationsachse des Qubit-Zustands in der Bloch-Kugel. Wird das Qubit mit Pulsen identischer Phase angesprochen, rotiert der Zustand immer um dieselbe Achse, beispielsweise um die x-Achse. Durch Änderungen der Phase wird auch die Rotationsachse verändert. Ein um  $90^\circ$  phasenverschobener Puls lässt den Zustandsvektor dann um die y-Achse rotieren.

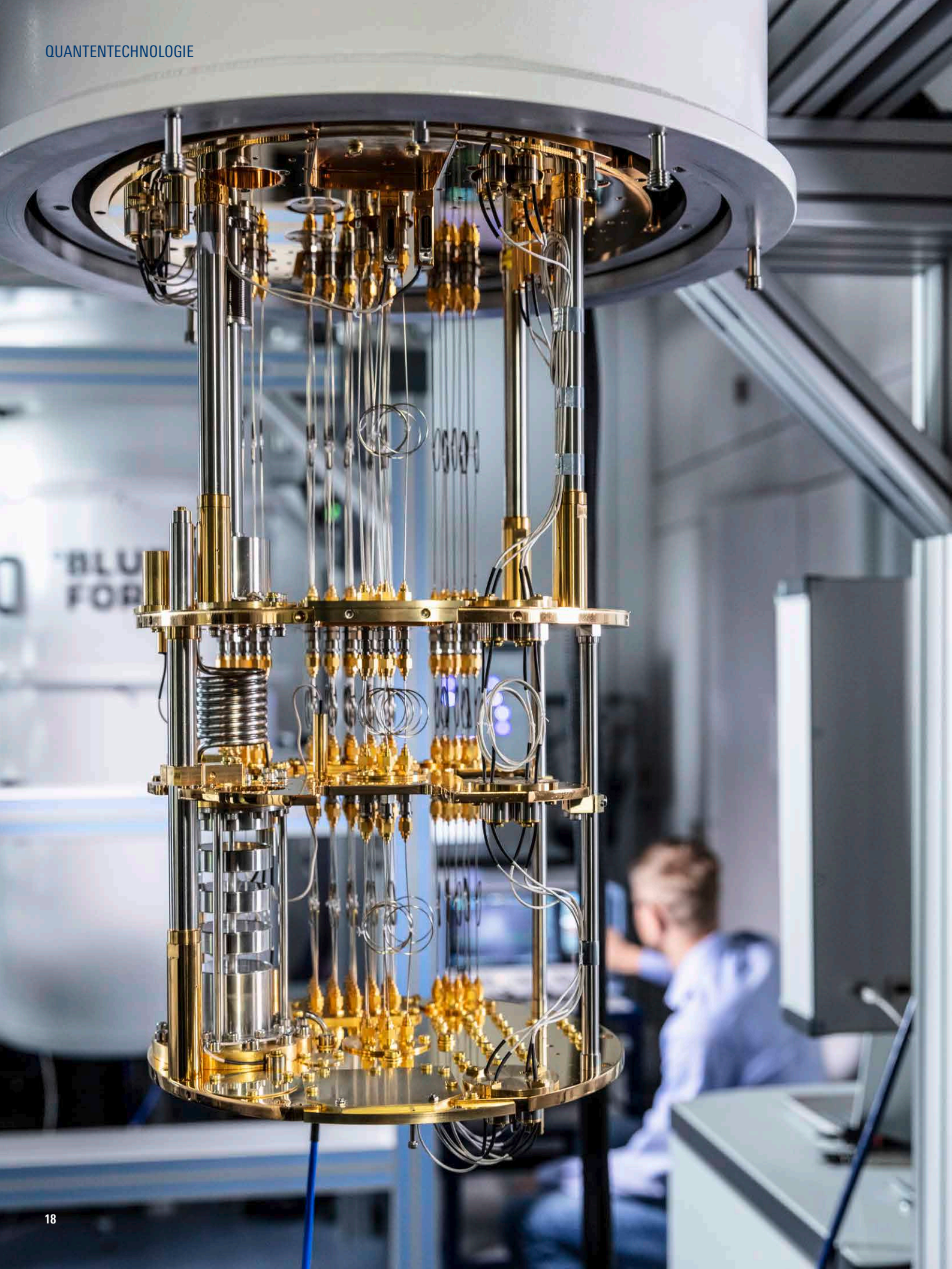
Für das Erzeugen von Kontrollsignalen haben sich Arbiträrgeneratoren als flexible Signalquellen bewährt. Zusammen mit Mikrowellensignalen und Mischern lassen sich die erforderlichen Pulse in der richtigen Qubit-Frequenz erzeugen. Durch präzise Phasenregelung des Kontrollpulses in Echtzeit und eine sehr genaue Kontrolle der Einhüllenden, kann von jedem beliebigen Ausgangspunkt jeder beliebige Zielpunkt auf der Bloch-Kugel erreicht werden. Ein vollständiger Satz von Kontrolloperationen sind beispielsweise Rotationen um  $90^\circ$  in Kombination mit einer beliebig kontrollierbaren Phase des Trägersignals.

### Anforderungen an die Signalquellen

Im Gegensatz zu klassischen Rechenoperationen, bei denen eine hohe Fehlertoleranz gegeben ist, sind Quantencomputer auf eine präzise Kalibrierung der Kontrollpulse angewiesen. Bereits kleine Abweichungen in der bewirkten Rotation, beispielsweise eine Überdrehung

des Quantenzustandes um 1 %, verändern die erwirkte Quantenoperation. Ähnliche Fehler entstehen bei einer nicht exakten Phasenkontrolle. Kontrollinstrumente für Quantencomputer müssen daher eine hohe Phasen- und Amplitudenstabilität aufweisen. Die Phase der Kontrollpulse ist dabei kontrolliert durch die In-Phase- und Quadraturkomponenten des Pulses, die auf dem Arbiträrgenerator gespeichert werden.

Die ausgeführten Quantenalgorithmen sind komplex, ebenso die Experimente an Quantencomputern. Beides erfordert die phasenstabile und zeitsynchrone Ausgabe einer großen Anzahl von Signalpulsen auf mehreren Kanälen. Dies führt in vielen Fällen zu langen Wartezeiten beim Initialisieren der klassischen Kontrollhardware und kann letztendlich auch die Komplexität geplanter Experimente limitieren. In den letzten Jahren haben daher unterschiedliche Hersteller von Mikrowellengeneratoren angefangen, spezielle Geräte unter enger Zusammenarbeit mit Quantencomputing-Wissenschaftlern zu entwickeln. Der Funktionsumfang solcher Geräte geht über den von klassischen Arbiträrgeneratoren hinaus und bedient einige spezielle Anforderungen dieses Forschungszweigs. Beispielsweise lässt sich durch Verwendung von FPGAs (Field Programmable Gate Array) die Phase der Pulse direkt auf dem Gerät aufbringen. Das reduziert den benötigten Speicherplatz drastisch. Dazu gibt es noch eine weitere Möglichkeit: Weil sich selbst komplexe Quantenalgorithmen, die tausende Operationen umfassen, auf einen überschaubaren Satz von fundamentalen Operationen zurückführen lassen, muss nicht für jeden Quantenalgorithmus das vollständige Signal im Arbiträrgenerator gespeichert werden. Der Satz an Fundamentaloperationen und die Sequenz, in der sie ausgeführt werden müssen, sind völlig ausreichend. Spezialisierte Arbiträrgeneratoren für die Forschung an Quantencomputern unterstützen solche Funktionen bereits.



## Signalanalyse zum Auslesen von Quantenzuständen

Hat ein Quantencomputer eine Operation ausgeführt, werden die Quantenzustände der Qubits ausgelesen. Dafür koppelt man die Qubits an Ausleseresonatoren. Durch die Interaktion mit dem Qubit verschiebt sich die Resonanzfrequenz des Resonators abhängig vom Energiezustand des Qubits (Bild 2). Wird er mit einem Auslesesignal nahe der Resonanzfrequenz angesteuert, lässt sich aus der Verschiebung von Amplitude und Phase des Signals in Transmission oder Reflexion auf den Qubit-Zustand schließen.

Aktuelle Entwicklungen von Quantenkontrollhardware ermöglichen einen effektiven Betrieb

von Kontrollelektronik und Quantenhardware. Ist die Signalanalyse direkt in den Geräten integriert, können Ergebnisse des Quantenalgorithmus in Echtzeit berücksichtigt werden. Damit erleichtern intelligente Arbiträrgeneratoren den Betrieb von Quantencomputern in einer ähnlichen Weise, wie es die Assembler in der Computer- und Maschinenprogrammierung schon lange tun. Eine der größten Herausforderungen ist dabei die Synchronisation und Koordination von hunderten Signalen, die für die Operation von größeren Quantencomputern nötig sind.

MAX WERNINGHAUS, PhD CANDIDATE  
AM WALTHER-MEIBNER-INSTITUT

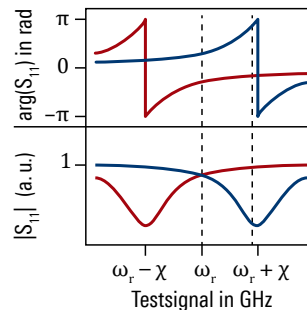
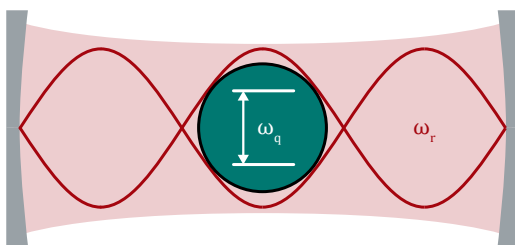


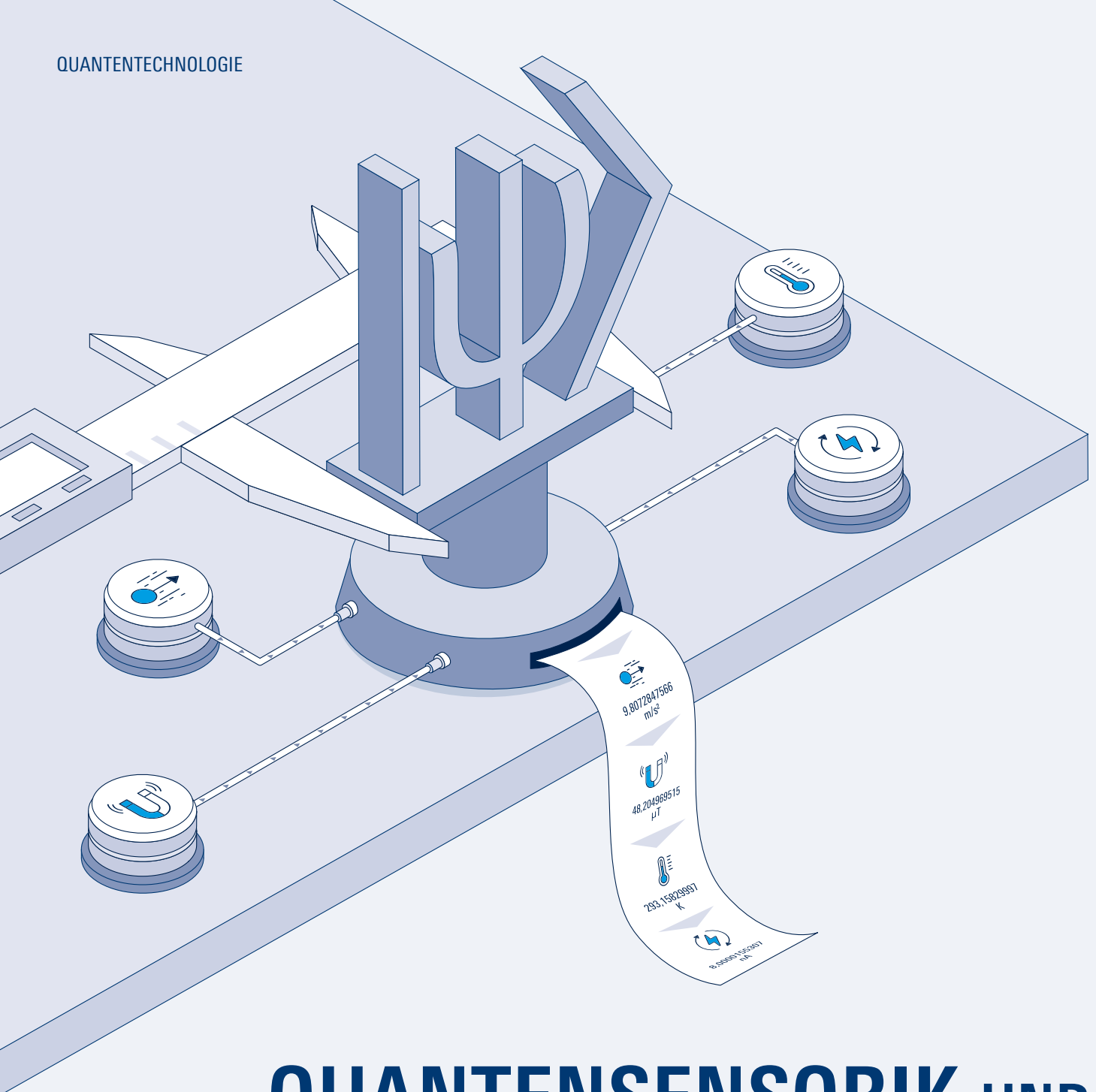
Bild 2: Durch die Interaktion zwischen Qubit und Resonator (links) beeinflussen sich beide Systeme gegenseitig. Je nach Zustand des Qubits (blaue und rote Kurven) verschiebt sich die Resonanzfrequenz  $\omega_r$  eines Resonators um einen bestimmten Betrag  $\chi$ . Durch ein Testsignal können die Transmissions- und Reflexionseigenschaften des Resonators und somit der Zustand des Qubits bestimmt werden. Rechts sind Argument und Betrag des Streuparameters  $S_{11}$  aufgetragen.

## THERMISCHES RAUSCHEN IM KONTROLLSIGNAL UNTERDRÜCKEN

Das Kühlmanagement von Qubits umfasst neben dessen unmittelbarer Umgebung auch die Steuer- und Kontrollsignale. Weil sich die Signalgeneratoren außerhalb des Kryostaten befinden und bei Raumtemperatur arbeiten, enthalten die Kontrollsignale ein viel zu großes thermisches Rauschen. Sie müssen auf den einzelnen Temperaturstufen so weit abgeschwächt werden, dass Photonen bei der Übergangsfrequenz des Qubits statistisch weitgehend unterdrückt sind. Typischerweise wird eine Abschwächung des Signals von rund 100 Dezibel angestrebt. Glücklicherweise benötigen die Quantenschaltkreise eine sehr

geringe Eingangsleistung, sodass eine Signalstärke von 0 dBm bei Raumtemperatur meist ausreicht.

Im Bild links ist ein kryogener Aufbau mit Tieftemperatur-Signalleitungen gezeigt. Im Betrieb liegt die Temperatur der unterschiedlichen horizontalen Platten, betrachtet von oben nach unten, bei circa 1000 mK, 100 mK und 10 mK. Die Mikrowellensignale werden auf jeder Stufe thermalisiert, um thermisches Rauschen von höheren Temperaturen abzuführen und die effektive Rauschtemperatur auf die Temperatur der Stufe zu senken.



# QUANTENSENSORIK UND QUANTENMETROLOGIE MACHEN GEWALTIGE FORTSCHRITTE

Mittlerweile können Forschende Quantensysteme gezielt erzeugen und ihren Zustand präzise kontrollieren und auslesen. Das nährt nicht nur die Hoffnung auf eine neue Generation von Computern, sondern auch auf präzisere Sensoren sowie deutlich kürzere Messzeiten. Damit befassen sich die Forschungsfelder Quantensensorik und Quantenmetrologie – und machen aktuell große Fortschritte.

Sensoren spielen für die Menschheit eine zentrale Rolle. Sie erlauben es, eine Vielzahl von Messdaten aufzunehmen, die unsere menschlichen Sinnesorgane gar nicht erfassen können. Die Menge der durch Sensoren erzeugten Rohdaten hat in den vergangenen Jahrzehnten so stark zugenommen, dass sie heute oft gar nicht mehr gesichtet werden. Stattdessen extrahieren intelligente Analyseverfahren nur die wirklich nützlichen Informationen aus den riesigen Datenmengen.

Der Wunsch, die Empfindlichkeit von Sensoren zu verbessern und so neue Anwendungsgebiete zu erschließen, ist so alt wie die Sensoren selbst. Schon sehr früh wurden dafür quantenphysikalische Phänomene wie Supraleitung und Magnetismus gezielt ausgenutzt. Solche hochempfindlichen Quantensensoren sind bereits seit Jahrzehnten erfolgreich im Einsatz. Vor diesem Hintergrund wirkt es zunächst überraschend, dass die Forschungsaktivitäten auf einem technisch so ausgereiften Feld wieder stark zugenommen haben.

#### Neues Interesse an Quantensensorik

Tatsächlich ist das Interesse aus Forschung, Industrie und Politik so stark, dass man von einem neuen Hype

um das Thema Quantensensorik sprechen kann. Dafür gibt es aber einen guten Grund: Mit dem enormen Fortschritt in der Quantentechnologie haben Forschende gelernt, maßgeschneiderte Quantensysteme herzustellen, sie genau zu präparieren, zu manipulieren und auszulesen. Reagieren diese Quantensysteme empfindlich auf Umgebungsvariablen, zum Beispiel elektrische und magnetische Felder, Temperatur oder Beschleunigung, können durch Messung der Zustandsänderung dieser Quantensysteme die Umgebungsvariablen hochgenau bestimmt werden.

Bei Quantensensoren geht es also darum, aus der Änderung des Zustands eines Quantensystems seine Umgebungsvariablen mit höchster Genauigkeit zu bestimmen. Die Grundanforderungen an solche Quantensensoren lauten:

- ▶ Der Sensor wird von einem Quantensystem mit diskreten Energieniveaus gebildet.
- ▶ Das Quantensystem muss in einem wohldefinierten Zustand initialisiert werden können sowie gut manipulierbar und auslesbar sein.
- ▶ Es liegt eine ausgeprägte Abhängigkeit des Quantenzustands von Umgebungsparametern vor.

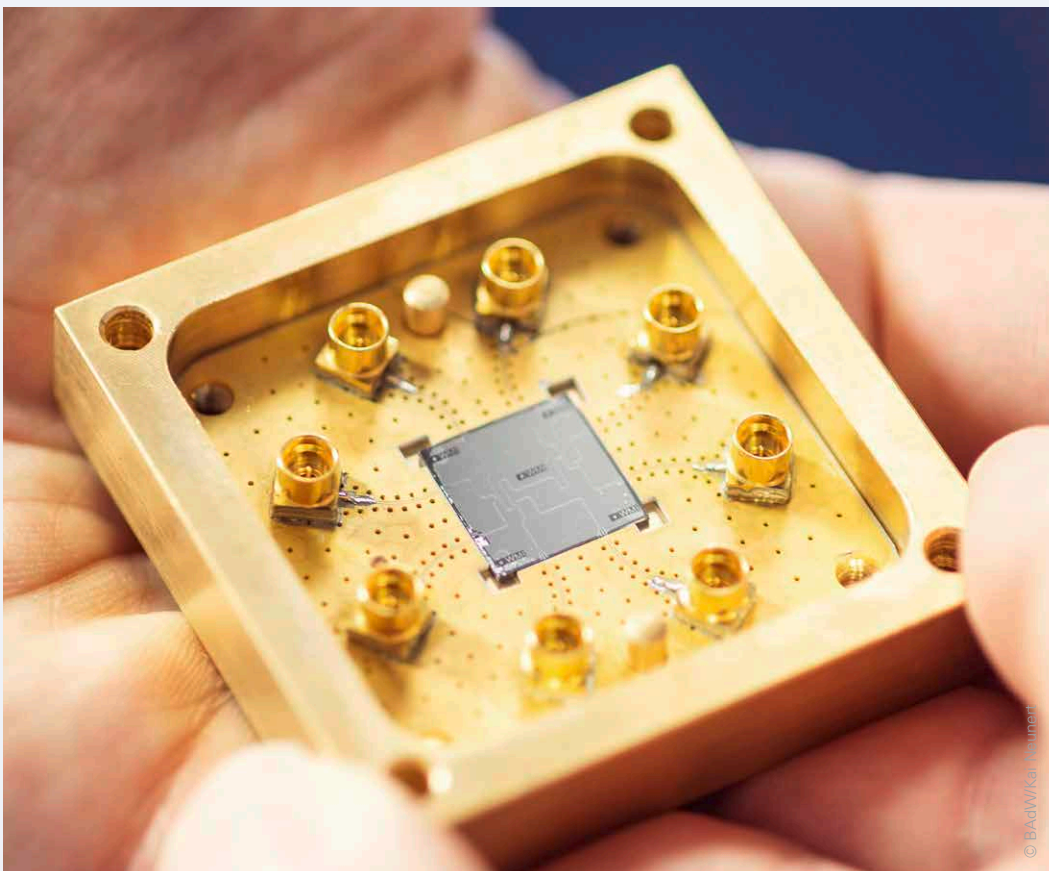
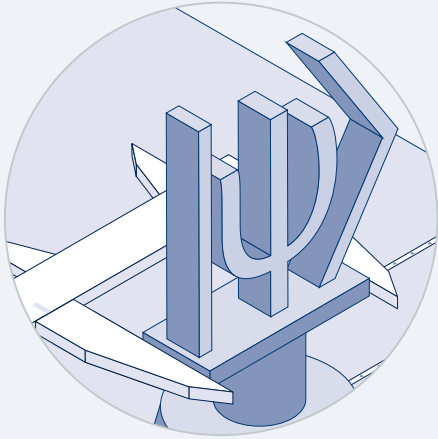


Bild 1: Hergestellt am Walther-Meißner-Institut: Der Chip im HF-Gehäuse beherbergt mehrere supraleitende Schaltkreise.



Glücklicherweise kommt bereits in der Natur eine Vielzahl von Quantensystemen vor, die diese Anforderungen erfüllen. Hierzu gehören einzelne Atome, Ionen und Atomwolken, die sich mit Ionenfallen festhalten lassen. Eine zweite Klasse sind atomartige Defekte in Festkörpern, wie das Stickstoff-Fehlstellen-Zentrum in Diamant, das oft für Quantensensoren genutzt wird. Für beide Klassen stehen heute ausgefeilte Techniken zur Verfügung, um Quantenzustände kohärent zu manipulieren und zu kontrollieren. Diese Techniken basieren unter anderem auf kontinuierlichen und gepulsten Laser- und Mikrowellensignalen.

#### Wo Quantensensorik und Quantencomputer voneinander profitieren

Die Forschung ist heute sogar noch einen Schritt weiter. Mittlerweile lassen sich auf der Basis von Festkörpern auch maßgeschneiderte Quantensysteme künstlich herstellen. Ihre Eigenschaften können dann für Sensoranwendungen gezielt optimiert werden. Prominente Beispiele sind nanomechanische, supraleitende oder Spin-basierte Systeme. Besonders interessant ist, dass solche Quantensysteme auch für die Realisierung von Quantencomputern verwendet werden. Eigentlich sind Quantencomputing und Quantensensorik zwei getrennte Forschungsfelder, denn während Quantensysteme für Computer im Allgemeinen nur sehr schwach von den Umgebungsparametern abhängen dürfen, gilt für Sensoranwendungen gerade das Gegenteil. Aber bei der Entwicklung von Techniken zur Manipulation und Kontrolle von Quantensystemen gibt es eine deutliche Überschneidung, sodass beide Bereiche stark voneinander profitieren können.

#### Quantenmetrologie und kürzere Messzeiten

Noch viel enger mit der Quantensensorik ist das Gebiet der Quantenmetrologie verbunden. Hier geht es darum, den Zustand eines bestimmten Systems – dies kann ein klassisches oder ein Quantensystem sein – durch eine Messung

möglichst genau zu bestimmen. Ein solcher Messvorgang ist auch das Auslesen eines Quantensensors.

Für diesen Messprozess setzt die Quantenphysik mit der Heisenbergschen Unschärferelation eine fundamentale Grenze. Die Heisenberg-Grenze besagt, dass die Präzision einer Messung mit zunehmender Messzeit  $t$  nicht schneller als proportional zu  $1/t$  oder äquivalent zum Kehrwert  $1/N$  der Zahl der Messvorgänge zunehmen kann. Die Heisenberg-Grenze kann aber nur dann erreicht werden, wenn die einzelnen Messvorgänge quantenkorreliert sind. Erreichen lässt sich das durch nicht-klassische Signale, zum Beispiel gequetschte Quantenzustände. Dann muss aber auch sichergestellt werden, dass die Quantenkorrelationen während des Messprozesses nicht durch Wechselwirkung mit störenden Umgebungseinflüssen verloren gehen. Ohne Quantenkorrelationen liegt nur noch der so genannte Standard-Quanten-Limes im Bereich des Möglichen, bei dem die Messpräzision proportional zu  $1/\sqrt{N}$  skaliert. Ein typisches Anwendungsbeispiel ist das Quantenradar (siehe Artikel „Quantenkorrelation verbessert Radartechnik“ auf Seite 24), bei dem das Signal-Rausch-Verhältnis durch Verwendung von gequetschten Mikrowellenzuständen verbessert werden kann.

Ein weiteres Beispiel stammt aus der Grundlagenforschung. Gelingt hier die direkte Messung von Gravitationswellen, könnte sich ein neues Forschungsfeld in der Astronomie auf tun. Arbeiten die Laser-Interferometer, die als Gravitationswellendetektoren genutzt werden, statt mit dem üblichen kohärentem Laserlicht mit gequetschtem Licht, lässt sich die Auflösung bei gleicher Messzeit wesentlich verbessern.

Während quantenmetrologische Techniken zum Erreichen der Heisenberg-Grenze Gegenstand aktueller angewandter Forschung sind, deuten jüngste Forschungsergebnisse bereits darauf hin, dass selbst diese Grenze überwunden werden kann. Nötig sind dazu quantenkorrelierte Zustände, bei denen die einzelnen Teilchen des Zustands (Photonen bei gequetschtem Licht) miteinander wechselwirken.

#### Starke nationale Forschungslandschaft, internationaler Anwendermarkt

Aufgrund der großen allgemeinen Bedeutung von Sensorik und Metrologie in Wissenschaft und Technik besteht international riesiges Interesse an der Entwicklung verbesserter



Bild 2: Supraleitende Schaltkreise arbeiten nahe am Temperaturnullpunkt und werden dafür in Kryostaten wie diesem betrieben.

Sensoren und Messverfahren durch die Verwendung von Quantentechnologien. Die Themen Quantensensorik und Quantenmetrologie stellen deshalb auch zentrale Forschungsgebiete des Münchener Exzellenzclusters Munich Center for Quantum Science and Technology (MCQST) und eines Leuchtturmprojekts des Munich Quantum Valley e.V. (MQV) dar. Da die für Quantensensorik und Quantenmetrologie notwendigen Quantensysteme weniger komplex als die für Quantencomputer sind, ist zu erwarten, dass praktische Anwendungen hier früher realisiert werden können. Die Einsatzgebiete sind breit gefächert. Sie reichen von der Mikroskopie, medizinischer Bildgebung und Radartechnik über Positioniersysteme, Sensoren für elektrische und magnetische Felder, Geoprospektion und Seismologie bis hin zu Gravitationswellendetektoren sowie noch präziseren Atomuhren und Spektroskopieverfahren.

Durch die großzügige Forschungsförderung im Bereich der Quantenwissenschaften und Quantentechnologien in Deutschland sind die wissenschaftlichen und technischen Fortschritte bei der Quantensensorik und Quantenmetrologie zurzeit riesig. Ein erwartungsvoller Blick in die Zukunft ist also angebracht, zusammen mit der Hoffnung, dass die wissenschaftlichen und technischen Erfolge auch in kommerzielle Erfolge umgesetzt werden können.

PROF. DR. RUDOLF GROSS,  
WALTHER-MEIBNER-INSTITUT, BaDw  
FABIAN KRONOWETTER, ROHDE & SCHWARZ





# QUANTENKORRELATION VERBESSERT RADAR- TECHNIK

Die Radartechnologie wird seit Jahrzehnten immer weiter vorangetrieben und perfektioniert. Aktuelle Forschungen zielen nun darauf ab, sogar deren fundamentale Leistungsgrenzen zu verschieben. Potenzielle Anwendungsfelder reichen von der Luftfahrt bis hin zur Medizintechnik. Das Mittel dazu: Quantentechnologie.

Radar (Radio Detection and Ranging) ist eine leistungsfähige Messmethode zur berührungsfreien Nah- und Fernerkundung mit elektromagnetischen Wellen im Mikrowellenbereich. Es bildet die Basis für eine Vielzahl praktischer Anwendungen, die sich von der Weltraumerkundung über die Erschließung von Rohstoffen bis hin zur Detektion, Identifikation und Verfolgung von Objekten erstrecken.

## Grundlagen der Radartechnik

Das Funktionsprinzip ist einfach: Eine Quelle sendet ein gerichtetes Mikrowellensignal in die Umgebung. Objekte im Ausbreitungspfad reflektieren Teile des Signals, die ein Empfänger registriert. Aus dem detektierten Signal kann dann auf die Existenz des Objekts und weitere Eigenschaften geschlossen werden, etwa die Entfernung zum Empfänger, die Bewegungsrichtung und die Geschwindigkeit. In der Praxis treffen auf den Empfänger leider nicht nur die eigentlichen Nutzsignale, sondern immer auch Störsignale, zum Beispiel durch unvermeidbares Umgebungsrauschen. Insbesondere kann das Nutzsignal durch Absorption, geringe Reflektivität oder große Entfernung des Objekts so schwach sein, dass es im Rauschhintergrund untergeht. Unterhalb dieser Nachweisgrenze ist

die Detektion eines Objekts nicht mehr möglich. Deshalb basiert heutige Radartechnik auf modernen Signalverarbeitungsverfahren, die das Nutzsignal effizient aus dem Rauschhintergrund herausfiltern. Besonders wirkungsvoll sind Methoden, die Korrelationen zwischen Sende- und Empfangssignal ausnutzen. Sie verbessern das Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SRV) und erhöhen damit die Reichweite und Güte einer Radarmessung. Hierbei gibt es allerdings eine theoretische Grenze.

**Klassische SRV-Grenze quantenmechanisch ausweiten**

Nach den riesigen Fortschritten im Bereich der Quantenwissenschaften ergab sich sofort die Frage, ob diese theoretische Grenze durch den Einsatz von Quantentechnologien weiter verschoben werden kann. Die Antwort sei hier gleich vorweggenommen: Ja, durch Ausnutzen von Quantenkorrelationen ist das prinzipiell möglich. In der Fachliteratur ist dann von einem Quantenvorteil die Rede. Dieser Quantenvorteil ist nicht auf den Mikrowellenbereich und Radarsysteme im engen Sinn beschränkt, sondern ist prinzipiell für alle Anwendungen zu erwarten, die auf einem Abbildungsprinzip analog zur Radartechnik basieren. Hierzu zählen bildgebende Verfahren aus der Medizintechnik sowie spektroskopische Methoden wie die Elektron- (ESR) und Kernspinresonanz (NMR). Besonders attraktiv ist der Einsatz von Quantentechnologien für diejenigen Anwendungen, die bereits nahe an der klassischen Grenze des SRVs betrieben werden.

**Quantenkorrelationen und ihre Anwendungen im Quantenradar**

Faszinierende und rein quantenmechanisch erklärbare Korrelationen sind Verschränkung und Diskord. Ein aktuell verfolgter Ansatz für ein Quantenradar basiert auf beiden Effekten. An Stelle von klassischen Mikrowellen werden

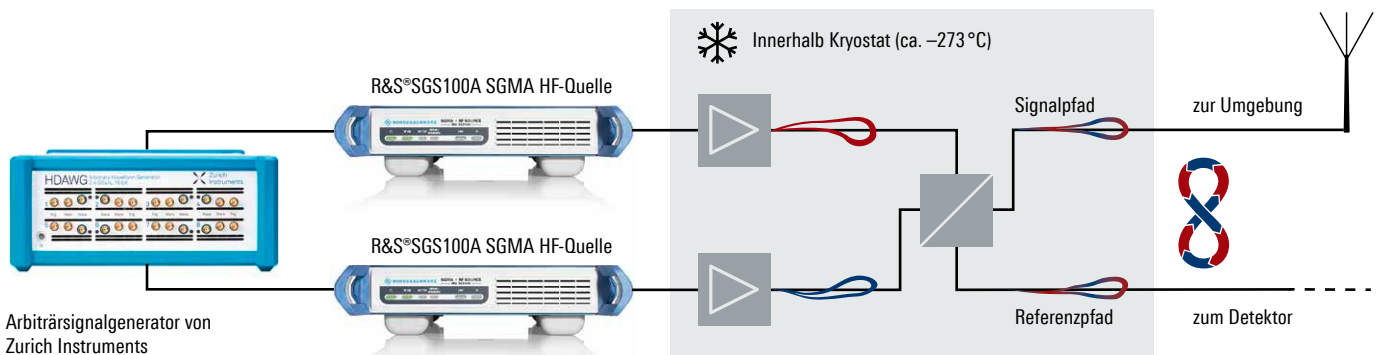
Objekte mit Hilfe von verschränkten Mikrowellensignalen detektiert. Forschende am Walther-Meißner-Institut erzeugen solche Signale bereits seit über zehn Jahren mit Hilfe von supraleitenden Schaltkreisen. Die gleichen Schaltkreise inklusive ihrer komplexen Kühltechnik bilden auch die Basis für supraleitende Quantencomputer, was einen weiteren Forschungsschwerpunkt des Instituts darstellt. Dadurch ergeben sich erhebliche Synergieeffekte bei der Technologieentwicklung.

Auf dem Quantendiskord basiert eine besonders praxisrelevante Eigenschaft des Quantenradars: Es büßt den Quantenvorteil auch dann nicht vollkommen ein, wenn ein Teil der Quantenkorrelationen im Verlauf des Detektionsprozesses verloren geht. Das ist fundamental wichtig, da die Quantenverschränkung inhärent fragil ist und durch Interaktion mit dem unvermeidbaren Rauschhintergrund oder bei der Reflexion des Signals am Objekt leicht zerstört wird. Trotzdem kann noch mit einem Quantenvorteil gerechnet werden. Diese Robustheit lässt sich intuitiv so verstehen, dass selbst nach dem Brechen der Verschränkung noch allgemeinere Quantenkorrelationen – der Quantendiskord – zwischen Sende- und Referenzsignal bestehen.

**Verschränkte Mikrowellen im Quantenradar**

Für eine Implementierung des Quantenradars werden zwei sogenannte gequetschte Zustände (siehe Infobox „Gequetschte Zustände“ am Ende des Artikels) erzeugt und in einem Strahlteiler überlagert. Dieser Vorgang resultiert in zwei räumlich getrennten und stark quantenkorrelierten Pfaden, dem Signal- und Referenzpfad (Bild 1). Der Signalpfad wird analog zum klassischen Radar in die Umgebung entsandt, der Referenzpfad hingegen führt

Bild 1: Signalpfad und Referenzpfad sind in einem Quantenradar stark quantenkorreliert.



direkt zu der Detektionseinheit des Quantenradars. Die beiden Pfade, präziser gesagt, die Feldquadraturen  $P$  und  $Q$ , sind quantenverschränkt (siehe Infobox „Verschränkung“). Eine wiederholte lokale Messung des Signalpfads oder des Referenzpfads gibt keinerlei Informationen über den jeweiligen Pfad preis, die Messergebnisse sind vollkommen normalverteilt und sehen damit aus wie ein Rauschen. Interessanterweise gibt jedoch eine Messung von  $P$  in einem Pfad direkten Aufschluss über  $Q$  in dem anderen Pfad. Wie kann man sich dieses interessante Phänomen aber zunutze machen?

### Quantendetektor für einzelne Mikrowellen-Photonen

Dafür bedarf es der sogenannten gemeinsamen Messung. Hier werden in einem Quantendetektor Empfangssignal und Referenzsignal auf eine spezifische Art und Weise gemischt und dann in Einzelphotonendetektoren eingekoppelt. Das Überlagern der beiden Signalkomponenten in einem speziellen Mischer wandelt die verbleibenden Quantenkorrelationen in eine messbare Größe. In diesem Fall ist die Messgröße die Anzahl an detektierten Photonen. Einzelne Mikrowellenphotonen zu zählen ist aufgrund der kleinen Energieskalen eine anspruchsvolle Messaufgabe, deshalb sind Mikrowellen-Einzelphotonendetektoren Schlüsselkomponenten im Quantenradar. Sie können mit Hilfe von supraleitenden Quantenbits (Bild 2) realisiert werden und sind so empfindlich, dass sie die kleinste Energieeinheit der elektromagnetischen Welle – ein einzelnes Photon – auflösen können.

Eine wiederholte Messung mit dem Quantendetektor liefert zwei unterschiedliche Messverteilungen, je nachdem ob das Empfangssignal einen Teil des Sendesignals enthält, also von einem Objekt reflektiert wird, oder das

Sendesignal verloren geht, also nicht auf ein Objekt trifft. Können wir nun ein Messergebnis einer dieser Verteilungen zuordnen, so lässt sich direkt auf die Präsenz oder Absenz eines Objekts schließen. Bemerkenswert ist an dieser Stelle, dass diese Unterscheidung im Quantenempfänger möglich ist, obwohl die empfangene Signalstärke in beiden Fällen identisch sein kann. Die gewonnenen Informationen resultieren demnach rein aus den Korrelationen zwischen Empfangssignal und Referenzsignal.

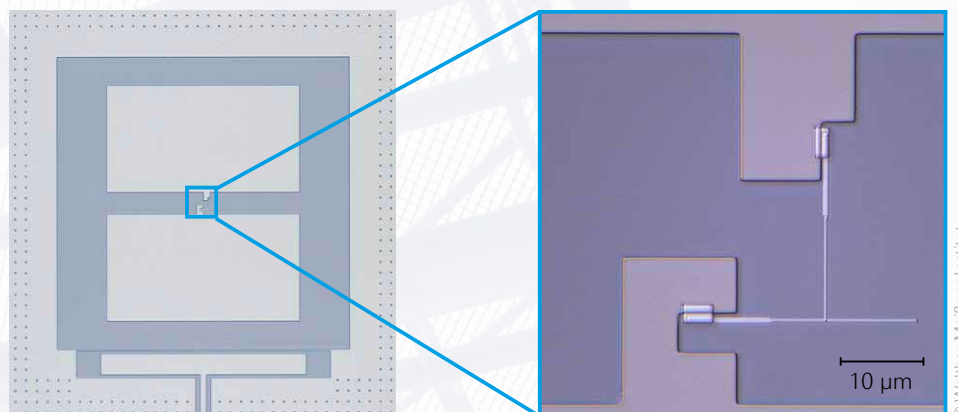
Zusammengenommen bilden verschränktes Sendesignal und Quantenempfänger ein Quantenradar, das bei gleicher Sendeleistung durch das Ausnutzen von Quantenkorrelationen ein verbessertes SRV aufweist. Für den vorgeschlagenen Detektor beträgt dieser Quantenvorteil einen Faktor zwei (3 dB) bezogen auf das bestmöglich SRV ohne Quantenkorrelationen. Weitere Verbesserungen sind möglich. So gilt der diskutierte Quantenvorteil von 3 dB nur für den einfachsten Fall der Verschränkung von zwei Signalmoden. Prinzipiell kann aber auch eine größere Anzahl an Moden miteinander verschränkt werden. In diesem Fall wird erwartet, dass sich der Quantenvorteil proportional zur Anzahl der verschränkten Moden erhöhen lässt. Aktuell arbeiten zahlreiche Forschungsgruppen auf der ganzen Welt daran, diese noch offenen Fragen zu klären.

### Herausforderungen und das Engagement von Rohde & Schwarz

Das Ausnutzen von Quantenkorrelationen beim Quantenradar erfordert eine Erweiterung der klassischen, auf Korrelationsfiltern und Ambiguitätsfunktion basierenden Radartheorie. Hierbei treten einige physikalische und technologische Herausforderungen auf, insbesondere wenn der Blick auf einen feldtauglichen Einsatz der Quantenradartechnologie gerichtet wird. So kann beim heutigen

Bild 2: Mikroskopaufnahme eines supraleitenden Qubits. Die beiden hellen Rechtecke (links) aus Niobium liefern die passenden Kapazitäten, die über eine nichtlineare Induktivität mittels eines Josephson-Kontakts aus Aluminium gekoppelt sind (rechts). So entsteht ein LC-Schwingkreis, der effektiv ein Zweizustandssystem bildet.

-  Parametrischer Verstärker
-  Strahlteiler
-  Gequetschter Mikrowellenpuls
-  Gequetschter Mikrowellenpuls
-  Verschränkte Mikrowellenpulse
-  Mikrowellenkabel
-  Quantenkorrelationen



© Waelther-Meißner-Institut

Stand der Technologie ein Quantenvorteil nur für ausgesprochen niedrige Signalleistungen erreicht werden. Deshalb wird ein Quantenradar zunächst für Anwendungen in Frage kommen, bei denen bei kleinen Reichweiten der Sender unerkannt bleiben möchte oder eine breitbandige Störung unserer mobilen Kommunikationsinfrastruktur vermieden werden soll. Mittelfristig muss aber nach Lösungen gesucht werden, wie der Signalpegel signifikant angehoben werden kann, ohne dabei die Quanteneigenschaften zu zerstören. Klassische Verstärkerkonzepte sind hierzu nicht verwendbar. Als Nahziel steht der experimentelle Nachweis eines Quantenvorteils in Laborexperimenten im Vordergrund, bei denen das gesamte Experiment in einer Tieftemperaturapparatur durchgeführt wird (Bild 3 rechts). Während die Erzeugung von quantenverschränkten Mikrowellensignalen und der Quantendetektor hier bereits in ihrer Funktion vollständig implementiert werden, können der Umgebungseinfluss und das Objekt durch passende Komponenten simuliert werden.

Zur Durchführung dieser Experimente spielen Geräte von Rohde&Schwarz und Zurich Instruments eine zentrale Rolle. So kann eine Kombination aus R&S®SGS100A SGMA HF-Quellen und HDAWG 750 MHz Arbiträrsignalgeneratoren zur Erzeugung quantenverschränkter

Mikrowellen mit einer Frequenz von einigen Gigahertz mit supraleitenden Quantenschaltkreisen eingesetzt werden.

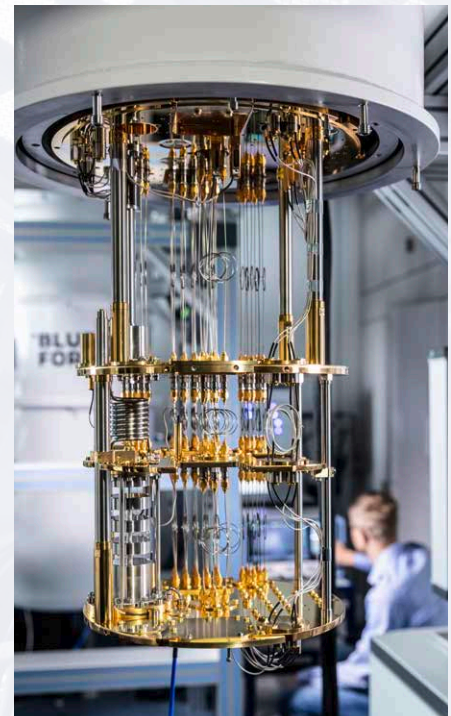
Auch für die Realisierung des Quantenempfängers spielen diese Komponenten eine zentrale Rolle, sowohl im Mischer als auch in den Einzelphotonendetektoren. Außerdem ermöglichen Vektornetzwerkanalysatoren, Spektrumanalysatoren und Oszilloskope von Rohde&Schwarz die Kalibrierung und Vorcharakterisierung des Aufbaus.

Auf dem Weg zu potenziellen Anwendungen müssen noch zahlreiche technische Herausforderungen überwunden werden. Sie reichen von der Signalaufbereitung und der Signalübertragung von den Tieftemperatur- auf die Raumtemperaturkomponenten bis hin zum Betrieb eines Systems unter Alltagsbedingungen. Diese Herausforderungen geht ein Münchner Team aus Wissenschaft und Industrie in dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Verbundprojekt QUARATE an. Rohde&Schwarz gehört dem Projekt als Partner und Projektkoordinator an.

FABIAN KRONOWETTER, ROHDE & SCHWARZ



Bild 3: Messaufbau am Walther-Meißner-Institut mit Kryostat (rechts) und einem R&S®ZNA Vektornetzwerkanalysator (links) zur Analyse der Resonanzen supraleitender Schaltkreise.



## GEQUETSCHTE ZUSTÄNDE

Am Walther-Meißner-Institut werden verschränkte Mikrowellensignale für Quantenradare mit Hilfe von sogenannten gequetschten Zuständen erzeugt. Dafür kommt ein supraleitender parametrischer Verstärker zum Einsatz. Er funktioniert analog zu einer Schaukel, bei der Kinder durch eine periodische Hoch-Tief-Bewegung intuitiv die effektive Seillänge der Schaukel variieren und dadurch die Schwingungsamplitude parametrisch verstärken. Dem Parameter Seillänge entspricht beim supraleitenden parametrischen Verstärker die Induktivität eines elektrischen Schwingkreises, die mit einem Pumpsignal periodisch moduliert wird. Damit lässt sich eine Quadratur  $P$  des Mikrowellensignals  $P \cdot \sin \omega t + Q \cdot \cos \omega t$  verstärken, während gleichzeitig die dazu orthogonale Quadratur  $Q$  abgeschwächt wird. Gemäß der Heisenbergschen Unschärferelation sind  $P$  und  $Q$  nicht gleichzeitig beliebig genau messbar, sondern das Produkt  $\Delta P \cdot \Delta Q$  ihrer Unschärfen muss immer einen minimalen Wert übersteigen. Mit Hilfe eines parametrischen Verstärkers lässt sich aber die Unschärfe der einen Quadratur zu Ungunsten der dazu orthogonalen

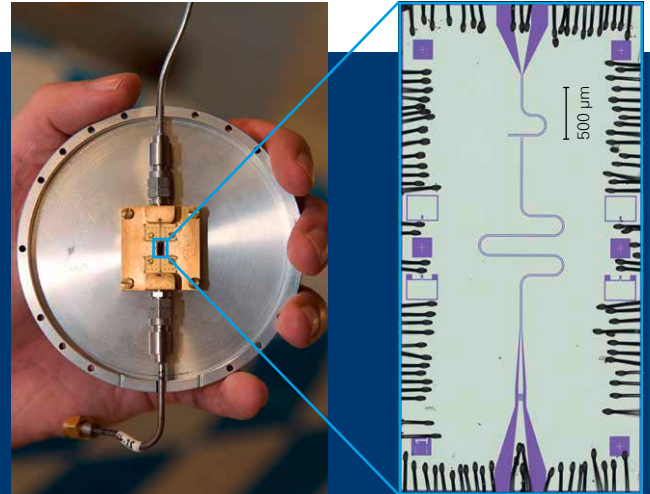


Bild 4: Struktur eines supraleitenden parametrischen Verstärkers.

sogar unter den Wert der Nullpunkts- oder Vakuum-Fluktuationen reduzieren. In diesem Fall liegt ein gequetschter Zustand vor. Das Unterschreiten der Nullpunkts-Fluktuationen ist eine Vorbedingung zum Erreichen eines Quantenvorteils.

## VERSCHRÄNKUNG

Quantenphysikalische Korrelationseffekte wie die Verschränkung sind uns im Alltagsleben fremd. In der klassischen Physik lässt sich ein Gesamtsystem, das zum Beispiel aus zwei Teilen zusammengesetzt ist, immer trennscharf in seine beiden Komponenten zerteilen. Der Zustand der beiden Komponenten, charakterisiert durch beispielsweise die Eigenschaften rot und blau, ist dabei immer wohldefiniert und das Zusammenwirken beider Komponenten erklärt das Verhalten des Gesamtsystems vollständig. In der Quantenwelt trifft dies nicht mehr zu. Hier kann ein verschränkter Zustand des Gesamtsystems vorliegen, der zwar auch wohldefiniert ist, sich aber nicht mehr durch zwei Teilsysteme mit jeweils eigenen, wohldefinierten Zuständen (rot und blau) beschreiben lässt. Vielmehr befinden sich die Teilsysteme in einer Überlagerung aus möglichen Zuständen. Verschränkung bedeutet nun, dass jedem Zustand des einen Teilsystems der korrespondierende Zustand des anderen Teilsystems zugeordnet ist.

Ergibt eine Messung, dass das eine Teilsystem im Zustand rot ist, weiß ein Beobachter oder eine Beobachterin sofort, dass sich das andere Teilsystem im Zustand blau befindet. Die Messergebnisse an den Komponenten eines verschränkten Systems sind also korreliert. Wären sie völlig unabhängig, könnten bei einer Messung auch beide Systeme im Zustand blau oder beide Systeme im Zustand rot sein und aus dem Wissen über das eine Teilsystem ließe sich nicht mit Sicherheit auf das andere Teilsystem rückschließen.

Nachdem dieses Phänomen den Horizont der klassischen Physik übersteigt, ist die Rede von Quantenkorrelationen. Da die beiden Subsysteme beliebig weit voneinander entfernt sein können, hat Albert Einstein das Phänomen der Verschränkung als spukhafte Fernwirkung bezeichnet und versucht, es durch Gedankenexperimente zu widerlegen. Seine Existenz ist heute aber gesichert und wird bereits in Anwendungen technisch genutzt.

## QUARATE

Seit Februar 2021 arbeiten Rohde&Schwarz, das Walther-Meißner-Institut, die Technische Universität München und das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) zusammen im dreijährigen Verbundprojekt QUARATE (kurz für Quantenradar-Team). Sie ermitteln die wissenschaftlich-technischen Grundlagen für ein quantenbasiertes Radar und bewerten die Perspektiven für die feldtaugliche Umsetzung. Von den erarbeiteten Erkenntnissen können auch Nachbarbereiche wie Metrologie oder Bildgebung profitieren. Dafür steht ein Projektvolumen von 3,1 Millionen Euro zur Verfügung, rund drei Viertel davon stellt das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) bereit.

# SICHER VERSCHLÜSSELN IM QUANTENZEITALTER

Asymmetrische Verschlüsselungstechniken sind heute weit verbreitet und gelten als sicher. In ein paar Jahren fordern Quantencomputer diesen Status heraus. Ein Schreckensszenario, aus dem es aber zwei Auswege gibt: Quantenschlüsselverteilung (QKD) und Post-Quanten-Kryptografie (PQC).

Soll heutzutage der Datenaustausch geschützt werden, geschieht das fast immer über eine Kombination aus zwei Verfahren: der symmetrischen und der asymmetrischen Verschlüsselung. Bei symmetrischen kryptografischen Verfahren entschlüsselt die Empfängerseite Daten mit dem gleichen Schlüssel, mit dem sie senderseitig verschlüsselt wurden. Ein Beispiel dafür ist der Advanced Encryption Standard (AES). Im Jahr 2000 hat ihn die US-Standardisierungsbehörde NIST zertifiziert. Heute wird er weltweit genutzt.

## Asymmetrisch abgesichert

Der kritische Punkt einer symmetrischen Verschlüsselung ist das

sichere Verteilen des Schlüssels an beide Kommunikationsparteien. Diese Verteilung wird üblicherweise mit asymmetrischer Kryptografie geschützt. Der Name drückt aus, dass hier mit zwei unterschiedlichen Schlüsseln ver- und entschlüsselt wird. Neben einem geheim zu haltenden privaten Schlüssel (Private Key) nutzt man einen öffentlichen Schlüssel (Public Key), dessen Echtheit zwar garantiert werden muss, zum Beispiel über ein Zertifikat, der aber sonst ohne weitere Schutzmaßnahmen über einen öffentlichen Kanal übertragen werden kann. Zentral ist für diese Methode, dass der öffentliche Schlüssel eine Einbahnstraße darstellt: Wurden Daten einmal mit ihm

chiffriert, kann nur der private Schlüssel sie wieder dechiffrieren.

Den Anfang der Datenübertragung macht bei der asymmetrischen Verschlüsselung die Empfängerseite. Sie erzeugt ein Paar aus öffentlichem und privatem Schlüssel und stellt erstere zum Beispiel über einen Schlüssel-Server (Key-Server) öffentlich zur Verfügung (Bild 1). Die Senderseite verschlüsselt ihre Nachricht mit dem öffentlichen Schlüssel und übermittelt diese an die Empfängerseite. Die Empfängerseite entschlüsselt mit ihrem privaten Schlüssel. Die Stärke dieser Methode ist, dass der sensible private Schlüssel von Anfang an bei der Empfängerseite liegt und nicht übertragen wird.

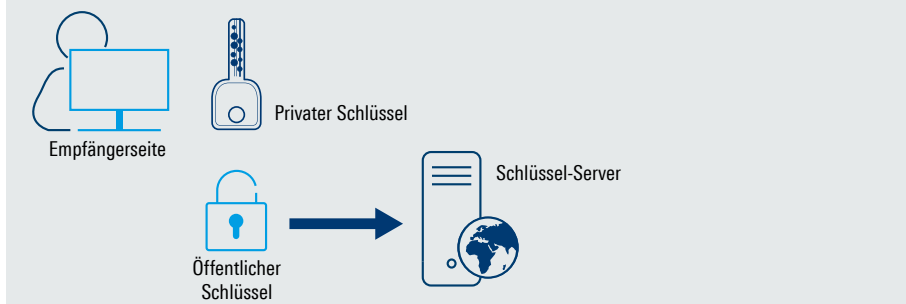
Weil asymmetrische Verfahren deutlich mehr Rechenleistung als die symmetrischen benötigen, wendet man sie in der Regel nicht auf den Datenverkehr selbst an. Stattdessen schützen sie die Schlüsselverteilung eines symmetrischen Verfahrens, das den Datenverkehr verschlüsselt.

## Schutzwall Mathematik

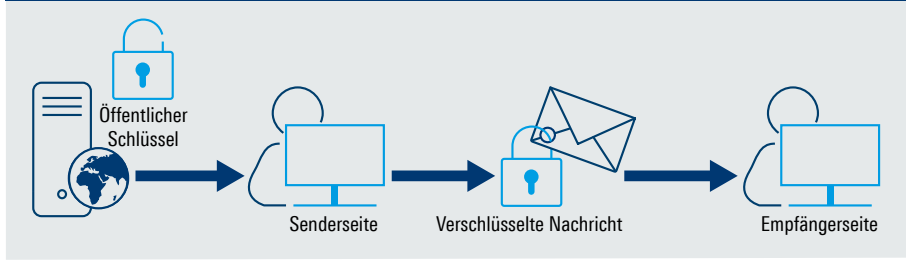
Weil der öffentliche Schlüssel zum Verschlüsseln genutzt wird, enthält er auch gewisse Informationen zum Entschlüsseln. Prinzipiell lässt sich also aus dem öffentlichen Schlüssel auf den privaten Schlüssel schließen – aber nicht innerhalb eines relevanten Zeitraums. Um das



Die Empfängerseite erzeugt ein Schlüsselpaar aus öffentlichem und privatem Schlüssel und stellt den öffentlichen Schlüssel über einen frei zugänglichen Schlüssel-Server zur Verfügung.



Die Senderseite lädt sich den öffentlichen Schlüssel herunter und verschlüsselt damit ihre Nachricht. Dass dieser Schlüssel tatsächlich von der Empfängerseite stammt, stellt ein Zertifikat sicher.



Die Empfängerseite entschlüsselt mit ihrem privaten Schlüssel.



Bild 1: Prinzip der asymmetrischen Kryptografie.

sicherzustellen, basieren öffentliche Schlüssel auf mathematisch schwierigen zu lösenden Problemen, in der Regel der Primfaktorzerlegung (Bild 2) oder dem Berechnen von diskreten Logarithmen. Sie werden so angewendet, dass sich der Rückschluss auf den privaten Schlüssel praktisch in unüberwindbare Länge zieht. Ein herkömmlicher Computer benötigt dafür mehrere Millionen Jahre oder noch länger.

**Gamechanger Quantencomputer**

Bezieht man in dieses Szenario allerdings technisch ausgereifte Quantencomputer mit ein, entsteht eine neue Situation. Bereits seit dem Jahr 1994 steht mit dem Shor-Algorithmus ein Verfahren zur Verfügung, um die Primfaktorzerlegung und das Auffinden diskreter Logarithmen deutlich schneller zu lösen. Es ist ein Quantenalgorithmus, für den ein Quantencomputer mit genügend

Rechenleistung nötig ist. Da so gut wie alle heute eingesetzten asymmetrischen Krypto-Verfahren auf diesen beiden mathematischen Problemen basieren, würden technisch reife Quantencomputer ihnen die Grundlage entziehen. Es sind auch Quantenalgorithmen bekannt, die symmetrische Krypto-Verfahren direkt angreifen. Hier reichen zwar bereits längere Schlüssel zum Erhalt des Schutzniveaus aus, allerdings würde durch gebrochene asymmetrische Verfahren die vorhergehende Absicherung der Schlüsselverteilung fehlen.

Noch sind diese Verschlüsselungsverfahren aber nicht gebrochen. Dafür existieren, soweit bekannt, noch keine Quantencomputer mit genügend Rechenleistung. Allerdings arbeiten namenhafte Unternehmen wie Google, IBM und Amazon mit Hochdruck an deren

Weiterentwicklung und auch zahlreiche Staaten beschleunigen die Entwicklung durch nationale und internationale Förderprojekte. Experten des Bundesamts für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) rechnen mit einer Wahrscheinlichkeit von 20 Prozent, dass im Jahr 2030 erste Quantencomputer bereitstehen, um Verschlüsselungsverfahren zu brechen, die heute als sicher gelten. Entsprechend hoch ist der Bedarf, bald Daten mit quantensicheren kryptografischen Verfahren zu verschlüsseln. Das gilt vor allem für Organisationen und Behörden, die größere Mengen an sensiblen Daten über einen langen Zeitraum vorhalten müssen. Sie benötigen genügend Zeit, um ihre Datenvorräte auf quantensichere Verschlüsselung umzustellen.

**PQC und QKD: zwei Methoden, ein Ziel**

Dafür werden aktuell zwei große Ansätze verfolgt. Unter dem Begriff Post-Quanten-Kryptografie (PQC) entwickeln Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler spezielle

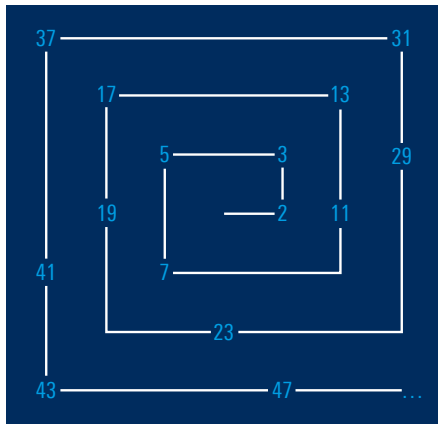


Bild 2: In der Ulam-Spirale, benannt nach dem polnischen Mathematiker Stanislaw Marcin Ulam, liegen Primzahlen häufig auf Diagonalen. Das deutet zwar eine gewisse Systematik an, aber bis heute gibt es keine Methode, um für eine große Zahl schnell sagen zu können, ob es sich um eine Primzahl handelt oder nicht. Deshalb kann auch nur unter großem Zeitaufwand aus dem Produkt von zwei großen Primzahlen  $p \cdot q$  zurück auf die jeweiligen Faktoren  $p$  und  $q$  geschlossen werden. Auf diesem Phänomen basiert die Einwegfunktion des öffentlichen Schlüssels von asymmetrischen Verschlüsselungsverfahren wie RSA.

asymmetrische Algorithmen, die selbst mit Hilfe eines Quantencomputers nicht auf relevanten Zeitskalen zu brechen sind. Es existieren einige aussichtsreiche Kandidaten, die auf verschiedenen mathematischen Problemen basieren, beispielsweise auf Gittern (Lattices) oder kryptografischen Hashfunktionen. Ein weiterer Ansatz für PQC sind fehlerkorrigierende Codes, von denen man annimmt, dass auch ein Quantencomputer sie nicht effizient lösen kann.

Ein großer Vorteil von PQC ist, dass die bestehende Netzwerk-Infrastruktur weiterhin genutzt werden kann. Allerdings gibt es hier noch Herausforderungen. So wurden jüngst bereits einige aussichtsreiche PQC-Kandidaten gebrochen. Im Vergleich zu klassischen asymmetrischen Verfahren haben die verschiedenen PQC-Verfahren zudem Nachteile bei Effizienz und Schlüssellänge. Auf diese Aspekte fokussiert sich aktuell ein beträchtlicher Forschungs- und Entwicklungsaufwand.

**Quantum Key Distribution (QKD)**

Einen gänzlich anderen Ansatz verfolgt die Quantenschlüsselverteilung, auch bekannt als Quantum Key Distribution (QKD). Es werden quantenphysikalische Gesetzmäßigkeiten ausgenutzt, um Schlüssel für symmetrische kryptografische Verfahren zu erzeugen und sicher zu verteilen. Die Kommunikationspartner tauschen anstatt klassischer Bits nun sogenannte Qubits in Form von Quantenzuständen einzelner Photonen aus.

QKD fußt darauf, dass einzelne Quantenzustände nicht perfekt kopiert werden können und dass die Messung von Photonen durch Dritte – was einem Abhörversuch gleichkommt – entdeckt werden kann. Wenden zwei Kommunikationsparteien diese beiden grundlegenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten geschickt an, können sie gegenüber potenziellen Angreifern einen Vorteil erlangen. Durch geeignete Nachbearbeitung der gemessenen Qubits lässt sich eine Bitfolge erzeugen, die

nur diesen beiden Parteien bekannt ist und als Schlüssel verwendet werden kann (siehe Artikel „Quantum Key Distribution“ auf Seite 34). Sollten asymmetrische kryptografische Verfahren also gebrochen werden, kann QKD ihre Rolle einnehmen. Die Quantenschlüsselverteilung beruht auf physikalischen Gesetzen und ist zudem informationstheoretisch sicher. Daher ist die Sicherheit der erzeugten Schlüssel unabhängig von der Rechenleistung von Quantencomputern und klassischen Computern.

**QKD-fähige Geräte und Infrastruktur**

Es existieren bereits viele verschiedene QKD-Protokolle. Sie alle beruhen auf den oben beschriebenen Grundsätzen, die je nach Protokoll aber unterschiedlich umgesetzt werden. Manche basieren zum Beispiel auf polarisierten Photonen, andere auf der Zeit-Phase-Unschärferelation. Damit sind auch unterschiedliche Mechanismen zur Präparation und Messung des Quantenzustands verbunden. Einige Protokolle sind bereits

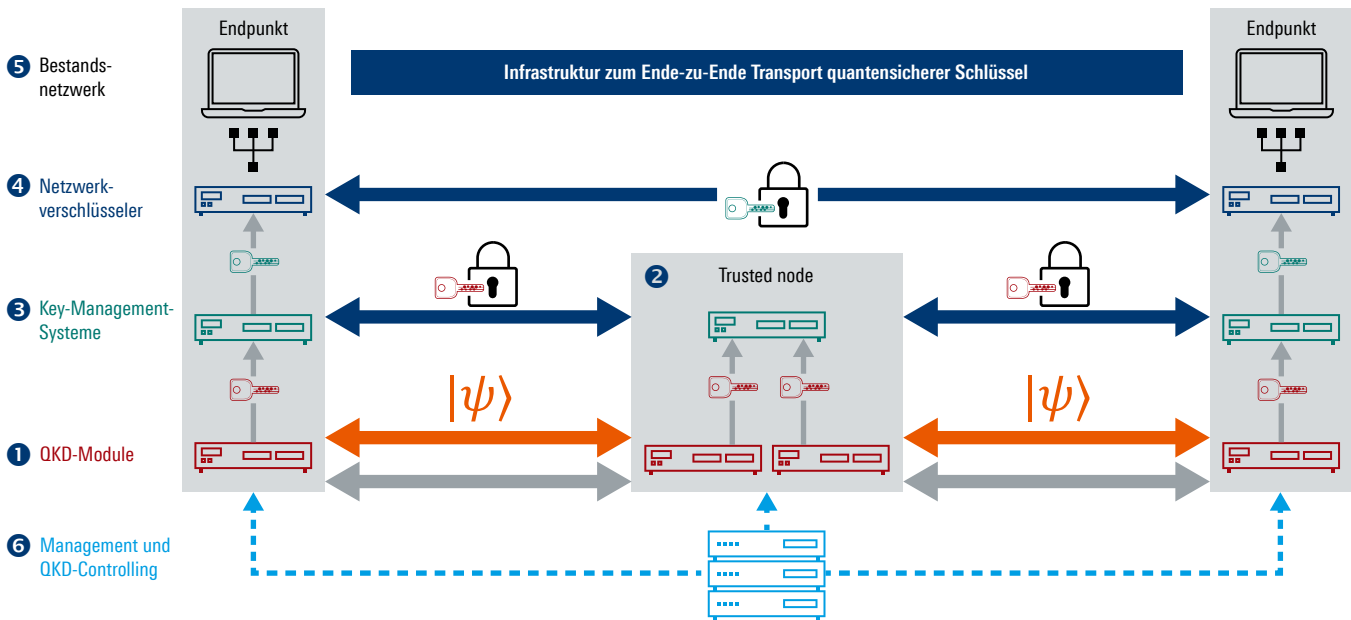


Bild 4: Um Bestandsnetzwerke mit QKD zu erweitern, sind mehrere Elemente nötig: (1) QKD-Module zum Erzeugen der Quantenschlüssel, (2) Trusted Nodes, um die Quantenschlüssel über mehr als 100 Kilometer zu verschicken, (3) Key-Management-Systeme (KMS), die die Quantenschlüssel entgegennehmen, verarbeiten, verwalten und bei Nutzeranfragen an die (4) Netzwerkverschlüsseler weitergeben. Letztere sind das Bindeglied zu den Bestandsnetzwerken (5) und müssen über entsprechende Schnittstellen und Funktionalitäten verfügen, um Quantenschlüssel entgegenzunehmen. Da komplexe Netzwerke aus mehreren Einzelnetzwerken bestehen, muss eine netzwerkübergreifende Verwaltung von KMS und QKD-Modulen und das Routing der Schlüsselübertragung sichergestellt sein. Diesen Part übernehmen (6) Management und QKD-Controlling.



recht ausgereift und anwendungsnah umgesetzt. Erste QKD-Lösungen zur sicheren Punkt-zu-Punkt-Kommunikation können bereits jetzt von verschiedenen Anbietern erworben werden. In naher Zukunft wird sich die Produktpalette weiter vergrößern.

Da sich Quantenzustände nicht perfekt kopieren lassen, können allerdings auch keine optischen Verstärker zur Langstreckenübertragung eingesetzt werden. Damit ist die Reichweite von QKD beschränkt, aktuell auf rund 100 Kilometer. Bei größeren Entfernungen ist die erreichbare Datenrate zu gering für praxisrelevante Anwendungen. Das wirkt sich auch auf die erforderliche Netzwerktopologie aus, für die sogenannte vertrauenswürdige Knotenpunkte (Trusted Nodes) nötig sind. Daneben erfordert Quantenverschlüsselung, zusätzlich zur bestehenden Kommunikationsinfrastruktur, eine ergänzende Netzwerk-Infrastruktur zur Übertragung der Quantenbits. Diese Infrastruktur wird momentan in verschiedenen Regionen der Welt aufgebaut. Das Vorgehen dafür ist überall ähnlich: Einzelne Punkt-zu-Punkt-Verbindungen werden zu größeren Testnetzen kombiniert, die zunehmend den Status eines kommerziell nutzbaren Netzes annehmen. Das größte dieser QKD-Netze ist das Quanten-Backbone-Netz. Offiziell ist es seit dem Jahr 2017 fertiggestellt und wird seitdem über ganz China ausgeweitet. Die Europäische Union startete im Jahr 2019 die EuroQCI-Initiative (European Quantum Communication Infrastructure) für den Aufbau einer sicheren Quantenkommunikationsinfrastruktur. Durch Glasfaser- und Satellitenverbindungen soll sie sich über die gesamte Europäische Union erstrecken, einschließlich ihrer Überseegebiete. Die so entstehenden nationalen Netzwerke sollen sich in den nächsten Jahren zu einem europäischen Gesamtnetz zusammenfügen.



**Bild 3: Europäisches QKD-Netz**

Die Initiative EuroQCI drückt den politischen Willen aller 27 EU-Staaten für ein QKD-Netz aus. Ab 2023 werden nationale QKD-Netzwerke aufgebaut, hier beispielhaft für ausgewählte Länder in verschiedenen Farben dargestellt, und bis 2027 schrittweise zu einem europäischen Gesamtnetzwerk zusammengeführt.

### Teile eines QKD-Netzwerks

Ein Quantennetzwerk besteht nicht allein aus QKD-Geräten, sondern auch aus entsprechend gehärteten Systemen zur Schlüsselverwaltung sowie QKD-fähigen Verschlüsselern, Steuer- und Managementsystemen. Auf diesem Gebiet hat die Rohde&Schwarz Cybersecurity GmbH in den letzten Jahren ihr Engagement verstärkt und entwickelt mit verschiedenen Partnern an entsprechenden Funktionalitäten und Produkten, die teilweise schon in heute angebotenen Lösungen zu finden sind.

Rohde&Schwarz Cybersecurity ist schon seit langem ein vertrauenswürdiger Anbieter von BSI-zugelassenen IT-Sicherheitslösungen und kann zum Beispiel für die Entwicklung von QKD-fähigen Verschlüsselern auf bestehende Technologie

für klassische Netzwerke aufbauen. Der Funktionsumfang der Verschlüsseler wurde soweit ergänzt, dass sie in QKD-Netzwerken zum Einsatz kommen können. Im Rahmen von Forschungsprojekten haben sie sich bereits in europäischen Testnetzwerken im laufenden Einsatz bewährt. Andere Technologien, beispielsweise die Systeme zur Schlüsselverwaltung, werden von Grund auf neu entwickelt. Auch hier ist die Erfahrung von sicherheitstechnisch gehärteten und zugelassenen Sicherheitslösungen von großem Vorteil, da auch diese Geräte für die behördliche Zulassung gehärtet werden müssen.

DR.-ING. HENNING MAIER, DR. JASPER RÖDIGER,  
STEFAN RÖHRICH (ALLE ROHDE & SCHWARZ)

# QUANTUM KEY DISTRIBUTION

Quantum Key Distribution (QKD) soll asymmetrische Verschlüsselungsverfahren ersetzen, so dass man auch im Zeitalter der Quantencomputer vertrauenswürdig kommunizieren kann. Der Ansatz gilt als vielversprechend und wird in ersten Stufen schon heute angewendet.

Im Deutschen wird Quantum Key Distribution als Quantenschlüsselverteilung übersetzt. Es verschlüsselt nicht den Datenverkehr selbst, sondern stellt einen geheimen Schlüssel bereit, mit dem andere kryptografische Verfahren Daten verschlüsseln oder auch authentifizieren. QKD-Schlüssel können beispielsweise in symmetrischen Kryptographie-Verfahren eingesetzt werden. Diese arbeiten sehr recheneffizient und sind zur Datenverschlüsselung weit verbreitet. Sie selbst sind sogar relativ robust gegen unberechtigte Dechiffrierversuche durch Quantencomputer, nicht aber die asymmetrischen Kryptografie-Verfahren, mit denen heutzutage die Verteilung des symmetrischen Schlüssels abgesichert wird (siehe auch Artikel „Sicher verschlüsseln im Quantenzeitalter“ auf Seite 30). Um diese asymmetrischen Kryptografie-Verfahren quantensicher zu ersetzen, ist QKD eine vielversprechende Möglichkeit.

In erster Linie geht es bei QKD um die sichere Kommunikation zwischen besonders schützenswerten Netzwerken, etwa von staatlichen Organisationen, kritischer Infrastruktur, Banken oder Kommunikationsverbindungen zwischen größeren Firmenstandorten. Die Funktionsweise von QKD wird im Folgenden erklärt.

## Austausch über zwei Kanäle

Im einfachsten Fall ist das Ziel, zwei Endpunkten, normalerweise Alice und Bob genannt, einen gemeinsamen Schlüssel bereitzustellen, den nur sie kennen. Dafür arbeitet QKD immer mit zwei Kommunikationskanälen. Der Quantenkanal transportiert eine Folge von Qubits, also Quantenbits, von denen einige, aber nicht alle, den geheimen Schlüssel bilden. Die Übertragung geschieht in Form von einzelnen Photonen, meist über eine Glasfaser. Der zweite Kanal ist ein gewöhnlicher Kommunikations-Link, der aber zwingend authentifiziert sein muss. Über diesen authentifizierten klassischen Kanal tauschen Alice und

Bob in mehreren Runden Informationen aus, um aus der ursprünglich gesendeten Quantenbitfolge einen gemeinsamen Schlüssel zu erzeugen.

Für die Sicherheitsbewertung wird angenommen, dass eine Spionin, genannt Eve, den Quantenkanal im Rahmen der physikalischen Gesetze beliebig messen und manipulieren kann. Den klassischen Kanal kann Eve aufgrund der Authentifizierung zwar mithören, aber nicht manipulieren.

## Schutzwall Quantenphysik und Informationstheorie

Die Sicherheit von QKD fußt auf zwei fundamentalen physikalischen

Eigenschaften: Der Heisenbergschen Unschärferelation und dem No-Cloning-Theorem. Erstere besagt, dass bestimmte Paare von Messgrößen nicht beide zum gleichen Zeitpunkt beliebig genau gemessen werden können. Je präziser die Messung eines Parameters ausfällt, desto größer wird die Messunsicherheit beim anderen Parameter. QKD-Verfahren basieren oft auf der Zeit-Phase- oder der Polarisations-Unschärferelation einzelner Photonen. Aus dem No-Cloning-Theorem folgt, dass sich Quantenbits nicht perfekt kopieren lassen. Ein Mithören am Quantenkanal hinterlässt also immer Spuren und kann bemerkt werden.



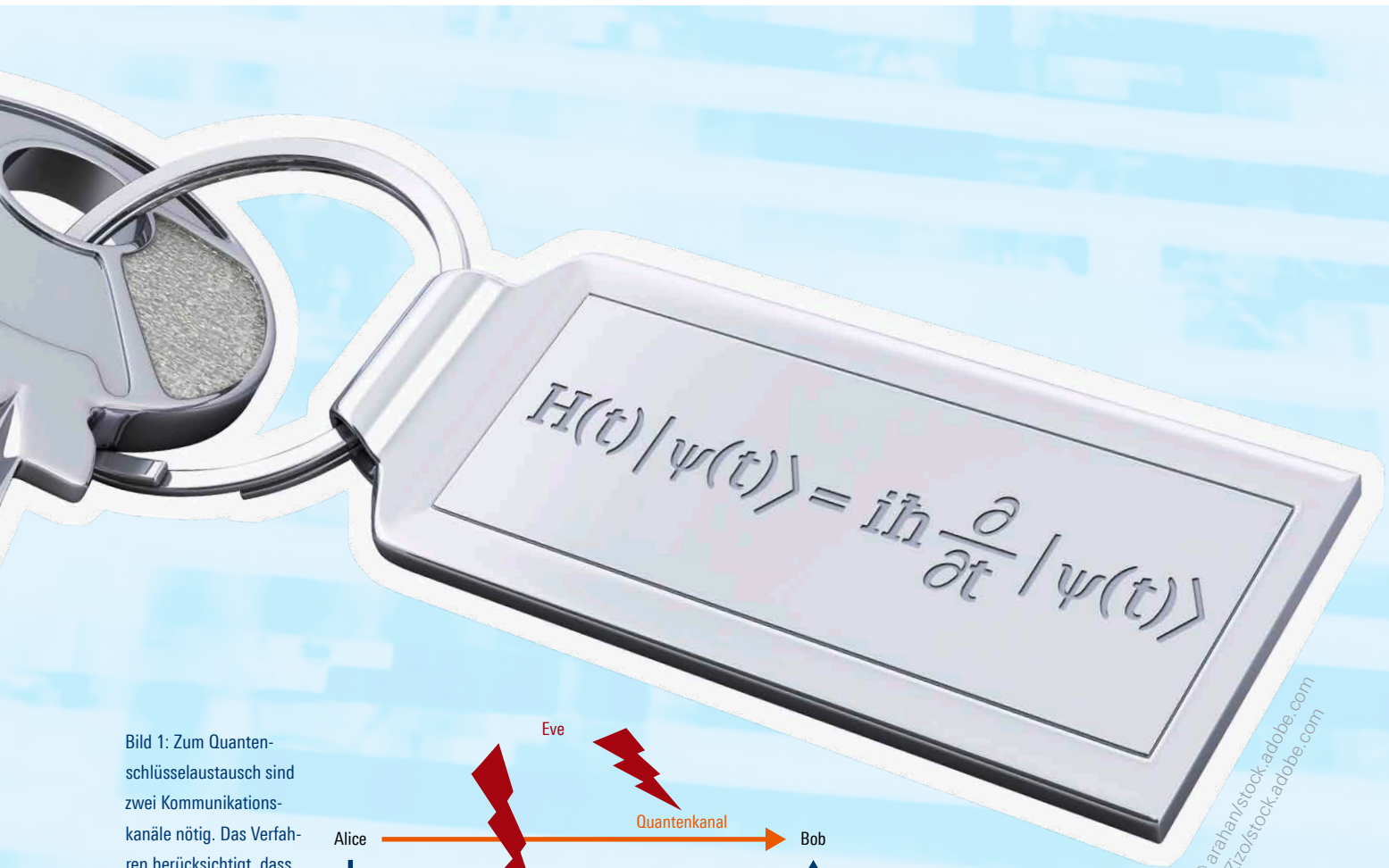
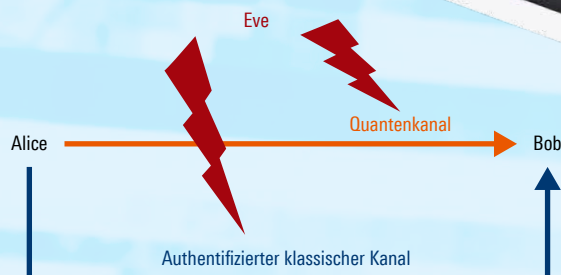


Bild 1: Zum Quantenschlüsselaustausch sind zwei Kommunikationskanäle nötig. Das Verfahren berücksichtigt, dass beide abgehört und der Quantenkanal außerdem manipuliert werden kann.



### Wie QKD funktioniert

Anschaulich lässt sich das Prinzip hinter QKD anhand des BB84-Protokolls erklären. Historisch ist es das erste QKD-Protokoll und wurde, wie der Name andeutet, 1984 von Charles H. Bennett und Gilles Brassard vorgeschlagen. Seine Prinzipien lassen sich auf viele weitere QKD-Protokolle übertragen.

Der Gedanke hinter dem BB84-Protokoll ist, Senderin Alice und Empfänger Bob bei der Übertragung der Quantenbits durch geschicktes Ausnutzen der Heisenbergschen Unschärferelation und des No-Cloning-Theorems einen Informationsvorteil

gegenüber Spionin Eve zu verschaffen. Ausgespielt wird dieser Informationsvorteil in der Nachbearbeitung der Quantenbitfolge. Nach den drei Schritten Fehlerabschätzung, Fehlerkorrektur und Maß an Privatsphäre erhöhen, liegt Alice und Bob ein gemeinsamer und sicherer Schlüssel vor. In der meist englischsprachigen Fachliteratur sind diese drei Schritte als Error Estimation, Error Correction und Privacy Amplification bekannt.

Die Kommunikation startet über den Quantenkanal. Alice schickt eine Folge von Quantenbits, indem sie einzelne Photonen kodiert, beispielsweise über verschiedene lineare

Polarisationen. Bob misst die Polarisation der empfangenen Photonen. Dafür definieren sie zwei zueinander rotierte Kodierungsbasen (Bild 2).

Aufgrund der Heisenbergschen Unschärferelation misst Bob nur dann die korrekte Polarisation eines empfangenen Photons, wenn er zum Messen die gleiche Basis verwendet wie Alice beim Senden. Hat er die falsche Basis gewählt, erhält er ein zufälliges Ergebnis, das statistisch in etwa 50 Prozent der Fälle richtig ist. Für jedes übertragene Quantenbit wählen Alice und Bob zufällig und unabhängig voneinander eine der beiden Basen aus. Was zunächst vielleicht

unnötig kompliziert erscheint, dient zum Schutz. Nach dem Übertragen einer längeren Quantenbitfolge tauschen sich Alice und Bob über den authentifizierten klassischen Kanal über die jeweilige Basenwahl aus – nicht jedoch über die gesendeten Bits selbst. Sie verwerfen alle Messungen, bei denen ihre Basenwahl unterschiedlich war. Dies wird als Sifting oder zu Deutsch als Aussieben bezeichnet. Da Eve bei einem Abhörversuch ebenfalls zufällig Basen wählen muss, ist es praktisch unmöglich, dass sie dabei immer richtig liegt. Die dadurch verursachten Fehler gibt Eve an Bob weiter: Je mehr Photonen Eve abzuhören versucht, desto mehr Fehler verursacht sie.

**Nachbearbeitung: Drei Schritte zum sicheren Quantenschlüssel**

Dies können Alice und Bob nun in der Nachbearbeitung ausnutzen. Zur Fehlerabschätzung vergleichen sie eine kleine und zufällig ausgewählte Menge von Bitwerten miteinander. Weil dieser Vorgang abgehört werden kann, verwerfen sie die

Bits anschließend. Aus dem Vergleich dieser wenigen Bitwerte schätzen sie eine Fehlerrate für ihre gesamte Quantenbitfolge ab und ermitteln so, wie viele Informationen Eve maximal über den Schlüssel erlangt haben kann. In der Informationstheorie spricht man hier von Mutual Information (gegenseitige Information oder auch Transinformation). Im Wesentlichen ist damit die gemeinsame Information von Sender und Empfänger über die Quantenbitfolge gemeint. Den Zusammenhang zwischen Fehlerrate und Mutual Information veranschaulicht Bild 3:

Je mehr Fehler beim Übertragungsprozess entstehen, desto kleiner wird die Mutual Information zwischen Alice und Bob. Die Polarisations-Unschärferelation zusammen mit der Wahl der zwei Basen führt dazu, dass das Mithören von Eve Übertragungsfehler erzeugt. Deshalb erhöht sich bei steigender Fehlerrate ihre maximal mögliche Mutual Information mit Alice, also ihr Wissen über den Schlüssel. Obwohl in der

Praxis Fehler durch Störeffekte wie Leitungsrauschen entstehen können, muss man zur Sicherheitsabschätzung vom ungünstigsten Fall ausgehen, dass alle Fehler durch das Mithören von Eve entstehen. Dann gibt die Fehlerrate einen direkten Hinweis darauf, wie viele Informationen über die Quantenbitfolge Eve maximal abgehört haben kann. Das Überschreiten eines gewissen Fehler-Schwellenwerts führt zum Abbruch und Neubeginn des Schlüsselaustauschs. Verschleiern kann Eve den Anstieg in der Fehlerrate auch nicht dadurch, dass sie ihre Messungen an perfekten Kopien von abgefangenen Quantenbits durchführt und die fehlerfreien Originale an Bob weiterleitet. Das No-Cloning-Theorem verbietet genau diesen Versuch.

So lange sich Alice und Bob links vom Schnittpunkt in Bild 3 befinden, haben sie einen Informationsvorteil und können einen gemeinsamen Schlüssel erzeugen, der Eve nicht bekannt ist. Dafür sind die beiden weiteren Schritte nötig.

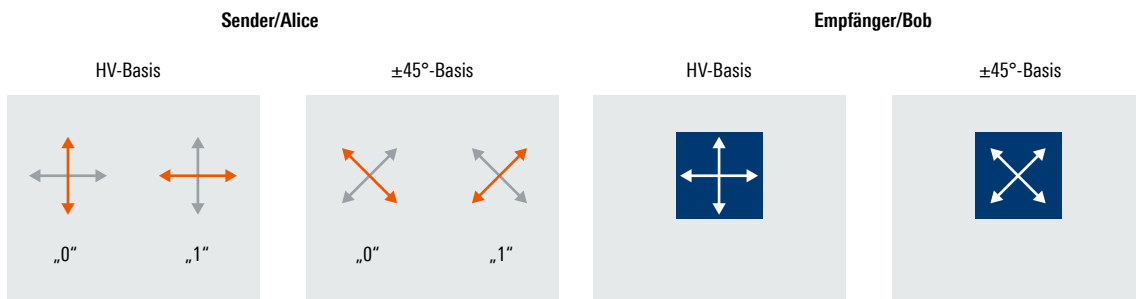
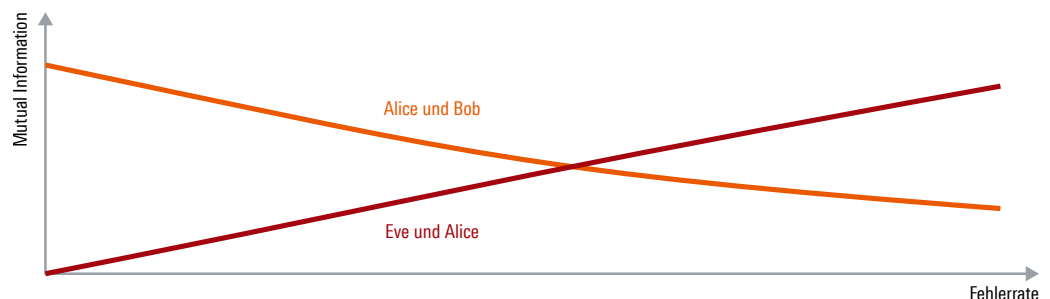


Bild 2: In der Horizontal-Vertikal-Basis (HV) repräsentiert eine vertikale Polarisation den Bitwert null, eine horizontale den Bitwert eins. Analoges gilt in der rotierten 45°-Basis.

Bild 3: Das Abhören des Quantenkanals führt zu Übertragungsfehlern. Am Schnittpunkt haben Absenderin Alice und Empfänger Bob genauso viele gemeinsame Informationen (Mutual Information) über die Quantenbitfolge wie Absenderin Alice und Spionin Eve.



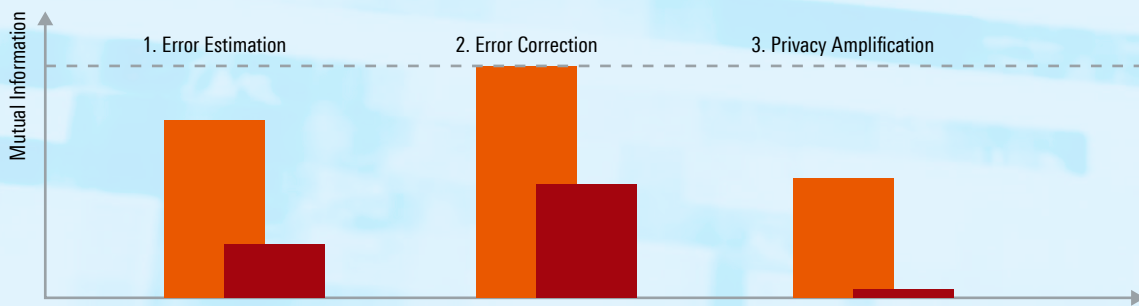


Bild 4: Die gemeinsame Information über die Bitfolge von Alice und Bob (orange) ändert sich im Laufe der drei Nachbereitungsschritte. Die gemeinsame Information von Alice und Eve (rot) ist am Ende minimiert. Die gestrichelte Horizontale markiert die Schwelle, an der die Mutual Information pro Bit dem Wert eins entspricht. Der verbleibende rote Balken nach der Privacy Amplifikation ist nur symbolisch eingetragen.

Über die Fehlerkorrektur merzen sie die verbleibenden Fehler zwischen ihren Bitfolgen aus. Dafür müssen sie sich über den authentifizierten Kanal über weitere Quantenbits ihrer Quantenbitfolge austauschen. Danach stimmen beide Quantenbitfolgen überein (Bild 4). Anders ausgedrückt: Die Mutual Information pro übertragenem Quantenbit ist eins. Weil aber Eve dabei lauschen kann, hat auch sie gewisse Informationen über den Schlüssel erhalten. Daher erhöhen

sich bei diesem Schritt oranger und roter Balken.

Der dritte Schritt läuft erneut über den authentifizierten klassischen Kanal ab. Eves Kenntnisse über den gemeinsamen Schlüssel von Alice und Bob werden minimiert, indem sie Funktionen nutzen, die aus mehreren Bits als Input einen Output aus wenigen Bits erzeugen. Nur wenn alle Input-Bits bekannt sind, können die resultierenden Bits berechnet werden.

Nach der Fehlerkorrektur trifft das nur auf Alice und Bob zu, daher liegt ihnen nun eine Bitfolge vor, die Eve gänzlich unbekannt ist. Sie ist der geheime Schlüssel (Secret Key). Zwar hat sich durch diesen letzten Schritt das Informations-Delta nicht weiter erhöht, aus sicherheitstechnischen Aspekten ist es aber günstiger, potenziellen Angreifern gar keine Informationen über einen verwendeten Schlüssel zu geben.

DR. JASPER RÖDIGER, ROHDE & SCHWARZ

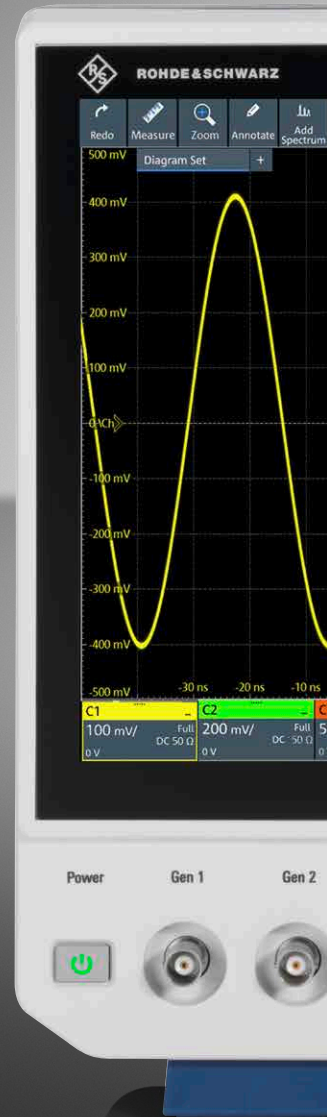
## QKD BEI ROHDE & SCHWARZ

Für herstellerübergreifende Kompatibilität von QKD-fähigen Geräten hat das Europäische Institut für Telekommunikationsnormen (ETSI) unter anderem die beiden Standards ETSI GS QKD 004 und ETSI GS QKD 014 spezifiziert.

Die R&S®SITLine ETH Ethernet-Verschlüsseler wurden um eine Schnittstelle nach diesem Standard erweitert, über die sich insbesondere QKD-Schlüsselgeneratoren anbinden lassen. In den kommenden Jahren wird das Portfolio an sicherer und QKD-fähiger Netzwerkausrüstung schrittweise erweitert.



Bild 5: Der R&S®SITLine ETH-XL Ethernet-Verschlüsseler ist QKD-ready.



# NEUE MASSSTÄBE IN DER MITTELKLASSE

Digitaltrigger, höchste Aktualisierungsrate und neuer ASIC: Mit den R&S®MXO 4 Oszilloskopen wird die Mittelklasse um zahlreiche Funktionen reicher.



Im Jahr 2010 hat Rohde&Schwarz den Markt für Oszilloskope betreten und in kürzester Zeit ein breites Produktsortiment aufgebaut. Heute deckt es Bandbreiten von 70 MHz bis 16 GHz ab und reicht von Handheld-Oszilloskopen für den Feldeinsatz über Einstiegsmodelle für den Lehrbetrieb bis zu High-End-Geräten für Forschungslabore. Oft werden Innovationen zuerst in Geräten der höheren Leistungsklasse eingeführt. Bei der neuesten Familie von Oszilloskopen, den R&S®MXO 4, ist das anders. Sie bieten die Leistungsfähigkeit von Geräten der Oberklasse – inklusive einiger Funktionen, die es bisher in keinem anderen Oszilloskop gab – und

fallen dabei preislich ins Mittelklasse-Segment. Die Gerätefamilie besteht aus Vierkanal-Modellen mit Bandbreiten von 200 MHz bis 1,5 GHz.

### Schnelle Einblicke in Signaldetails

Gänzlich neu auf dem Markt für Oszilloskope ist die Echtzeit-Aktualisierungsrate von über 4,5 Millionen Messkurven pro Sekunde. Je höher dieser Wert ist, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, auch sehr schnelle und unregelmäßig auftretende Signale zu erfassen (Bild 1). Entwicklungsteams erhalten so ein besseres Verständnis ihrer Designs, was letztlich den Testaufwand reduziert.

Die Signalverarbeitung wird auf dem MXO-EP ausgeführt, ein 200-Gbit/s-ASIC aus eigener Entwicklung (Bild 3). Er ist einer von mehreren neuen Technologiebausteinen im R&S®MXO 4. Das Oszilloskop hält die hohe Aktualisierungsrate auch dann noch aufrecht, wenn komplexe Funktionen wie automatisierte Messungen, Spektrumanalyse oder Deep-Memory-Erfassungen aktiv sind. Die hauseigene ASIC-basierte Signalverarbeitung sorgt für reibungslose Arbeitsabläufe.

**12-bit-Auflösung ohne Kompromisse**

Ein 12-bit-ADC setzt das Eingangssignal digital um. Er ist ohne Einschränkungen bei allen Abtastraten aktiv. Gegenüber einer 8-bit-Architektur, die nach wie vor in vielen

Oszilloskopen verwendet wird, stellt das eine 16-fache Verbesserung der Vertikalaufklärung dar. Der HD-Modus steigert sie auf 18 bit, sodass Signaldetails sichtbar werden, die andernfalls durch Rauschen verdeckt würden. Für Geschwindigkeitsvorteile wurde der HD-Modus direkt über die Hardware umgesetzt. Beim Rauschen setzt das R&S®MXO 4 neue Maßstäbe mit lediglich 22 µV AC (eff.) bei 1 mV/Div.

Es bietet eine ausgezeichnete Empfindlichkeit bis zu 500 µV/Div ohne Bandbreiteneinbußen und den in dieser Klasse größten Offsetbereich von ±5 V bei einer Skalierung von 500 µV/Div an einem 50-Ω-Pfad ohne spezielle Tastköpfe. Die Messkurve lässt sich einfach und ohne weitere

Hilfsmittel in die Mitte des Bildschirms legen, sodass vor allem Signale mit hohem Gleichstromanteil deutlich zugänglicher für die Analyse werden.

**Mehr Signalzeit erfassen**

Pro Kanal stehen 400 MPunkte Speicher zur Verfügung – ohne Erweiterung und bei gleichzeitiger Messung an allen vier Kanälen. Diese Speichertiefe liegt weit über der marktüblichen Grundausstattung. Anwenderinnen und Anwender können damit deutlich längere Signalausschnitte aufzeichnen und auch bei langsamerer Zeitbasis die volle Bandbreite des Geräts ausnutzen.

Nicht immer ist der gesamte Signalverlauf von Interesse. Zum Beispiel

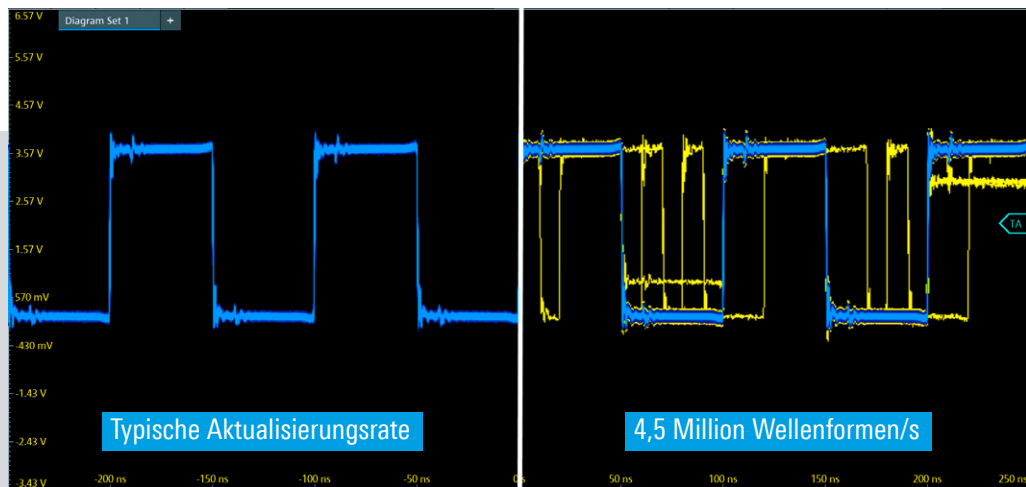


Bild 1: Mit 4,5 Millionen Messkurven pro Sekunde lassen sich Signale erfassen, die sonst unsichtbar bleiben würden.

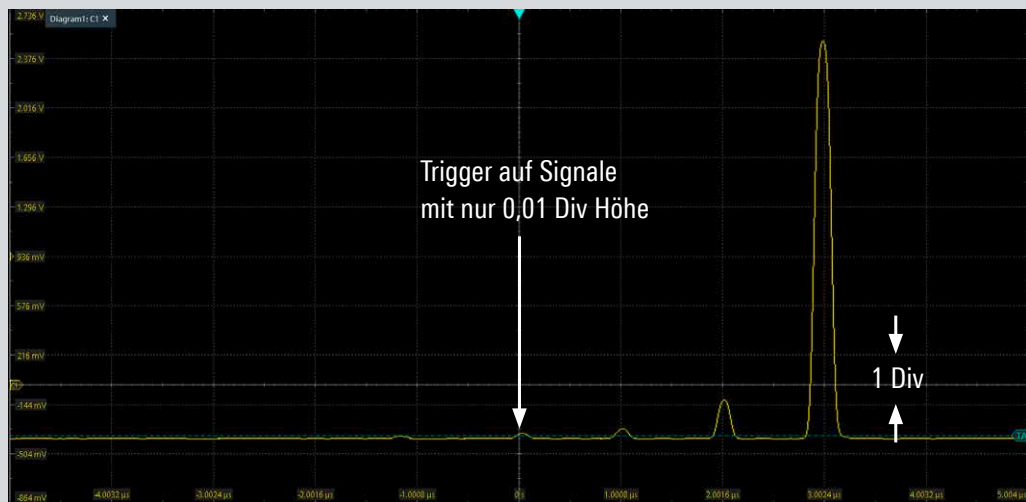


Bild 2: Das R&S®MXO 4 bietet den empfindlichsten Trigger der Branche mit 1/10 000 einer vertikalen Unterteilung und erreicht eine äußerst kurze Trigger-Reaktivierungszeit von < 21 ns.





**Bild 3: Blick in das Innenleben des R&S®MXO 4:**  
Für die Signalverarbeitung wurde ein neuer  
200-Gbit/s-ASIC entwickelt.

konzentriert sich die Analyse von HF-Pulsen, Lasersignalen oder Datenströmen in seriellen Bussen auf die aktiven Phasen der Signalübertragung. Die Pausenzeiten sind nicht von Interesse. Sie lassen sich mit einem segmentierten Speicher gezielt aussparen, um sie gar nicht erst abzuspeichern. Segmentierter Speicher gehört zur Standardausstattung des R&S®MXO 4. Der so gewonnene Speicherplatz gibt Anwenderinnen und Anwendern die Freiheit, entweder längere Signalverläufe aufzuzeichnen oder eine höhere Bandbreite zu wählen. Der History-Modus muss in dieser Oszilloskop-Serie nicht auf Knopfdruck gestartet werden, sondern zeichnet den Signalverlauf permanent auf. Einmal erfasste Signale stehen später auf Knopfdruck wieder zur Verfügung. Für die Analyse des Ein- und Ausschaltverhaltens von Komponenten bietet sich die Option zur Speichererweiterung auf 800 MPunkte an.

#### **Hochgenauer digitaler Trigger**

Fast alle auf dem Markt befindlichen Oszilloskope arbeiten mit analogen Triggern. Dafür wird das

Eingangssignal in einen Pfad zur Signalausgabe auf dem Bildschirm und einen anderen Pfad zur Triggerung aufgeteilt. An Grenzen stößt dieser Ansatz bei sehr kleinen Signaländerungen und es lassen sich nur bestimmte Filter auf das Triggersignal anwenden. Rohde & Schwarz hat eine digitale Trigger-Technologie entwickelt, die einen einzigen Signalpfad nutzt. In den leistungsstärkeren und hochpreisigeren Oszilloskopen hat sie sich bereits als deutlich präziser und empfindlicher als ihr analoges Pendant erwiesen. Der digitale Trigger kann auf Signaldetails angewendet werden, die für einen Analogtrigger zu fein sind (Bild 2) und ist mit einer größeren Anzahl an Filtern kombinierbar.

Diese Gerätefunktion, die bisher der Oberklasse vorbehalten war, gehört zur Standardausstattung der R&S®MXO 4 Oszilloskope. Kein vergleichbares Oszilloskop auf dem Markt verfügt über eine derart hohe Trigger-Empfindlichkeit. Voller Zugriff auf die Trigger-Hysterese-Einstellung erlaubt ein flexibles anpassen der Trigger-Bedingungen an die Messaufgabe

und eine deutlich umfassendere Rauschunterdrückung im Trigger-Signal. Zusammen mit der 12-bit-Architektur und dem HD-Modus bringen die Geräte alles mit, was Anwenderinnen und Anwender heute von einem modernen Oszilloskop an Messpräzision erwarten können und sogar noch darüber hinaus.

#### **Leistungsstark auch im Frequenzbereich**

Die Domäne von Oszilloskopen ist eigentlich der Zeitbereich. Weil Produktentwicklerinnen und -entwickler aber häufig auch im Frequenzbereich messen, wurden die R&S®MXO 4 Oszilloskope mit leistungsstarken Funktionen zur Spektrumanalyse ausgestattet. Als erste Oszilloskope überhaupt führen sie 45.000 schnelle Fourier-Transformationen (FFT) pro Sekunde durch. Vergleichbare Oszilloskope schaffen teilweise weniger als zehn. Dies ermöglicht eine schnelle und einfache Erfassung von Signalfehlern im Spektrum, insbesondere bei der EMV-Fehlersuche (Bild 4).

Die Konfiguration der Spektrumsfunktion wurde durch die Eingabe gängiger Parameter wie Mittenfrequenz, Span oder Auflösebandbreite (RBW) vereinfacht. Diese Einstellungen sind unabhängig von den Zeitbereichseinstellungen, jedoch immer noch zeitkorreliert. So bleibt die zeitkorrelierte Darstellung des Signalspektrums erhalten. Die Funktionen zur Spektrumanalyse sind bereits im Grundgerät enthalten und sorgen für eine bessere Darstellung von HF-Signalen als mit jedem anderen Oszilloskop dieser Klasse.

**Bedienung: Auf die Anwender gehört**

Wie gut sich mit einem Oszilloskop arbeiten lässt, hängt nicht zuletzt von dessen Bildschirm und grafischer Benutzeroberfläche ab. Die R&S®MXO 4 Serie punktet hier mit einem kapazitiven 13,3-Zoll-Full-HD-Touch-Display mit Gestenunterstützung. In die Entwicklung der intuitiven Bedienoberfläche sind zahlreiche Anwenderrückmeldungen eingeflossen (Bild 5).

Die Touch-Bedienbarkeit wird durch ein übersichtliches Box-Design

wesentlich verbessert. Um einen Parameter zu ändern, reicht das Berühren eines beliebigen Punktes auf dem Einstellungsfeld. Die größeren Felder erleichtern das effektive Arbeiten. Alternativ ist auch das Arbeiten mit Maus und/oder Tastatur möglich. Über die effizient organisierte Toolbar lassen sich wichtige und häufig verwendete Funktionen schnell mit nur einer Berührung aufrufen. Reicht die Standarddarstellung für bestimmte Messaufgaben nicht aus, kann über das R&S®SmartGrid ein individuelles Messkurven-Layout

festgelegt werden, um alles Wichtige stets im Blick zu behalten. Das R&S®SmartGrid ist eine weitere Funktion, die es bisher nur in leistungsstärkeren Oszilloskopen gab.

**Über das Grundgerät hinaus**

Durch ihre geringe Stellfläche, das kaum noch hörbare Betriebsgeräusch, eine VESA-Montageschnittstelle und einen Rahmen für den Einbau in Racks fügen sich die R&S®MXO 4 Oszilloskope ideal in verschiedenste Arbeitsplätze ein.

JITHU ABRAHAM, ROHDE & SCHWARZ

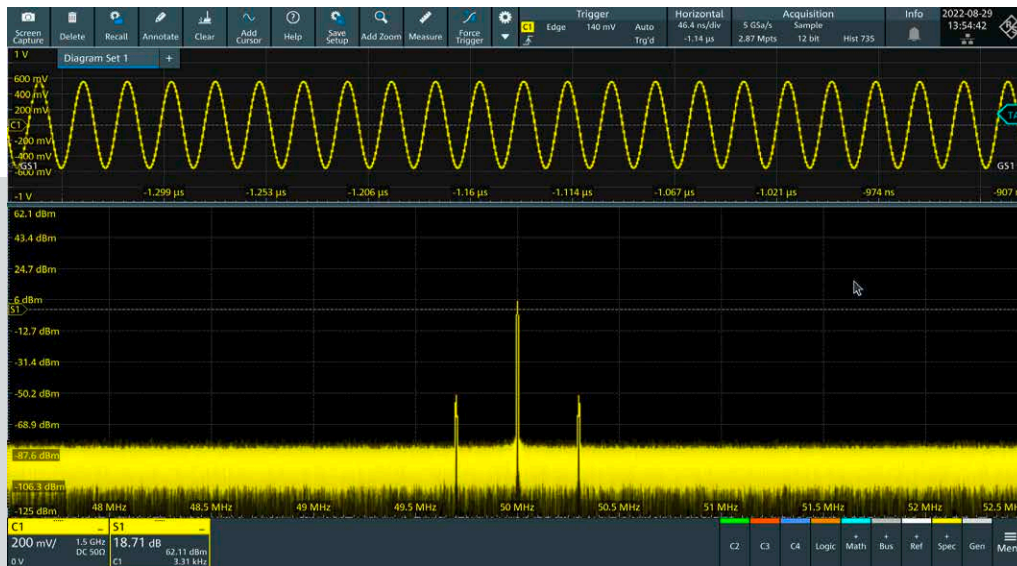


Bild 4: Die Spektrumfunktion des R&S®MXO 4 bietet die vertraute Oberfläche eines Spektrumanalysators.



Bild 5: Auch bei geöffneten Einstellungsdialogen steht noch reichlich Darstellungfläche für die Messkurven bereit. Damit wurde ein Wunsch der Anwenderinnen und Anwender erfüllt.



Zu den wichtigsten Erweiterungsmöglichkeiten zählen eine Mixed-Signal-Option (MSO) mit 16 integrierten digitalen Kanälen, ein integrierter Zweikanal-100-MHz-Arbiträrgenerator sowie Optionen zur Protokoll-Triggenung und -Decodierung für eine Vielzahl von Standard-Industriebussen. Für Leistungsmessungen sind aktive und passive Tastköpfe für Spannungs- und Strombereiche von  $\mu\text{A}$  bis  $\text{kA}$  und von  $\mu\text{V}$  bis  $\text{kV}$  vorhanden. Spezielle Power-Rail-Tastköpfe erkennen selbst kleine und unregelmäßige Verzerrungen an DC-Spannungsversorgungen.

Bild 6: Das neue R&S®MXO 4 Oszilloskop mit Mixed-Signal-Option (MSO) und DUT.



Bild 7: Mit einem Hochspannungs-Differenzialtastkopf lassen sich zuverlässig Schaltnetzteile vermessen. Durch das leise Betriebsgeräusch eignen sich die R&S®MXO 4 Oszilloskope auch für Büroarbeitsplätze.

# AUGEN AUF BEI DER SIGNALINTEGRITÄT

Augendiagramme sind extrem praktische Hilfsmittel für Signalintegritätstests. Um sie zu berechnen, arbeitet das R&S® RTP Oszilloskop erstmals mit einem hardwarebasierten Ansatz. Dadurch ergeben sich deutliche Geschwindigkeitsvorteile bei der Analyse serieller Signale.



Augendiagramme zeigen Jitter und Rauschen eines Datensignals auf einen Blick. Außerdem geben sie eine schnelle Übersicht darüber, wie robust eine Datenübertragung ist. Ihre hohe Bedeutung innerhalb der Testlandschaft zeigt sich auch darin, dass mittlerweile zahlreiche Standards von schnellen Busschnittstellen Augenmasken für den Test der Signalintegrität definieren. Das ist zum Beispiel bei USB und PCI-Express (PCIe) der Fall.

## Augendiagramme für serielle und parallele Datenübertragung

Für eine zuverlässige Analyse bedarf es einer hohen Anzahl an Datenbits, die übereinander gelagert das Datenaugen formen. Um die einzelnen Bits aus dem Datenstrom zu

extrahieren und korrekt zu überlagern, ist eine bitbezogene Zeitreferenz nötig. Diese kann, wie bei den parallelen DDR-Schnittstellen, ein zweites Signal (Clock, Data Strobe) sein. Bei seriellen Signalen ist das Taktsignal (Clock) im Datenstrom eingebettet. Damit ein Oszilloskop es als Referenz zur Darstellung von Augendiagrammen nutzen kann, muss es zuerst über eine Clock-Data-Recovery (CDR) wiedergewonnen werden. Dieser Schritt geschieht in aller Regel in der softwaregeführten Nachbearbeitung des Datensignals und erfordert eine gewisse Rechenzeit. Das finale Augendiagramm zeigt die Signalqualität mit Parametern wie Höhe und Breite des Augeninneren, Zeit- und Amplitudenfehler in Form von Jitter

und Rauschen oder auch das Wirken von Vorverzerrern.

## Deutlich schneller mit hardwaregeführter Clock-Data-Recovery (HW-CDR)

Rohde & Schwarz hat eine hardwaregeführte Clock-Data-Recovery entwickelt, die Anwenderinnen und Anwendern erstmals im High-Performance-Oszilloskop R&S® RTP zur Verfügung steht. Weil sie direkt in die Trigger-Hardware integriert ist, entfällt die Berechnung per Software und spart viel Zeit. So eröffnet sich ein ganz neuer Ansatz zur Augenanalyse von seriellen Signalen.

Die HW-CDR kann wahlweise jeden Eingangskanal des R&S® RTP als Quelle nutzen, unterstützt Datenraten bis 16 Gbit pro Sekunde und erlaubt die Konfiguration der Trackingbandbreite von 1/500 bis zu 1/3000 der nominalen Bitrate. Nach erfolgreichem Einrasten auf das DUT-Signal läuft die HW-CDR kontinuierlich. Die Zeitstempel werden parallel zu den Daten der Messkurve im Erfassungsspeicher abgelegt und stehen neben der Augenberechnung auch für mathematische Analysen zur Verfügung.

## „Echtzeit“-Auge für Langzeitbeobachtung

Mit der HW-CDR als Trigger wird erstmals eine Augenanalyse quasi in Echtzeit möglich. Dazu akquiriert das Oszilloskop kurze Signalsequenzen

und stellt diese sofort im Diagramm dar. Bei unendlich gewählter Persistence-Einstellung baut sich dann schnell das Augendiagramm auf. Das R&S®RTP erreicht dabei eine maximale Rate von > 400 000 Unit Intervalls (nominale Bitbreite) pro Sekunde. Damit können auch sporadische Fehler wie Übersprechen von benachbarten Komponenten schnell und zuverlässig detektiert werden. Mit Maskentests und Histogrammen sind weitere Analysen möglich, ohne die Erfassungsrate nennenswert zu bremsen. Dazu gehören auch Langzeitbeobachtungen, bei denen beispielsweise Maskentestfehler zum Stopp der Messung führen, um Fehlerquellen weiter erforschen zu können. Die hohe Erfassungsrate der HW-CDR stellt sicher, dass auch bei langen Beobachtungszeiträumen schnelle und nur sporadisch auftretende Signale nicht übersehen werden.

### Standardspezifische Augenanalyse an einem langen Datenstrom

Mit der HW-CDR des R&S®RTP ist auch die Augenanalyse eines langen, zusammenhängenden Bitstroms möglich, wie sie beispielsweise die Testspezifikationen von USB oder PCIe Standards fordern. Neben den reinen Messkurven werden auch die Flankenzeitpunkte der HW-CDR gespeichert und für die schnelle Augenberechnung bereitgestellt.

Mit der Augendiagramm-Funktion sind auch weitere Einstellungen der Berechnung und Darstellung möglich. Beispielsweise kann ein Auge nur aus solchen Bits dargestellt werden, denen ein Bitwechsel oder eine von der Anwenderin oder vom Anwender festgelegte Bitfolge vorausgegangen ist.

### Vom schnellen Einstieg bis zur detaillierten Analyse

Nachdem das Augendiagramm dargestellt ist, sind weitere detaillierte Analysen möglich. Neben einfachen Cursor-Messungen bietet das Oszilloskop auch eine umfangreiche Auswahl an automatisierten Augenmessungen.

Eine weitere wichtige Funktion ist der Augenmaskentest. Signalverläufe durch eine Maskenfläche werden als Verletzungen registriert. Das R&S®RTP bietet für viele Standards bereits vorgefertigte Masken. Andernfalls sind Masken auch direkt am Bildschirm oder über bestimmte Vorgaben im Maskendialog schnell selbst erstellt.

Die Eye-Stripe-Funktion markiert eine Verletzung in der Augenmaske als roten Strich am entsprechenden Zeitpunkt in der originalen Messkurve. Das erleichtert die Ursachenforschung für Maskenverletzungen. Mit eingeschaltetem Zoom-Coupling fokussiert die Zoomfunktion

der Messkurve auf die aktuell in der Ergebnistabelle gewählte Verletzung.

Die Augendiagramme zeigen an den Bitübergängen links und rechts den Jitter des Signals und an den Signalamplituden in der zeitlichen Mitte des Auges das Signalrauschen. Die Histogramm-Funktion stellt die Verteilung von Jitter und Rauschen übersichtlich und auf einen Blick erfassbar dar. Mit der Separierungsoption für Jitter und Rauschen (R&S®RTP-K134) ist ein weiteres Herunterbrechen der jeweiligen Komponenten möglich.

### Zusammenfassung

Das R&S®RTP High-Performance-Oszilloskop bietet umfangreiche Möglichkeiten für die Analyse der Signalintegrität von elektrischen Signalen. Mit der R&S®RTP-K137 Advanced Eye Analyse Option, die Datenraten bis 16 Gbit pro Sekunde unterstützt, steht den Anwenderinnen und Anwendern erstmalig eine integrierte HW-CDR als Trigger zur Verfügung. Damit ist sowohl eine schnelle Erfassung von kurzen Bitsequenzen für ein schnelles Augendiagramm, als auch die Analyse von langen, teststandardkonformen Bitsequenzen möglich.

GUIDO SCHULZE, ROHDE & SCHWARZ

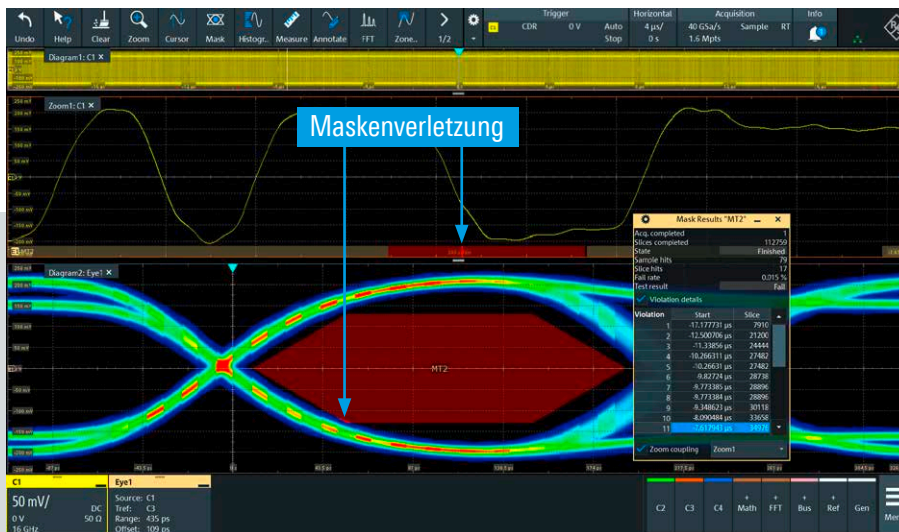


Bild 1: Die Eye-Stripe-Funktion erleichtert die Fehlersuche. Maskenverletzungen werden im Augendiagramm und im Zeitsignal der Messkurve rot markiert (blaue Pfeile). In der Ergebnistabelle sind alle Verletzungen aufgelistet und der aktuell dargestellte Signalabschnitt ist blau markiert.



# IMPEDANZVERHALTEN ZUVERLÄSSIG MESSEN

Die Impedanzmessung an passiven Komponenten ist für Elektronikentwickler und Komponentenhersteller gleichermaßen relevant. Dafür erzeugen die R&S®LCX LCR-Meter Testsignale bis 10 MHz und bieten maßgeschneiderte Messfunktionen für Transformatoren.



Mit den LCR-Metern der R&S®LCX Gerätefamilie betritt Rohde & Schwarz den Markt für hochpräzise Impedanzmessungen.

Wer galvanisch getrennte Schaltnetzteile entwirft, benötigt einen passenden Hochfrequenz-Transformator. Ihn maßgeschneidert zu entwickeln, ist immer ein Abwägungsprozess. Wird der Transformator zum Beispiel auf hohe Magnetisierungsinduktivität ausgelegt, erhöht das meist auch die Streuinduktivität und damit den Streufluss – vor allem dann, wenn zur galvanischen Trennung verschiedene Isolationsschichten zwischen Primär- und Sekundärseite vorgesehen sind. Die unerwünschten Effekte dabei sind eine erhöhte Verlustleistung am Transformator und mögliche Probleme bei der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) durch erhöhte Störausstrahlung. Letztere wird besonders bei hohen Schaltfrequenzen zutage treten.

### Transformatoren schnell vermessen

Damit Entwickler und Entwicklerinnen abschätzen können, wie sich ein Hochfrequenz-Transformator auf Wirkungsgrad, maximale Nennspannung und EMV-Verhalten auswirkt, also die zentralen Leistungsparameter des Schaltnetzteils, müssen sie den Baustein präzise charakterisieren. Für einen guten Schaltungsentwurf sind neben der Streuinduktivität noch weitere Parameter wichtig, zum Beispiel die Induktivität der Primär- und Sekundärspule, die Wicklungskapazität oder der Wicklungswiderstand.

Für solche Messaufgaben eignen sich die LCR-Meter aus der Gerätefamilie R&S®LCX. Sie geben auch weitere für Transformatoren typische Parameter direkt als Messwert aus, die Anwender sonst selbst ausrechnen müssten. Dazu gehören das Übersetzungsverhältnis und die Gegeninduktivität.

### Zwei Modelle decken grundlegende und erweiterte Messanforderungen ab

Entwickelt wurden die LCR-Meter für präzise Messungen an allen gängigen passiven Komponenten. Dafür arbeiten sie nach dem Prinzip der selbstabgleichenden Messbrücke. Die Gerätebedienung erfolgt bequem per Touch-Steuerung über einen 5-Zoll-Farbbildschirm. Umfangreiche Fernsteuerfunktionalität ermöglicht den Einsatz in automatisierten Systemen und die Bedienung über eine Web-Schnittstelle.

Die Gerätefamilie besteht aus zwei Modellen. Sie bringen alle Funktionen mit, die man von modernen Messgeräten für die Aufgaben in Forschung, Entwicklung und im Produktionsumfeld erwarten kann. Das R&S®LCX100 ist mit einem Testsignal-Frequenzbereich von 4 Hz bis 300 kHz für die grundlegenden Messaufgaben im Entwicklungslabor ausgelegt. Das R&S®LCX200 reicht in der Grundausstattung bis 500 kHz und kann, wenn zum Beispiel die Eigenresonanz von Bauelementen bestimmt werden soll, auf 1 MHz und 10 MHz erweitert werden. Der Impedanzmessbereich ist mit 10 mΩ bis 100 MΩ für beide Modelle identisch, genauso wie die ±0,05% Grundgenauigkeit für Impedanzmessungen. Weitere Optionen ermöglichen zusätzliche Analysefunktionen und eine vielseitige Auswahl von Testhalterungen stellt den Einsatz für Messungen an den unterschiedlichsten Komponenten sicher.

# ZUBEHÖR

## R&S®LCX-Z1

Testadapter für bedrahtete Bauelemente



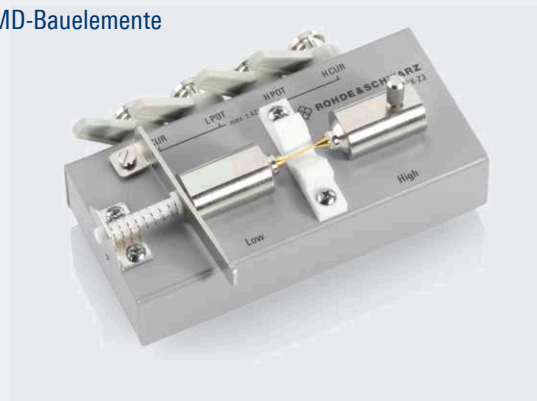
## R&S®LCX-Z2

Messleitung mit Kelvin-Klemmen



## R&S®LCX-Z3

Testadapter für SMD-Bauelemente



## R&S®LCX-Z11

BNC-Verlängerung



## R&S®LCX-Z4

Testpinzette für SMD-Bauelemente



## R&S®LCX-Z5

Testkabel zum Messen von Transformatoren





### Bauteile sortieren – vollautomatisiert

Die LCR-Meter eröffnen auch den Weg zur Prozessautomatisierung. Die Option R&S®LCX-K107 erweitert die Geräte-Schnittstellen um digitale I/O-Anschlüsse mit Triggeringang und acht Datenleitungen. Damit lassen sich Bauteile je nach Messergebnis in bis zu acht unterschiedliche Klassen sortieren (Binning). Ein Kriterium können Toleranzwerte sein, um zum Beispiel Präzisions-Kondensatoren von Standard-Kondensatoren zu trennen. Zusammen mit einem Fertigungsroboter, der die Bausteine in die Prüfadapter einspannt, lassen sich so die Arbeitsprozesse in einer Komponentenfertigung automatisieren. Als Teil eines größeren Prüfsystems verwandelt der Rack-Adapter (R&S®ZZA-GE23) das Tischgerät in einen 19-Zoll-Einschub. Die standardmäßig verfügbare Logging-Funktion erfasst zehn Messwerte pro Sekunde und schreibt sie in den internen Gerätespeicher, einen USB-Stick oder überträgt die Daten per LAN-, USB- oder die optionale GPIB-Schnittstelle auf einen externen PC. Flexibilität erzeugen die drei wählbaren Messgeschwindigkeiten schnell ( $\leq 15$  ms), mittel ( $\leq 100$  ms) und langsam ( $\leq 500$  ms). So lässt sich der beste Kompromiss aus nötiger Messgenauigkeit und verfügbarer Messzeit wählen.

### Erweiterte Analysefunktionen

In der Regel ermitteln LCR-Meter die Impedanz eines Prüflings durch ein Testsignal mit einer festen Frequenz und einer festen Amplitude. Jenseits dieses Messpunkts kann sich die Impedanz aber je nach Prüfling mehr oder weniger stark verändern. Daher ist man meist auch an Messungen mit verschiedenen Frequenzen

und Amplituden interessiert. Dafür gibt es die Erweiterungsoption R&S®LCX-K106. Mit ihr lassen sich lokal dynamische Impedanzmessungen durchführen, bei denen Testsignale mit unterschiedlichen Frequenzen erzeugt werden. Außerdem ermöglicht die Option das Einbinden des R&S®LCX Sweep Tools. Diese Software wird auf einem externen Mess-PC ausgeführt und ermöglicht Sweep-Messungen mit einem R&S®LCX LCR-Meter. Als Sweep-Parameter stehen die Frequenz oder die Amplitude des Testsignals zur Auswahl und die Amplitude des DC-Bias-Signals. Das Tool gibt die Messergebnisse als Tabelle oder grafisch aus, zum Beispiel als Nyquist-Diagramm. Die LCR-Meter erzeugen Testsignale mit einer Amplitude von 100 mV bis 10 V und DC-Bias-Signale bis 10 V, mit der Option R&S®LCX-K108 auch bis 40 V über eine externe Quelle.

### Zusammenfassung

Die R&S®LCX LCR-Meter messen präzise das Impedanzverhalten von passiven Bauelementen wie Kondensatoren, Spulen, Widerständen und Transformatoren. Dafür erfüllen die beiden Modelle R&S®LCX100 und R&S®LCX200 alle gängigen Anforderungen, sei es im Entwicklungslabor, der Forschung oder dem Fertigungsumfeld. Die Fülle an Mess- und Analysefunktionen kombiniert mit einfachster Bedienbarkeit machen das Gerät einzigartig am Markt. Maßgeschneiderte Messfunktionen für Transformatoren vereinfachen das Leben von Elektronikentwicklerinnen und Entwicklern noch weiter.

SHIVAM ARORA

### Hauptmerkmale der R&S®LCX LCR-Meter

	R&S®LCX100	R&S®LCX200
<b>Impedanzmessbereich</b>	10 mΩ bis 100 MΩ	
<b>Grundgenauigkeit für Impedanzmessungen</b>	±0,05 %	
<b>Bias-Spannung intern</b>	0 V bis 10 V (DC)	
<b>Bias-Strom intern (optional)</b>	0 mA bis 200 mA (DC)	
<b>Bias-Spannung extern (optional)</b>	0 V bis 40 V (DC)	
<b>Testsignal-Frequenzbereich</b>	DC, 4 Hz bis 300 kHz	DC, 4 Hz bis 500 kHz (Optionen bis 1 MHz und bis 10 MHz)
<b>Testsignal-Spannungsbereich</b>	100 mV bis 10 V	$\leq 1$ MHz: 100 mV bis 10 V, $\leq 5$ MHz: 100 mV bis 2 V, > 5 MHz: 100 mV bis 1 V



# 6G

**ALLES  
WIRD  
NETZ**



Obwohl sich der Ausbau der 5G-Netze noch über Jahre hinziehen wird, reichen die Visionen der Technologiestrategen schon weit darüber hinaus. Werden ihre 6G-Szenarien Realität, erwartet uns in den 2030er Jahren ein Wunderland der Kommunikation.

Seit der Einführung des LTE-Standards (4G) sind die Bedürfnisse der meisten Mobilfunknutzer erfüllt. Mit Download-Raten bis zu mehreren hundert Megabit pro Sekunde lassen sich hochaufgelöste Videos flüssig streamen und Downloads in Sekundenschnelle erledigen. 5G, in vielen Ländern schon flächendeckend verfügbar, vervielfacht diese Geschwindigkeit und bringt dem Privatanutzer kaum noch nennenswerte Vorteile. Trotzdem wird bereits an der nächsten Mobilfunkgeneration 6G geforscht, deren Einführung um das Jahr 2030 erwartet wird. Aber lässt das technisch anspruchsvolle 5G-System, das ja permanent weiterentwickelt wird, überhaupt noch Wünsche offen? Diese Frage stellte im September 2018 ein Autoren-Duo in den Raum [1]. Was als Diskussion unter Fachexperten begann, hat mittlerweile eine bemerkenswerte Eigendynamik entwickelt. Mit dem Interesse von Industrie und Politik an 6G ist ein weltweites Technologie-Wettrennen gestartet, mit dem milliardenschwere Investitionen in Forschung und Entwicklung verbunden sind.

#### Welchen Bedarf kann 6G noch decken?

„6G kommt, um die Erwartungen zu erfüllen, die 5G geweckt hat.“ Auf diese griffige Formel brachte es Dr. Dr. Ivan Ndip vom Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration (IZM) in einem Interview aus dem Frühling 2021. Obwohl der 5G-Mobilfunk sein volles Potenzial noch gar nicht richtig entfaltet hat, zeichnen sich bereits Anwendungsfälle ab, die erst mit 6G in großem Stil umsetzbar werden. Ein Beispiel dafür ist das autonome Fahren.

Selbst auf der noch weit entfernten Stufe 5 wird es gar nicht so autonom sein, wie der Begriff suggeriert. Schließlich teilen sich die Fahrzeuge Straßen, Ampeln und andere Infrastruktureinrichtungen mit zahllosen Verkehrsteilnehmern. Um dieses Miteinander zu orchestrieren, müssen die Fahrzeuge auf drei Arten vernetzt sein: untereinander, mit Einrichtungen entlang der

Tabelle 1: Vergleich der Leistungsdaten von 5G und den für 6G diskutierten Werten.

KPI	5G	6G
Spitzendatenrate	20 Gbit/s	1 Tbit/s
Durchschnittlich verfügbare Datenrate	100 Mbit/s	1 Gbit/s
Signallatenz	1 ms	0,1 ms
Maximale Kanalbandbreite	100 MHz	1 GHz
Zuverlässigkeit (fehlerfreie Datenblöcke)	99,999%	99,99999%
Maximale Teilnehmerdichte	106/km <sup>2</sup>	107/km <sup>2</sup>
Maximale Teilnehmergewindigkeit	500 km/h	1000 km/h
Positionsgenauigkeit	20 cm bis mehrere Meter in 2D	1 cm in 3D

Strecke und mit einer Verkehrszentrale. Da viele Situationen sicherheitskritischen Charakter haben, etwa eine Notbremsung, sind eine hohe Übertragungsgeschwindigkeit und Zuverlässigkeit der Signalübermittlung oberstes Gebot. Sollen Fahrzeuge untereinander auch noch Sensordaten austauschen und detaillierte Verkehrspläne herunterladen, muss dafür die nötige Datenrate bereitgestellt werden. 5G ist hier ein großer Schritt nach vorne, aber seine 20 Giga-bit pro Sekunde Spitzendatenrate und eine Millisekunde Signallatenz reichen für die ganz große Vision vom autonomen Fahren vermutlich nicht aus. Sie wird erst mit dem 6G-Standard erreichbar, mit dem die Signallatenz um den Faktor zehn gedrückt und der Datendurchsatz verfünffzigfacht werden soll (Tabelle 1).

Ähnliches gilt für die Tele-Medizin und speziell die Tele-Chirurgie. Mit einer 5G-Datenverbindung können Chirurgen und Chirurgen bereits manche Operationen aus der Ferne durchführen. Im Extremfall befinden sich Patient/in und Operateur/in dabei in unterschiedlichen Kontinenten. Damit solche Leistungen möglich sind, müssen neben den Steuerbefehlen für den Operationsroboter auch visuelle Daten erzeugt und verzögerungsfrei übertragen werden. Sie zeigen dem Chirurgen oder der Chirurgin auf einem ultrahochoauflösenden Display, was gerade im operierten Bereich geschieht. Kompliziertere Operationen bringen ein 5G-Mobilfunknetz an seine Grenzen. Auch dann, wenn die weiteren technischen Entwicklungsstufen umgesetzt werden, die im Jahr 2024 mit 5G-Advanced kommen sollen.

Szenarien wie diese motivieren bereits heute die Forschung an der nächsten Mobilfunkgeneration.

**Fokusverschiebung zur Maschine**

Im 6G-Standard werden Funktionen und Dienste für eine effiziente Maschine-zu-Maschine-Kommunikation (M2M) eine wichtige Rolle spielen.

Bereits bei 5G fallen mit mMTC und URLLC (siehe Bild 1) zwei der drei großen Entwicklungsschwerpunkte in diesen Bereich. Adressiert werden damit – neben dem schon erwähnten autonomen Fahren – Anwendungsfelder wie Industrie 4.0, Smart City oder Smart Home. Gefragt ist hier nicht nur eine einzige Art von M2M-Kommunikation, sondern stark unterschiedliche Varianten davon: Wo die vernetzte Fabrik hochzuverlässige Funkverbindungen mit Ende-zu-Ende-Signallaufzeiten im unteren Millisekundenbereich benötigt, sind diese Anforderungen in der Smart City oder dem

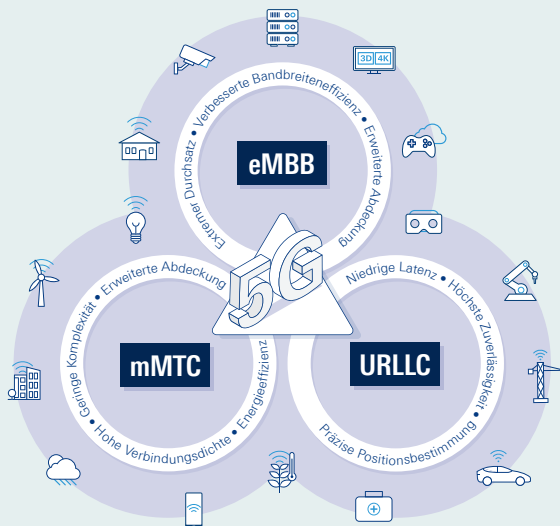


Bild 1: 5G soll drei Anwendungsbereiche abdecken: eMBB (Enhanced Mobile Broadband) steht für die klassischen Mobilfunkanwendungen, ist aber noch viel leistungsfähiger als LTE; mMTC (Massive Machine Type Communications) unterstützt stromsparende Low-Performance-Anwendungen wie Sensornetze; bei URLLC (Ultra Reliable Low Latency Communications) liegt der Fokus auf Echtzeitanwendungen, die garantierte Signallaufzeiten und Verfügbarkeit erfordern.



© Annette Birkenfeld/Getty Images

**Bild 2: Augmented-Reality-Brillen bringen heute schon gegenständliche und virtuelle Realität zusammen. In der 6G-Vision sollen alle Sinne miteinbezogen werden, sodass man von völliger Immersion sprechen kann.**

Smart Home deutlich überdimensioniert. Hier geht es darum, Dinge wie Verbrauchszähler und Alltagsgegenstände wie Mülltonnen mit Sensoren oder Stellgliedern auszustatten, um sie aus der Ferne entweder auszulesen oder Abläufe zu automatisieren.

Dafür reicht eine Funkkommunikation, die nur sporadisch erfolgt und wenige Daten überträgt. In einem Smart-City-Funknetz müssen aber auch hunderte oder tausende gleichartige, oft batteriebetriebene Teilnehmergeräte verbunden werden. Solche Anwendungen, die bei der ursprünglichen Entwicklung des Mobilfunks nicht absehbar waren, haben die Konzeption von 5G bestimmt. Nicht der Mensch steht weiterhin im Mittelpunkt, sondern Geräte und Maschinen, sprich das Internet der Dinge (IoT).

### **Die Vision von 6G**

Entsprechend richtet sich die weitere technische Entwicklung verstärkt an den Bedürfnissen

verschiedener Industrien aus. Von hier tauchen auch die unterschiedlichsten Zukunftsbilder für 6G auf, die sich zu einem faszinierenden Gesamtpanorama verdichten. Damit sie umgesetzt werden können, sind Technologien nötig, die größtenteils noch gar nicht verfügbar sind. Mittelfristig sieht man sie aber in Reichweite. Ihr Zusammenwirken wird man als sechste Mobilfunkgeneration bezeichnen, obwohl dieser nüchterne Terminus die Zielvision nur unzureichend beschreibt.

### **Zwillinge auf dem Holodeck**

Mit der Ankündigung des Metaverse durch Facebook-Gründer Mark Zuckerberg im Herbst 2021 bekamen die oft als Spielerei wahrgenommenen VR-Brillen eine neue Marktrelevanz. Sie sind das zentrale Werkzeug, um Zuckerbergs Vision von einem Extended-Reality-Erlebnisraum umzusetzen. Die Mittel dazu stehen dem Konzern, der mittlerweile unter dem Namen Meta firmiert, zur Verfügung, schließlich

gehört der VR-Brillen-Hersteller Oculus zum Meta-Imperium.

Damit wird der Ursprungsgedanke der VR-Brille ambitioniert und visionär weitergedacht. Bereits heute bekommen Techniker über die Brille beispielsweise das 3D-Modell eines zu montierenden Teils ins Realbild eingeblendet, zusammen mit Hinweisen, wie damit umzugehen ist.

Der Lens-Träger kann mit der holografischen Projektion sogar manuell interagieren, als wäre sie real, kann sie anfassen und manipulieren. Ein solches System millionenfach verbreitet und für jeden erschwinglich, ist sowohl Zuckerbergs Vision wie auch eines der 6G-Leitszenarien.

Wird das Konzept von Extended Reality konsequent zu Ende gedacht, umschließt es eine Reihe anderer gehaltvoller Visionen. Das Fernziel ist das völlige Eintauchen in die neue Welt, die als echt erlebt wird. Immersion total. Dazu gehört eine dreidimensionale optische Auflösung, die das menschliche Sehvermögen ausreizt, eine entsprechende akustische Umwelt mit verzögerungsfreier Reaktion aller synthetischen Objekte (taktiles Internet) und nicht zuletzt deren glaubwürdige visuelle Darstellung. Entscheidend ist aber, dass einige dieser

Objekte mit realen Pendants aus der Wirklichkeit korrespondieren. Es sind dies sogenannte digitale Zwillinge, interaktive virtuelle Repräsentanten echter Gegenstände und Maschinen, die man aus der Meta-Welt heraus manipulieren kann. Die Bedienung lässt sich so in beliebiger Entfernung von der Maschine vornehmen, mit möglicherweise weitreichenden Konsequenzen für die Organisation von Arbeit. Eine gesellschaftliche Folgewirkung könnte die Wiederbelebung des ländlichen Raums sein, wenn die Notwendigkeit zur Präsenz in den Ballungsgebieten abnimmt.

Wer über solche Szenarien nachdenkt, kommt an 6G nicht vorbei. Die Rechenleistung für eine immersive Kunstwelt wie das Metaverse übersteigt das Vermögen einer VR-Brille. Soll sie außerdem zierlich und unauffällig wie eine normale Brille aussehen, ist externe Rechenleistung nötig. Soll sie aus der Cloud bezogen werden, kommt 6G ins Spiel. Die Übertragung der extremen Datenmengen zur Brille mit Videoauflösungen von mindestens 8k in Stereo erfordert Transportkapazitäten in der Größenordnung von mehreren hundert Gigabit pro Sekunde und Signallaufzeiten von einer Zehntel Millisekunde, um ein natürliches Agieren in Echtzeit zu ermöglichen. Eine solche Performance ist in 5G nicht



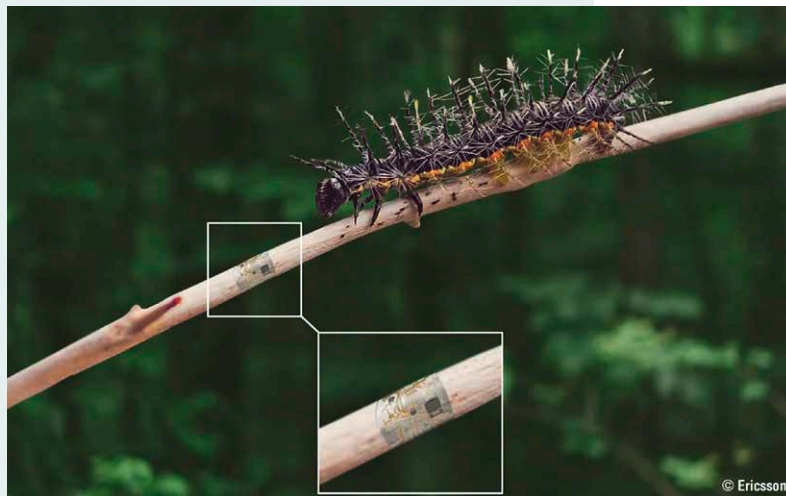
Bild 3: Mithilfe von 6G sollen physische Welt (Umwelt, Maschinen), digitale Welt (Daten, virtuelle Räume) und die menschliche Perspektive eine gleitende Symbiose eingehen, hier in der Vision der europäischen Hexa-X-Initiative.

vorgesehen. Auch die intelligente Bereitstellung von Rechenleistung für die diversen 6G-Services wird zu den Aufgaben des Netzes gehören, das sich dazu künstlicher Intelligenz bedient. Die wird in einem 6G-Netz allgegenwärtig sein.

### Das wahre Internet der Dinge

Obwohl das Internet der Dinge langsam Gestalt annimmt und durch 5G besonders in Industrie und Verkehrswesen einen Schub erfahren wird, kommt die allumfassende Vernetzung erst mit dem 6G-Mobilfunk. Er soll sowohl von seinem technischen Zuschnitt wie auch von seiner Kapazität her in der Lage sein, eine beliebige Anzahl von Objekten einzubinden, egal ob aus dem Heimbereich, der Industrie, dem Straßenverkehr oder der Infrastruktur. Damit werden plötzlich Dinge zu potenziellen Vernetzungskandidaten, an die man früher nie gedacht hätte. Eingebettete Funksensoren können zum Beispiel den Zustand von Brücken und Autobahnen kontinuierlich überwachen und den Instandhaltungsbedarf schnell sichtbar machen. Ein weiteres Beispiel findet sich in Handel und Logistik. Hier könnten die üblichen, nur auf Schrittdistanz auslesbaren RFID-Etiketten mit Messsensoren und größerer Reichweite ausgestattet werden, um die Qualität von Lebensmitteln zu überwachen.

Der IoT-Schub wird auch die Energieversorgung von Funksensoren verändern. Hier liegt eine große Herausforderung für die massive Ausbringung von vernetzten Funksensoren. Sowohl die schiere Anzahl als auch die Miniaturisierung machen einen Tausch der Energiezelle unmöglich. Der nötige Wartungsaufwand wäre unwirtschaftlich und praktisch kaum zu leisten. Da viele IoT-Anwendungen langfristig, unter Umständen auf Jahre hin angelegt sind, müssen die Sensoren energetische Selbstversorger sein. Die zugehörigen Stichwörter lauten Zero Energy Device und Energy Harvesting. Heutige RFID-Sensoren arbeiten bereits so, werden aber direkt vom Lesegerät in unmittelbarer Nähe mit elektromagnetischer Energie versorgt. 6G-Sensoren müssen diesen Komfort entbehren und ihre Energie aus geeigneten Quellen vor Ort beziehen, sei es Wärme, Licht, Bewegung oder etwas anderes. Auf diesem Gebiet steckt die Forschung, wie bei vielen 6G-Themen, noch in den Anfängen.



© Ericsson

### Ein Netz aus Funknetzen

6G wird dem Internet der Dinge nicht nur eine unerschöpfliche Grundlage bieten, sondern selbst eine Art Internet sein. So wie man das etablierte Internet gern das Netz der (Computer-)Netze nennt, wird man 6G als Netz der Funknetze bezeichnen können. Die monolithische Struktur heutiger Mobilfunknetze wird einer heterogenen, sich ständig umgestaltenden Netzlandschaft weichen (organisches Netz), die kommerzielle, private und öffentliche Teilnetze jedweder Größe miteinander verbindet, von der Quadratkilometer versorgenden Makrozelle heutiger Prägung bis hinab zu Atto- und Zepto-Zellen für die Versorgung eines Zimmers oder Autos. Damit das Andocken eines Netzes an die Gesamtstruktur automatisiert werden kann, will man so viele Netzfunktionen wie möglich virtualisieren, das heißt, rein logisch beschreiben. Die Funktionsblöcke im Netz müssen diese Sprache herstellerübergreifend verstehen und standardkonform interpretieren. Die O-RAN-Initiative, in der sich auch Rohde&Schwarz engagiert, legt heute bereits den Grundstein dafür.

### Der Wettlauf hat begonnen

Seit den ersten Überlegungen zu 6G vor erst wenigen Jahren ist in Industrie, Forschungseinrichtungen und Politik schon einiges in Bewegung geraten.

Weltweit wurden Forschungsinitiativen gegründet, Fördergelder ausgelobt und Allianzen geschmiedet. Die Politik hat verstanden, dass die Konkurrenzfähigkeit und wirtschaftliche Prosperität ganzer Länder von der

**Bild 4:** Design-Studie des Netzwerkausrüsters Ericsson: Zero Energy Devices sind nicht nur in der Zivilisation von Nutzen. Ein 6G-IoT-Funksensor könnte zum Beispiel Ökosystemdaten ermitteln und an eine Zentrale melden.

## 6G-FORSCHUNGSSCHWERPUNKTE

Unter anderem besteht auf den folgenden Gebieten noch Forschungs- und Entwicklungsbedarf:

- ▶ **FREQUENZEN:** 5G nutzt erstmals den Millimeterwellenbereich (> 20 GHz) für die Individualkommunikation. 6G wird noch weit darüber hinausgehen und in den noch unzureichend verstandenen Terahertz-Bereich vorstoßen (300 GHz bis 3 THz), bedarfsweise auch sichtbares Licht und Infrarot einbeziehen. Nur bei diesen hohen Frequenzen lassen sich die angestrebten extremen Übertragungsraten realisieren.
- ▶ **ANTENNEN:** Durch die hohen Frequenzen, gleichbedeutend mit kurzen Wellenlängen, schrumpfen die Antennen auf Millimetergröße. Man wird in den Basisstationen bis zu je 60.000 davon zu Gruppenantennen kombinieren, die hunderte von Endgeräten über individuelle Richtstrahlen gleichzeitig bedienen können. Zur punktgenauen Anstrahlung des Teilnehmers wird außerdem über intelligente reflektierende Oberflächen, etwa an Hauswänden, nachgedacht, mit denen man gezielt um die Ecke funken kann.
- ▶ **KÜNSTLICHE INTELLIGENZ (KI):** KI wird ein wesentliches Kennzeichen von 6G sein. Insider gehen davon aus, dass ein 6G-Netz ohne KI weder bezahlbar noch überhaupt funktionsfähig wäre. Seine Komplexität ist zu groß für konventionelle Design- und Management-Methoden. KI wird sowohl in den technischen Komponenten wie auch bei der Netzwerkplanung und -überwachung zum Einsatz kommen. Ziel ist die Zero-Touch- bzw. Selbstoptimierung des Netzes in Bezug auf seine Kosten-, Energie-, spektrale und operationale Effizienz.
- ▶ **VIRTUALISIERUNG:** Alle wesentlichen Netzwerkkomponenten sollen über standardisierte abstrakte Funktionen definiert und ansprechbar sein. Das erlaubt die Mischung von Produkten verschiedener Hersteller und schafft Spielräume für die konkrete technische Ausgestaltung.
- ▶ **BATTERIELOSE SENSOREN:** Myriaden von Miniatursensoren werden den stückzahlmäßig größten Anteil am Internet der Dinge stellen. Sie müssen über lange Zeit wartungsfrei arbeiten und ihre Betriebsenergie durch Energy Harvesting selbst gewinnen.
- ▶ **INTEGRIERTES FUNK-, SENSORIK- UND RECHNERNETZ:** 6G wird viel mehr als ein Funknetz sein. Über integrierte Ortungsfunktionen wird man die Position eines Funkteilnehmers zentimetergenau bestimmen können. Das Netz wird außerdem über eine gewaltige verteilte Rechenleistung verfügen, die je nach Bedarf in der Nähe des Funkteilnehmers oder in entfernten Rechenzentren zu leisten ist (Edge-, Fog-, Cloud-Computing).
- ▶ **DATENINTEGRITÄT:** Mehr noch als 5G wird 6G das Rückgrat von Wirtschaft und Industrie sein. Unzählige Geschäftsabläufe und Services werden darauf basieren. Der Datenschutz ist daher von überragender Bedeutung. Auf die korrekte Authentifizierung eines Teilnehmers muss unbedingter Verlass sein. Verschlüsselung ist Pflicht bei jeder Verbindung. Zur Sicherstellung der Datenintegrität zieht man die Block-Chain-Technologie in Betracht, um von Zentralinstanzen unabhängig zu sein.
- ▶ **ENERGIEEFFIZIENZ:** Mit exponentiell wachsender Datenkommunikation steigt auch der Energiebedarf. Um ihn zu begrenzen, muss die Energieeffizienz, also der Energieaufwand pro übertragenem Bit, sinken.

gleichberechtigten Teilhabe am 6G-System abhängen kann und es Abhängigkeiten zu vermeiden gilt. So kamen Japan und die USA im Frühling 2021 auf höchster Ebene überein, gemeinsam 4,5 Milliarden Dollar für die 6G-Forschung aufzubringen. Europa hat das 6G-Flaggschiff-Projekt Hexa-X ins Leben gerufen, an dem sich Organisationen aus neun Ländern beteiligen. Unabhängig davon stellt das deutsche Bundesministerium für Bildung und Forschung bis 2025 700 Millionen Euro zur Verfügung. 250 Millionen davon fließen kurzfristig vier nationalen Forschungs-Hubs zu, in denen sich auch Rohde&Schwarz als Partner engagiert. Südkorea verfolgt den ambitionierten Plan, schon 2026 mit ersten Feldversuchen zu beginnen und will bis dahin rund 195 Millionen Dollar investieren.

Und China? Denkt nicht daran, seine bei 5G errungene starke Position mit der nächsten Generation wieder abzugeben. Sein Ministerium für Wissenschaft und Technologie koordiniert zusammen mit anderen Ministerien und staatlichen Stellen die nationalen Ressourcen, um 6G so schnell wie möglich einsatzreif zu machen.

Rohde&Schwarz, seit dem Beginn der digitalen Mobilfunk-Ära ein enger Partner und führender Messtechnik-Lieferant der Industrie, bringt bereits heute seine Produkte und Expertise in mehrere 6G-Forschungsprojekte ein und wird Zug um Zug die für 6G erforderlichen Messmittel bereitstellen.

REDAKTION

[1] David, K., Berndt, H.: 6G vision and requirements: Is there any need for beyond 5G? IEEE Vehicular Technology Magazine, Vol. 13, Issue 3, Sept. 2018.



# DAS VERNETZTE FAHRZEUG KOMMT

Sowohl gestandene Automobilkonzerne als auch Branchenneulinge treiben das autonome Fahren kräftig voran. Neben ausgeklügelter Sensorik führt kein Weg an einem vollständig vernetzten Fahrzeug vorbei. Dafür setzen OEMs und Zulieferer weltweit auf den C-V2X-Standard. Die Mobilfunktester von Rohde & Schwarz bringen für den C-V2X-Test alle nötigen Funktionen mit – inklusive die Simulation von 5G-Testfällen.

Shanghai zur Rushhour. Reißverschlussverfahren? Hier heißt die Devise: Hupen, losfahren! Wer Bremsen musste, hupt zurück, fertig. Mit in einer Kreuzung den Rückwärtsgang einlegen, um doch eine andere Richtung einzuschlagen? Kommt vor. Und mit Glück hat es zu tun, nicht mit einem der unzähligen geräuschlos durch alle Lücken kurvenden E-Rollerfahrer

zusammenzurauschen. Elektromoped-Piloten, sogar Fahrer von Kleintransportern mit E-Antrieb nutzen ungeniert die Bürgersteige. „Die Straßen“, so der Münchner Unternehmensberater und Absolvent der Shanghaier Wirtschaftsuniversität SUFE Julian Schneider, „sind ihnen einfach zu unsicher“. Besonders tückisch: wollen Fußgänger im Dauergehupe eine Kreuzung

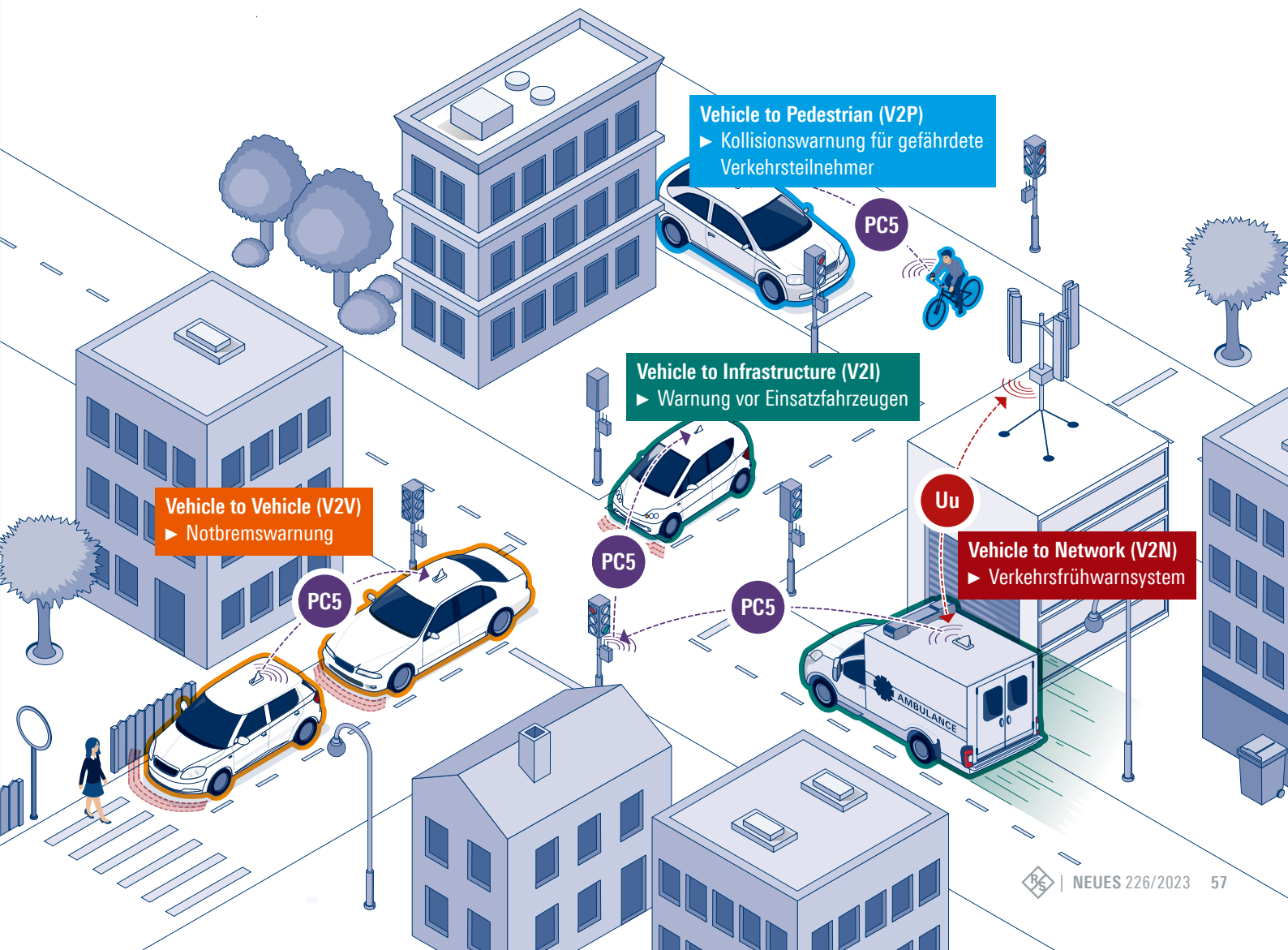




Bild 1: Blick in die Zukunft – damit Fahrzeughersteller Lenkräder durch Displays ersetzen können, ist zuverlässiger Mobilfunk im Kfz nötig.

überqueren, seien sie auch bei Grün nicht sicher. Denn Rechtsabbieger dürfen auch bei Rot fahren, wie übrigens auch in Kanada und den USA. Die Folgen: So viele Verkehrstote wie nirgendwo sonst auf der Welt. Das zeigen die jüngsten verfügbaren Daten der Weltgesundheitsorganisation WHO aus 2018. Doch diesen Zuständen hat die chinesische Regierung den Kampf angesagt. Dabei sind ihr vor allem solche Mittel willkommen, die die Technologiekompetenz des Landes stärken – etwa der vernetzte autonome Verkehr.

#### Verkehrsnot wird zur Tugend

Chinesische Start-ups gehören denn auch zu den Pionieren für den Autoverkehr der Zukunft. Die chaotischen Verhältnisse in ihren Großstädten spielen ihnen dabei in die Karten. James Peng hält die Herausforderungen in China für besonders hoch. Er ist Geschäftsführer des 2016 gegründeten Robotaxi-Start-ups Pony.ai, das mit 8,5 Milliarden US-Dollar Unternehmenswert bereits zu den Branchengrößen gehört. Die Erfahrungen mit den unberechenbaren lokalen Verhältnissen seien wertvoller und die

Daten aussagekräftiger als beispielsweise in den USA. In der südchinesischen Metropolregion Guangzhou betreibt Pony.ai bereits eine Flotte von 100 Robotertaxis und deckt damit ein Einsatzgebiet von 800 Quadratkilometern ab. Ein weiterer Schritt auf dem Weg zur Kommerzialisierung des autonomen Fahrens in China. Den weltweiten Durchbruch zu einem Massengeschäft erwarten Branchenkenner bis zum Jahr 2025. Den größten Markt stellt China dar. Bis 2030 soll hier bereits ein Millionenheer von Robotaxis unterwegs sein. Das



Geschäft wird sich Pony.ai mit starken lokalen Konkurrenten wie Baidu, AutoX und DiDi Xungking teilen müssen. Sie betreiben ebenfalls seit längerer Zeit Testfelder und verfeinern ihre Fahrerassistenzsysteme.

### US-Start-ups konkurrieren mit Europas Fahrzeugindustrie

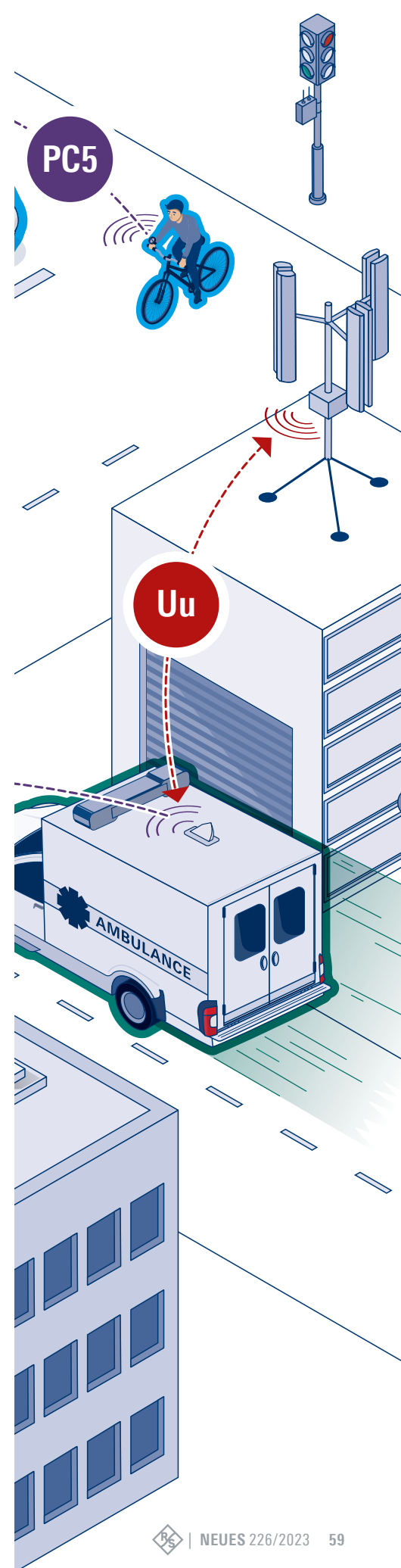
Vorreiter beim vernetzten autonomen Verkehr sind einmal mehr die USA. Früh wurden, vor allem in Kalifornien, günstige regulatorische Bedingungen geschaffen. So konnte die Google-Schwesterfirma Waymo vor der internationalen Konkurrenz wertvolle Testkilometer sammeln und gilt bis heute als der Maßstab für

autonomes Fahren. Mittlerweile haben auch andere Unternehmen Kalifornien als Testfeld für sich entdeckt und ziehen nach.

In Europa stellt sich eine ganz andere Situation dar. Während die USA und China mit ihren Start-up-Initiativen auf die Geschwindigkeit kleinerer, nur zu einem Zweck gegründeter Unternehmen bauen, setzt man in Europa auf die geballte Entwicklungsleistung der eigenen Automobilindustrie und auf Kooperationen mit den großen IT-Unternehmen. Teilweise werden auch lokale Projekte mit automatischen Shuttles oder People Movern durchgeführt, die auf der ersten oder letzten Meile des öffentlichen Verkehrs zum Einsatz kommen. Auch wenn die Vorreiter aus anderen Regionen stammen, war es immerhin Deutschland, das als erstes Land im Juli 2021 ein flächendeckendes Gesetz zum autonomen Fahren bis zur Stufe 4 verabschiedet hat, das den Betrieb automatischer Taxi-Flotten auch auf deutschen Straßen ermöglicht.

### Die Rolle von C-ITS, V2X und 5G

Die oft genannte Autonomiestufe 5, ab der die Fahrerassistenzsysteme so ausgeklügelt sind, dass sich Fahrzeuge völlig autonom und dabei auch noch sicherer als mit einem menschlichen Fahrer bewegen können, ist nur ein Zwischenziel. Das große Bild wird unter der Überschrift C-ITS gezeichnet: kooperative intelligente Transportsysteme. Diese Vision umfasst den gesamten Verkehr mit dem Ziel, sowohl die Verkehrssicherheit als auch die Verkehrs-Effizienz mit technischen Mitteln zu maximieren. Zum Beispiel muss im vernetzten Verkehr eine grüne Welle keine glückliche Seltenheit mehr sein und Folgeunfälle lassen sich wirksam vermeiden, wenn ein Fahrzeug eine Notbremsung schon im Moment des Geschehens



an die nachfolgenden Verkehrsteilnehmenden kommuniziert. Gerade für Speditionen ist das sogenannte Platooning eine attraktive Möglichkeit, um Kraftstoff einzusparen. Besonders reizvoll würde die Technik spätestens dann, wenn die Rechtsprechung nur noch für das erste Kolonnenfahrzeug einen Sicherheitsfahrer vorschreiben sollte. Bis dahin wird aber noch ein gutes Stück zu gehen sein.

Voraussetzung für den vernetzten Verkehr ist, dass sich die Fahrzeuge sowohl untereinander als auch mit der umgebenden Infrastruktur und einer Verkehrszentrale verständigen. Das Prinzip ist unter dem Kürzel V2X-Kommunikation bekannt,

Vehicle-to-Everything. Das schließt die Kommunikation von Fahrzeug zu Fahrzeug (Vehicle-to-Vehicle, V2V), von Fahrzeug zu Infrastruktur (Vehicle-to-Infrastructure, V2I) und von Fahrzeug zu zum Beispiel dem Smartphone einer Fußgängerin (Vehicle-to-Pedestrian, V2P) mit ein.

Eine wichtige technische Grundlage zur V2X-Kommunikation ist mit dem 5G-Mobilfunk bereits geschaffen. Das ist kein Zufall. Schon früh im Standardisierungsprozess hat die Automobilindustrie auf die Berücksichtigung ihrer Belange hingewirkt und so war 5G von vornherein der ideale Kandidat für die Verkehrsvernetzung. Dafür bringt er alle passenden

Eigenschaften mit: hohe Übertragungsraten, Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit und kurze Signallaufzeit (Latenz). Mit zellularem Mobilfunk (C-V2X) – dem Funkverkehr über vermittelnde Basisstationen – lässt sich aber nur ein Teil der Kommunikationsaufgaben abdecken. In Funklöchern oder Ad-hoc-Situationen müssen die Fahrzeuge in der Lage sein, direkt miteinander zu reden. Dafür gibt es eine sogenannte Sidelink-Schnittstelle (PC5), die bereits mit LTE (4G) eingeführt wurde. Abhängig von der tatsächlichen Situation wird die V2X-Kommunikation entweder über das Netz oder in Form von V2V-Kommunikation über den PC5-Sidelink abgewickelt.



## Neuer Standard bringt neue Testfälle

Um die visionären Pläne umzusetzen, müssen die kommenden Fahrzeuggenerationen 5G-fähig werden. Durch die Pflicht zum Notrufsystem eCall hat die Automobilindustrie bereits einen gewissen Erfahrungsschatz mit Mobilfunk-Telematik aufgebaut. Gegenüber den bekannten Standards ist 5G deutlich anspruchsvoller und bringt für Fahrzeughersteller und Zulieferer ganz neue Testanforderungen mit sich.

Rohde & Schwarz bietet eine Reihe von spezialisierten Messgeräten, die Entwicklern und Systemintegratoren alle nötigen Funktionen an die Hand gibt, um verschiedenste Funk-Varianten effizient zu integrieren. Dazu gehören neben Mobilfunk auch Bluetooth®, WLAN und

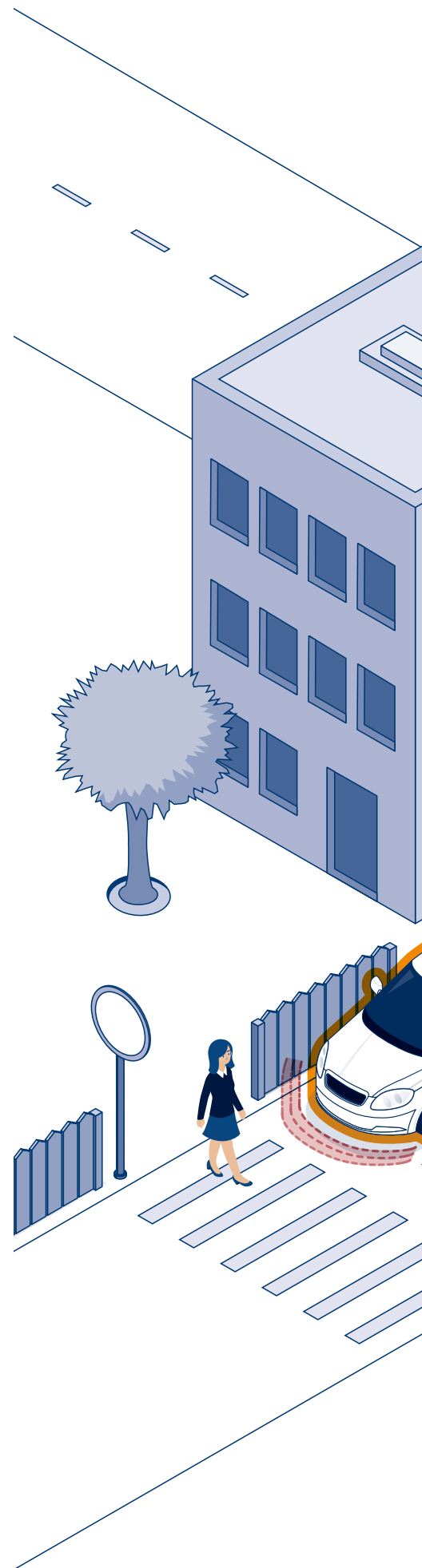
**Bild 2:** Im Kontext von C-V2X lässt sich mit dem Mobilfunktester R&S®CMX500 die Schnittstelle zwischen Fahrzeug und Mobilfunkanbieter testen. Sie wird auch als V2N-Schnittstelle (Vehicle-to-Network) oder Uu-Schnittstelle bezeichnet.



GNSS. Mobilfunktester wie der R&S®CMX500 simulieren ein Mobilfunknetz in all seinen Funktionen, messen und beurteilen die Leistungsfähigkeit eines Teilnehmergeräts und ermöglichen den Labortest beliebiger 5G-Applikationen. So lassen sich Telematik-Einheiten oder ganze Fahrzeuge mit beliebigen Verkehrssituationen konfrontieren, inklusive solcher Szenarien, die es im aktuellen Straßenverkehr noch gar nicht gibt. Diese Fähigkeit ist für die Entwicklung von C-ITS besonders relevant, weil für die Systeme Automatismen entwickelt werden müssen, die eine enorme Fülle von Verkehrssituationen abdecken. Lassen sich für ein mögliches Szenario echte Testdaten gar nicht oder nur mit unverhältnismäßigem Aufwand gewinnen, kann das Szenario im Labor zumindest simuliert werden.

Ein besonderes Augenmerk gilt den Luftschnittstellen der Fahrzeuge, den Antennen. Schlüsselfertige Messsysteme automatisieren die nötigen Untersuchungen und entlasten die Hersteller von zeitaufwendigen und fehleranfälligen Prozeduren, die spezielles Fachwissen voraussetzen (full vehicle antenna test, FVAT). Neben den (Mobil-)Funk-Messeinrichtungen finden Automobilhersteller und Zulieferindustrie bei Rohde & Schwarz alle Messmittel für die Entwicklung und den Test der elektrischen und elektronischen Fahrzeugkomponenten, sei es eCall, die Multimedia-Ausstattung, die Fahrzeug-Datenbusse, die Radarsensorik oder der E-Antrieb. Einrichtungen zum Test der elektromagnetischen Verträglichkeit kommen hinzu. Fazit: Messtechnik von Rohde & Schwarz bringt das Auto der Zukunft ins Rollen.

REDAKTION





# DIE DIGITALISIERUNG DES FLUGFUNKS SCHREITET VORAN

Schon länger entwickelt Rohde & Schwarz zusammen mit Forschungspartnern das digitale Datenübertragungsverfahren LDACS. In der zivilen Luftfahrt soll es das weit verbreitete VDL Mode 2 ablösen und zum weltweit gültigen Standard werden. Damit eröffnen sich Fluggesellschaften und Kommunikationsdienstleistern völlig neue Anwendungsfälle.



© DLR

Im Frühjahr 2019 startete die Falcon des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt zu sechs Testflügen mit LDACS-Funkausrüstung an Bord.

Technischer Fortschritt bedeutet nicht einfach, analoge Verfahren durch digitale abzulösen. Das zeigt sich kaum besser als in der zivilen Luftfahrt. Hier basiert der Sprechfunk zwischen Pilot und Tower nach wie vor auf der 1948 eingeführten Doppelseitenband-Amplitudenmodulation (DSB-AM). Und es gibt keine Bestrebungen, dieses analoge VHF-Verfahren (Frequenzbereich: 118 MHz bis 137 MHz) durch einen digitalen Sprechfunk zu ersetzen. Schließlich bietet der Analogfunk bis heute einige unverzichtbare Charakteristiken wie kurze Verzögerungszeiten, aktives Mithören durch alle Teilnehmenden und einiges mehr, was bisher kein Digitalfunk leisten kann.

Anders sieht es bei Funkverfahren zur Datenübertragung aus. Seit den 1990er Jahren besteht der Flugfunk nicht allein aus Sprechfunk, sondern er wurde um Verfahren zur Datenübertragung ergänzt – digitale Verfahren. Von ihnen ist VDL Mode 2 am weitesten verbreitet.

Wird heute von der Digitalisierung des Flugfunks gesprochen, dann ist damit gemeint, die älteren digitalen Verfahren zur Datenübertragung durch neue und leistungsstärkere zu ersetzen. Der Sprechfunk selbst soll auch weiterhin analog bleiben. Von der Digitalisierung ist er nur insofern betroffen, als dass sie ihn entlastet. Durch diese Koexistenz von analoger Sprach- und digitaler Datentechnologie zum Zwecke der Flugsicherung, wird wirtschaftlich

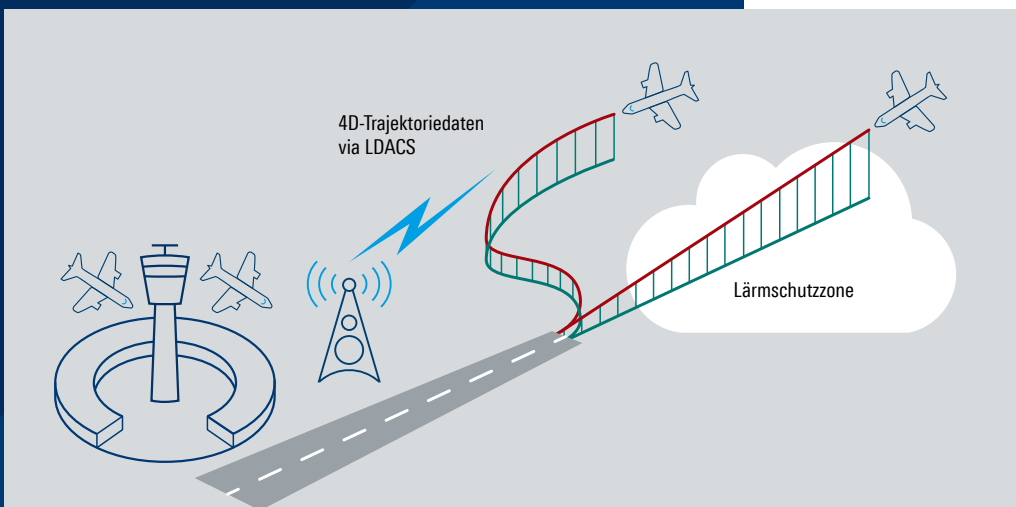
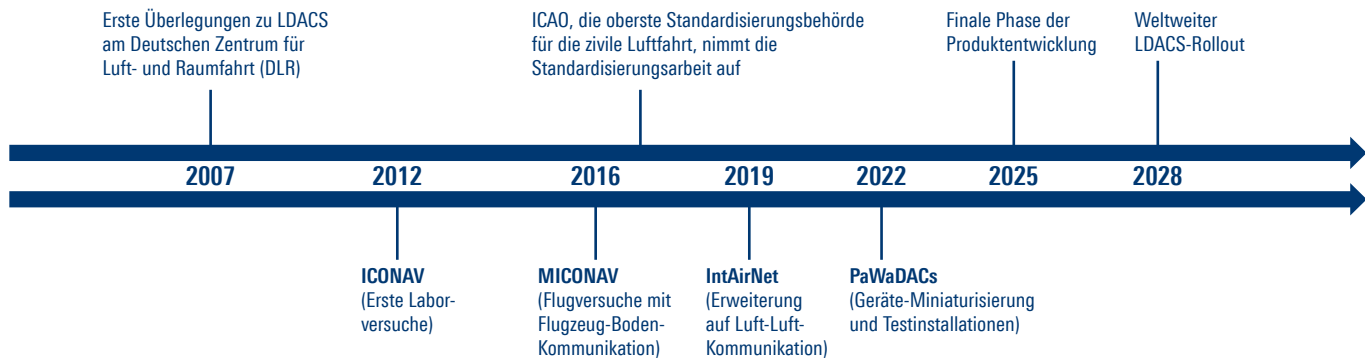


Bild 1: Beispiel für eine 4D-Trajektorie. Sollen Lärmschutzzonen in Zukunft umflogen werden, sind kompliziertere Kurvenmanöver statt eines geraden Anflugs nötig. Die Positionsdaten erhalten Piloten über den LDACS-Datenlink.

**Bild 2: Von der Entwicklung bis zum weltweiten Standard**

Zu den Meilensteinen der Entwicklung von LDACS gehören vier große Forschungsprojekte. Sie sind unterhalb des Zeitstrahls eingetragen und in der Infobox am Ende des Artikels näher beschrieben.



und zukunftsicher ein Höchstmaß an Effizienz, Zuverlässigkeit und Betriebssicherheit erreicht.

### Regel Funkverkehr im engen VHF-Spektrum

Bereitgestellt wird VDL Mode 2 von Air Navigation Service Providern (ANSP). Hinter dem Begriff verbergen sich Kommunikationsdienstleister für den Flugbetrieb, ähnlich zu den Mobilfunkanbietern im privaten Bereich. Weil das Verfahren ebenfalls im VHF-Frequenzband arbeitet, müssen sich Datenübertragung und Sprechfunk das verfügbare Spektrum teilen. Entsprechend klein sind die nutzbaren Bandbreiten, sodass VDL Mode 2 lediglich einige Kilobit pro Sekunde an Daten übertragen kann.

### Der Weg ins L-Band: LDACS

Hier kommt nun die neue LDACS-Technologie ins Spiel. Das Akronym steht für L-Band Digital Aeronautical Communication System und bietet einen bis zu circa zweihundertfach höheren Datendurchsatz als VDL Mode 2. Der Name beinhaltet bereits die relevanteste Neuerung: die Datenübertragung findet im L-Band statt. LDACS fügt sich genau in die Teile dieses Frequenzbands ein, die für die Flugkommunikation reserviert sind. Für den störungsfreien Betrieb mit anderer Flugausrüstung, die ebenfalls im L-Band operiert, arbeitet LDACS mit entsprechenden Entstör-Algorithmien und wurde auf minimale Nebenband-Aussendungen optimiert.

### Neue, attraktive Dienste für die Luftfahrt

Die moderne Luftfahrt erfordert einen sicheren Datenaustausch. Anders ist die Organisation des

Flugverkehrs heute nicht mehr möglich. LDACS kann hohe Datendurchsätze zuverlässig und durch Verschlüsselung abgesichert bereitstellen. Damit unterstützt es eine Vielzahl von neuen Anwendungen. Zur effizienten Einsatzplanung ihrer Flotte benötigen Fluggesellschaften zum Beispiel Datenverbindungen zu ihrem Flugpersonal. Hinzu kommt, dass sich heute deutlich mehr Flugzeuge durch den Luftraum bewegen als früher. Entsprechend muss die Flugsicherung in der Lage sein, schneller neue Navigationsdaten zu verteilen, um Flugbewegungen auch dann noch rechtzeitig anzupassen, wenn sich die Situation im Luftraum kurzfristig ändert.

Als attraktive erste Anwendung mit LDACS ist geplant, dessen Datenlink-Fähigkeit dafür zu nutzen, um die langsame VHF-Funkstrecke in den Bestandssystemen der Flugsicherung durch den schnellen LDACS-Datenlink zu erweitern oder gar zu ersetzen. So lässt sich die Datenübertragung schnell spürbar verbessern, ohne dass neue Systeme angeschafft werden müssen. Hinzu kommt, dass es ein sehr einfacher Weg zur Markteinführung von LDACS ist.

Die zuverlässige und auch sichere Datenübertragung von LDACS wird in Zukunft auch für umweltschonende neue Navigationsmethoden genutzt. Geplant ist hier, Flugzeuge Routen abfliegen zu lassen, die durch präzise Koordinaten im dreidimensionalen Raum festgelegt und innerhalb eng vorgegebener Zeitlimits zu passieren sind. Diese sogenannten 4D-Trajektorien kommen zum Beispiel dann zur Anwendung,



wenn Flugzeuge dynamisch an Lärmschutz-zonen im Einzugsgebiet von Flughäfen vor-bei geleitet werden müssen, wie es in Bild 1 dargestellt ist.

Langfristig will man den kompletten Flugweg vom Startflughafen bis zum Ziel ausschließ-lich über 4D-Trajektorien abwickeln. Das eröff-net den Weg, um den immer enger werdenden Luftraum deutlich effizienter und umweltscho-nender zu nutzen.

### Standards sind entscheidend für die Luftfahrt

Wie alle Systeme an Bord von Flugzeugen müssen auch die Funkgeräte international stan-dardisiert sein. Auf Basis dieser Standards wer-den dann später Flugzulassungen durchge-führt, um sicherzustellen, dass die Technik an Bord zuverlässig funktioniert und alle Krite-rien der Flugsicherheit erfüllen. Dafür ist ein sehr langer zeitlicher Vorlauf nötig, der nicht selten zehn oder auch zwanzig Jahre dauern kann. Weil es sich kaum ein Unternehmen lei-ten kann, so lange auf einen Absatzmarkt zu warten, die Industrie aber möglichst früh in die Standardisierungsprozesse eingebunden wer-den soll, gibt es staatliche Forschungsinitiati-ven. Für LDACS hat das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz die Programme zur Luftfahrtforschung (LuFo) ins Leben gerufen, an denen sich auch Rohde&Schwarz beteiligt. Hier

wird zusammen mit Projektpartnern wie dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) die LDACS-Technologie entwickelt. Par-allel dazu erarbeiten Arbeitsgruppen die für die Flugzulassung benötigten Standards in Koopera-tion mit der International Civil Aviation Organi-zation (ICAO) und verabschieden diese. Die ICAO mit Sitz in Kanada ist die oberste Standardisie-rungsbehörde für die zivile Luftfahrt. Sie prüft und verabschiedet die wichtigsten Dokumente für eine Standardisierung.

Im nachfolgenden Bild ist die Historie der bishe-rigen Standardisierungsaktivitäten bis hin zu den aktuell geplanten Produktentwicklungen kom-pakt dargestellt.

Im Rahmen des erst vor kurzem gestarteten LuFo-Projekts PaWaDACs (siehe Infobox) wird endgültig der technologische Grundstein gelegt, um anschließend eine Produktentwicklung von LDACS-Boden- und LDACS-Bordgeräten ab ca. 2025 starten zu können. Mit einer Markteinfüh-rung ist ab ca. 2028 zu rechnen. Durch die frühe Beteiligung an den LuFo-Projekten besteht eine gute Chance, dass Rohde&Schwarz als Markt-führer auf der Bühne der LDACS-Anbieter ins Rennen geht.

THOMAS BÖGL, ROHDE & SCHWARZ

## VIER GROSSE FORSCHUNGSPROJEKTE

Vier aufeinander aufbauende Forschungsprojekte, gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), brachten die Entwicklung des digitalen Datenübertragungsver-fahrens LDACS für den zivilen Flugverkehr maßgeblich voran:

### ► ICONAV (Integrated Communications and Navigation)

Zusammen mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und weiteren Projektpartnern entwickelte Rohde & Schwarz innerhalb eines Konsor-tiums von 2012 bis 2015 einen funktionsfähigen Demonstrator für Labortests.

### ► MICONAV (Migration towards Integrated COM/NAV Avionics)

Die Funktionstüchtigkeit im Flugbetrieb wies das Folgeprojekt MICONAV nach. Hier entstand von 2016 bis 2019 ein flugtauglicher Demonstrator mit zusätzli-cher, hochgenauer Navigationsfähigkeit. In den anschließenden Labor- sowie Flugversuchen gelang das erfolgreiche Testen von An- und Abmelden an vier extra für das Projekt eingerichteten LDACS-Basisstationen sowie die Übergabe von einer zur anderen Bodenstation. Ebenso zuverlässig funktionierte die Kom-munikation zwischen Flugzeug und Bodenstation in verschiedenen Situationen wie Überflug in größerer Höhe, An- und Abflug oder Rollen am Flughafen.

### ► IntAirNet (Inter Air Network)

In diesem Projekt (2019 bis 2022) wurden die Fähigkeiten des Funkverfahrens auf die direkte Vernetzung zwischen Flugzeugen erweitert. Damit ist LDACS nicht mehr zwingend auf eine terrestrische Infrastruktur angewiesen und kann auch für die Wege über die Ozeane genutzt werden.

### ► PaWaDACs (Pave the Way to Digital Aeronautical Communications)

Das Projekt PaWaDACs läuft seit dem Jahr 2022 und widmet sich der Verklei-nerung der Gerätedemonstratoren sowie einer realitätsnahen Testinstallation an zwei Standorten der Deutschen Flugsicherung (DFS). Mit der Vollendung dieser Arbeiten werden auch die entscheidenden Technologieschritte für zukünftige LDACS-Systeme erschlossen sein. Damit wäre eine solide Ausgangsbasis für die Entwicklung neuer Produkte für die zivile Luftfahrt geschaffen, mit denen Rohde & Schwarz nicht allein Bodenstationen ausrüsten, sondern in Zukunft auch an Bord der Flugzeuge Lösungen für seine Kunden anbieten kann.



Interview mit Thomas Bögl, Director of Technology and Studies

# „DAS WAR DAS ENDE DES HENNE-EI-PROBLEMS“

Der offizielle Startschuss zu LDACS (L-band Digital Aeronautical Communications System) fiel im Dezember 2016, als die internationale Zivilluftfahrtorganisation in Kanada die Standardisierungsarbeiten aufnahm. Damit es so weit kam, war jahrelange Vorarbeit nötig.

Das weiß kaum jemand besser als Thomas Bögl. Dem Abteilungsleiter bei Rohde & Schwarz war bereits gegen Ende der 2000er Jahre klar, dass der rein analoge Flugfunk langfristig um einen digitalen Standard erweitert werden muss. Zusammen mit Thomas Richter, leitender Ingenieur aus der Vorentwicklung, und seiner Abteilung stieß er Forschungs- und Entwicklungsarbeiten innerhalb des Konzerns an, suchte den Kontakt mit Forschungsinstituten wie dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und scheute auch die gut 6000 Kilometer von München nach Montreal zum Hauptquartier der internationalen Zivilluftfahrtorganisation ICAO (International Civil Aviation Organization) nicht.

**NEUES: Herr Bögl, wann begann für Sie die Arbeit an LDACS?**

**Thomas Bögl:** Meine erste Berührung mit LDACS war etwa im Jahr 2010. Es war ein Treffen mit dem DLR in Oberpfaffenhofen, die ja einer der Erfinder des LDACS-Funkverfahrens sind. Die Spezialisten dort haben sehr überzeugend dargestellt, dass in Zukunft neue digitale Funkverfahren benötigt werden, um den analogen Sprechfunk zu entlasten. Dass dafür neue Produkte entwickelt werden müssen, war bereits damals klar. Weil das aber nicht Aufgabe des DLR ist, machte eine Partnerschaft zwischen Forschung und Industrie viel Sinn. Tatsächlich war dieses Treffen auch der Beginn der bis heute sehr fruchtbaren LuFo-Projektpartnerschaft mit dem DLR. LuFo steht für Luftfahrtforschung.

**Der analoge Sprechfunk hat sich im Flugverkehr gut bewährt. Woran konnte man den Entlastungsbedarf erkennen?**

Heute müssen Fluglotsinnen und Fluglotsen fast genauso viele Luftfahrzeuge koordinieren wie vor Corona. Und die Tendenz steigt rasant. Diesen Trend konnte man auch schon vor fünfzehn Jahren sehen. Wichtig zu verstehen ist noch, dass diese Arbeitslast nicht auf mehr Personal verteilt werden kann, weil dafür nicht genügend parallele Sprechfunkkanäle vorhanden sind. Eine Entlastung kann nur erreicht werden, indem solche Anweisungen, die nicht unbedingt eine direkte Sprachverbindung zwischen Piloten und Lotsen erfordern, über eine parallele Datenverbindung abgewickelt werden. Darunter fallen zum Beispiel nicht sicherheitskritische Anweisungen, etwa wenn sich das Flugzeug noch am Boden befindet. Für den Datenaustausch gibt es zwar schon lange die VHF-Datenfunktechnik, aber durch ihren limitierten Datendurchsatz bietet sie mittel- bis langfristig keine wirksame Entlastung für den Sprechfunk. Deshalb zeichnete sich schon damals ab, dass die Luftfahrt bald eine leistungsstärkere digitale Datenfunktechnik benötigen würde.

**LDACS wird auch neue Anwendungsfälle eröffnen. Welche sind für Sie die wichtigsten und warum?**

Die erste und gleichzeitig auch die wichtigste Anwendung ist das Bereitstellen einer ausreichend hohen Datenrate und einer Verschlüsselung – und zwar in bestehenden Systemen. Ihrem VHF-Datenlink wird mit LDACS ein starker



**Testflüge 2019:** Wellenformentwicklungs- und Messgeräte von Rohde & Schwarz ermöglichten die Funkverbindungen und zeichneten sämtliche erhobenen Daten auf – insgesamt über zwölf Terabyte.

## „Das absolute LDACS-Highlight waren für mich natürlich die Flugversuche im April 2019, als wir einen LDACS-Demonstrator in das Forschungsflugzeug des DLR integriert haben.“

Bruder im L-Band zur Seite gestellt. Der Einfachheit halber verhält sich ein LDACS-Datenlink so wie ein quasi-breitbandiger VHF-Datenlink. So lassen sich Bestandssysteme möglichst unkompliziert erweitern.

Zusätzlich bringt LDACS eine eigene Navigationsfunktion mit. Sind GPS oder andere Navigationssysteme an Bord gerade nicht verfügbar, kann sie als Ersatzsystem dienen und eine Positionsbestimmung des Flugzeugs vornehmen. Damit leistet LDACS nicht nur einen Beitrag zur Effizienzsteigerung der Flugfunkkommunikation, sondern auch zur Flugsicherheit.

### **Sehr früh ging es für Sie und ihr Team nach Montreal, zum ICAO-Hauptsitz. Warum nicht nach Paris zum europäischen Regionalbüro oder zur Deutschen Flugsicherung?**

Nur am Stammsitz der ICAO sitzen die Personen im sogenannten Communications Panel. Und nur sie können neue Arbeitsgruppen gründen, die auch das Mandat haben, neue Technologien für die Luftfahrt zu standardisieren. Die Deutsche Flugsicherung ist ein Anwender von für die Flugsicherung freigegebenen Technologien, kann selbst aber keine Standardisierungen durchführen.

### **In der Regel investieren Fluggesellschaften und Flughafenbetriebe erst, wenn marktreife Geräte in Reichweite sind und Komponenten- und Gerätehersteller fragen erst nach einem Absatzmarkt, bevor sie in die Geräteentwicklung investieren. War der Besuch bei der ICAO auch der Schlüssel, um dieses übliche Henne-Ei-Problem zu überwinden? Wenn das oberste Gremium entscheidet, hat schließlich jeder Planungssicherheit.**

Der Besuch bei der ICAO war in der Tat das Ende des Henne-Ei-Problems und der Beginn zielgerichteter internationaler Aktivitäten zu LDACS. Mit der Einberufung der neuen Arbeitsgruppe Projekt Team Technologie wurde schnell ein Forum geschaffen, in dem sich alle Interessenten und Betroffenen von LDACS offiziell treffen und austauschen konnten. Das war auch der Boden für weitere

Aktivitäten, die über die reine Standardisierung hinausgingen. Ein Beispiel ist die Gründung der Avionic Task Force. Unter dem Mandat der ICAO bringt sie alle an Flugsystemen beteiligten Firmen an einen Tisch, identifiziert alle noch im Weg stehenden Hürden und räumt sie aus. Leiter dieser Arbeitsgruppe ist im Übrigen Thomas Richter. Als Projektleiter der LuFo-Projekte bei Rohde&Schwarz hat er unter anderem die Flugversuche geplant und organisiert. Er hat insgesamt einen maßgeblichen Anteil am Geschehen um LDACS und ohne seinen unermüdlichen Einsatz wären die vielen Aktivitäten von Rohde&Schwarz zu LDACS gar nicht leistbar.

### **Welche Organisationen und Behörden müssen zusammenspielen, damit ein weltweiter Standard wie LDACS erfolgreich eingeführt werden kann?**

Allen voran sind die ICAO und die EUROCAE zu sehen, aber auch entscheidende Flugsicherungsorganisationen wie EUROCONTROL, die mit der Standardisierung zunächst die formelle Basis zum Ausrollen und zum Betrieb legen. Genauso entscheidend sind aber auch die zukünftigen Betreiber und Nutzer von LDACS. Fluggesellschaften und Flugzeughersteller müssen ihr Interesse an der Nutzung bekunden, damit die Industrie genug Sicherheit sieht, um Entwicklungsbudgets zu investieren, damit sie die benötigten Produkte auch wirklich anbieten können.

### **Damals brach ein fünfköpfiges Team nach Montreal auf. Wie hat sich das Interesse an LDACS seitdem entwickelt?**

In einem der letzten LDACS-Webinare, zu der die Deutsche Flugsicherung als Ausrichter eingeladen hatte, kamen circa 200 Firmen und Organisationen. Sie informieren sich über LDACS, treiben aber auch eigene Aktivitäten voran. Trotz dieses steigenden Wettbewerbs ließ Rohde&Schwarz bisher als einzige Firma verlauten, in Zukunft sowohl für Flugzeuge als auch für die Bodeninfrastruktur LDACS-Produkte liefern zu wollen.

### **Was hat Sie in den rund 15 Jahren am meisten bei der Arbeit motiviert?**

Mehreres. Ein Aspekt ist, dass die internationale Luftfahrtgemeinschaft viele unserer Vorschläge zu LDACS aufgegriffen hat, zum Beispiel dazu, wie die Infrastruktur von Flugzeugen und am Boden mit LDACS kostengünstig erweitert werden kann. Es freut mich auch, dass uns viele Firmen und Organisationen zu LDACS ansprechen und als zentralen Kompetenzträger wahrnehmen.

Das absolute LDACS-Highlight waren für mich natürlich die Flugversuche im April 2019, als wir einen LDACS-Demonstrator in das Forschungsflugzeug des DLR

integriert haben und die Fähigkeiten des neuen Funkverfahrens live im Flug zeigen konnten. In Süddeutschland haben wir dafür sogar vier LDACS-Bodenstationen aufgebaut, mit denen die Flugzeuginstallation während des Fluges erfolgreich kommunizierte. Für realitätsnahe Testflüge hat die Deutsche Flugsicherung alle Freigaben erteilt. Das heißt, wir konnten uns im Luftraum innerhalb des normalen Flugverkehrs bewegen. Weil es die weltweit ersten Flüge waren, in denen LDACS real gezeigt werden konnte, gab es auch ein großes Medienecho. Auf der Webseite des DLR standen an diesem Tag ausnahmsweise keine Berichte über Marsmissionen oder die ISS, sondern die LDACS-Testflüge unseres Projekts.

**Wie arrangieren Sie sich als Techniker mit der bürokratischen Facette der Standardisierungsarbeit?**

Ich bin zwar techniknah unterwegs, allerdings immer mit dem Blick für die Nutzbarkeit und die Wirtschaftlichkeit zukünftiger Lösungen. Diese beiden Aspekte sind mir sehr wichtig. Ohne hohen Kundennutzen fehlt die Kaufbereitschaft und wenn eine neue Technik nicht beherrschbar und finanziell attraktiv ist, wird sie gar nicht erst eingeführt. Dann hilft auch der höchste Kundennutzen nicht mehr.

Die Standardisierungsarbeit kann in der Tat sehr bürokratisch sein. Wir teilen sie uns im Wesentlichen mit dem DLR und der Deutschen Flugsicherung. Beide sind Projektpartner im laufenden LuFo-Projekt PaWaDACs und beide spielen eine wesentliche Rolle in den relevanten Standardisierungsgremien bei der ICAO und der EUROCAE. Durch diese Arbeitsteilung können wir uns vorrangig auf die Technik und den Kundennutzen fokussieren und das DLR und die Deutsche Flugsicherung berücksichtigen unsere Ergebnisse dann in den entsprechenden Dokumenten der Standardisierung.

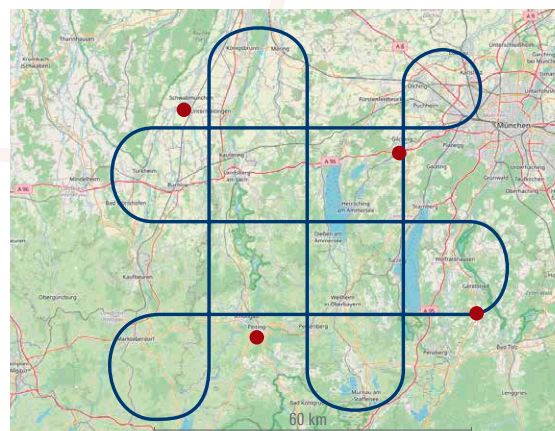
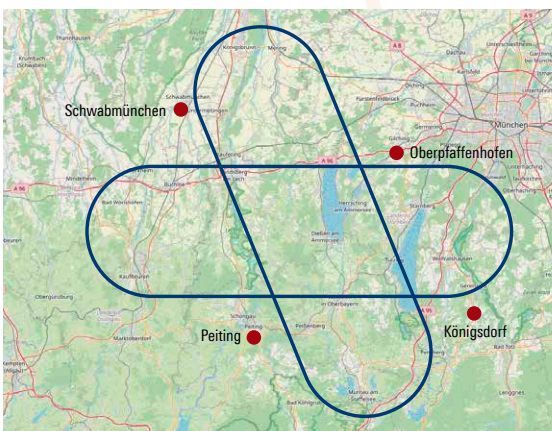
**Welche Bilanz ziehen Sie zum bisher Erreichten? Und was sehen Sie als nächsten großen Meilenstein für LDACS?**

Die bisherige Bilanz ist durchweg sehr positiv. Es gibt mittlerweile viele Interessenten für LDACS und die Standardisierung wird in diesem Kalenderjahr abgeschlossen sein. Damit sind die wichtigsten Voraussetzungen für uns als Firma erfüllt, um zur prognostizierten Markteinführung im Jahr 2028 mit den richtigen Produkten bereit zu stehen und uns den zivilen Markt der Avionik weiter zu erschließen.

REDAKTION



Die Route des ersten MICONAV-Testflugs führte über vier eigens für das Projekt errichtete LDACS-Bodenstationen in Südbayern. Zwei davon sind reine Sender zum Erheben von Navigationsdaten, die anderen beiden sind Transceiver für digitale Flugfunkdaten. Die Flugrouten wurden so geplant, dass der Funkzellenwechsel (Handover) getestet werden konnte (unten links) und außerdem verschiedene Triangulationsszenarien mit zwei bis vier Bodenstationen (unten rechts).



www.openstreetmap.org/copyright (2 x)

# 5 kW KURZWELLEN-SENDELEISTUNG FÜR DIE FLUGSICHERUNG

Der R&S®SK4105 HF-Hochleistungssender vereint kleine Standfläche, hohe Sendeleistung und Ausfallsicherheit. Damit eignet er sich bestens für die Flugverkehrskontrolle über weiträumigen Gebieten und bei rauen Standortbedingungen wie in Grönland.



Bild 1 (rechts): Ausgewählte Flugfunkstationen entlang der grönländischen Küste.



Mit etwa zwei Millionen Quadratkilometern ist Grönland die größte Insel der Welt mit gerade einmal 57 000 Einwohnern. Entsprechend weitläufig ist der Luftraum und entlegen sind die Sendestationen. Den Flugverkehr im unteren Luftraum organisiert die dänische Flugsicherung Naviar über das Flight Information Centre (FIC) in Grönland. Weitere HF- und VHF-Funkanlagen sind an strategisch ausgewählten Punkten entlang der grönländischen Küste in Betrieb. Die Hauptkommunikation läuft über das FIC in der südwestlich gelegenen Hauptstadt Nuuk. Die dort installierten HF-Sender sollen bald erneuert werden. Dafür liefert Rohde&Schwarz im Sommer 2023 den wartungsarmen und kompakten R&S®SK4105 HF-Hochleistungssender, der auch in solch anspruchsvollen Umgebungen zuverlässig arbeitet. Er sendet im Kurzwellen-Frequenzbereich von 1,5 MHz bis 30 MHz mit bis zu 5 kW. Diese hohe Sendeleistung stellt die nötige spektrale Leistungsdichte zur Verfügung, die das System breitbandfähig macht und eine klare Sprechfunkverbindung von der Bodenstation zum Flugzeug über eine hohe Reichweite ermöglicht.

### Kompakt und wartungsarm durch Flüssigkeitskühlung

Dafür sind der Signalquelle flüssigkeitsgekühlte Hochleistungsverstärker nachgeschaltet. Flüssigkeitskühlungen sind in Fernseh- und Rundfunksendern weit verbreitet, in Sendern zur Flugverkehrskontrolle (Air Traffic Control, ATC) stellen sie ein Alleinstellungsmerkmal dar, das sich in einer kompakten Stellfläche, verminderterem Wartungsaufwand und hoher Zuverlässigkeit bemerkbar macht. Der R&S®SK4105 passt inklusive Wärmetauscher und Pumpenstand in ein 19-Zoll-Rack. Vergleichbare Sender mit Luftkühlung benötigen bis zu viermal so viel Stellfläche und sind durch die mechanischen Verschleißteile wartungsintensiver.

Das Kühlmittel zirkuliert durch einen Aluminiumblock, auf dem die gesamte Sender-Baugruppe montiert ist. Diese vollflächige Kühlung stellt eine optimale Betriebstemperatur des Senders sicher, entlastet außerdem alle weiteren Komponenten im Gehäuse von thermischem Stress und erhöht so die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems. Ein relevantes Argument für Sendestationen mit sicherheitskritischen Aufgaben. Noch dazu, wenn ihre Standorte entlegen, in der Regel eingeschneit und entsprechend nur sehr schwer zugänglich sind. Unter solchen Betriebsbedingungen kann die im Sendergehäuse anfallende Verlustwärme einer sinnvollen Zweitverwertung zugeführt werden, indem sie zum Heizen des Sender-Unterstands genutzt wird.

Verglichen mit einem luftgekühlten HF-Sender fällt der Gesamtstrombedarf geringer aus. So reduzieren sich die Betriebskosten. In Regionen deutlich jenseits des grönländischen Dauerfrostklimas bietet die Flüssigkeitskühlung einen weiteren Vorteil. Weil die Kühlung unabhängig von der Umgebungsluft erfolgt, kann der Sender auch an wenig klimatisierten Standorten betrieben werden.

### Zukunftsfester HF-Sender für ATC-Aufgaben

Eine Schlüsselkomponente des R&S®SK4105 ist der Steuersender R&S®GX4100, welcher bereits erfolgreich in mehreren 1-kW-HF-Funkstationen des grönländischen Küstenfunks für den Schiffsverkehr eingesetzt wird. Der Steuersender erfüllt die Kriterien nach EUROCAE ED-137C und ist softwaredefiniert. Dadurch lassen sich mit wenig Aufwand auch nachträglich neue Senderfunktionen integrieren und Anpassungen auf zukünftige Funkstandards vornehmen. Als Teil des CERTIUM®-Geräteuniversums von Rohde&Schwarz ist der HF-Hochleistungssender kompatibel mit weiterer Hard- und Software

der CERTIUM®-Reihe und kann je nach Anwendungsfall passend erweitert werden.

REDAKTION

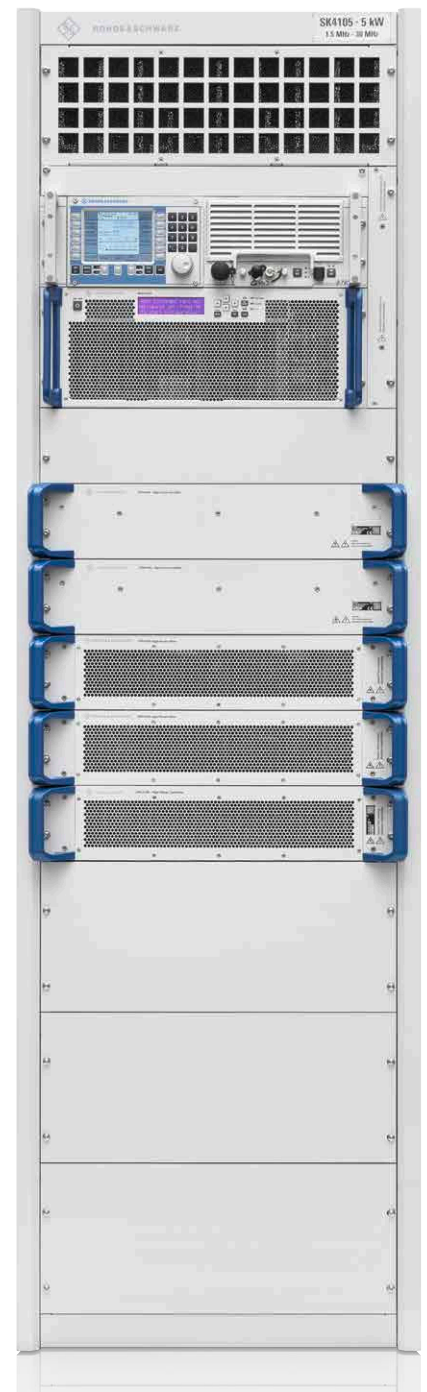


Bild 2: Der R&S®SK4105 HF-Hochleistungssender ist in Varianten von 150 W bis 5 kW Sendeleistung konfigurierbar.

