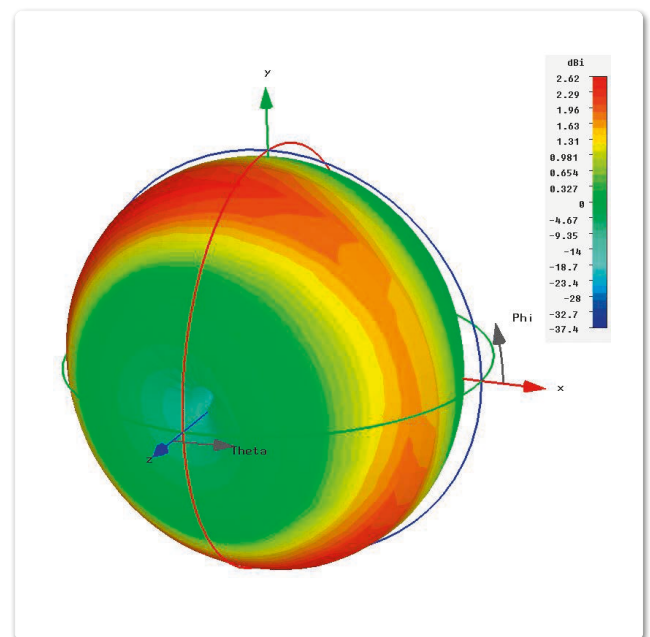
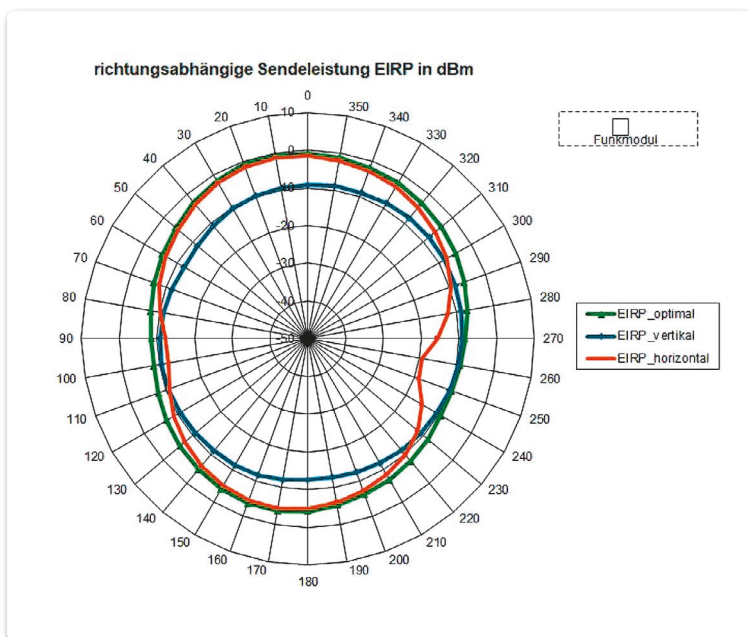


Die unsichtbare Komponente

Effiziente Antennenintegration in IoT- und Smart-Home-Devices

Der Artikel zeigt, welche Antennenkonzepte sich in der Praxis bewährt haben, wie Groundplane, Gehäuse und Matching die Antenneneigenschaften und damit das Funkverhalten beeinflussen und warum frühzeitige HF-Reviews sowie messtechnische Validierung entscheidend für eine zuverlässige Funklösung sind.



Die Antenne bleibt oft unsichtbar – ihre Wirkung jedoch nicht. Ob Smart Home, Smart Meter oder IoT-Sensor: Eine schlechte Antennenintegration kann Funkreichweite, Batterielaufzeit und Produktqualität massiv beeinträchtigen.

Ob Smart Meter im Keller, Türsensor im Smart Home oder Umweltsensor in der Smart City – das Herzstück jeder drahtlosen Kommunikation ist die Antenne. Während sich Prozessoren und Sensorik zunehmend standardisieren und einfach integrieren lassen, bleibt die HF-Schnittstelle eine der größten Herausforderungen im Produktdesign, zumal sie so gut wie immer im Gehäuse versteckt sein muss.

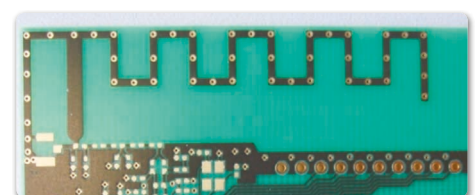
Für Produktentwickler entscheidet die Qualität der Antennenintegration maßgeblich über Reichweite, Energieeffizienz und letztlich den Markterfolg. Wegen der Unsichtbarkeit der elektromagnetischen Felder und der wunschgemäß versteckten Antenne handelt es sich um eine der kritischsten und meistunterschätzten Komponenten moderner IoT-Geräte.

Embedded-Antennen: PCB, Chip, Wire oder Flex?

Für Anwendungen bis etwa 6 GHz haben sich mindestens drei Antennenkonzepte etabliert:

• PCB-Antennen (z.B. Mäander-Monopol, Inverted-F)

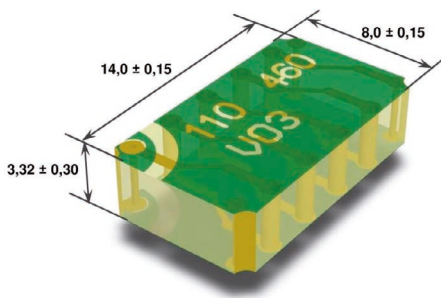
Kostengünstig, da direkt in die Leiterplatte integriert. Voraussetzung ist jedoch ein sorgfältig definiertes Layout mit ausreichend großer Massefläche. Solche „Null-Euro-Antennen“ werden aus Kostengründen meist bevorzugt, sind jedoch bei der Produktentwicklung aufwendiger.



Einfache PCB-Antenne für Sub-GHz-Anwendungen



Autor:
André Volkmar
Dipl.-Ing. (FH)
Teamleiter Entwicklung
IK Elektronik GmbH
www.ik-elektronik.de



Beispiel für eine Chip-Antenne

Der Integrationsprozess ist insbesondere für schmalbandigen ISM-Datenfunk (auch bei sehr kleinen Geräten) noch relativ einfach, wenn die Antenne von Anfang an im Gesamtkonzept berücksichtigt wird.

• Chip-Antennen

Sehr kompakt und einfach per SMT zu bestücken. Verfügbar als keramische Bauelemente, aber auch auf anderen Trägermaterialien, wie Kunststoff oder FR-4. Reagieren empfindlich auf ihre unmittelbare Umgebung und benötigen präzise Layoutvorgaben.

Für Anwendungen mit großen Stückzahlen sind LTCC- oder ähnliche Chipantennen meist zu teuer. Vorteilhaft kann die stabile Performance in der Serie und die kleine Bauform sein.

• Wire- oder Folien-Antennen

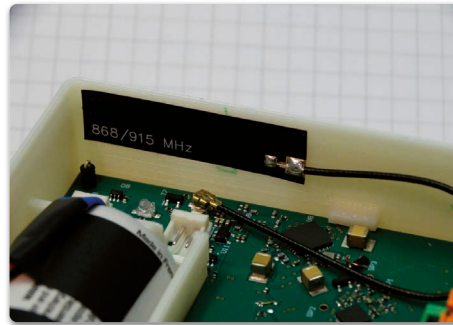
Ideal bei beengten Platzverhältnissen auf dem Mainboard und zusätzlichem Platz im Gehäuse. Sie ermöglichen eine flexible Positionierung im Gehäuse, erfordern jedoch einen höheren Montageaufwand.

Solche Antennen sind nicht Plug&Play: Sie funktionieren meist suboptimal, da sie nicht für die jeweilige Einbausituation optimiert sind. Das Anpassungsnetzwerk kann kaum optimiert werden und Kabellänge und Position sind kritisch. Versuche zeigen, dass sich unter 10 ähnlichen FPC-Antennen meist nur eine mit akzeptabler Performance für die jeweilige Anwendung findet.

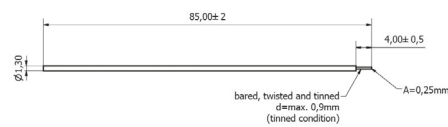
• Customized

Zugeschnitten auf das jeweilige Produkt kann auf maximale Performance optimiert werden. Für Antenne und Groundplane sollte möglichst ein großes Volumen genutzt werden.

Für kundenspezifische Lösungen werden meist bekannte Technologien kombiniert, um Einschränkungen zu verringern, z.B. kann mit einem Blechteil oder mit einer zusätzlichen Platine relativ kostengünstig das verfügbare Volumen optimal



Eine Folienantenne



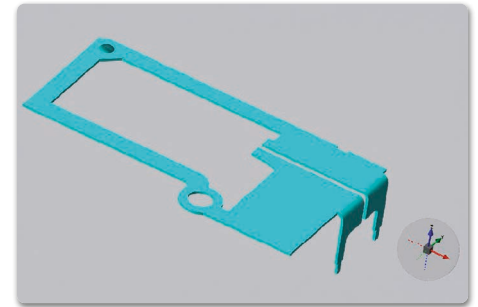
Abmessungen einer Drahtantenne

ausgenutzt werden. Außerdem kann mit einem eigenen Design besser und flexibler auf Änderungen reagiert werden.

Die Auswahl der Antenne sollte immer in einer möglichst frühen Entwicklungsphase im Kontext von Bauraum, Frequenzband und Gehäusemechanik erfolgen.

Einfluss der Groundplane

Ein häufiger Irrtum im Entwicklungsprozess ist die Betrachtung der Antenne als isoliertes Bauteil. Tatsächlich bildet im Sub-GHz-Bereich (aber auch bspw. bei 2,4 GHz) meist die gesamte Leiterplattenmasse den Gegenpol zur Antenne. Ist diese zu klein



Prototyp einer kundenspezifischen LTE-Antenne als Stanz-Biege-Teil

oder ungünstig ausgeführt, sinkt der Wirkungsgrad drastisch.

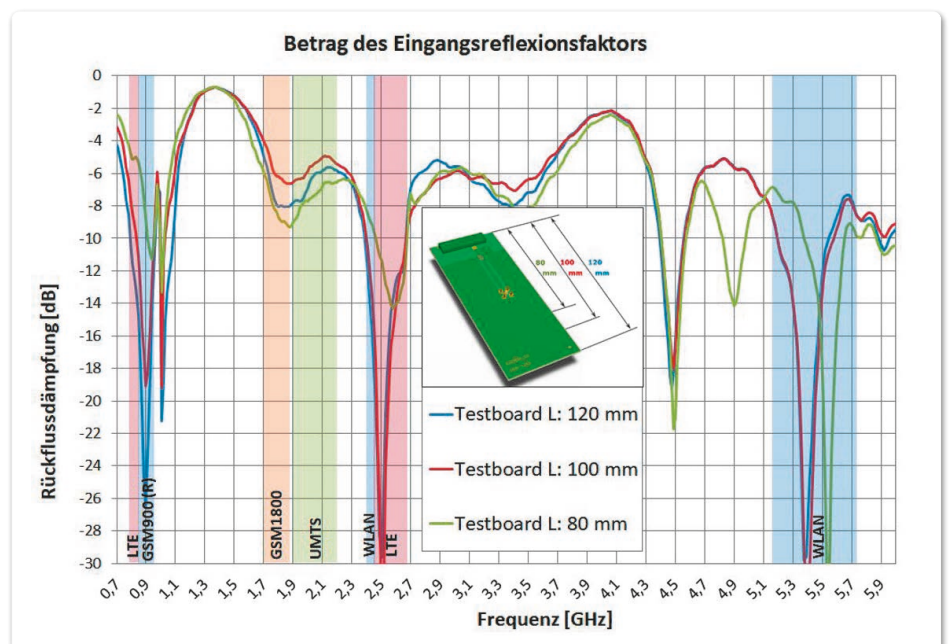
Die Antennenposition und die Struktur der Masseflächen sollten bereits zu Beginn des Produktdesigns betrachtet werden. Eine nachträgliche Optimierung ist meist deutlich schwieriger.

Gehäuseeinflüsse und Materialwahl

Auch das Gehäuse ist integraler Bestandteil des HF-Systems. Kunststoffe sind zwar grundsätzlich durchlässig für Funkwellen, ihre Dielektrizitätskonstante verschiebt jedoch die Resonanzfrequenz der Antenne zu tieferen Frequenzen hin.

Metallisierte Beschichtungen, Kohlenstoffanteile im Kunststoff oder EMV-Schutzlacke können darüber hinaus zu starker Dämpfung oder vollständiger Abschirmung führen.

Mechanik und HF-Design müssen frühzeitig gemeinsam betrachtet werden.



Eingangsreflexionsfaktor bei unterschiedlicher PCB-Fläche

Messtechnik: Vom VNA zur OTA-Analyse

Eine zuverlässige Bewertung der Antennenperformance ist meist nur im eingebauten Zustand möglich. Vektor-Netzwerkanalyse (VNA)

Messung der Anpassung (Rückflussdämpfung/S11). Werte unter 10 dB sind typischerweise erforderlich für einen effizienten Betrieb.

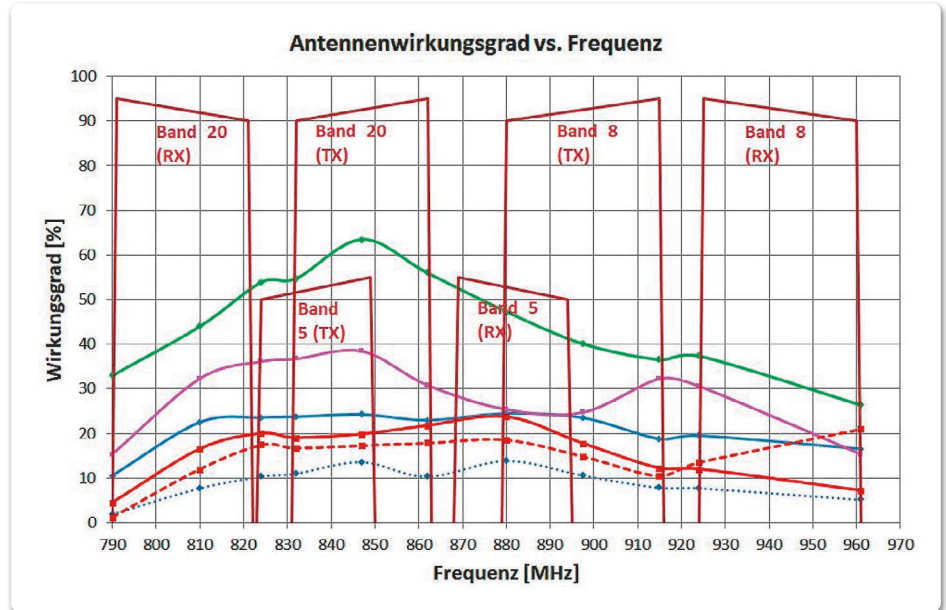
• Over-the-Air-Messungen (OTA)

Bestimmung realer Abstrahleigenschaften wie Antennenwirkungsgrad, Gewinn und Richtfaktor, TRP (Total Radiated Power) und TIS (Total Isotropic Sensitivity) sowie ERP (Effective Radiated Power) und EIRP (Equivalent Isotropically Radiated Power).

• Pre-Compliance-Tests

Frühzeitige Messungen reduzieren das Risiko teurer Redesigns vor der Zertifizierung (z.B. CE/RED). Neben der aktiven Elektronik spielt auch die passive Antenne eine entscheidende Rolle für die Einhaltung von regulatorischen Grenzen, sowohl für die Nutzfrequenz als auch für Spurious Emissions.

Das gesamte Gerät ist die Antenne. Jede Veränderung, z.B. durch zusätzliche Gehäuseteile, Zuleitungskabel, Einbau- und Anwendungsbedingungen können einen Einfluss haben. Das muss für das finale Produkt, aber auch während der Qualifizierungsmessungen berücksichtigt werden.



Gemessene Antenneneffizienz verschiedener LTE-Folienklebantenennen in einem Gehäuse

Design-Review als Erfolgsfaktor

Ein strukturierter HF-Design-Review vor der ersten Prototypenfertigung ist entscheidend:

- ausreichende Groundplane-Dimensionierung
- konsequente Einhaltung von Keep-out-Zonen
- günstige Platzierung des Antennenelementes (Kante/Ecke des PCBs)
- frühzeitige Bewertung der Gehäusematerialien
- Messungen an Prototypen

In der industriellen Praxis zeigt sich, dass frühe Reviews und Messungen an Prototypen die Entwicklungszeit signifikant verkürzen und das Produktrisiko senken.

Impedanzanpassung im System (Matching Networks)

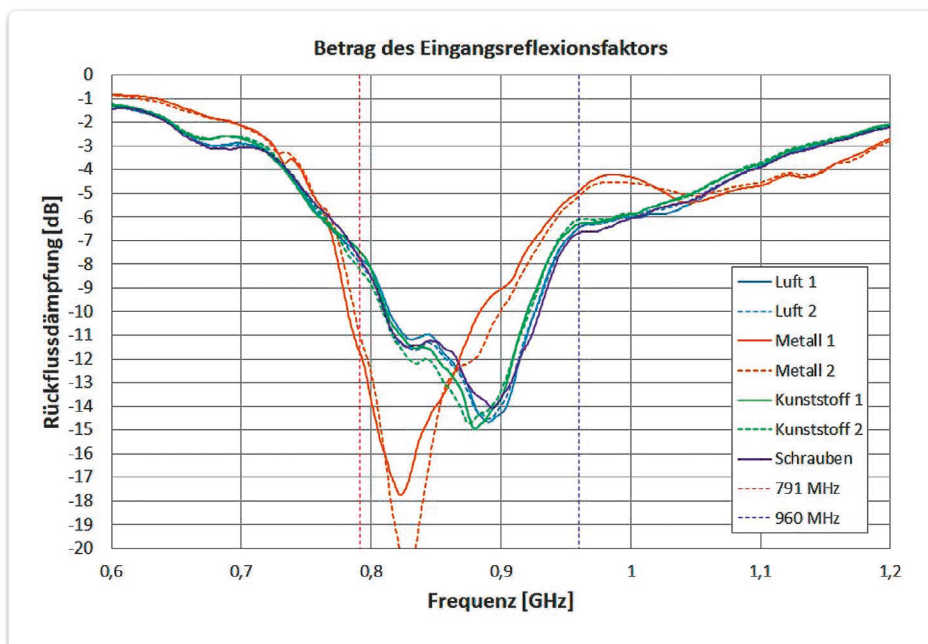
Selbst optimal ausgewählte Antennen verändern ihr Verhalten im realen Produkt. Eine Feinabstimmung kann über das Matching Network (häufig als Pi-Filter ausgeführt) erfolgen. Durch gezielte Anpassung mittels VNA-Messungen im finalen Gehäuse ist folgendes möglich:

- Fertigungstoleranzen kompensieren
- abgestrahlte Leistung maximieren
- Batterielaufzeit verbessern

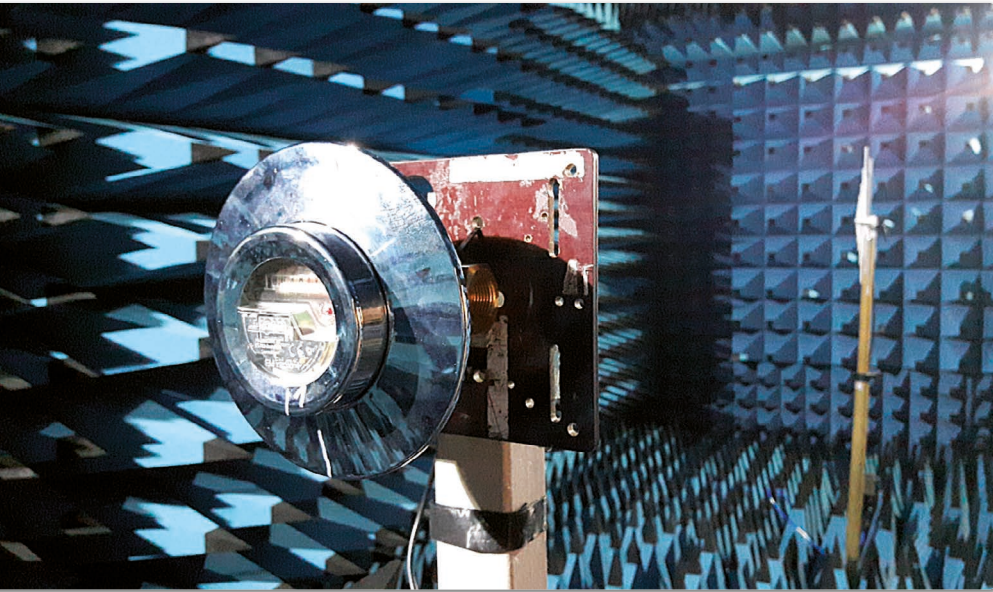
Gerade bei energieoptimierten IoT-Systemen ist dies ein entscheidender Stellhebel. Trotz optimaler Prototypenentwicklung können sich – z.B. mit ersten werkzeugfallenden Teilen der Kunststoffgehäuse – nochmal leichte Verstimmungen ergeben. Eine Analyse der Einflüsse der Fertigungstoleranzen und Umgebungseinflüsse sollte durchgeführt werden.

Entwicklungserfahrungen

In typischen Projekten – etwa bei kompakten IoT-Sensoren im Sub GHz-Bereich – zeigt sich der Einfluss der Integration besonders deutlich: Wird eine Standard-Kauf-Antenne ohne optimierte Massefläche und ohne Matching eingesetzt, kann der Antennenwirkungsgrad schnell bei wenigen Prozent landen. Das Produkt kann auf dem Labortisch oder in normaler Umgebung sogar noch gut



Untersuchung zu verschiedenen Umgebungseinflüssen auf die Antennenresonanz einer LTE-Antenne



OTA-Messung eines Funk-Wasserzählers im reflexionsarmen Messraum

Fazit

Die Antenne ist kein nachgelagertes Detail, sondern ein zentrales Systemelement!

Nur durch die ganzheitliche Betrachtung von HF-Design, Layout, Gehäuse und Messtechnik lässt sich eine robuste Funkverbindung sicherstellen. Wer Antennenintegration von Beginn an systematisch angeht, gewinnt nicht nur an Performance, sondern auch an Entwicklungssicherheit.

Im reflexionsarmen Messraum bei IK Elektronik GmbH können die Abstrahlungseigenschaften von Antennen und Funk-Baugruppen im Frequenzbereich 300 MHz bis 6 GHz bestimmt werden. Die Erfahrung der Entwicklungsingenieure aus über 300 Projekten hilft bei der effizienten und pragmatischen Beurteilung von Antennen. Entwicklungsbegleitende Optimierung und Pre-Compliance-Messungen sind möglich. ◀

funktionieren. Die schlechte Funkabdeckung zeigt sich dann erst durch häufigere Ausfälle in der Praxis oder beim Endkunden. Dies kann bei Mobilfunkgeräten teilweise durch höhere Sendeleistung kompensiert werden – auf Kosten eines deutlich höheren Stromverbrauchs. Die Kundenzufriedenheit leidet darunter erheblich.

Durch gezielte Layout-Anpassung, abgestimmtes Matching und frühzeitige Validierung der Antenneneigenschaften lassen sich diese Effekte reduzieren oder ganz vermeiden.

Messtechnik und Entwicklung aus einer Hand

Die wachsende Komplexität moderner Funksysteme stellt viele Entwicklungsabteilungen vor Herausforderungen – insbesondere im Hinblick auf Messinfrastruktur und HF-Know-how. Ein durchgängiger Entwicklungsansatz beinhaltet:

- Layout-Review
- Simulation
- Matching-Optimierung
- Abstrahlungsmessungen
- Pre-Compliance-Messung im Antennenmessraum

Dies ermöglicht eine signifikante Reduktion von Entwicklungsrisiken und Time-to-Market.

Wichtige Kennwerte bei Antennen und Funkgeräten

P_{TX}	Sendeleistungspegel am Ausgang des Senders in dBm
P_{RX}	Empfangsempfindlichkeit am Eingang des Empfängers in dBm
TRP	abgestrahlte Leistung (Total Radiated Power) des Senders in dBm
TIS	„gestrahlte“ Empfindlichkeit (Total Isotropic Sensitivity) des Empfängers in dBm
η	Antennenwirkungsgrad in Prozent oder manchmal in dB $\eta = TRP / P_{TX}$
d_{max}	Der Richtfaktor D einer Antenne ist definiert als das Verhältnis der Strahlstärke Φ in Hauptstrahlrichtung zu der über alle Richtungen gemittelten Strahlstärke. $D_{max} = \text{Max} [\Phi(\theta, \phi) / \Phi_g]$ $d_{max} [\text{dBi}] = 10 \log (D_{max})$
g_{max}	Der Antennengewinn G ist mit dem Richtfaktor D über den Antennenwirkungsgrad η verknüpft: $G_{max} = \eta * D_{max}$ $g_{max} [\text{dBi}] = 10 \log (G_{max})$ Gewinn und Richtfaktor sind einheitslose Faktoren und können bezogen auf den Isotropstrahler in dBi oder bezogen auf den Dipolstrahler in dBd angegeben werden.
EIRP	äquivalente isotrope Strahlungsleistung (equivalent isotropically radiated power) $EIRP [W] = P_{TX} * G_{max}$ $EIRP [\text{dBm}] = p_{TX} [\text{dBm}] + g_{max} [\text{dBi}]$
ERP	effektive Strahlungsleistung (effective radiated power) bezogen auf den Dipolstrahler $ERP [W] = EIRP / 1,64$ $ERP [\text{dBm}] = EIRP [\text{dBm}] - 2,15 \text{ dB}$
EIS	effektive isotrope Empfindlichkeit (effective isotropic sensitivity) $EIS [W] = PRX / G_{max}$ $EIS [\text{dBm}] = p_{RX} [\text{dBm}] - g_{max} [\text{dBi}]$
ERS	effektive Strahlungsempfindlichkeit (effective radiated sensitivity) $ERS = EIS * 1,64$ $ERS [\text{dBm}] = EIS [\text{dBm}] + 2,15 \text{ dB}$