

RoProxCon® – Rosenberger Proximity Connector

Einfluss des Materials auf die kontaktlose Datenübertragung

WHITEPAPER



Einleitung

Moderne industrielle Fertigungsanlagen zeichnen sich durch immer komplexere und aufwendigere Komponenten und Systeme aus. Dabei ist deren Vernetzung und Steuerung von zentraler Bedeutung. Zahllose Sensoren an Werkzeugmaschinen, Montageautomaten oder Handlings-Systemen erfassen kontinuierlich Daten, die zur Verarbeitung zuverlässig und in Echtzeit an IT-Systeme oder in die Cloud weitergeleitet werden.

Die Verbindung der einzelnen Anlagenkomponenten übernehmen in der Regel elektromechanische Systeme. Kabel und Steckverbinder sind in der industriellen Umgebung jedoch erheblichen Belastungen ausgesetzt und können beschädigt werden oder sogar ausfallen, was den Stillstand der Anlage zur Folge hätte. Stoßen konventionelle elektromechanische Steckverbinder an ihre Grenzen – etwa aufgrund von rotierenden Komponenten oder der begrenzten Lebensdauer – kommen kontaktlose Verbindungssysteme wie RoProxCon® in Betracht, die Daten per Nahbereichsfunk übertragen.

Um die kontaktlose Daten- und Energieübertragung möglichst zuverlässig zu gestalten, müssen material- und umgebungsbedingte Einflüsse auf die Antennen-Einheit minimiert werden. Das geschieht im Rahmen der Auslegung des sogenannten Radoms. Darunter versteht man den Gehäuseteil, der die Antenne vor äußeren Einflüssen schützt, der aber gleichzeitig für die Funkwellen möglichst durchlässig sein muss.

Im Folgenden werden physikalische Hintergründe der Funkwellenübertragung beleuchtet und – darauf basierend – Empfehlungen für die Konstruktion des Radoms gegeben, besonders im Hinblick auf die Einflüsse des Materials und der Abmessungen.



Inhalt

01 Kontaktloses Verbindungssystem RoProxCon®

Daten übertragen

Energie übertragen

Produkte und Eigenschaften

02 Physikalische Hintergründe

Interferenz

Dielektrische Eigenschaften und Kenngrößen

Auswirkungen auf die Transmission

03 Empfehlungen für die Konstruktion des Radoms

Material

Abmessungen

Verunreinigungen

04 Zusammenfassung

01 Kontaktloses Verbindungssystem RoProxCon®

RoProxCon® ist ein berührungsloses Verbindungssystem, mit dem durch Funk im mmW-Bereich (Millimeterwellen) über kurze Entfernungen Daten und Energie übertragen werden. So lassen sich konstruktionsbedingte Luftspalte ohne elektromechanischen Kontakt überbrücken. Die Vorteile liegen auf der Hand: Höchste mechanische Flexibilität wird ebenso erreicht wie hohe Störfestigkeit gegenüber Umwelteinflüssen sowie absolute Verschleißfreiheit, die den Wartungsaufwand minimiert. RoProxCon® ist damit besonders in anspruchsvollen industriellen Umgebungen eine zuverlässige und effiziente Verbindungslösung.

Daten übertragen

RoProxCon® zeichnet sich besonders durch hohe Datenraten aus. Das SoM (System-on-Module) kann bis zu 3,125 Gbit pro Sekunde übertragen. Dies erfordert hohe Bandbreiten, wie sie im mmW-Bereich verfügbar sind. Ein Hochfrequenz-Band in diesem Wellenlängenbereich ist das 60-GHz-Band, das Bandbreiten bis 7 GHz bietet und damit für die Übertragung hoher Datenraten geeignet ist.

Details hierzu sind im europäischen Standard ETSI EN 305 550 festgelegt.



Das Funkmodul von RoProxCon® basiert auf dem ST60 von STMicroelectronics, das mit einer Trägerfrequenz von 60 GHz arbeitet. Zusammen mit der einzigartigen, von Rosenberger entwickelten Antennen-Einheit lässt sich eine Voll-Duplex-Übertragung realisieren, bei der die Daten gleichzeitig in beide Richtungen übertragen werden können. Außerdem ist damit eine fehlerfreie Datenübertragung auch bei unterschiedlichen Abständen, Bewegungen und Neigungen sichergestellt. Die Antennen-Einheit von Rosenberger erlaubt sogar die Datenübertragung während einer kontinuierlichen Rotation – ein weiteres Alleinstellungsmerkmal, das noch mehr Anwendungsmöglichkeiten eröffnet.

Energie übertragen

Grundsätzlich kommen zwei Mechanismen in Frage, um elektrische Energie kontaktlos zu übertragen: die Kopplung über das elektrische oder über das magnetische Feld. Man spricht dann von kapazitiver oder induktiver Kopplung.

RoProxCon® nutzt die induktive Kopplung. Dafür wird ein magnetisches Wechselfeld mit einer Frequenz von etwa 200 kHz erzeugt. Die dafür von Rosenberger entwickelte Leistungselektronik arbeitet mit wenigen elektronischen Komponenten hocheffizient bei hohem Wirkungsgrad. Deshalb entsteht nur wenig Abwärme und die Verluste sind minimal. Mit dem RoProxCon®-Produkt „Hybrid“ können so Leistungen bis 30 W übertragen werden.

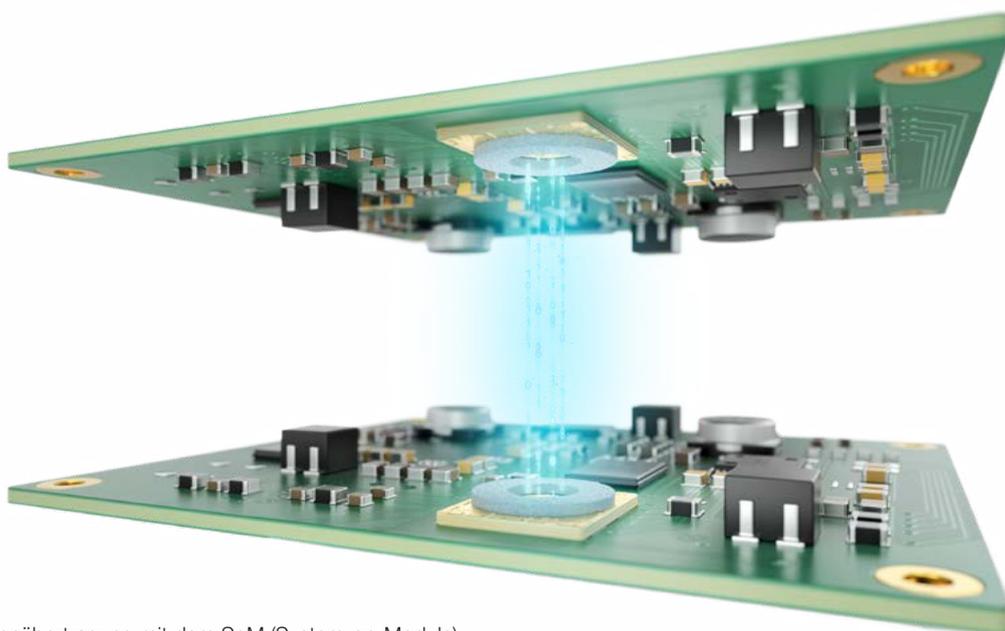


Abbildung 1: Datenübertragung mit dem SoM (System-on-Module)

Produkte und Eigenschaften

Produkt	SoM (System-on-Module)	Data	Hybrid
			
Datenrate	bis 3,125 Gbit/s	bis 1 Gbit/s (Gigabit Ethernet)	bis 1 Gbit/s (Gigabit Ethernet)
Abstand	bis 20 mm	bis 10 mm	bis 5 mm
Übertragung	Daten	Daten	Daten und Energie
Leistung	–	–	30 W
Versatz	±2 mm	±2 mm	±2 mm
Rotation	0–360°	0–360°	0–360°
Vorteil	kundenspezifische Lösungen einfach realisierbar	einfach zu integrieren	überträgt Daten und Energie

02 Physikalische Hintergründe

Interferenz

Konstruktive und destruktive Interferenz treten bei der Überlagerung von Wellen auf.

Treffen zwei oder mehrere gleichgerichtete elektromagnetische Wellen in Phase aufeinander, führt dies zu einer stärkeren Amplitude der resultierenden Welle, denn die Wellenberge und Wellentäler addieren sich (Abbildung 2). Wellen in Phase sind nicht oder um ein Vielfaches der Wellenlänge λ versetzt.

Dieser Fall wird als konstruktive Interferenz bezeichnet.

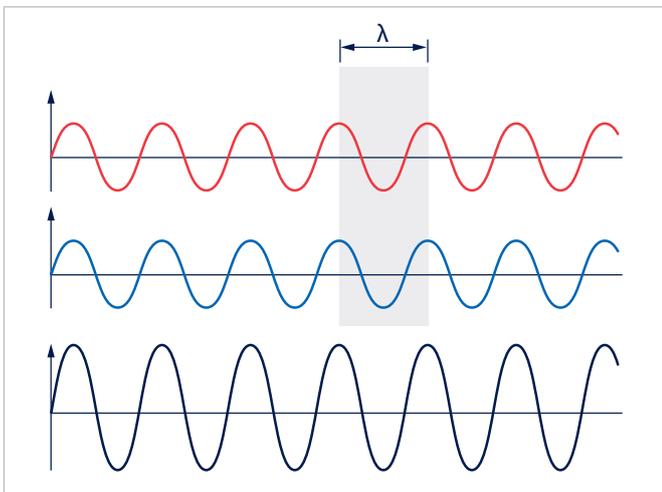


Abbildung 2: Verstärkte resultierende Welle (unten) bei konstruktiver Interferenz zweier Wellen mit Phasendifferenz λ

Treffen zwei oder mehrere gleichgerichtete elektromagnetische Wellen in entgegengesetzter Phase aufeinander, führt dies zu einer geringeren Amplitude der resultierenden Welle oder sogar zu deren Auslöschung, da sich die Wellenberge und Wellentäler subtrahieren oder ganz auslöschen (Abbildung 3). Wellen in entgegengesetzter Phase sind um ein Vielfaches der halben Wellenlänge $\lambda/2$ versetzt.

In diesem Fall spricht man von destruktiver Interferenz.

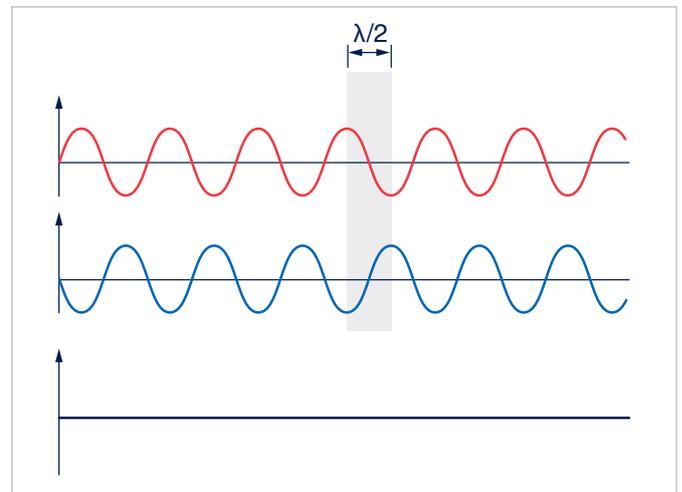


Abbildung 3: Ausgelöschte resultierende Welle (unten) bei destruktiver Interferenz zweier Wellen mit Phasendifferenz $\lambda/2$

Beim Auftreffen elektromagnetischer Wellen auf eine Grenzfläche zwischen zwei dielektrisch unterschiedlichen Materialien (Diskontinuität) entsteht eine teilweise Reflexion der einfallenden Welle mit Phasenverschiebung. Demnach kann es in der Folge zu Interferenzen kommen. Auch der Betrag der reflektierten Welle und deren Phasenverschiebung hängt von den dielektrischen Eigenschaften der beiden Materialien und von der Struktur der Grenzfläche ab.

Dielektrische Eigenschaften und Kenngrößen

Grundsätzlich können elektromagnetische Wellen durch eine Vielzahl von Materialien übertragen werden, die aber weder elektrisch leitend noch magnetisch sein dürfen. Derartige, elektrisch isolierende Materialien werden auch als Dielektrika bezeichnet. In der Technik kommen dafür hauptsächlich Kunststoffe, aber auch Glas oder keramische Werkstoffe in Frage.

Die von der sendenden Antenne in RoProxCon® abgestrahlten, hochfrequenten, elektromagnetischen Wellen müssen durch das Material des Radoms übertragen werden. Dort werden diese Funkwellen an der Grenzfläche teilweise reflektiert und die transmittierten Anteile gedämpft (Abbildung 4).

Wird eine Materialstärke des Radoms von einer halben Wellenlänge ($\lambda/2$) gewählt, überlagern sich die Teilreflexionen destruktiv und die Teiltransmissionen konstruktiv. Das Radom wird dadurch nahezu durchlässig für die elektromagnetischen Wellen.

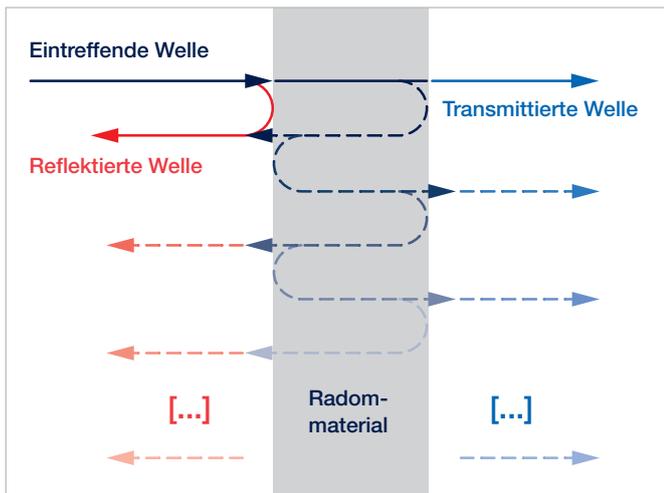


Abbildung 4: Anteile der Welle nach Auftreffen auf Grenzflächen

Für die Auslegung von Diskontinuitäten ist die Kenntnis und Berücksichtigung der physikalischen Eigenschaften eines Materials entscheidend. Es geht um die Abschätzung, wie gut das Material elektrische Ladungen speichern und wie es das elektrische Feld im Vergleich zum Vakuum beeinflussen kann. Gekennzeichnet werden die elektromagnetischen Materialeigenschaften durch die relative Permittivität ϵ_r (oder: Dielektrizitätskonstante) und den Verlustfaktor $\tan\delta$ (δ : Verlustwinkel).

Die relative Permittivität ist eine materialabhängige Kennzahl und gibt das Verhältnis der Permittivität des Materials zu der des Vakuums an. Die relative Permittivität des Materials – hier der Werkstoff des Radoms – gibt Aufschluss über die Reflexion elektromagnetischer Wellen an der Grenzfläche zur Luft.

Der Verlustfaktor hingegen charakterisiert die Absorptionsverluste durch Umwandlung in Wärme im Dielektrikum, durch die eine elektromagnetische Welle gedämpft wird.

Zusammen geben relative Permittivität und Verlustfaktor Auskunft über die Effizienz bei der Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen im Material.

Je niedriger die relative Permittivität und der Verlustfaktor sind (Tabelle 1), desto geringer ist der Einfluss des Materials auf die Ausbreitung der elektromagnetischen Welle.

Material	Relative Permittivität ϵ_r	Verlustfaktor $\tan\delta$
Vakuum	1,0	0
Luft	1,0006	0
Glas	6–8	0,002
Keramik	9	0,002–0,006
Kunststoff	2–4	0,001–0,03

Tabelle 1: Dielektrische Kenngrößen ausgewählter Materialien

Auswirkungen auf die Transmission

Abbildung 5 verdeutlicht die Einflüsse von relativer Permittivität ϵ_r (negative y-Achse, in der Abbildung rechts) und Materialstärke (negative x-Achse, in der Abbildung vorn) auf die Durchlässigkeit für elektromagnetische Wellen (negative z-Achse, in der Abbildung links). Dabei wird auch der Verlustfaktor $\tan\delta$ durch Absorption berücksichtigt (abfallende Linie hinten bzw. Kurven in negativer x-Richtung zu höheren Materialstärken). Die dunkelblauen Bereiche der farbigen Fläche sind erstrebenswert, die helleren Einschnitte sind zu meiden.

Entspricht die Materialstärke einem ganzzahligen Vielfachen der halben Wellenlänge ($\lambda/2$), ist das Material für die vorgesehene Trägerfrequenz von 60 GHz nahezu durchlässig, in Abbildung 5 gelangt man dadurch in den Bereich der dunkelblauen Wellenrücken.

Bei einer Trägerfrequenz von 60 GHz ist die Wellenlänge λ_0 in Luft 5 mm, im Dielektrikum in Abhängigkeit der relativen Permittivität entsprechend geringer. In einem exemplarischen Dielektrikum mit einer relativen Permittivität $\epsilon_r = 3$ (mittlere relative Permittivität von Kunststoffen) beträgt die halbe Wellenlänge $\lambda_r/2$ etwa 1,4 mm.

$$\frac{\lambda_r}{2} = \frac{\lambda_0}{2\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{5}{2\sqrt{3}} \text{ mm} \approx 1,4 \text{ mm}$$

Die Werte der exemplarischen Rechnung sind im rot markierten Punkt dargestellt.

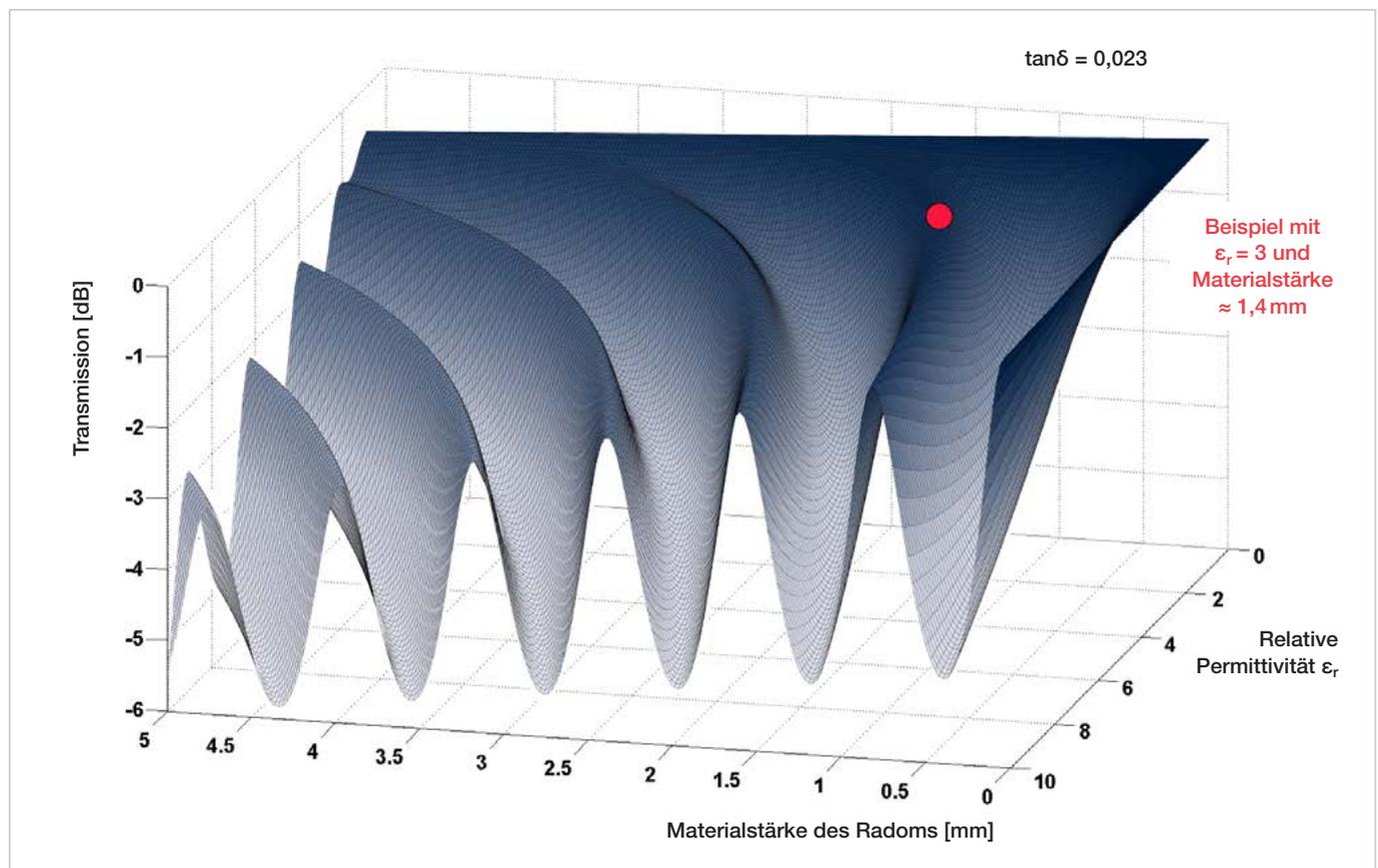


Abbildung 5: Kombination der Einflüsse von relativer Permittivität ϵ_r , Verlustfaktor $\tan\delta$ und Materialstärke auf die Übertragung elektromagnetischer Wellen

Dabei beachten, dass die destruktiven Interferenzeffekte und damit die Verluste bei der Transmission aufgrund einer falsch ausgelegten Materialstärke schwerer wiegen als die Auswahl eines Materials mit hohen dielektrischen Verlusten. Abbildung 5 zeigt diesen Zusammenhang: Der Effekt des dielektrischen

Verlustfaktors (hier $\tan\delta = 0,023$) wird durch das stetige Abfallen der Kurve zu höheren Materialstärken des Radoms hin beschrieben. Dieses Abfallen ist jedoch deutlich geringer als die Auswirkungen durch den Interferenzeffekt bei der Wahl einer falschen Materialstärke, durch die man in die verlustreichen Wellentäler gelangt.

Abbildung 6 veranschaulicht die gleichen Zusammenhänge wie Abbildung 5, allerdings reduziert auf eine Ansicht von oben. Dabei sind die x- und y-Achsen – anders als in Abbildung 5 – auf einen Koordinatenursprung links unten referenziert.

Auch hier sind die dunkelblauen Bereiche mit minimalen Verlusten bei der Transmission der Wellen erstrebenswert, die helleren Bereiche zu meiden.

Die Werte der exemplarischen Rechnung sind im rot markierten Punkt dargestellt.

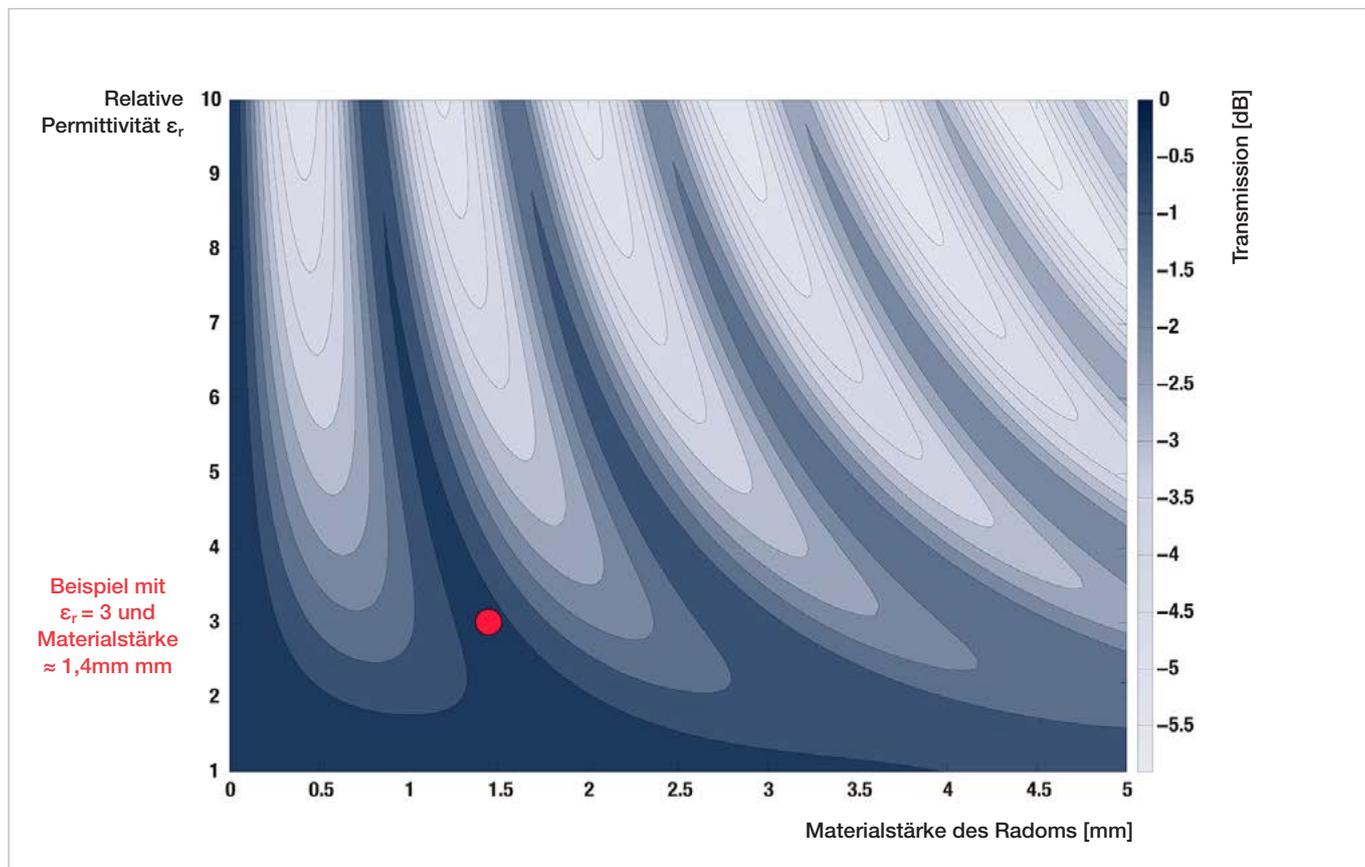


Abbildung 6: Kombination der Einflüsse von relativer Permittivität ϵ_r und Materialstärke auf die Übertragung elektromagnetischer Wellen bei Verlustfaktor $\tan\delta = 0,023$ in der Draufsicht

03 Empfehlungen für die Konstruktion des Radoms

Material

Grundsätzlich können elektromagnetische Wellen durch elektrisch leitende oder magnetische Materialien nicht übertragen werden.

Empfehlung



Elektrisch leitende oder magnetische Materialien vermeiden. Alle metallischen Werkstoffe scheidet demnach aus.

Die Struktur der Grenzfläche beeinflusst das Reflexionsverhalten einer Materialoberfläche.

Empfehlung



Oberflächenstrukturen vermeiden, nur glatte Oberflächen für das Radom vorsehen.

Je niedriger die relative Permittivität, desto geringer ist der Anteil der reflektierten Welle.

Empfehlung



Nur Materialien in Betracht ziehen, deren relative Permittivität und Verlustfaktor bekannt sind.

Materialien für das Radom mit möglichst geringer Permittivität wählen.

Idealerweise sollte die relative Permittivität des Materials für das Radom möglichst nahe am Wert 1 liegen, da sie auch in Luft einen Wert von etwa 1 hat, bei dem elektromagnetische Wellen ungestört übertragen werden.

Empfehlung



Materialien mit einer relativen Permittivität nahe am Wert 1 sind in der Regel porös und haben Luftporen, die sowohl Festigkeit als auch dielektrischen Eigenschaften (durch zusätzliche Grenzflächen im Material) negativ beeinflussen. Im industriellen Umfeld sind sie als Material für das Radom daher ungeeignet.

Möglichst homogene Materialien wählen, idealerweise ohne Luft- oder andere Materialeinschlüsse.

In Industrieumgebungen sind nicht entflammbar, leicht bearbeitbar und mechanisch wie thermisch stabile Materialien mit guten dielektrischen Eigenschaften sinnvoll.

Empfehlung



Kunststoffe sind das bevorzugte Material für das Radom. Tabelle 2 zeigt typische Kunststoffarten, die besonders geeignet sind.

Material	Relative Permittivität ϵ_r	Verlustfaktor $\tan\delta$	Optimale Materialstärke [mm]
Polyamid PA 6.6	3,2	0,01	1,40
Polybutylen-terephthalat PBT	3,4	0,02	1,36
Polyoxymethylen POM	2,9	0,03	1,47

Tabelle 2: Dielektrische Kenngrößen und optimale Materialstärke des Radoms für empfohlene Kunststoffe

Abmessungen

Die Materialstärke des Radoms spielt eine entscheidende Rolle für die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen im mmW-Bereich.

Empfehlung



Sicherstellen, dass die Materialstärke einem ganzzahligen Vielfachen der halben Wellenlänge ($\lambda/2$) entspricht. Damit ist das Material für die vorgesehene Trägerfrequenz von 60 GHz nahezu durchlässig und die Verluste bei der Transmission sind gering.

Im Beispiel mit $\epsilon_r = 3$ (Abbildungen 5 und 6) berechnet sich die halbe Wellenlänge im Radom:

$$\frac{\lambda_r}{2} = \frac{\lambda_0}{2\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{5}{2\sqrt{3}} \text{ mm} \approx 1,4 \text{ mm}$$

Der maximal zulässige Abstand zwischen den beiden Antennen beträgt beim SoM (System-on-Module) 20 mm.

Empfehlung



Die maximal zulässigen Abstände beachten (Abbildung 7). Zwischen den Antennen zweimal den Abstand von der Antenne zum Radom **A**, zweimal die Materialstärke des Radoms **B** sowie die Breite des Luftspalts **C** berücksichtigen.

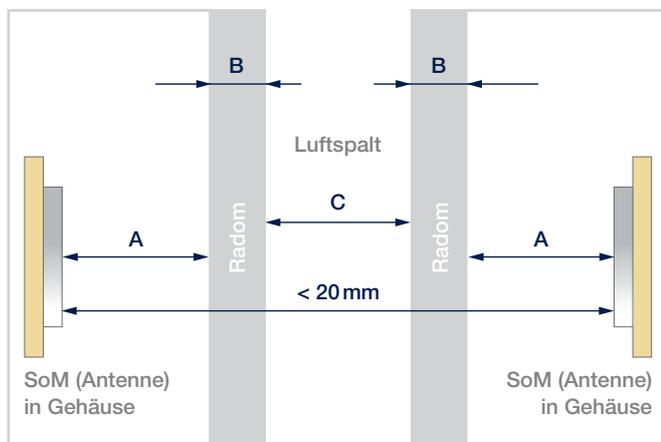


Abbildung 7: Abstände bei der Übertragung über einen Luftspalt

Das SoM (System-on-Module) toleriert Versatz zwischen den gegenüberliegenden Antennen-Einheiten.

Empfehlung



Bei der Positionierung die maximal zulässigen Werte für den Versatz von ± 2 mm und die Neigung von 3° nicht überschreiten.

Verunreinigungen

Industrieanlagen sehen sich einer Vielzahl von Herausforderungen gegenüber, wie beispielsweise extreme Temperaturen, Verunreinigungen im Luftspalt durch Staub, Partikel oder Metallspänen sowie Feuchtigkeit oder Schmiermittel. Ablagerungen geringer Stärke auf Gehäuse und Radom sind unkritisch, dennoch ist eine Kontrolle der Umgebungsbedingungen und deren Verschmutzung sinnvoll.

Empfehlung



Gehäuse staubdicht nach Schutzart IP6X konstruieren.

Zugang zur Reinigung beider Radome vorsehen.

04 Zusammenfassung

Bei der Integration des RoProxCon® SoM (System-on-Module) in Ihr spezifisches System entscheidet die Konstruktion des Radoms – also des Gehäuseteils, durch den die Funkwellen übertragen werden – über die Effizienz der kontaktlosen Verbindung.

Dabei ist es von zentraler Bedeutung, die dielektrischen Eigenschaften des projektierten Materials und

das Zusammenwirken aller Materialeinflüsse zu berücksichtigen. Auch die Auslegung aller Abmessungen, insbesondere der Materialstärke, hat direkte Auswirkungen auf die Übertragung der elektromagnetischen Wellen.

Nutzen Sie unseren Support speziell für konstruktive Fragen rund um RoProxCon®. Wir beraten Sie gern!

Kontakt

Business Area Interconnect | communication@rosenberger.com

Rosenberger

Rosenberger Hochfrequenztechnik GmbH & Co. KG

Hauptstraße 1 | 83413 Fridolfing

P.O. Box 1260 | 84526 Tittmoning

Germany

Phone +49 8684 18-0

info@rosenberger.com

www.rosenberger.com

Certified by IATF 16949 · DIN EN 9100 · ISO 9001 · ISO 14001 · ISO 45001 · ISO 50001 · ESA (ESCC Specification)

Rosenberger® is a registered trademark of Rosenberger Hochfrequenztechnik GmbH & Co. KG.
All rights reserved.

© Rosenberger 2024