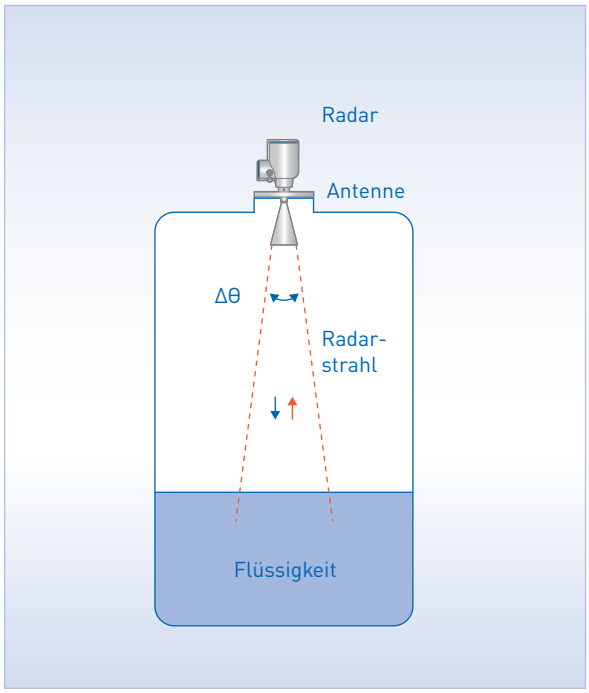
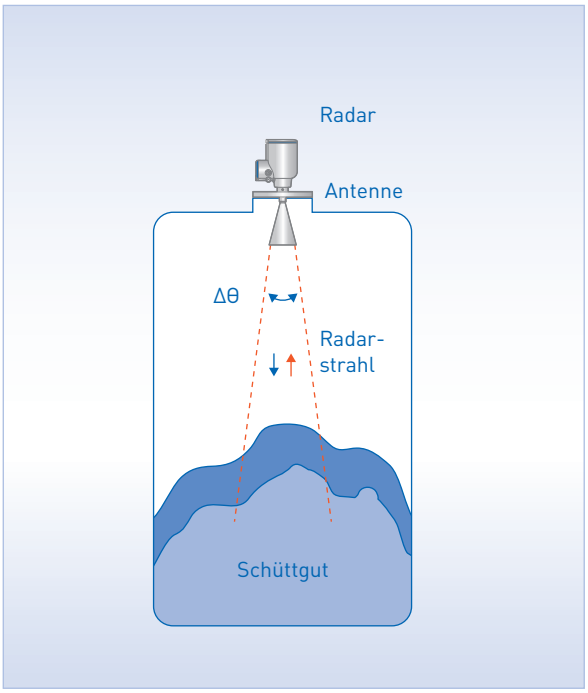
FMCW-Radar-Füllstandmesssysteme (Frequency-Modulated Continuous-Wave)

Radar basierte Füllstandmesssysteme (Radio Detection and Ranging) werden sehr erfolgreich zur Bestimmung des Füllstands von Flüssigkeiten in Tanks und von Schüttgut in Silos eingesetzt. Gegenüber anderen Verfahren weisen sie eine Vielzahl von Vorteilen in der industriellen Anwendung auf. Ihr größter Vorteil ist das berührungslose Messprinzip, welches auf der Laufzeitmessung von Mikrowellen-Echosignalen im Freiraum über dem Messstoff basiert. Damit sind zuverlässige Messungen unter verschiedenen Praxisbedingungen und auch bei aggressiven Messstoffen, wie Säuren und Laugen, gewährleistet. Mikrowellen breiten sich auch durch staubige und neblige Atmosphäre aus. Der Einfluss von Luftzusammensetzung und von Parametern wie Druck, Temperatur ist in erster Näherung vernachlässigbar. Radarsysteme liefern daher auch unter rauen Umgebungsbedingungen genaue Füllstandmesswerte, sogar wenn die Radarantenne beispielsweise durch Schüttgutablagerungen oder Kondensatbildung verdreckt sein sollte.



Radar-Füllstandmessung: Flüssigkeit im Tank



Radar-Füllstandmessung: Schüttgut im Silo

Im Bereich der Radar-Füllstandmesssysteme kommen hauptsächlich zwei verschiedene Konzepte zur Anwendung: das sogenannte *FMCW-Radar (Frequency-Modulated Continuous-Wave)* und das *Puls-Radar*. Dabei bietet das FMCW-Radar viele Vorteile gegenüber anderen Technologien, wobei die große Messempfindlichkeit (Dynamikumfang) das wichtigste Merkmal ist. Aus diesem Grund setzten sich FMCW basierte Radarsysteme in vielen Anwendungsgbereichen herstellerübergreifend durch und verdrängen nach und nach andere Systeme.

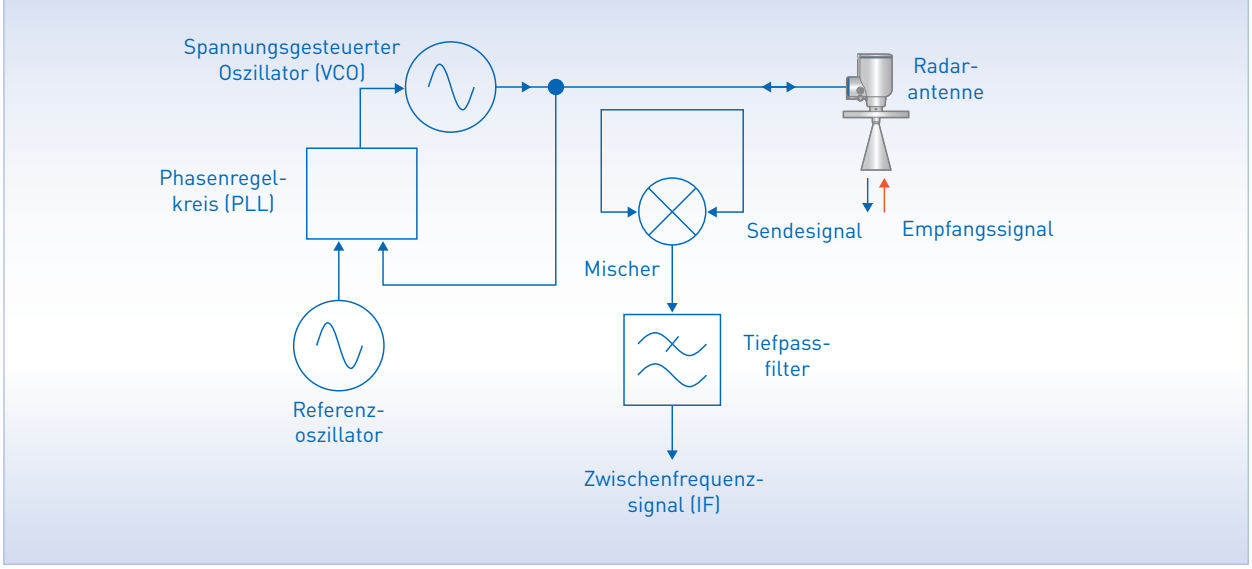
Nachfolgend wird beschrieben, wie sich verschiedene Konfigurationen eines Radarsystems auf dessen Eigenschaften (Öffnungswinkel, Entfernungsauflösung, Echosignal-Amplitude) und damit auch auf die Messperformance (Messempfindlichkeit, Fähigkeit zur Unterscheidung verschiedener Radarziele, Messgenauigkeit) auswirken. Entscheidende Parameter sind insbesondere das genutzte Frequenzband, genauer gesagt die Mittenfrequenz und die Bandbreite, sowie die Größe (Durchmesser) der verwendeten Radarantenne.

Aus diesem Grund existieren Radarsysteme für verschiedene Frequenzbänder zu denen jeweils verschiedene Arten von Radarantennen unterschiedlicher Größe erhältlich sind, um die Anforderungen der verschiedenen Anwendungen und ihrer Prozessbedingungen zu erfüllen. Die optimale, auf die jeweilige Applikation abgestimmte Zusammenstellung von Radarsystem und Antenne ist ausschlaggebend für eine zuverlässige Messung. Dieses Whitepaper soll dafür entsprechende Hilfestellung geben.

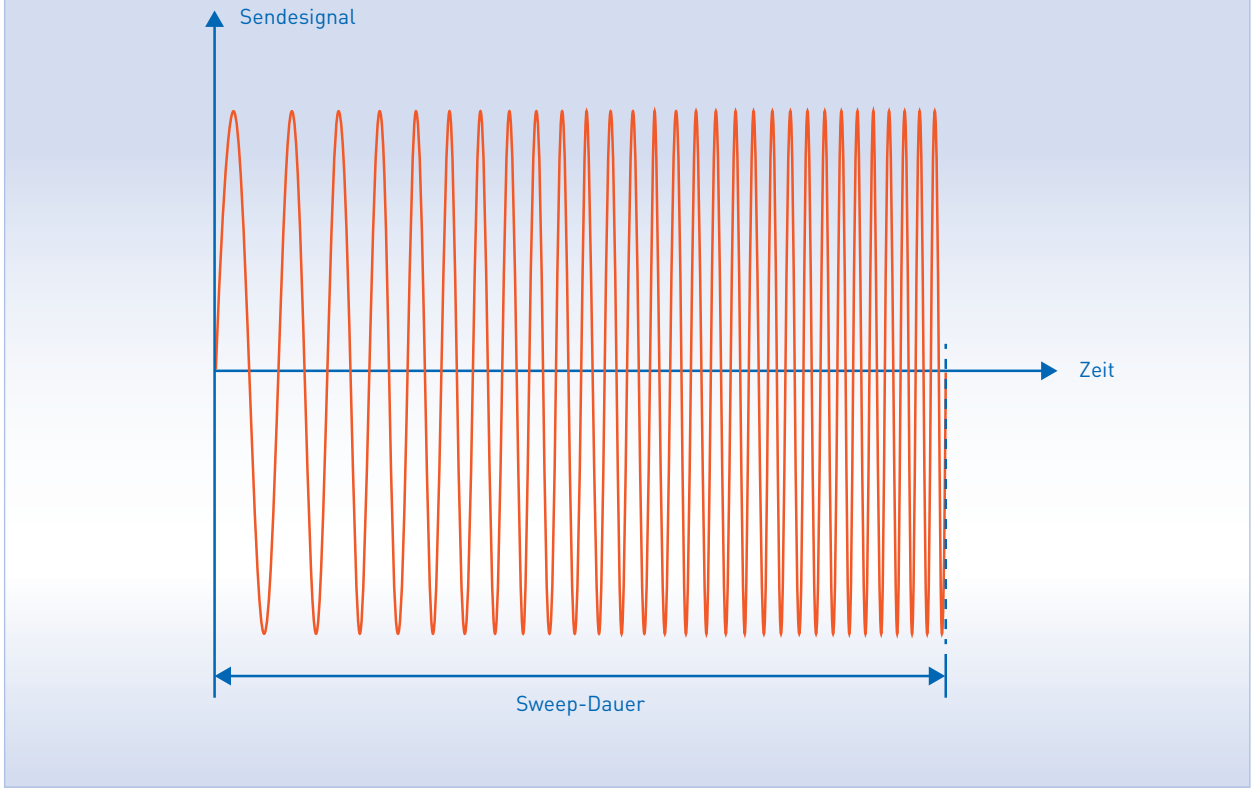
FMCW-Radarsysteme

Die Radar-Füllstandmessung basiert im Allgemeinen auf der Messung der Laufzeit von Mikrowellen. Diese werden von einer Radarantenne ausgesendet und nach Reflexion an der Oberfläche der Flüssigkeit bzw. nach Rückstreuung von der Oberfläche des Schüttguts wieder vom Radarsystem empfangen. Es wird die Signallaufzeit von der Aussendung bis zum Empfang gemessen. Bei *Puls-Radarsystemen* wird hierzu ein kurzes Impulssignal ausgesendet und das resultierende Echosignal erfasst. Die Erfassung erfolgt üblicherweise durch eine sequentielle Abtastung des empfangenen Echosignals. Hierzu wird nicht ein einzelner Impuls ausgesendet, sondern eine Sequenz sich periodisch wiederholender Impulse. Das Echosignal wird mittels einer zweiten Impulssequenz mit leicht abweichender Pulsfolgerate abgetastet. Die Energie der einzelnen ausgesendeten Impulse ist relativ niedrig, da die Spitzenamplitude begrenzt ist. Gepaart mit der sequenziellen Abtastung bewirkt dies, dass das Puls-Radar generell nur einen vergleichsweise *kleinen* Dynamikumfang und somit einen relativ geringen Signal-Rauschabstand (SNR) aufweist.

FMCW-Radarsysteme erreichen hingegen einen viel besseren SNR. Es wird ein *kontinuierliches* Signal erzeugt und ausgesendet, d. h. ein Signal mit einer vergleichsweise langen Dauer und daher einer höheren Energie im Vergleich zum ausgesendeten Signal eines Puls-Radarsystems (bei gleicher Spitzenamplitude). Die Frequenz des kontinuierlichen Signals wird über der Zeit linear moduliert (linearer ‚Frequenz-Sweep'), beginnend ab der gewünschten unteren Grenzfrequenz bis zur oberen Grenzfrequenz (oder anders herum), wobei das gesamte erforderliche Frequenzband abgedeckt wird. Diese Herangehensweise bietet den Vorteil, dass die ‚Sweep-Dauer' unabhängig von der Bandbreite gewählt werden kann und dass das Radarsignal mittels eines spannungsgesteuerten Oszillators (VCO) erzeugt werden kann und eine sehr hohe spektrale Reinheit aufweist. Die volle Kontrolle über den ausgesendeten Frequenzbereich ermöglicht es, die in Regularien geforderten Frequenzbänder einzuhalten und Abstrahlung in angrenzende Frequenzbänder zu vermeiden.



FMCW-Radar: Blockschaltbild



FMCW-Radar: FMCW-Signal („Frequenz-Sweep")

Zur Vorbereitung für die digitale Weiterverareitung des Echosignals (ebenfalls ein kontinuierliches Signal) wird bei FMCW-Radarsystemen das Empfangssignal mit dem Sendesignal gemischt (multipliziert). Eine anschließende Tiefpassfilterung liefert ein niederfrequentes Signal (das sogenannte Zwischenfrequenz-Signal), welches direkt mittels eines kostengünstigen Analog-Digital-Wandlers (ADC) mit niedriger Abtastrate digitalisiert werden kann. Dies ist ein weiterer Vorteil gegenüber der beim Puls-Radar notwendigen sequentielle Abtastung.

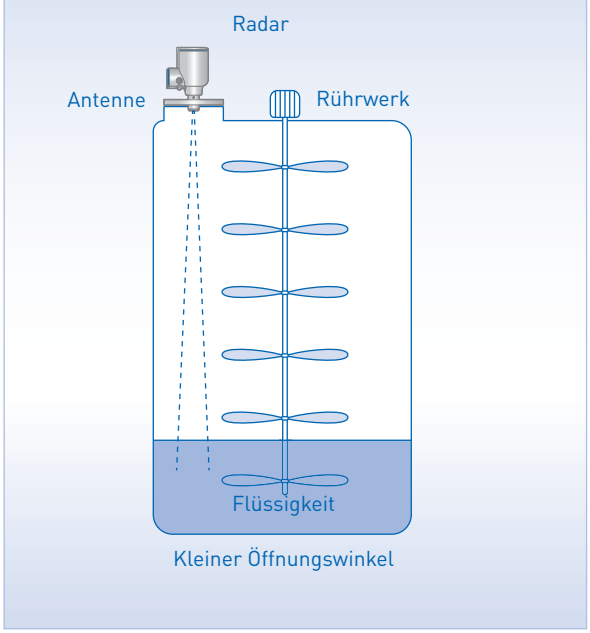
In der Vergangenheit bestand eine große Herausforderung in der stabilen Erzeugung eines hoch linearen Frequenz-Sweeps. Eine zusätzliche Herausforderung bildete dabei die energieeffiziente Realisierung von FMCW-Systeme auf Grund der in 2-Leitergeräten gegebenen Energielimitierung. Auf Grund des technologischen Fortschritts im Bereich der monolithisch integrierten Mikrowellenschaltungen (MMIC) und der viel besseren Verfügbarkeit von MMICs wechselt heute der Großteil der industriellen Hersteller und Anbieter von Radar-Füllstandmesssystemen bei Neuentwicklungen von Puls-Radarsystemen auf die FMCW-Radartechnologie. Abgesehen von diesem Trend, der in der deutlichen technischen Überlegenheit des FMCW-Konzepts begründet ist, sind jedoch immer noch eine Vielzahl verschiedener Puls-Radare auf dem Markt.

Parameter eines Radarsystems

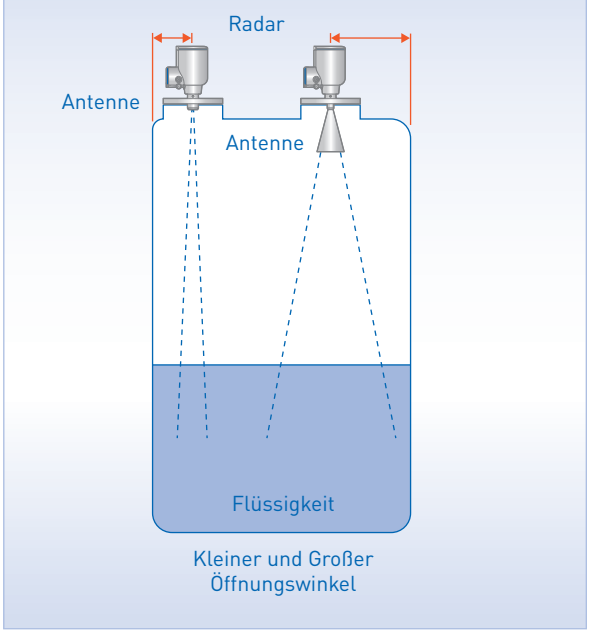
Jede Kombination aus Radar-Füllstandmesssystem und Antenne ist durch folgenden technischen Parameter gekennzeichnet:

- Genutztes Frequenzband (Mittenfrequenz und Bandbreite)
- Antennengröße (Durchmesser und Länge)
- Antennentyp (Hornantenne, dielektrische Tropfenantenne, dielektrische Linsenantenne)
- Antennengewinn und -wirkungsgrad

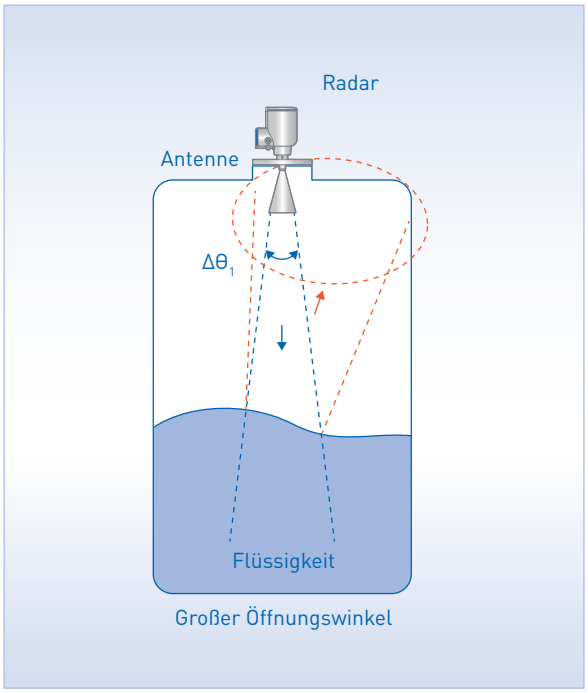
Der Öffnungswinkel der Abstrahlkeule der Antenne verhält sich umgekehrt proportional zum Durchmesser der Antennenapertur und zur Mittenfrequenz. Bei konstantem Antennendurchmesser ergibt sich folglich mit steigender Mittenfrequenz ein kleinerer Öffnungswinkel. Bei konstanter Frequenz wiederum verringert sich der Öffnungswinkel mit zunehmendem Antennendurchmesser. Der Öffnungswinkel hängt also nicht nur von einem sondern von zwei Parametern ab. Die Mittenfrequenz und Antennendurchmesser sind Freiheitsgrade, die den Öffnungswinkel bestimmen. Die richtige Auswahl einer Antenne aus einer Reihe verfügbarer Antennen mit unterschiedlichen Öffnungswinkeln muss unter Berücksichtigung der geplanten Einsatzbedingungen erfolgen.

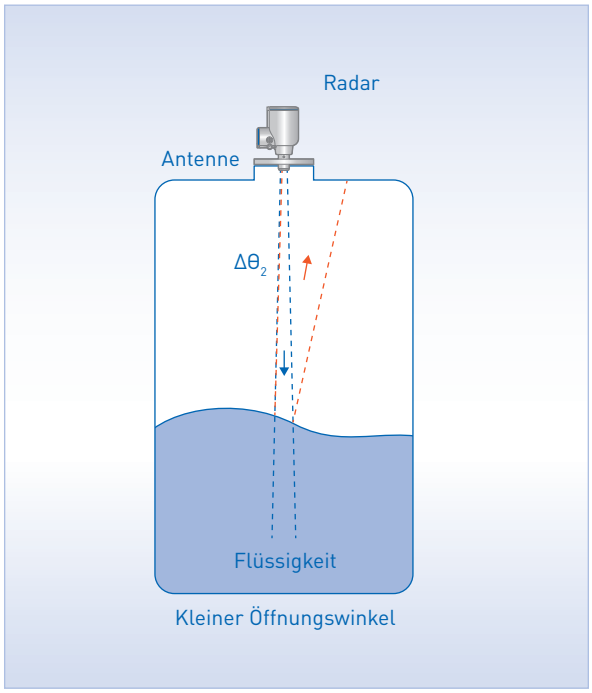


Antennen mit einem kleinen Öffnungswinkel vermeiden störende Echos von Tankeinbauten



Antennen mit einem kleinen Öffnungswinkel können näher an die Tankwand installiert werden





Vergleich von Antennen mit großem und kleinem Öffnungswinkel: bewegte Flüssigkeitsoberfläche (‚Wellen')

Bei einem hohen schmalen Tank oder Silo sollte der Öffnungswinkel vorzugsweise klein sein, um eine unerwünschte ‚Anstrahlung' der Tank- bzw. Silowand und störende Echosignale von Tankeinbauten (z. B. Rührwerke oder Aussteifungselemente) zu vermeiden. Der Öffnungswinkel sollte aber auch nicht zu klein sein, wenn beispielsweise die Flüssigkeitsoberfläche in Bewegung ist (‚Wellen') oder wenn das Sendesignal nicht senkrecht auf eine ebene Flüssigkeitsoberfläche trifft. Dies kann zum Beispiel der Fall sein, wenn der Flansch an einem Tank nicht waagerecht montiert ist. In beiden Fällen würden die an der Produktoberfläche reflektierten Mikrowellen bei sehr kleinem Öffnungswinkel im Extremfall nicht zur Antenne zurückgelangen, so dass eine Signalauswertung nicht möglich wäre.

Der Übertragungsverlust einer sogenannten Radarstrecke ist das Verhältnis von Sendesignalstärke zu Empfangssignalstärke. Dieser Parameter ist größtenteils von den Antenneneigenschaften (Gewinn und Wirkungsgrad), von der genutzten Frequenz und natürlich vom Reflexions- bzw. Rückstreuverhalten der Flüssigkeit bzw. des Schüttguts abhängig. Während sich der Reflexionskoeffizient einer ebenen Flüssigkeitsoberfläche über der Frequenz nicht ändert, nimmt die Rückstreuung an feinkörnigen Schüttgütern mit steigender Frequenz deutlich zu. Die Durchdringung des Schüttguts durch die Mikrowellen nimmt entsprechend ab.

Als Faustregel gilt, dass die Empfangssignalstärke im Allgemeinen mit steigender Frequenz und größerem Antennendurchmesser zunimmt. Der Echosignalpegel lässt sich daher durch Nutzung einer hohen Frequenz und Verwendung einer Antenne mit großem Durchmesser verstärken.

Durch eine Maximierung der beiden Parameter Frequenz und Antennendurchmesser werden der Übertragungsverlust und gleichzeitig der resultierende Öffnungswinkel der Antenne minimiert.

Auf den ersten Blick erscheint es vorteilhaft, Radarsysteme grundsätzlich so zu konfigurieren, dass Übertragungsverlust und Öffnungswinkel minimal sind, es gibt jedoch Ausnahmen. In den oben bereits gezeigten Beispielen (bewegte Flüssigkeitsoberfläche, Flansch nicht waagerecht) erweist sich ein zu kleiner Öffnungswinkel als unvorteilhaft. Für diesen eher selten vorkommenden Fall ist es nicht sinnvoll, die Parameter Mittenfrequenz und Durchmesser

Radarmessung innerhalb geschlossener metallischer Behälter (TLPR – Tank level probing Radar)

Radarmessung außerhalb geschlossener metallischer Behälter (LPR – Level Probing Radar)

beide zu maximieren, sondern nur einen Parameter. In anderen, spezielleren Szenarien, zum Beispiel wenn sich auf der Flüssigkeitsoberfläche Schaum befindet, ist von einer Maximierung der Frequenz abzuraten.

Ein weiterer Parameter des Radarsystems ist die Entfernungsauflösung. Sie beschreibt die Fähigkeit des Systems, in Entfernungsrichtung nahe beieinanderliegende Radarziele voneinander zu unterscheiden, und verhält sich als Parameter umgekehrt proportional zur Bandbreite. Aus diesem Grund wird eine große Bandbreite benötigt, um eine zuverlässige Unterscheidung zwischen den Echosignalen des Messstoffs und etwaige Störreflexionen, zum Beispiel an der Antennenöffnung (Ursache des sogenannten ‚oberen Totbereichs') oder an Schweißnähten in der Tank- oder Silowand, sicherzustellen. Die Bandbreite eines Radarsystems erhöht sich typischerweise proportional mit der Mittenfrequenz.

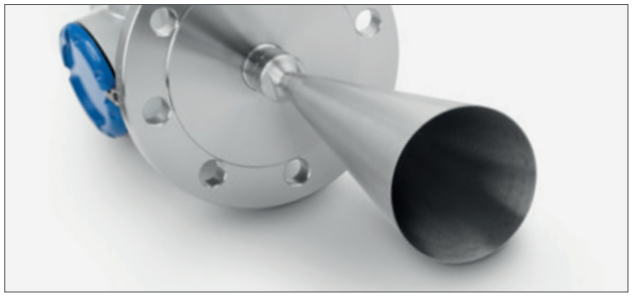
Abgesehen von den technischen Einschränkungen im Hinblick auf die genutzte Bandbreite eines Radarsystems wurden für industrielle Radarsysteme im Rahmen der weltweiten Harmonisierung von Funkfrequenzen gesonderte Frequenzbänder im 6-GHz-Bereich (C-Band), 10-GHz-Bereich (X-Band), 24-GHz-Bereich (K-Band) und 80-GHz-Bereich (W-Band) zugewiesen. Zusätzlich wird zwischen zwei unterschiedlichen Betriebsarten unterschieden: der Radarmessung innerhalb geschlossener metallischer Behälter (TLPR – Tank Level Probing Radar) und der Radarmessung außerhalb geschlossener metallischer Behälter (LPR - Level Probing Radar). Für den letzteren Anwendungsfall gelten strengere Limitierungen für den Betrieb eines Radarsystems in Hinblick auf Störaussendungen und die Ausrichtung der Antenne.

Radarantennen

Dielektrische Linsenantenne

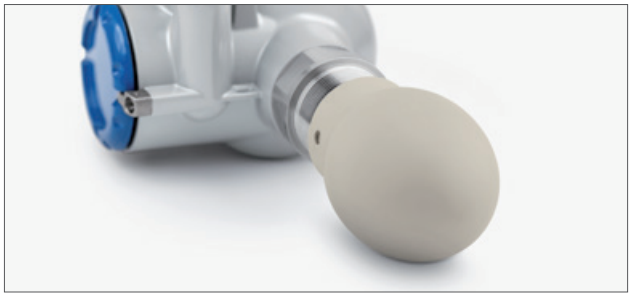
Dieser Antennentyp ist für Radarsysteme im 80-GHz-Frequenzbereich vorgesehen. Bei dieser Antenne handelt es sich um eine sogenannte Linsenantenne. Neben der Fokussierung des Radarstrahls dient die Linse zeitgleich als drucktragende Komponente der Trennung zwischen Prozess und Radarsystem. Vorteilhaft bei dieser Ausführung ist, dass die Antenneneben dem sehr guten radarsignalbezogene Eigenschaften eine sehr geringe Baulänge aufweist.

Hornantenne



Dies ist der Standard-Antennentyp, insbesondere für den 10-GHz- und 24-GHz-Frequenzbereich. Hornantennen sind in der Regel für die meisten Anwendungen sehr gut geeignet. Hornantennen haben eine relativ große Gesamtlänge, bieten jedoch eine sehr gute elektrische Anpassung an den Freiraum. Die Prozesstrennung erfolgt bei Hornantennen innerhalb des zylindrischen Hohlleiters, oberhalb des Antennentrichters. Als Trennelemente kommen unterschiedliche Kunststoffelemente oder ein sogenanntes ‚Metaglas' zum Einsatz. Neben der eigentlichen Abdichtung zum Prozess stellen die Trennelemente eine wichtige Komponente im Rahmen des Explosionsschutzkonzeptes des Geräts dar.

Dielektrische Tropfenantenne



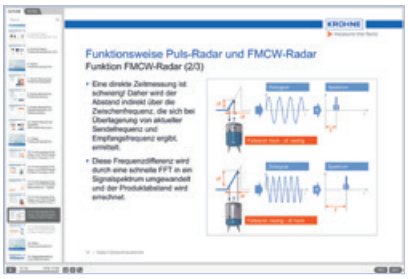
Dieser Antennentyp weist gegenüber einer Hornantenne gleichen Durchmessers eine bessere Strahlbündelung auf und überzeugt durch eine deutlich kürzere Baulänge. Aufgrund der massiven Bauweise dient die Antenne gleichzeitig der Prozesstrennung. Des Weiteren ist dieser Antennentyp sehr gut geeignet für Schüttgut-Anwendungen und raue Umgebungen, da die glatte Oberfläche der Antenne das Anhaften von Schüttgut, Kondenswasser und anderen Anhaftungen größtenteils verhindert. Sollte es dennoch zu Anhaftungen kommen, sind diese dank der großen Kunststoffoberfläche der Antenne weniger kritisch als bei anderen Antennen. Die Antenne weist eine gute elektrische Anpassung auf, was zu einer vergleichsweise kleinen oberen Blockdistanz führt.

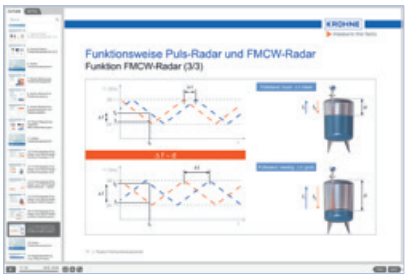
Die Gesamtlänge einer Antenne ist insbesondere in Hinblick auf das Abklingen von Störechos (‚Antennenklingeln') über die Entfernung relevant. Störechos entstehen durch Mehrfachreflexionen im Inneren der Antenne, welche durch die (stets vorhandene) Fehlanpassung an der Antennenvorderseite und an ihren Speisepunkten verursacht werden. Sie klingen umso schneller ab, je kleiner die Gesamtlänge der Antenne ist. Demnach sind kurze Antennen vorteilhaft bei Füllstandmessungen bei denen der Abstand zwischen Antenne und Medienoberfläche gering ist.

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Anhand der oben gegebenen Erläuterungen wird deutlich, dass ein einziges Radarsystem nicht die Antwort auf alle Anforderungen unterschiedlichster Anwendungen sein kann. Die Lösung ist stattdessen stets die richtige Kombination aus Radarsystem und Antenne in Abhängigkeit von der jeweiligen Anwendung.

Ein umfassendes Sortiment von Radarsystemen in unterschiedlichen Frequenzbereichen und eine große Auswahl dazu passender Antennen sind daher das Entscheidende, wenn es darum geht, Lösungen zur berührungslosen Füllstandmessung für unterschiedlichste Anwendung bereitstellen zu können.





eLearning-Kurs „Radar-Füllstandmesstechnik“

Der eLearning-Kurs „Radar-Füllstandmesstechnik“ besteht aus drei Lernmodulen und deckt alle wichtigen Bereiche im Zusammenhang mit diesem Messverfahren ab.

Folgende Hauptthemen werden in diesem Kurs behandelt:

- Einführung und kurze Abhandlung zur Geschichte der Radar-Füllstandmesstechnik
- Erläuterung des Radar-Messprinzips
- Funktionsweise Puls-Radar und FMCW-Radar
- Gegenüberstellung Puls-/FMCW-Radar
- Frequenz und Antennenformen
- Design und Kalibrierung von Radar-Füllstandmessgeräten
- Einschränkungen/Vorteile des Messverfahrens
- Installationshinweise
- Industrien und Anwendungen

Über KROHNE Academy online

Die Lernplattform KROHNE Academy online ermöglicht Ihnen einen direkten Zugriff auf das Know-how und auf die langjährige Erfahrung eines der führenden Anbieter im Bereich der industriellen Prozessmesstechnik. Die Plattform richtet sich sowohl an Anwender aus der Praxis, die tagtäglich mit den verschiedensten Messprinzipien in Berührung kommen, als auch an Studierende oder an Interessierte allgemein, die sich zu Messverfahren und Anwendungen in technischen Anlagen auf den neuesten Stand bringen wollen. Die KROHNE Academy online bietet elektronische, vollvertonte Lerninhalte. KROHNE bewirbt dort keine Messgeräte von KROHNE, sondern beschreibt und erklärt Messtechnik herstellerunabhängig und branchenübergreifend. Registrierung und Nutzung der Plattform sind komplett kostenfrei und für alle Interessierten sofort zugänglich.

http://academy-online.krohne.com

KROHNE

KROHNE Messtechnik GmbH
Ludwig-Krohne-Str. 5
47058 Duisburg
Germany

Tel.: +49 203 301 0
Fax: +49 203 301 10 389

info@krohne.com
www.krohne.com