

# Autonomes Fahren und die Herausforderungen für Werkstoffe und Oberflächen bei 4D-Radarsystemen

Von Jürgen Hofinger<sup>1)</sup>, Thomas Bertuch<sup>2)</sup>, Carlos Galvis-Salzburg<sup>2)</sup> und Frank Gräbner<sup>3)</sup>

Zur Realisierung der Zukunftstechnologie des autonomen Fahrens und dessen mehrere Vorstufen bedarf es erheblicher Weiterentwicklungen bei der notwendigen Sensorik zur Erkennung der bewegten Umgebung. Die besten Aussichten, um die erforderlichen Informationen zu liefern, hat die Radartechnologie. Allerdings muss die Technologie deutliche Fortschritte im Hinblick auf die Miniaturisierung der Antennen, deren Robustheit unter den Belastungen im Straßenverkehr oder der Fertigung mit leichten und kostengünstigen Rohstoffen in großen Stückzahlen erzielen. Die Beschichtungstechnik spielt für die Herstellung der in den Radarsensoren integrierten Antennen eine wichtige Rolle, wobei die dafür vorrangig in Betracht kommenden Verfahren der Vakuumbeschichtung und der galvanotechnischen Abscheidung zu vergleichen sind. Es zeigt sich, dass für die vorliegenden Anforderungen die galvanotechnischen Abscheidungsverfahren besser geeignet sind.

Autonomes Fahren ist für die Automobilbranche bereits seit einigen Jahren einer der großen Wunschträume für die Zukunft. Sogenannte 4D-Radarsysteme werden dabei sehr wahrscheinlich eine wichtige Rolle spielen, da sie bei vergleichsweise geringen Kosten selbst bei schlechtem Wetter entscheidende Informationen über das Fahrumfeld liefern können im Gegensatz zu optischen Systemen, die daran bereits scheitern.

Komplett autonomes Fahren, bei dem kein menschlicher Fahrer mehr benötigt wird, liegt vermutlich noch einige Jahre in der Zukunft, auch wenn immer wieder vollmundige Ankündigungen etwas anderes versprechen. Dieser als *Level 5* bezeichneten Stufe des autonomen Fahrens gehen aber die Varianten *assistiertes Fahren*, *teilautomatisiertes Fahren*, *hochautomatisiertes Fahren* und *vollautomatisiertes Fahren* mit einem menschlichen Fahrer voraus. Auf diesem langen Weg sind noch schwierige juristische Fragen zu klären, so etwa, nach welchen Richtlinien die Systeme in kritischen Fahrsituationen entscheiden sollen sowie Fragen der Haftung bei Unfällen. Auch auf technischer Seite gibt es große Herausforderungen, die sich zu zwei Hauptthemen zusammenfassen lassen:

- die Hardware, mit der Informationen über die komplette Umgebung des Fahrzeugs kontinuierlich gemessen werden müssen
- die Software, die mithilfe von Methoden des Machine Learning und der künstlichen Intelligenz die wichtigen Informationen herausfiltern, Entscheidungen treffen und

entsprechende Fahrzeugfunktionen ansteuern muss.

Bei der Hardware kommen verschiedene Systeme zum Einsatz, die sich durchaus gut ergänzen können. Kamerasysteme liefern Live-Bilder der Umgebung, die mit Hilfe von Echtzeit-Bildanalysen sehr schnell Objekte erkennen können. Voraussetzung ist eine freie Sicht; Objekte hinter anderen nicht transparenten Hindernissen können grundsätzlich nicht erkannt werden. Nicht nur schlechtes Wetter wie starker Regen oder Nebel sind eine Herausforderung, sondern auch die Sonne in Gegenlichtsituationen oder andere blendende Lichtquellen, wenn zum Beispiel nachts die Umgebung nur teilweise oder schlecht beleuchtet wird.

Besser kommen LiDAR-Systeme mit schwierigen Lichtverhältnissen zurecht. *LiDAR* steht für *Light Detection and Ranging*. Es handelt sich im Gegensatz zu Kameras um ein aktives System, bei dem mit Hilfe eines Laserstrahls in einem extrem engen Winkel Objekte bestrahlt werden. Über eine Laufzeitmessung zwischen Abstrahlung und dem empfangenen reflektierten Licht kann der Abstand der Objekte bestimmt werden. Über den Vergleich von mehreren Messungen desselben Objekts kann somit auch dessen Geschwindigkeit bestimmt werden. So mancher Autofahrer wird mit dieser Option bereits im Rahmen von Geschwindigkeitskontrollen ungewollt in Kontakt gekommen sein. Die von den Ordnungshütern eingesetzten mobilen Geräte setzen auf diese Technik. Durch schnelles Scannen

mit einzelnen Impulsen in verschiedenen Richtungen können mit dieser Methode ähnlich wie bei einer Kamera auch mehrere Objekte in einem größeren Raumwinkel beobachtet werden. Werden die Sichtverhältnisse allerdings zu schlecht, kommen auch LiDAR-Systeme in Schwierigkeiten. Außerdem sind die Systeme zumindest gegenwärtig im Vergleich zu ihren technologischen Konkurrenten relativ teuer.

Die sicher am besten bekannte Methode zur Erkennung von Ort und Geschwindigkeit auch weit entfernter Objekte ist die Radar-Messtechnik. Auch dieses Verfahren ist bei Autofahrern durch ihren Einsatz bei der stationären Geschwindigkeitsüberwachung typischerweise nicht sonderlich beliebt. Im Gegensatz zum LiDAR-Verfahren kann hier die Geschwindigkeit eines Objekts direkt über den Dopplereffekt gemessen werden. Sollen allerdings sowohl Entfernung als auch Geschwindigkeit mit hoher Genauigkeit gemessen werden, wird auch bei diesem Verfahren die Geschwindigkeit über den zeitlichen Verlauf der Entfernungen bestimmt. Besondere Vorteile der Radartechnik sind ihre hohe Robustheit gegenüber schlechten Witterungsverhältnissen und eine mögliche Massenfertigung zur sehr günstigen Kosten.

## 1 4D-Radarsysteme

Stationäre Blitzkästen zur Geschwindigkeitskontrolle im Straßenverkehr begnügen sich mit der Radarvermessung jeweils eines einzelnen Ziels an einer vorher bekannten räumlichen Position. In diesem Fall interessiert nur die Geschwindigkeit. Bei den radarbasierten Fahrassistenten zur Abstandsregelung in Fahrzeugen, ebenso wie bei ihren laserbasierten technologischen Wettbewerbern,

<sup>1)</sup> Biconex GmbH, Heidestraße 70, D-01454 Radeberg

<sup>2)</sup> Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik FHR, Fraunhoferstraße 20, D-53343 Wachtberg

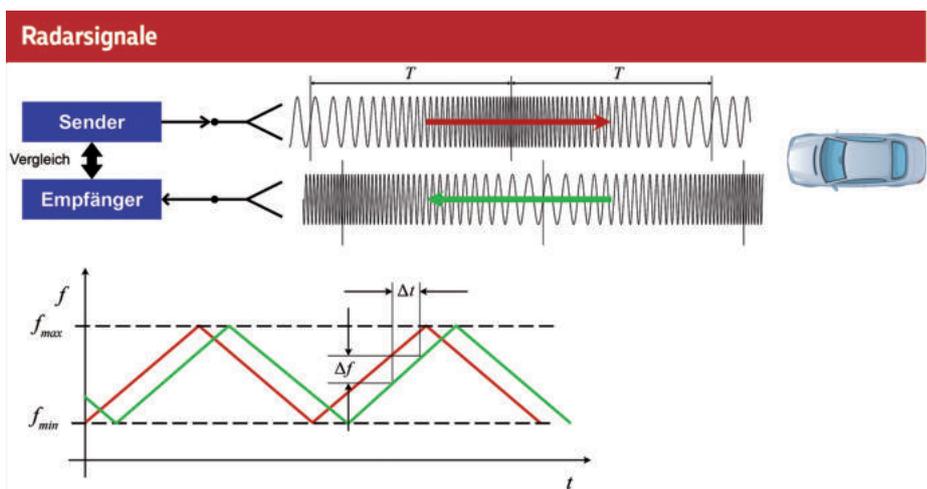
<sup>3)</sup> IMG Electronic & Power Systems GmbH, An der Salza 8a, D-99734 Nordhausen

# OBERFLÄCHEN

werden dagegen hunderte Reflexionen aus einer Vielzahl von räumlichen Winkeln und Abständen verarbeitet. Wurden in der Vergangenheit hauptsächlich die Zielparameter Abstand, Geschwindigkeit und horizontaler Winkel bezogen auf die Fahrzeugachse bestimmt, so sind zukünftige 4D-Radarsysteme in der Lage, eine vierte Dimension, nämlich die Höhe von Zielen über der Straßenoberfläche zu vermessen. Den radialen Abstand und die Geschwindigkeit eines Ziels erhält man durch eine zeitliche Abfolge sich wiederholender Radarsignale (s. *Infokasten Radarsignale*) während sich die Richtung eines Ziels aus dem Vergleich der Laufzeiten eines Echos zu zwei oder mehr Empfangsantennen ergibt (s. *Infokasten Winkelbestimmung*).

Voraussetzung für eine gute räumliche Auflösung ist die Verwendung einer großen Frequenzbandbreite (radiale Auflösung) und einer großen Antennenfläche (Richtungsauflösung). Neben einer hohen Anzahl an Einzelantennen könnte die Winkelauflösung in verschiedenen Richtungen natürlich durch mechanisches Schwenken einer einzelnen großen Antenne erreicht werden. Das ist aber langsam, wartungsintensiv und würde das Radarsystem stark verteuern. Eine bessere Variante ist das elektronische Schwenken der Blickrichtung der Antenne, wobei viele Einzelantennen über eine Phasenverschiebung die Radarsignale zusammen in verschiedene Richtungen ausstrahlen können. Aber selbst dieses, hauptsächlich im militärischen Bereich eingesetzte Verfahren, ist wegen der Vielzahl an notwendigen Elektronikkomponenten sehr kostenintensiv.

Stattdessen wird ein Verfahren eingesetzt, das auf der Verwendung mehrerer Sende- und Empfangsantennen beruht, die alle den gesamten relevanten Winkelbereich ausleuchten, ohne zunächst eine bestimmte Richtung zu bevorzugen. Nur durch die geschickte Kombination von verschiedenen Sende- und Empfangsantennen wird eine hohe Richtungsauflösung erzielt (s. *Infokasten MIMO*). Bisher befanden sich die Einzelantennen direkt auf einer gedruckten Schaltung zusammen mit den elektronischen Bauelementen. Sie sind auf dem Schaltkreis als quadratische Punkte zu erkennen und strahlen als *Patch-Antennen* die elektromagnetischen Wellen vorwiegend in den Halbraum vor der Leiterplatte ab. Diese einfache Bauweise hat allerdings den Nachteil, dass ein großer Teil der elektromagnetischen Leistung während des Transports von der Hochfrequenzelektronik zu den Antennen wegen der verlustbehafteten



Automobilradare senden und empfangen typischerweise kontinuierlich. Gesendet wird ein sogenanntes frequenzmoduliertes Dauerstrichsignal (engl.: Frequency Modulated Continuous Wave signal, FMCW signal). Das Signal ist sinusförmig mit einer Frequenz, welche über der Zeit stückweise linear zwischen einem Minimal- und einem Maximalwert pendelt ( $f_{\min}$  und  $f_{\max}$ ). Das von einem Objekt reflektierte Signal hat die gleiche Form, ist aber entsprechend der zurückgelegten Zweifachentfernung zwischen Radar und Objekt zeitverzögert. Das Radar vergleicht ständig intern in festen Zeitschritten die Frequenzen des zu einem Zeitpunkt gesendeten Signals und des dann empfangenen Signals. Aufgrund der Zeitverzögerung des Empfangssignals  $\Delta t$  ergibt sich dabei eine Frequenzdifferenz  $\Delta f$ , die von der Objektentfernung abhängt. Aus der Geschwindigkeit, mit der das Radar die Sendefrequenz über der Zeit variiert, lässt sich daraus die Entfernung des Objekts berechnen. Ändert sich die gemessene Differenzfrequenz im Verlauf der Zeit, so bedeutet dies, dass sich der Objektabstand ändert. Anhand dieser Änderung kann das Radar wiederum die radiale Geschwindigkeit des Objekts relativ zur eigenen Plattform berechnen.

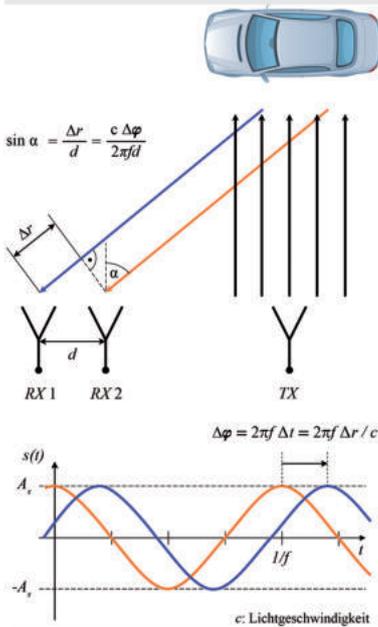
ten Zuleitungen verloren geht. Dieses Problem kommt besonders bei modernen Automobilradaren zum Tragen, da diese auf einer komplexen Antennenanordnung mit vielen Einzelantennen und entsprechend langen Zuleitungen basieren. Je höher die Frequenz, desto problematischer ist der leitungsgeladene Transport der elektromagnetischen Energie. Dies kann dazu führen, dass die Leistung der empfangenen Echosignale bei einigen Zielen nicht mehr ausreicht, um diese sicher detektieren zu können.

Das starke Erhöhen der Sendeleistung ist aus Rücksicht auf die Gesundheit von eventuell direkt vor dem Radar stehenden Personen keine gute Idee und daher gesetzlich auch sehr streng geregelt. Daher ist eines der Geheimnisse einer guten 4D-Radarantenne die möglichst verlustarme Gestaltung der Hochfrequenzleitungen innerhalb des Systems. Die Lösung für zukünftige Automobilradare ist die Verwendung sogenannter Hohlleiter, oft unter dem englischen Begriff *Hollow Waveguide* bekannt (s. *Infokasten Hohlwellenleiter*).

Herkömmliche Hohlleiter werden aus gut leitendem Metall, wie beispielsweise Messing

oder Aluminium, und zumindest bei komplexeren Geometrien und bei hohen mmW-Frequenzen mittels spanender Fertigungsverfahren (Fräsen) hergestellt. Bei besonders hohen Anforderungen wird die Oberfläche galvanisch mit Silber oder Gold veredelt. Für den vorgesehenen massenweisen Einsatz in Fahrzeugen wäre ein so hergestelltes Bauteil aber zu schwer und vor allem viel zu teuer. Da die elektromagnetischen Wellen aufgrund der hohen Frequenzen nur etwa einen Mikrometer tief in die Oberfläche der Antennenstrukturen eindringen (Skinneffekt), können die Bauteile in großen Mengen kostengünstig aus Kunststoff im Spritzgießverfahren hergestellt werden. Die Oberfläche erhält ihre hohe Leitfähigkeit dann durch eine Metallbeschichtung mit Kupfer oder Silber. Da sich die langen Rechteck-Kanäle eines Hohlleiters vor allem bei einem komplexeren Leiternetzwerk nicht so einfach durch Spritzgießen aus einem Stück herstellen und noch weniger beschichten lassen, werden die Bauteile aus mehreren Platten kombiniert, die einzeln gespritzt und beschichtet werden (s. *Infokasten Hohlwellenleiter*).

## Winkelbestimmung



Automobilradare verwenden in der Regel getrennte Antennen zum Abstrahlen eines Sendesignals (TX) und zum Empfangen der Echos (RX). Mit nur einer Sende- und einer Empfangsantenne lassen sich allerdings lediglich Abstand und Radialgeschwindigkeit von Streuobjekten ermitteln. Zur Bestimmung der horizontalen Richtung eines Objekts relativ zur Installationsplattform wird mindestens eine weitere Empfangsantenne benötigt, die so platziert wird, dass die Verbindungslinie zwischen den beiden Empfangsantennen senkrecht zur Fahrtrichtung und parallel zum Erdboden liegt. Die von einem Zielobjekt zurückgestreute elektromagnetische Welle wird von den beiden Empfangsantennen mit einer kleinen, winkelabhängigen Zeitverzögerung  $\Delta t$  empfangen. Nur wenn das Objekt genau in Fahrtrichtung liegt, wird das Echo von beiden Empfangsantennen gleichzeitig empfangen. Das Radargerät bestimmt die Zeitverzögerung der beiden Empfangssignale  $s(t)$  mit der Frequenz  $f$  anhand ihrer gegenseitigen Phasenlagen. Da die Signale periodisch sind, ist die Differenzphase  $\Delta\varphi$  nur für relativ kleine Zeitunterschiede eindeutig. Das bedeutet, dass die beiden Empfangsantennen nur einen sehr kleinen Abstand  $d$  voneinander haben dürfen. Um eine eindeutige Differenzphase für den maximal möglichen horizontalen Winkelbereich von  $-90^\circ$  bis  $+90^\circ$ , unter dem der Winkel  $\alpha$  eines Objekts eindeutig bestimmbar sein soll, zu erzielen, dürfen die beiden Empfangsantennen nicht weiter als eine halbe Wellenlänge  $\lambda$  voneinander entfernt sein. Bei einer Mittelfrequenz von 76,5 GHz sind dies nur etwa 2 mm. Mit lediglich zwei Empfangsantennen und dem oben erwähnten Abstand, lässt sich die Richtung eines Streuobjekts über einen großen Winkelbereich eindeutig bestimmen. Da die beiden Empfangsantennen aber so nahe beieinander liegen, ist die Genauigkeit der Winkelbestimmung sehr eingeschränkt und es lässt sich bei einer festen Entfernung die Richtung lediglich eines einzelnen Objekts auswerten. Daher werden meist mehr als nur zwei Empfangsantennen verwendet. Diese werden entlang einer Linie mit unterschiedlichen gegenseitigen Abständen angeordnet.

Für das Funktionieren dieses Verfahrens zur Bestimmung des Winkels eines Streuobjekts ist es wichtig, dass sowohl Sende- als auch Empfangsantennen den gesamten interessierenden Winkelbereich ausleuchten; sie benötigen also ein möglichst breites Strahlungsdiagramm. Auch ist es notwendig, dass der Zusammenhang zwischen Objektwinkel und Phasendifferenz möglichst eindeutig ist. Würden die Empfangsantennen im Freiraum arbeiten, so lässt sich diese Anforderung normalerweise relativ einfach erfüllen. Die vor den Antennen angeordneten Schutzschichten – zum Beispiel das Radom des Radargehäuses, Karosserieteile aus Kunststoff oder Embleme, hinter denen das Radar installiert ist – verschlechtern die Zuordnung zwischen Winkel und Phasendifferenz. Dies geht soweit, dass in der Regel die Installationsposition jedes Radargeräts auf einem Fahrzeug aufwändig optimiert werden muss.

Für eine klassische Hohlleiterantenne mit rechteckigen Wellenleiterkanälen ist es wichtig, dass die beiden Teile eines Kanals, die mit den verschiedenen Platten zusammengefügt werden, sehr gut elektrisch leitend miteinander verbunden werden. Diese technologische Anforderung ist eine potenzielle Fehlerquelle, weshalb vor wenigen Jahren die sogenannte Gap Waveguide Technologie – eine Variation des komplett metallisch geschlossenen Hohlleiters – entwickelt wurde. Hier werden die seitlichen metallischen Wände der Hohlleiter und der Bereich zwischen benachbarten Hohlleitern durch periodische Strukturen ersetzt, diese sorgen zum einen dafür, dass die in dem Hohlleiter geführte Welle nicht ausbrechen kann und zum anderen aber keinen elektrisch leitenden Kontakt zwischen den beiden Metallplatten, aus denen der Wellenleiterkanal zusammengesetzt wird, benötigen.

## 2 Herausforderungen für Material und Beschichtung

Insbesondere bei den höheren Stufen des autonomen Fahrens müssen alle dazu erforderlichen Komponenten höchsten Sicher-

heitsstandards genügen. 4D-Radarantennen können an verschiedenen Positionen eines Fahrzeugs verbaut werden; wie bei den Abstandssensoren bietet sich aber vor allem der Einbau in den Stoßfängern an. Die Sensoren müssen stoßartige mechanische Belastungen aushalten, aber auch korrosive Umgebungen und vor allem große und häufige Temperaturwechsel. Aus diesem Grund kommen für die Hohlleiterstrukturen eher hochwertige, technische Kunststoffe infrage. Besonders wichtig sind geringe Fertigungstoleranzen, die Dimensionsstabilität bei verschiedenen Temperaturen und eine geringe Längenausdehnung, und zwar möglichst isotrop, also in allen Richtungen gleich. Sowohl bei der Fertigung als auch im Einsatz können verschiedene Veränderungen von Material und Oberfläche zu einer Signaldämpfung führen. In der Anwendung bedeutet das sofort eine Einschränkung bei der Erkennung von Objekten in größerer Entfernung und bei der Unterscheidung zwischen verschiedenen Objekten.

Eine ganze Reihe von Materialparametern können sich im Einsatz besonders kritisch auf

die Dämpfung beim Transport der elektromagnetischen Wellen auswirken:

### – Inhomogenität der Beschichtung

Die Schichtstärke sollte die dreifache Skintiefe an keiner Stelle der Kanäle unterschreiten. Für Silber und für eine Frequenz von 50 GHz liegt diese ungefähr bei  $1 \mu\text{m}$ .

### – Verlust der Leitfähigkeit durch Korrosion

Ein erhöhter elektrischer Widerstand an der Oberfläche führt unmittelbar zur Umwandlung von elektrischer Energie in Wärme. Leider beginnt die Korrosion genau dort, wo die elektrischen Eigenschaften am wichtigsten sind, nämlich unmittelbar an der Oberfläche [1]. Die Auswirkungen sind jedoch nicht auf alle Metalle gleich. Silber, das leitfähigste aller Metalle, läuft ohne Schutzschicht in leicht schwefelhaltiger Atmosphäre bereits nach wenigen Monaten an und zeigt dies sehr deutlich durch eine schwarze Färbung. Damit ist aber nur eine relativ geringe Verschlechterung der Leitfähigkeit verbunden und beeinträchtigt somit die Leistung der Antenne kaum. Kupfer besitzt im metallischen Zustand immerhin 80 % der Leitfähigkeit von Silber, die eben-

# OBERFLÄCHEN

so große Anfälligkeit zum Anlaufen reduziert jedoch ohne Schutzschichten deutlich die Leitfähigkeit unmittelbar an der Oberfläche.

## – Fehler bei Herstellung der Beschichtung

Voraussetzung für einen möglichst verlustfreien Transport von Energie über elektromagnetische Wellen ist eine homogene Ausbreitung in definierten Schwingungsmoden. Kleine Löcher oder kahle Stellen führen zu Streuung und damit zu Reflexionen in den Wellenleitern oder an den Antennen in verschiedene Richtungen, die dann als Nutzsignal nicht mehr zur Verfügung stehen.

## – Lokale Ablösung der Schicht

Spannungen zwischen Kunststoff und Metallschicht können zu Blasenbildung an der Oberfläche führen. Der Kunststoff und die darauf abgeschiedene Metallschicht haben unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten. Bei fallenden Temperaturen schrumpft der Kunststoff schneller und die Metallschicht steht entlang der Oberfläche unter Druck. Bei geringer Haftung kann diese Spannung durch Ablösen vom Untergrund und der Ausbildung von Blasen reduziert werden. Der Kanal wird dadurch deformiert und führt ähnlich wie bei Beschichtungsfehlern zu inhomogenen Anteilen der elektromagnetischen Welle.

## – Rissbildung im Kunststoff

Die Antenne ist zwar für gewöhnlich keinen starken direkten mechanischen Belastungen ausgesetzt, muss aber mit relativ starken Temperaturschwankungen zurechtkommen. Dazu gehören Frosttemperaturen von  $-20\text{ °C}$  genauso wie Temperaturen über  $100\text{ °C}$  bei Sonneneinstrahlung in der warmen Jahreszeit. Besonders wiederholte Temperaturwechsel können durch Materialermüdung zu Rissbildungen führen. Besonders anfällig sind dafür die Kanten der Kanäle, da hier geometrisch bedingt Spannungsspitzen auftreten. Schichtdefekte können zusätzliche Spannungsspitzen erzeugen; eine ausreichend stabile Schicht kann jedoch auch die Neigung zur Rissbildung verringern.

## – Fehlender elektrischer Kontakt zwischen zwei Kanalhälften

Bei klassischen Waveguide-Antennen führt eine Unterbrechung der Leitfähigkeit zwischen zwei Hälften eines Kanals zu Streueffekten und damit zu einer Dämpfung des Signals. Beim Fügen der einzelnen Antennenteile ist daher besonders darauf zu achten, dass möglichst unmittelbar an den

Kanten eine leitende Verbindung besteht. Durch den deutlich geringeren Elastizitätsmodul im Vergleich zu Metallen sind bei Kunststoffantennen die Verformungen grundsätzlich größer. Kunststoffe verändern ihre Form aufgrund ihrer viskoelastischen Materialeigenschaften sehr stark in Abhängigkeit von der Temperatur, aber auch der Zeit. Die Wärmeformbeständigkeit als übliche Kenngröße ist ein erster Anhaltspunkt für eine gute Materialauswahl, berücksichtigt dabei aber nur die Temperatur. Bei thermoplastischen Kunststoffen spielt aufgrund der fehlenden Quervernetzung der Moleküle auch die Zeit eine große Rolle.

## – Einfluss der Oberflächenrauigkeit

Da elektromagnetische Wellen mit einer Länge von wenigen Millimetern nur etwa

einen Mikrometer tief in die Oberfläche eindringen, ist folglich auch ein Einfluss der Topologie in diesem Größenbereich zu erwarten. Idealerweise liegt daher die Oberflächenrauigkeit der Waveguide-Kanäle deutlich unter einem Mikrometer. Messungen an Musterantennen zeigen jedoch, dass dieser Einfluss vor allem im Vergleich zu anderen Faktoren weit geringer zu sein scheint, als man dies durch so einfache Überlegungen erwarten würden [2].

## 3 Beschichtungsverfahren

Aufgrund der geringen Eindringtiefe der elektromagnetischen Wellen bei den eingesetzten kurzen Wellenlängen ist eine Abscheidung von Metallen aus der Gasphase durchaus naheliegend. Besonders Sputterverfahren bieten sich hier an, bei denen im

### Multiple Input Multiple Output (MIMO)



Analogie Kettenschaltung Fahrrad:  
Anzahl Gänge ergibt sich aus Multiplikation der Ritzel an der Kurbel und am Hinterrad

Um den Winkel eines Streuobjekts in einer Ebene zu bestimmen, sind mindestens eine Sendeantenne und zwei Empfangsantennen notwendig. Die Genauigkeit der Winkelbestimmung und die Anzahl der detektierbaren Ziele mit gleicher radialer Entfernung lassen sich durch die Verwendung weiterer Empfangsantennen erhöhen. Diese Antennenkonfiguration könnte als *Single Input Multiple Output* bezeichnet werden. Die Anzahl der Empfangsantennen kann allerdings nicht bis ins *Unendliche* gesteigert werden. Dagegen sprechen der dazu benötigte Platzbedarf, die Komplexität der Hochfrequenzschaltungen und letztendlich die Kosten. Mit einem kleinen Trick lässt sich die Anzahl der Antennen aber trotzdem steigern. Dazu wird darauf verzichtet, dass sämtliche Phasendifferenzen zwischen allen Empfangsantennen gleichzeitig bestimmt werden können. In der Umsetzung bedeutet dies, dass mehr als eine Sendeantenne verwendet wird (*Multiple Input Multiple Output*, MIMO). Diese werden sukzessive einzeln betrieben und immer mit allen Empfangsantennen kombiniert. Da die Sendeantennen untereinander auch bestimmte Abstände haben, weisen die Empfangssignale, die von einem Streuobjekt reflektiert wurden, an einer der Empfangsantennen auch wieder bestimmte streuobjektwinkelabhängige Phasendifferenzen auf. Mathematisch lässt sich eine bestimmte Konfiguration von M-Sende- und N-Empfangsantennen umrechnen in eine virtuelle Konfiguration mit nur einer Sendeantenne und MxN-Empfangsantennen. Eine Analogie dafür ist die Kettenschaltung von Rennrädern. Um eine möglichst große Anzahl von fein abgestuften Gängen zu realisieren, werden nicht nur am Hinterrad sondern auch an der Kurbel mehrere Kettenblätter eingesetzt. Auch hier ergibt sich die Anzahl der – zumindest theoretisch möglichen – Gänge aus der Multiplikation der Anzahl der Kettenblätter an Kurbel und Hinterrad. Platzbedarf, Komplexität und Kosten der MIMO-Konfiguration sind deutlich geringer als es die Kosten für die direkte Umsetzung der virtuellen Konfiguration wären. Dieser Trend wird durch die Verfügbarkeit integrierter Radarschaltungen, die bereits über mehrere Sende- und Empfangskanäle verfügen, unterstützt.

Hochvakuum Atome aus einem metallischen Target durch Beschuss mit energiereichen Ionen herausgelöst werden und somit in die Gasphase übergehen und auf dem Bauteil wieder kondensieren. Große Stückzahlen der im Wesentlichen ebenen Antennengeometrien können analog zur Herstellung von Audio-CDs in kontinuierlich arbeitenden Automaten beschichtet werden. Rohteile werden dabei über eine Schleuse in die Hochvakuumstrecke eingebracht, in einer langen flachen Prozessstrecke beschichtet und danach wieder ausgeschleust. Dadurch muss der Prozess nicht über lange Pumpzeiten unterbrochen werden [3].

Chemisch-galvanische Beschichtungen sind für gewöhnlich auf bestimmte Kunststoffsorten beschränkt. Bei diesen Verfahren werden die Kunststoffoberflächen in einer vollautomatischen Prozessstrecke zunächst oberflächlich angeätzt. Durch einen Oxidationsvorgang wird die Oberfläche hydrophil und erhält mikroskopische Vertiefungen, in denen später das Metall verankert werden kann und so für die besonders gute Haftfestigkeit sorgt. Danach adsorbieren Palladium-Nanopartikel auf der Oberfläche. Diese wirken als Katalysator, was im nachfolgenden chemisch abscheidenden Nickel- oder Kupferelektrolyten zur Abscheidung einer ersten geschlossenen,

leitfähigen Schicht führt. Schließlich werden durch galvanische Prozesse in den folgenden Elektrolyten die Funktionsschichten aufgebracht, im vorliegenden Fall meist Kupfer und Silber.

In der dekorativen Kunststoffgalvanik werden üblicherweise fast ausschließlich ABS und in geringerem Umfang Polyamide eingesetzt. Beide Werkstoffe erfüllen die hohen thermischen und mechanischen Anforderungen für die Hohlleiterantennen allerdings nicht. Daher hat die Biconex GmbH für PPS-Kunststoffe einen speziellen, einfachen und ressourcenschonenden Beschichtungsprozess entwickelt, der besonders hochwertige Oberflächen liefert und sich durch hohe Schichthaltigkeiten auszeichnet.

Bei genauerer Betrachtung zeigt sich, dass gerade in Hinblick auf die erwähnten typischen Material- und Herstellungsfehler, die zu einer ungewollten Dämpfung der Antennensignale führen können, die chemisch-galvanische Beschichtungsmethode besonders vorteilhaft ist.

### 3.1 Schichthomogenität

Bei Sputtervorgängen im Hochvakuum hängt die Schichtdicke sehr stark von der Orientierung der Oberfläche ab. Der gasförmige Metalldampf trifft stark gerichtet auf die Bauteiloberfläche. Oberflächen senkrecht zur Einfallrichtung werden daher bevorzugt beschichtet, Oberflächen waagrecht zur Einfallrichtung sind besonders stark benachteiligt. Aus diesem Grund werden die Bauteile in der Beschichtungsanlage üblicherweise auf Gestellen permanent bewegt. Für die Massenbeschichtung der sehr flachen Antennen würde dies die Anlage allerdings sehr stark vergrößern und den Prozess verteuern. Zu Beschichtung der Hohlleiterkanäle bleibt alternativ daher nur die Öffnung der Wände um einen Winkel von mindestens  $10^\circ$ . Kritisch bleiben Durchgangslöcher.

Durch die Streufähigkeit moderner Elektrolyte haben chemisch-galvanische Beschichtungsverfahren dagegen kaum Schwierigkeiten mit der homogenen Abscheidung der Metalle auf komplexen Strukturen. Eine gute Benetzung vorausgesetzt können mühelos Kanäle mit senkrechten Wänden und einer Tiefe beschichtet werden, die mehr als das Doppelte ihrer Breite betragen.

### 3.2 Haftfestigkeit einer Schicht

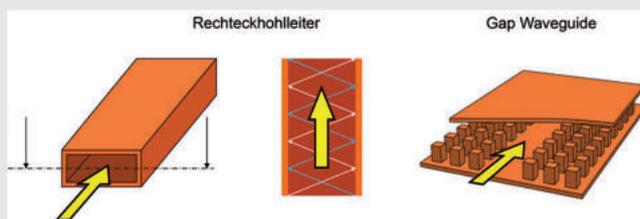
Durch den hohen lokalen Energieeintrag und den daraus resultierenden engen Kontakt der Werkstoffe können auch bei Sput-

## Hohlwellenleiter

Herkömmliche Hochfrequenzleitungen, wie zum Beispiel Koaxialkabel, bestehen aus zwei voneinander isolierten elektrischen Leitern. Entlang eines dieser

Leiter fließt ein elektrischer Strom in eine und entlang des anderen Leiters in die entgegengesetzte Richtung. Zwischen den Leitern breitet sich entlang der Leitung eine elektromagnetische Welle aus, mit ähnlichen Eigenschaften wie eine Freiraumwelle. Solche Leitungen können Frequenzen bis hinunter zum Gleichstrom übertragen. Bei Wechselströmen findet jedoch wegen des meist als Geflecht realisierten Außenleiters auch eine Abstrahlung von Wellen nach außen statt, die bei höheren Frequenzen zunimmt und zu Leistungsverlusten führt. Hohlwellenleiter hingegen bestehen nur aus einem einzelnen, rohrförmigen, hohlen elektrischen Leiter mit typischerweise rechteckigem oder rundem beziehungsweise elliptischem Querschnitt. Die Welle wird durch Mehrfachreflexion an den metallischen Innenseiten des Hohlwellenleiters geführt. Ein solcher Leiter kann eine elektromagnetische Welle erst ab einer geometrieabhängigen Grenzfrequenz übertragen. Bei Frequenzen unterhalb dieser Grenzfrequenz ist die Wellenlänge zu groß und die Welle *passt nicht in den Querschnitt*. Hohlwellenleiter wurden ursprünglich in der Mitte des letzten Jahrhunderts entwickelt, um hohe Leistungen bei hohen Frequenzen übertragen zu können. Sie haben aber auch den Vorteil, dass man mit ihnen eine sehr komplexe, dreidimensionale Leitungsführung bei gleichzeitig sehr geringen Leitungsverlusten realisieren kann.

Sogenannte Gap Waveguides können als Weiterentwicklung der Hohlwellenleitertechnologie betrachtet werden. Bei einem Rechteckhohlleiter (Hohlwellenleiter mit rechteckigem Querschnitt) wird die geführte Welle durch Mehrfachreflexion an den kurzen Wänden des rechteckigen Querschnitts geführt. Bei Gap Waveguides werden diese kurzen Wände durch periodische Anordnungen von Stiften ersetzt, die bei der zu übertragenden Signalfrequenz keine Wellenausbreitung zulassen und die Welle, ähnlich wie die kurzen Wände des Rechteckhohlleiters, reflektieren. Der Vorteil gegenüber herkömmlichen Hohlwellenleitern besteht in der einfacheren Herstellbarkeit, beispielsweise bei gefrästen oder 3D-gedruckten und metallisierten Umsetzungen. Bei diesen Herstellungsverfahren werden Hohlleiterschaltungen aus mehreren Platten zusammengesetzt. Ein Hohlleiterquerschnitt wird dabei auf die Oberflächen zweier sich berührender Platten aufgeteilt. Bei herkömmlichen Hohlwellenleitern ist es dann essentiell, dass die beiden Platten so zusammengedrückt werden, dass entlang der Hohlleiterbahn eine sehr gute elektrisch leitende Verbindung entsteht. Dies ist bei Gap Waveguides nicht notwendig, da aufgrund der periodischen Stifanordnung außerhalb des Wellenleiterbereichs keine Wellenausbreitung möglich ist und das auch, wenn die beiden Platten sich nicht berühren.



# OBERFLÄCHEN

terverfahren relativ gute Haftfestigkeiten erzielt werden, die bei dünnen Beschichtungen von wenigen Mikrometern Schichtdicke für eine gute mechanische Stabilität sorgen. Allerdings steigt mit der Schichtdicke die Belastung der Grenzfläche zwischen Metall und Kunststoff, vor allem aufgrund der verschiedenen thermischen Ausdehnungskoeffizienten bei wechselnden Temperaturen. Schnelle und kostengünstige Sputterverfahren müssen Kompromisse bei der Schichthomogenität eingehen. Um Beschichtungsfehler zu vermeiden, werden daher manche Bereiche stärker beschichtet, die sich dann besonders anfällig für Delaminationen der Schicht erweisen.

Chemisch-galvanische Beschichtungen beinhalten wie bereits beschrieben eine chemische Vorbehandlung der Oberfläche, die in einer Mikrostruktur resultiert, in der die Metallschicht verankert werden kann. Die weitere Abscheidung gleicht diese Struktur wieder aus, sodass diese anfängliche Mikrorauheit wieder verschwindet. Dadurch sind mit dieser Methode wesentlich höhere Schichthaftfestigkeiten möglich.

## 3.3 Oberflächenrauheit

Sputterverfahren bilden im Wesentlichen durch die Beschichtung die Oberfläche des Grundmaterials ab. Aufgrund der ausgeprägten Richtungsabhängigkeit des metallischen Beschichtungsmaterials werden Strukturen auf der Bauteiloberfläche eher noch verstärkt, insbesondere wenn die Beschichtung nicht genau senkrecht zur Oberfläche erfolgt. Dies ist besonders in den Kanalwänden der Fall.

Über die in den galvanischen Elektrolyten enthaltenen Glanzbildner ist es dagegen bei chemisch-galvanischen Beschichtungen möglich, Oberflächenrauigkeiten in der Größenordnung von einigen Mikrometern und da-

runter wieder auszugleichen. Bei dieser Art von Beschichtung werden bevorzugt Vertiefungen gefüllt, sodass sowohl die beim Beizprozess entstandenen Mikrostrukturen zur Verankerung der Metallschicht als auch Artefakte und Rauigkeiten, die vom Spritzgussprozess verursacht werden, wieder zuverlässig ausgeglichen werden können.

## 3.4 Schirmung des Antennenblocks

Bei der Anwendung in Fahrzeugen müssen die Sensorelektronik und die Antenne vor Umgebungseinflüssen geschützt werden. Jeder Sensor hat daher ein Gehäuse. In Richtung der abgestrahlten und empfangenen elektromagnetischen Wellen darf das Gehäuse jedoch möglichst keine Strahlung reflektieren oder absorbieren. Dieser als *Radom* bezeichnete Teil des Gehäuses muss daher aus einem Kunststoff mit geringen Absorptions- und Reflexionseigenschaften der Wellen gefertigt sein und besitzt eine spezielle Geometrie, welche die Abstrahlungsrichtung sowie die Wellenlänge der Signale berücksichtigt.

Reflexionen an der inneren Oberfläche des Radoms lassen sich allerdings nicht vollständig vermeiden. Diese können zwischen Antenne und Radom zu Mehrfachreflexionen führen, die das Nutzsignal überlagern und deren Auswertung erschweren. Absorbierende Schichten an der Oberfläche des Antennenblocks können diese Störsignale reduzieren.

Mit chemisch-galvanischen Beschichtungsverfahren können ferromagnetische Nickelschichten, optional kombiniert mit weiteren Absorbieren (Hexaferriten), auf der Oberfläche des Antennenblocks abgeschieden werden. Diese Art von Schichten bietet grundsätzlich das Potenzial, auch die unerwünschte, seitwärts gerichtete Abstrahlung der Antenne zu

reduzieren [4]. Das Design von Schichtsystemen unter Verwendung von magnetisch aktiven absorbierenden Materialien ist allerdings noch ein aktives Forschungs- und Entwicklungsgebiet.

## 4 Fazit

Nicht nur die aktiven Bauelemente von Millimeterwellen-Radarsystemen, die Software zur Auswertung der Sensordaten unter Nutzung von Machine Learning und künstlicher Intelligenz oder das Design der Antennen sind eine große Herausforderung für die Fahrassistenzsysteme von morgen; auch die verwendeten Werkstoffe und Schichtsysteme werden maßgeblich an der Marktdurchdringung dieser Assistenzsysteme in immer höheren Stufen des autonomen Fahrens verantwortlich sein. Die Verwendung technischer Kunststoffe wie PPS, vor allem aber chemische galvanische Beschichtungsverfahren sind besonders vielversprechende Strategien dafür.

## Literatur

- [1] Ch. Schade: Oberflächen von Kupfer und Kupferlegierungen optimieren; WOag 3, 2015
- [2] C. Galvis-Salzburg, J. Hofinger, T. Bertuch, S. Lee, F. Schüssler, A. Kwon: Metal-Coated 3D-Printed Waveguide Antenna for 77 GHz Automotive Radar Applications; 2023 17th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Florence, Italy, 2023, pp. 1-4, doi: 10.23919/EuCAP57121.2023.10133774
- [3] U. Huegel, A. Garcia-Tejero, R. Glogowski, E. Willmann, M. Pieper, F. Merli: 3D Waveguide Metallized Plastic Antennas Aim to Revolutionize Automotive Radar; Microwave Journal, September 2022
- [4] B. Zhao, J. Deng, R. Zhang, L. Liang, B. Fan, Z. Bai, G. Shao, Ch. B. Park: Recent Advances on the Electromagnetic Wave Absorption Properties of Ni Based Materials; Eng. Sci., 2018, 3, 5-40