Abbildung mit Millimeterwellen-Sensoren für Industrie- und Sicherheitsanwendungen

Industrial and Security Applications of Imaging Millimeter Wave Sensors

Peter Feil, Universität Ulm,
Winfried Mayer, Endress+Hauser GmbH & Co. KG, Maulburg,
Thomas Kraus, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Standort Oberpfaffenhofen, Weßling,
Claire Migliaccio, Université de Nice Sophia Antipolis, Valbonne, France,
Wolfgang Menzel, Universität Ulm

Zusammenfassung Die jüngsten Entwicklungen im Bereich automobiler Radaranwendungen fördern die Entwicklung und Verfügbarkeit von Komponenten und integrierten Schaltungen (MMICs) für den mm-Wellen-Frequenzbereich. Neben den Automobil-Sensoren können aber auch industrielle und Sicherheitsanwendungen von diesen Komponenten profitieren. In diesem Artikel werden verschiedene Sensoren und Anwendungen in den angesprochenen Gebieten beschrieben. ►►► **Summary** Recent advances in the area of automotive radar led to the development and availability of components and integrated circuits (MMICs) in the millimeter-wave range. Besides the automotive sensors also industrial and security applications can take benefit from these components. This article reports on different sensors and applications with respect to the above mentioned fields.

Schlagwörter mm-Wellen-Radar, digitale Strahlformung, SAR ►►► **Keywords** mm-wave radar, digital beam forming, SAR

There are annotations for the author on a separate page after the article. Please check.

1 Einleitung

Die Entwicklung im Bereich automobiler Radaranwendungen hat dazu geführt, dass zunehmend monolithisch integrierte Bauelemente (MMICs) sowie ganze Sende-/Empfangsmodule und Antennen für den Frequenzbereich um 24 GHz und 77 GHz entwickelt werden und verfügbar sind. Derzeit kommen vorwiegend integrierte Schaltungen auf GaAs-Basis zum Einsatz, die jeweils nur einen Funktionsblock (Oszillator, Verstärker, Mischer, etc.) beinhalten. Aus Kostengründen werden aber zukünftige Komponenten nahezu das vollständige HF-Frontend in SiGe-Technologie integrieren. Von dieser Entwicklung profitieren auch Massen- und Nischenanwendungen im industriellen und sicherheitstechnischen Umfeld [1]. Sogar komplexe, zwei- oder mehrdimensional abbildende Systemarchitekturen erscheinen nun wirtschaftlich umsetzbar. In diesem Artikel werden Demonstrator-Systeme bei 24 GHz und 77 GHz gezeigt, die in verschiedenen Bereichen erfolgreich getestet wurden. Als Beispiele dienen hier Anwendungen im Braunkohle-Tagebau und der Überwachung von Rollbahnen an Flughäfen. Dabei kommen Technologien wie digitale Strahlformung (DBF) und SAR (Synthetic Aperture Radar) zum Einsatz, die aus boden-, luft- und satellitengestützten Großsystemen bei niedrigeren Frequenzen gut bekannt sind. Im Bereich der industriellen

Kleinradare im Millimeterwellen-Bereich ist die Verwendung solcher Verfahren hingegen neu.

2 Konzepte von Radarsensoren

Radarsensoren zur Bestimmung von Entfernungen basieren auf der Messung der Laufzeit elektromagnetischer Wellen. Zudem kann der Doppler-Effekt zur Bestimmung von Geschwindigkeiten ausgenutzt werden. Pulsradare und FMCW-Radare (Frequency Modulated Continuous Wave) haben derzeit die größte technische Bedeutung. Bei Pulsradaren ist intuitiv leicht zu verstehen, dass das Auflösungsvermögen von der Pulsdauer abhängt. D. h. je kürzer die Pulse, umso besser ist die Auflösung. Die Empfindlichkeit von Radaren hängt jedoch von der Energie pro Puls ab. Da aber im Moment die kostengünstig auf Halbleiterbasis verfügbare Spitzenleistung bei mm-Wellen-Frequenzen auf einige Milliwatt begrenzt ist, sind Puls-Radare bei diesen Frequenzen in der Regel weniger geeignet.

Bei Sensoren nach dem FMCW-Prinzip hingegen werden frequenzmodulierte Pulse mit einer Dauer von bis zu mehreren Millisekunden abgestrahlt (s. Bild 1). Aufgrund der Laufzeit vom Radar zum Ziel und wieder zurück besteht ein Frequenzversatz zwischen abgestrahltem und empfangenem Signal. Dieser ist direkt proportional zur Zielentfernung. Die Bestimmung der Differenzfrequenz geschieht durch Mischen der beiden Signale und eine anschließende Spektralanalyse. Erfährt das Signal aufgrund einer Bewegung des Sensors oder Ziels eine Dopplerverschiebung, wirkt sich diese natürlich auch auf die Frequenzdifferenz aus. Jedoch können bei Verwendung einer dreieckförmigen Modulationsform (wie in Bild 1) durch Auswertung beider Flanken die Parameter Entfernung und Geschwindigkeit extrahiert werden.

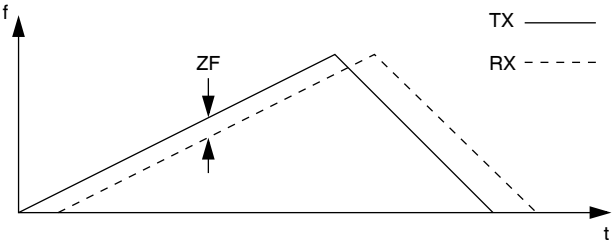

Bild 1 Momentanfrequenz von Sende- und Empfangssignal beim FMCW-Radar.

2.1 Abbildende Radarsensoren

Radarsysteme zur zweidimensionalen Abbildung von Szenarien können grundsätzlich in zwei Klassen unterteilt werden. Auf der einen Seite kann die Umgebung mittels mechanisch oder elektronisch geschwenkter Antennen bzw. Antennendiagramme abgetastet werden. Einen anderen Ansatz verfolgen Systeme, die die Radarantwort an räumlich getrennten Positionen auswerten und aus dem Vergleich der Einzelmessungen die Winkel-Information

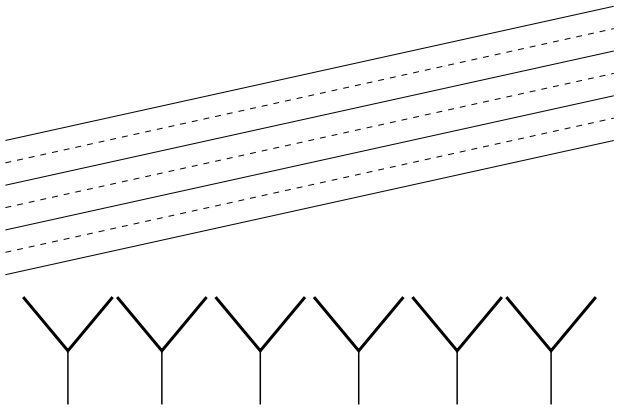

Bild 2 Ebene elektromagnetische Welle, die auf eine äquidistante Antennen-Gruppe trifft.

extrahieren. Ein einfaches Beispiel einer solchen Konfiguration ist die Verwendung einer Gruppe von äquidistant angeordneten Antennen (Uniform Linear Array, ULA), wie in Bild 2 skizziert.

Die von einem Radarziel reflektierte elektromagnetische Welle erfährt je nach Winkel unterschiedliche Laufzeiten zu den Antennen-Elementen. Eine phasenstabile Messung vorausgesetzt, schlagen sich diese Laufzeitdifferenzen in Phasenverschiebungen zwischen den Antennen-Elementen nieder. Bei einem Maximal-Abstand der Antennen von einer halben Wellenlänge lässt sich diese Phasendifferenz eindeutig einem Einfallswinkel im Bereich von ±90° zuordnen.

2.2 Digitale Strahlformung (DBF)

Unter dem Überbegriff „Digital Beamforming“ versteht man u. a. Verfahren, die durch geeignete Linearkombination der Signale der Antennenelemente die Empfindlichkeit des Sensors in einer bestimmten Winkelrichtung optimieren (s. Bild 3).

Für ein einfaches Szenario mit einem einzelnen Ziel wie in Bild 2 wird der Ausgang des Beamformers genau dann maximal, wenn seine Koeffizienten

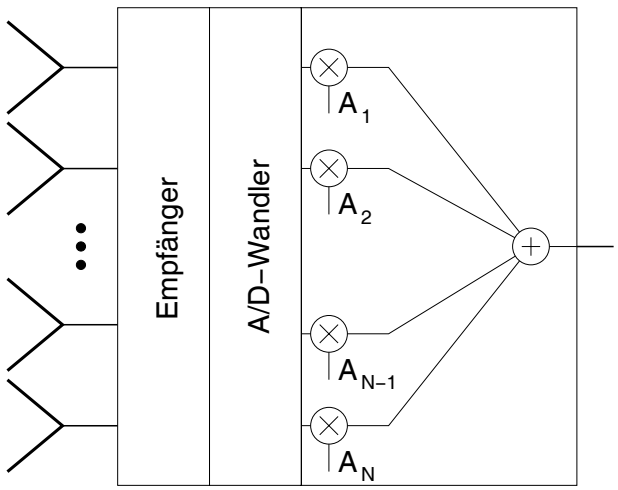

Bild 3 Blockschaltbild eines Beamformers.

die winkelabhängigen Phasenverschiebungen kompensieren (Delay-and-Sum-Beamformer). Das entspricht dem Prinzip der phasengesteuerten Antenne und folgt auch den gleichen Gesetzmäßigkeiten. So hängt die Winkelauflösung von der Apertur-Größe und der Nebenkeulenabstand von der Gewichtung der Einzelelemente ab. Zwei Ausprägungen dieses Prinzips, die auch bei den Demonstratoren umgesetzt sind, werden im Folgenden genauer beschrieben.

2.3 Radar mit geschaltetem Sendearray

Aufgrund der Reziprozität des Radarkanals sind bei zeitinvarianten Szenarien folgende Konfigurationen eines abbildenden Radarsensors äquivalent:

1. Ein Sender und N parallele Empfänger.
2. Ein Sender und N sequenziell geschaltete Empfänger.
3. N sequenziell geschaltete Sender und ein Empfänger.

Variante 2 und 3 kommen mit nur einem Empfänger aus, was trotz des notwendigen Schaltnetzwerkes die Komplexität des Systems verringert, da bei Kleinradaren mit geringer Sendeleistung die Sendestufen einfacher aufgebaut sind als die Empfangsstufen. Variante 3 ist deswegen zu bevorzugen, da Verluste im Schaltnetzwerk leicht durch zusätzliche Verstärker ausgeglichen werden können. Im Fall 2 erhöhen diese Verluste die Rauschzahl des Empfängers. Dies könnte zwar durch eine Erhöhung der Sendeleistung kompensiert werden, was aber oft an dem höheren Aufwand oder an regulatorischen Einschränkungen scheitert.

Eine interessante Erweiterung zu diesem Sensorkonzept bietet die Verwendung von zwei parallelen Empfangsantennen. Die Verknüpfung von jeder der N Sendeantennen mit den beiden Empfangsantennen entspricht systemtheoretisch einer Faltung von Sende- und Empfangsapertur (s. Bild 4). Die resultierende sog. „äquivalente Apertur“ ist in etwa doppelt so groß wie die physikalischen Abmessungen des Arrays. Da die Winkelauflösung linear mit der Apertur-Größe zusammenhängt, ist der Gewinn an Querauflösung durch diese Maßnahme erheblich.

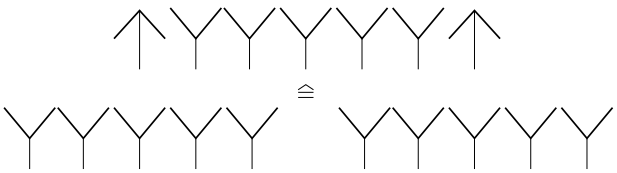

Bild 4 Anordnung aus Sende- und Empfangsantennen (oben); äquivalente Apertur (unten).

2.4 Synthetic Aperture Radar

Einem ähnlichen Prinzip folgen Radare mit synthetischer Apertur (SAR). Es wird ebenfalls sequenziell an räumlich getrennten Positionen die Radarantwort aufgezeichnet. Dabei wird allerdings nicht zwischen Antennen-Elementen umgeschaltet, sondern der gesamte

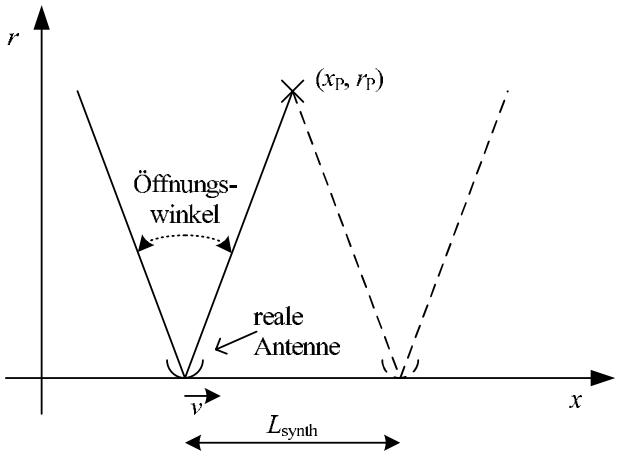

Bild 5 SAR-Geometrie: Das Radar bewegt sich entlang der x-Achse; das Punktziel tritt in die Antennenkeule ein, wird beleuchtet und tritt wieder aus.

Sensor incl. Sende- und Empfangsantenne wird auf einer definierten Bahn bewegt (Bild 5). Die dadurch gebildete synthetische Apertur L_{synth} kann also im Prinzip – abhängig vom Öffnungswinkel und damit der Größe der Apertur der realen Antenne – beliebig groß sein. Erst dadurch wird die Auflösung moderner satelliten- oder flugzeuggestützter Radare möglich.

Betrachtet man die Beleuchtungs-Geometrie eines SAR-Systems genauer, wird eine zusätzliche interessante Eigenschaft dieses Radarprinzips deutlich. Je weiter ein Radarziel – hier zum Beispiel bei (x_P, r_P) – von der Antenne in r-Richtung entfernt ist, umso länger wird es von dieser beleuchtet, d. h. entsprechend größer ist auch die synthetische Apertur, mit der dieses Ziel ausgewertet werden kann. Dies führt dazu, dass die Auflösung eines SAR in der zweiten Dimension, dem sogenannten Crossrange, unabhängig von der Entfernung ist. Ein Radar mit realer Apertur D, wie in den Abschnitten 2.1 und 2.2 beschrieben, hat eine Winkelauflösung von $\Theta_a \approx 60° \cdot \lambda / D$, was in einer entfernungsabhängigen Crossrange-Auflösung von $\delta_{\mathrm{RAR}} \approx r \cdot \lambda / D$ resultiert. Dagegen berechnet sich die Auflösung eines SAR zu $\delta_{\mathrm{SAR}} \approx D/2$ und ist damit nur noch von der Größe der realen Apertur, aber nicht mehr von der Entfernung des Zieles abhängig.

Bei der SAR-Signalverarbeitung [2] gilt es, wie bei jeder anderen Radarabbildung auch, in Entfernungsrichtung eine möglichst gute Auflösung zu erzielen. Diese hängt von der Bandbreite der verwendeten Wellenform ab, bei einem FMCW-Sensor also von der Steilheit der verwendeten Frequenzrampe und der Rampendauer. Ein zweidimensionales Abbild der Umgebung – eigentlich ihrer Radarrückstreueigenschaften – erhält man ähnlich wie in Abschnitt 2.2 durch Ausgleichen der Phasenunterschiede. Aufgrund der Größe der synthetischen Apertur reicht es aber nicht aus, diese Phasenunterschiede als Funktion des *Winkels* zu bestimmen. Stattdessen führt ein Punktziel abhängig von seinem *Ort* zu einem charakteristischen Phasenverlauf. Gleicht der SAR-Prozessor genau diesen Phasenverlauf aus, liegt das Punktziel im

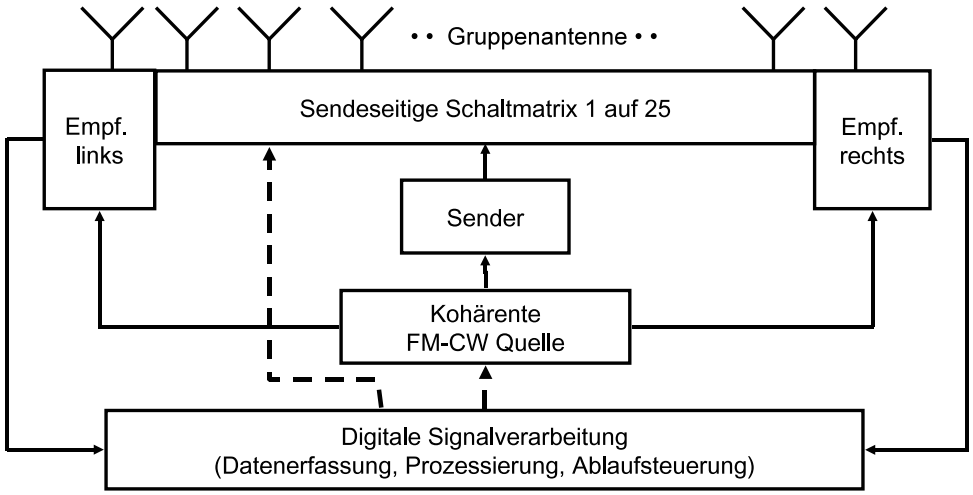

Bild 6 Blockschaltbild eines 24-GHz-Radars mit geschaltetem Sende-Array.

Fokus der synthetischen Apertur. Vom Standpunkt der digitalen Signalverarbeitung entspricht diese Art der Prozessierung einem Optimalfilter (engl. Matched Filter).

3 Beispiele für Sensoren bei 24 GHz und 77 GHz

3.1 Abbildendes 24-GHz-Radar

Nach dem in Absatz 2.3 beschriebenen Prinzip wurde ein feldtesttaugliches Demonstrationssystem realisiert [3]. Dessen Funktionsprinzip soll anhand des vereinfachten Blockschaltbilds in Bild 6 vorgestellt werden.

Ein Sender wird nacheinander auf 25 in einer Reihe angeordnete Antennenelemente einer Gruppenantenne geschaltet. Zwei weitere links und rechts neben der Gruppe der Sendeelemente angeordnete Antennenelemente dienen dem Empfang. Sie sind mit zwei parallel betriebenen homodynen Empfängern verbunden. In jeder Schalterstellung der sendeseitigen Schaltermatrix erfolgt eine FMCW-Radarmessung und nach einem Messzyklus stehen eindimensionale Radarantworten von allen Sende-/Empfangskombinationen zur Verfügung, aus denen mittels Methoden der digitalen Strahlformung (Absatz 2.2) ein zweidimensionales Radarbild berechnet wird. Die zur digitalen Strahlformung notwendige zeitliche Kohärenz der nacheinander aufgezeichneten Radarantworten wird durch den Einsatz eines Synthesizers als FMCW-Quelle erreicht.

Die in Bild 7 dargestellte Hardware des realisierten Demonstrationssystems besteht aus einem Frontend und einer Radarelektronik. Sie kann über eine USB- und eine serielle Schnittstelle direkt mit einem PC betrieben werden. In dem Frontend sind alle aktiven und passiven Mikrowellenbaugruppen und deren unterstützende Elektronik enthalten. Durch die Verwendung planarer Antennen, monolithisch integrierter Mikrowellenbausteine (MMIC) und einer für den Frequenzbereich geeigneten Multilayerkarte zeichnet sich das Frontend durch kompakte Abmessungen von nur 174 mm × 65 mm × 28 mm aus. Die Radarelektronik enthält alle Mixed-Signal-Baugruppen zur Signalerzeugung und zur Datenerfassung sowie programmierbare Logikbausteine und einen Mikroprozessor zur Steuerung des Messablaufs und der Schnittstellen zum PC-System. Die digitale Strahlformung wird im derzeitigen Ausbauzustand noch in dem an das System angeschlossenen PC durchgeführt. Verschiedene technische Daten des Demonstrationssystems sind in Tabelle 1 wiedergegeben.

Bild 7 Hardware des 24-GHz-Demonstrationssystems, bestehend aus Frontend (Vordergrund) und Radarelektronik (Hintergrund).

Tabelle 1 Wichtige System-Parameter des abbildenden 24-GHz-Radars.

Parameter	Wert
Frequenzbereich	24–25 GHz
Sendeleistung (EIRP)	10–16 dBm
Frequenzhub	100 MHz–1 GHz
Strahlbreite senkrecht zur Abbildungsebene	12°
Winkelauflösung in der Abbildungsebene	ca. 3° bei Delay-and-Sum-Beamforming
maximale Entfernungsauflösung	ca. 180 mm

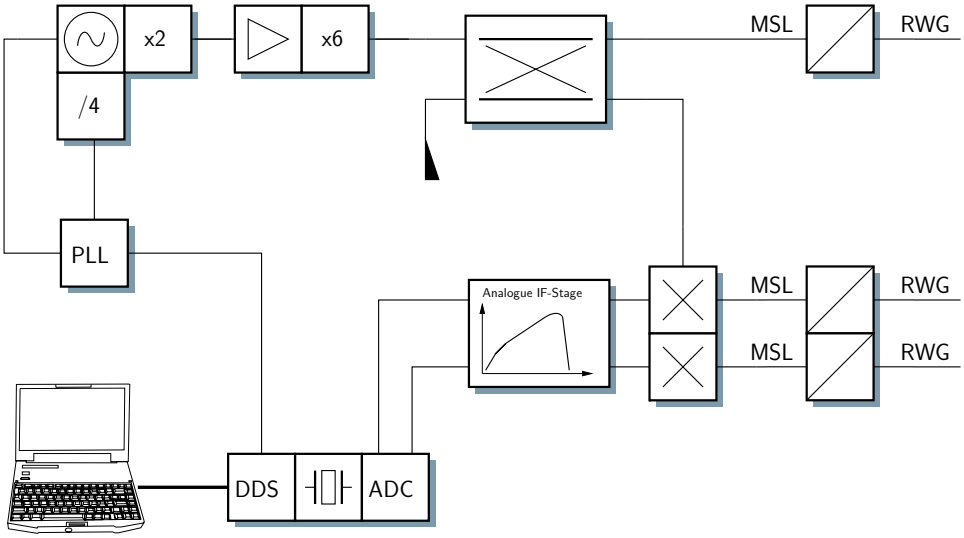

Bild 8 Blockschaltbild des 77-GHz-FMCW-Frontends.

3.2 Sensoren bei 77 GHz

Der oben beschriebene 24-GHz-Sensor wurde in vielfältigen Anwendungen getestet. Dabei hat sich gezeigt, dass das Sensorkonzept für viele Problemstellungen geeignet ist, in denen ein abbildendes Radar benötigt wird. Die Grenzen des Sensors sind sicherlich bei der Entfernungsauflösung und der Bündelung des Antennen-Arrays senkrecht zur Abbildungs-Ebene zu sehen. Bei 77 GHz steht zum einen eine Bandbreite zur Verfügung, mit der sich die Entfernungsauflösung signifikant verbessern lässt. Zum anderen sind bei gleicher Apertur-Größe wesentlich stärker bündelnde Antennen realisierbar.

Basis für die Untersuchungen bei 77 GHz ist ein breitbandiges zweikanaliges FMCW-Frontend. Ein Blockschaltbild ist in Bild 8 dargestellt. Die Synthese des frequenzmodulierten Sendesignals geschieht mit Hilfe eines direkten digitalen Synthesizers (DDS) bei Frequenzen um 25 MHz. Unter Verwendung eines Phasenregelkreises (PLL) und Vervielfacher-Stufen wird dieses Signal auf die eigentliche Sendefrequenz umgesetzt. Wie bei FMCW-Radaren üblich, wird das Ausgangssignal des Synthesizers zum Sendeausgang und zum Empfangsmischer geführt. Die Empfangssignale werden zunächst mit dem Sendesignal gemischt und nach geeigneter Filterung und Verstärkung digitalisiert.

Um Szenarien zweidimensional abzubilden, kann das Frontend zum einen mit einer hochbündelnden Antennen- und einer Rotations-Einheit kombiniert werden. Zudem wurde eine aktive geschaltete Gruppenantenne aufgebaut, die entsprechend Abschnitt 2.3 digitale Strahlformung möglich macht. Ein Foto der Gruppenantenne ist in Bild 9 dargestellt. Zur Bündelung in der zweiten Ebene kann die Gruppenantenne mit Zylinderlinsen verschiedener Größen und Brennweiten kombiniert werden.

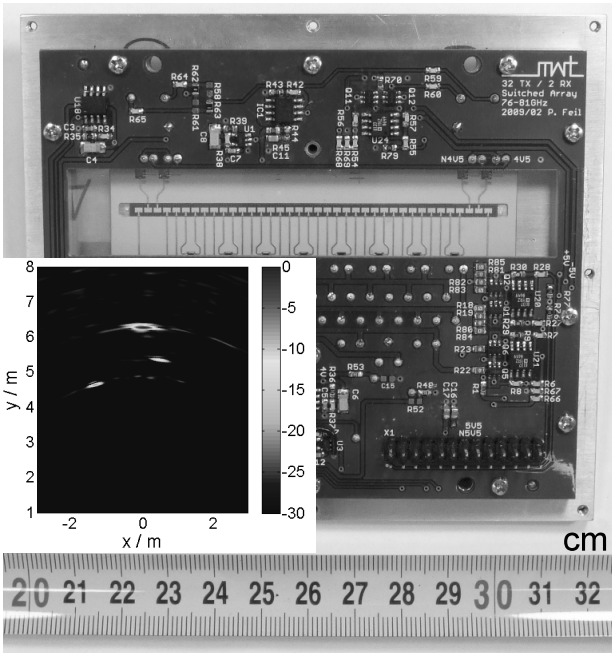

Bild 9 Geschaltetes Antennen-Array und beispielhafte Messung.

Tabelle 2 Wichtige System-Parameter des 77-GHz-Frontends und des geschalteten Arrays.

Frontend	
Frequenzbereich	73–80 GHz
Ausgangsleistung des Frontends	0–5 dBm
Frequenzhub	max. 7 GHz
maximale Entfernungsauflösung	ca. 30 mm
Geschaltetes, aktives Array	
Anzahl der Antennen-Elemente	32 × TX und 2 × RX
Strahlbreite senkrecht zur Abbildungsebene	6°
Winkelauflösung in der Abbildungsebene	ca. 2,5° bei Delay-and-Sum-Beamforming

Die wichtigsten technischen Daten des Frontends und der geschalteten Gruppenantenne sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

4 Anwendungen

Im Folgenden werden Anwendungs-Szenarien beschrieben, die mit den verschiedenen Sensoren untersucht wurden.

4.1 Braunkohle-Förderung

Im Umfeld der Braunkohle-Gewinnung treten mehrere Problemstellungen auf, die mit abbildenden Radarsensoren gelöst werden können. Zum Beispiel können Radarsensoren an Schaufelradbaggern zur Unterstützung des Maschinenführers angebracht werden. Diese dienen zum einen der Überwachung des Gefahrenbereichs um das Förderrad und helfen zum anderen, Geländekonturen bei schlechten Sichtverhältnissen abzuschätzen [4]. Zum Transport der geförderten Kohle in das Kraftwerk werden in der Regel Güterwaggons verwendet. Bei der Verladung vom Förderband auf die Waggons bestehen aufgrund der starken Staubentwicklung meist sehr schlechte Sichtverhältnisse. Der Beladestrom wird von einem Steuerstand aus kontrolliert. Dabei sollten die Waggons effizient ausgenutzt werden, aber kein Material an der Seite oder in den Zwischenräumen zu Boden fallen. Der oben beschriebene 24-GHz-Radarsensor wurde in einer Verladestation installiert. In Bild 10 sind zwei Situationen abgebildet. Einmal befindet sich ein voll beladener Waggon unterhalb des Sensors, bei der zweiten Messung ein Waggon-Zwischenraum. Bei der Beurteilung der Bilder ist zu beachten, dass das Radarbild einen vertikalen Schnitt durch das Szenario darstellt. Es ist zu sehen, dass sich zum einen der Ladezustand gut beurteilen lässt, zum anderen auch die Zwischenräume detektiert werden können. Dabei ist zu beachten, dass die Messdauer für ein Einzelbild lediglich 5 ms beträgt. Durch Integration mehrerer Messungen kann die Bildqualität noch verbessert werden.

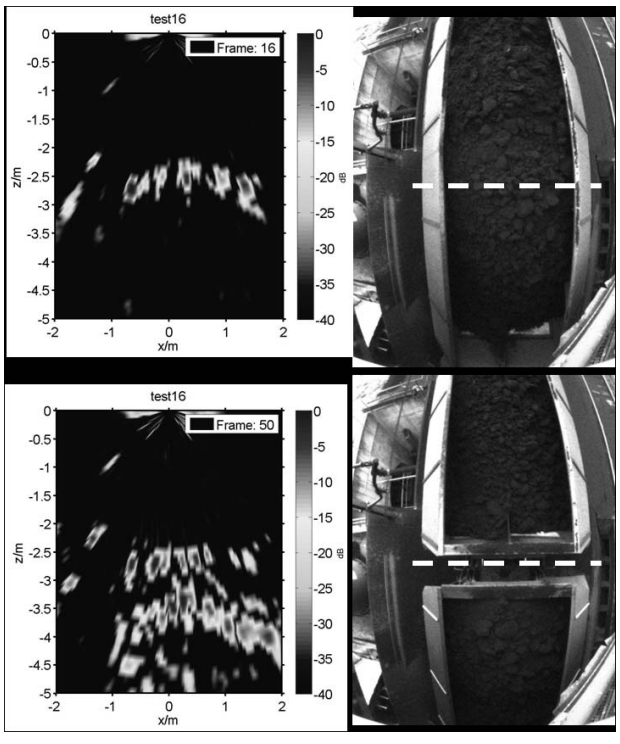

Bild 10 Momentaufnahmen bei der Verladung von Braunkohle; Kamerabild (rechts) und korrespondierendes Radarbild (links).

4.2 Flugfeld-Überwachung

Der Absturz eines Überschall-Passagierflugzeuges vom Typ „Concorde“ im Jahr 2000 hat zu einer Diskussion über die Sicherheit von Startbahnen geführt. Vermeintlicher Auslöser des Unglücks war ein Stück Titan-Blech, das von einer voraus fliegenden Maschine abgefallen war. Die Detektion solcher Fremdkörper (Foreign Object Debris, FOD) mittels verschiedener Sensorprinzipien (Kamera, Lidar, Radar, etc.) gewinnt dadurch zunehmend an Bedeutung [1; 5]. Mit dem 77-GHz-Sensor aus Abschnitt 3.2 wurden Untersuchungen durchgeführt, ob sich Kleinradare bei mm-Wellen-Frequenzen eignen, FODs zu detektieren. Dazu wurde der Sensor mit verschiedenen gefalteten, planaren Reflektorantennen [6; 7] kombiniert. Es hat sich gezeigt, dass selbst sehr kleine Objekte (z. B. Kugeln mit 25 mm Durchmesser, M10-Muttern, etc.) bis zu einer Entfernung von ca. 50 m zuverlässig erkannt werden können.

Bild 11 zeigt das Ergebnis einer Messung, bei der der Sensor an der Seite einer Rollbahn angebracht war. Zwischen den Graskanten bei 15 m bzw. 30 m ist der Verlauf der Rollbahn zu erkennen. Die überlagerten Marker kennzeichnen die Positionen der automatisch detektierten Objekte.

4.3 Nahbereichs-SAR

Um eingehende Untersuchungen zu örtlich hochauflösenden SAR-Systemen mit FMCW-Sensoren durchführen zu können, wurde ein Demonstratorsystem realisiert. Die in Abschnitt 3 vorgestellten Radare wurden zusammen

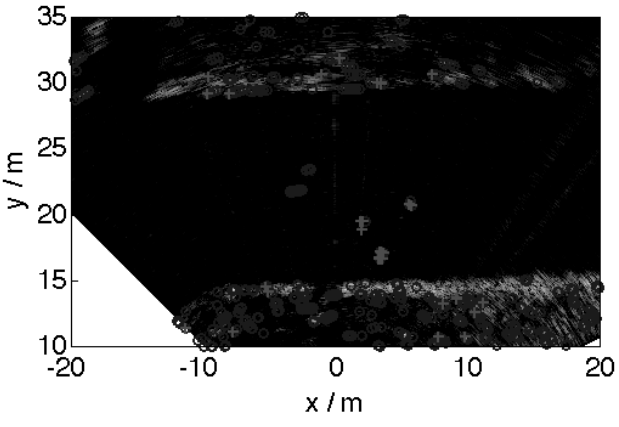

Bild 11 Radarbild einer Rollbahn mit überlagerten automatisch detektierten FODs.

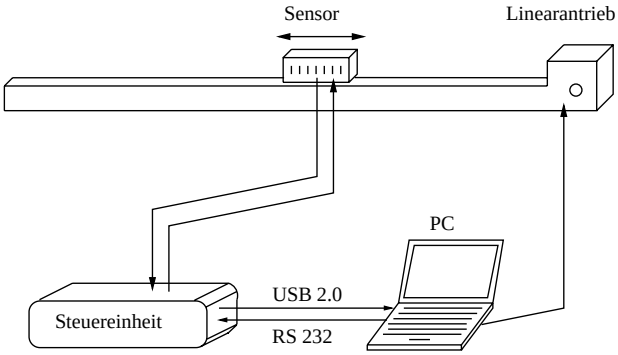

Bild 12 Schematischer Aufbau des SAR-Demonstrators.

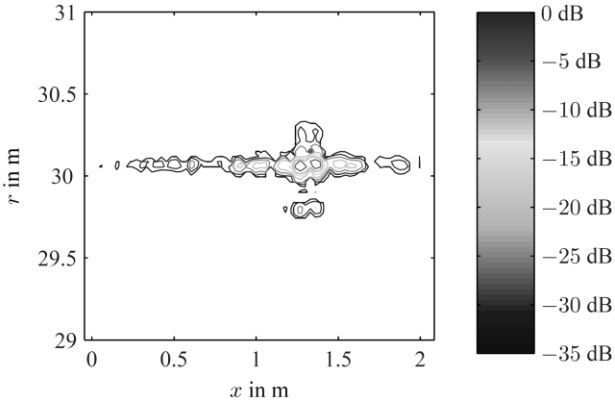

Bild 13 Ergebnis einer Stripmap-Aufnahme mit einem monostatischen FMCW-Radar bei 77 GHz mit gefalteter Reflektorantenne.

mit einem Linearantrieb zu einem SAR-System integriert (siehe Bild 12).

Für die Auswertung der mit dem Demonstrator gewonnenen Daten wurde der sog. Range-Doppler-Algorithmus [2] implementiert, da dieser sowohl eine effiziente Anwendung des Matched Filters als auch eine Korrektur der Zielentfernungsänderung erlaubt. Diese tritt auf, wenn das Radar eine so gute Entfernungsauflösung hat, dass die Antwort eines Punktzieles durch mehrere Entfernungszellen wandert.

In Bild 13 ist das prozessierte Ergebnis einer Aufnahme in der einfachsten Betriebsart, dem Streifenmodus, zu sehen. Man erkennt, dass das Szenario zweier dicht (7 cm) nebeneinander liegender Punktziele in 30 m Entfernung sehr gut durch das System aufgelöst werden kann.

Neben einer reinen SAR-Abbildung ermöglicht ein Sensor mit geschalteter Arrayantenne eine Abbildung in allen drei Dimensionen des Raumes, indem man das Array, wie in Bild 14 zu sehen ist, so ausrichtet, dass quer zur Bewegungsrichtung Beamforming möglich ist. Die Auflösungszellen ergeben sich dann durch das Auflösungsvermögen δ_r des FMCW-Radars in Entfernungsrichtung, die Winkelauflösung δ_θ des Beamformings und die Auflösung δ_a der Stripmap-SAR-Verarbeitung in Bewegungsrichtung.

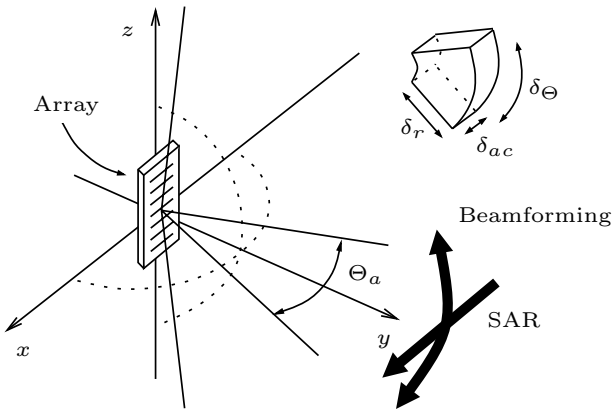

Bild 14 Radar mit geschalteter Array-Antenne zur Abbildung in allen drei Dimensionen des Raumes mittels SAR- und DBF-Verarbeitung; sowie eine Auflösungszelle.

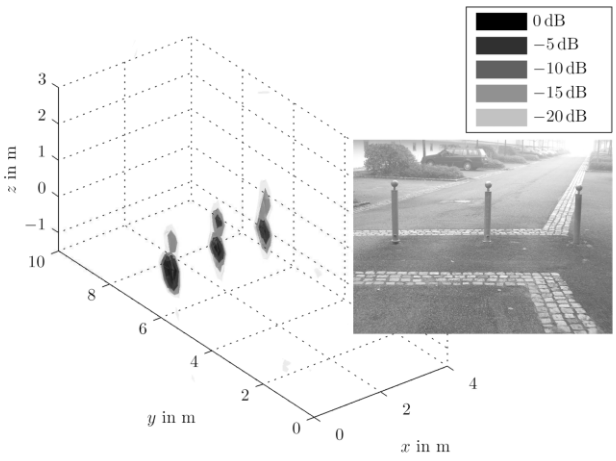

Bild 15 Ergebnis der dreidimensionalen Abbildung von drei Metallpfosten, dargestellt als normierte Isoflächen mit zunehmender Transparenz; sowie ein Foto des abgebildeten Szenarios.

Die theoretisch ermittelten Werte der Auflösungen – abhängig von der FMCW-Bandbreite sowie der verwendeten Arrayantenne – liegen bei $\delta_r = 190$ mm, $\delta_\Theta = 2{,}3°$ und $\delta_{ac} = 21$ mm.

Bei diesem Experiment kam der oben beschriebene abbildende Radar-Sensor bei 24 GHz zum Einsatz. Das Ergebnis einer Beispielmessung zusammen mit einem Foto des Szenarios ist in Bild 15 TS[a] zu sehen.

5 Zusammenfassung

Es wurden verschiedene Radar-Sensoren bei 24 GHz und 77 GHz vorgestellt. Typischerweise findet man solche Sensoren bisher vorwiegend im automobilen Umfeld. In diesem Artikel werden zudem Nischen-Anwendungen aufgezeigt, die von der Entwicklung der mm-Wellen-Technologie profitieren. Gerade in Bereichen, in denen die Sicherheit von Personen oder der Schutz hochwertiger Investitionsgüter im Vordergrund steht, besteht nun die Möglichkeit, kostengünstige und leistungsfähige Sensortechnologie einzusetzen. Daher eröffnet sich hier ein

weites und interessantes Tätigkeitsfeld für Forschung und Entwicklung.

Literatur

[1] P. Feil, W. Menzel, T. P. Nguyen, C. Pichot, and C. Migliaccio. Foreign objects debris detection (fod) on airport runways using a broadband 78 ghz sensor. In *Proc. European Radar Conference EuRAD 2008*, pages 451–454, 2008.

[2] I. G. Cumming and F. H. Wong. *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data*. Artech House Publishers, January 2005.

[3] W. Mayer, A. Gronau, W. Menzel, and H. Leier. A compact 24 GHz sensor for beam-forming and imaging. In *Proc. 9th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision ICARCV '06*, pages 1–6, 2006.

[4] K. Nienhaus, R. Winkel, W. Mayer, A. Gronau, and W. Menzel. An experimental study on using electronically scanning microwave radar systems on surface mining machines. In *Proc. IEEE Radar Conference*, pages 509–512, 2007.

[5] P. D. L. Beasley, G. Binns, R. D. Hodges, and R. J. Badley. Tarsier, a millimetre wave radar for airport runway debris detection. In *Proc. EURAD Radar Conference First European*, pages 261–264, 2004.

[6] W. Menzel, D. Pilz, and M. Al-Tikriti. Millimeter-wave folded reflector antennas with high gain, low loss, and low profile. *Antennas and Propagation Magazine, IEEE*, 44(3): 24–29, jun 2002.

[7] J. Lanteri, A. Zeitler, J. Y. Dauvignac, C. Pichot, C. Migliaccio, P. Feil, and W. Menzel. Investigation of wideband millimetre-wave reflectarrays for radar applications operating in the w band. In *Proc. 3rd European Conference on Antennas and Propagation EuCAP 2009*, pages 826–830, 2009.

Manuskripteingang: 11. April 2010, zur Veröffentlichung angenommen: 26. April 2010

Dipl.-Ing. Peter Feil arbeitet als wissenschaftlicher Angestellter am Institut für Mikrowellentechnik der Universität Ulm. Er beschäftigt sich mit breitbandigen mm-Wellen-Sensoren und deren Anwendungen im industriellen und sicherheitstechnischen Bereich.

Adresse: Institut für Mikrowellentechnik, Universität Ulm, Albert-Einstein-Allee 41, 89081 Ulm, E-Mail: peter.feil@uni-ulm.de

Dr.-Ing. Winfried Mayer arbeitete von 2003 bis 2007 als wissenschaftlicher Angestellter am Institut für Mikrowellentechnik der Universität Ulm und beschäftigte sich dort mit abbildenden Mikrowellensensoren. Sein jetziger Aufgabenbereich bei der Firma Endress+Hauser ist die Vorentwicklung zu Themen der Radarsensorik.

Adresse: Endress+Hauser GmbH & Co. KG, Hauptstraße 1, 79689 Maulburg, E-Mail: winfried.mayer@pcm.endress.com

Thomas Kraus, M.Sc., studierte bis 2009 an der Universität Ulm. Seither ist er Mitarbeiter am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR).

Adresse: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Standort Oberpfaffenhofen, Münchner Straße 20, 82234 Weßling,
E-Mail: t.kraus@dlr.de

Prof. Claire Migliaccio ist Professorin am Laboratoire d'Electronique, Antennes et Télécommunications der Université Nice Sophia Antipolis. Sie beschäftigt sich mit Antennen, Komponenten und Systemen im mm-Wellen-Bereich.

Adresse: LEAT, Université de Nice Sophia Antipolis, 250 rue Albert Einstein , 06560 Valbonne, France, E-Mail: claire.migliaccio@unice.fr

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Menzel ist Leiter des Instituts für Mikrowellentechnik an der Universität Ulm. Seine Arbeitsgebiete sind Schaltungsentwurf, Aufbau- und Verbindungstechnik, Antennen und Sensoren im Mikro- und Millimeterwellenbereich.

Adresse: Institut für Mikrowellentechnik, Universität Ulm, Albert-Einstein-Allee 41, 89081 Ulm, E-Mail: wolfgang.menzel@uni-ulm.de

tm061 Annotations for the author

TS[a] Bitte schicken Sie Bild 15 in besserer Qualität.