

Automobile Radartechnik

Neben dem „Smart Phone auf Rädern“ wird für das autonome Fahren auch eine Sensorik erforderlich sein, die ohne Radartechnik nicht denkbar ist. Die großen Fortschritte der Halbleitertechnologie in den vergangenen Jahren haben zu einer Kostendegression geführt, die eine Integration der Radarsensoren in Fahrzeuge aller Preisklassen ermöglicht. Die beschriebenen Grundlagen der Radar- und Antennentechnik sollen ein Verständnis der Einsatzmöglichkeiten heute und eine Abschätzung zukünftiger Entwicklungsrichtungen ermöglichen.

Als erster europäischer Hersteller bot Mercedes ab dem Jahr 1962 eine Geschwindigkeitsregelanlage an. Im US-amerikanischen Markt mit einer häufig strikt durchgesetzten Geschwindigkeitsbegrenzung ist ein Tempomat heute noch in vielen Mietfahrzeugen verbaut und angenehm erlebbar. Im deutschen Verkehrsgeschehen mit dichtem Verkehr und hohen Differenzgeschwindigkeiten ist das Fahrererlebnis mit einem auf konstante Geschwindigkeit regelnden Assistenzsystem ungleich bescheidener.

Das automatische Einhalten eines konstanten Abstands zu einem vorausfahrenden Fahrzeug ist im dichten Verkehr wesentlich hilfreicher und erfordert die kontinuierliche Messung des Abstands. Die gleichzeitige Messung der Differenzgeschwindigkeit ist wichtig, um stehende Objekte erkennen und ausblenden zu können.

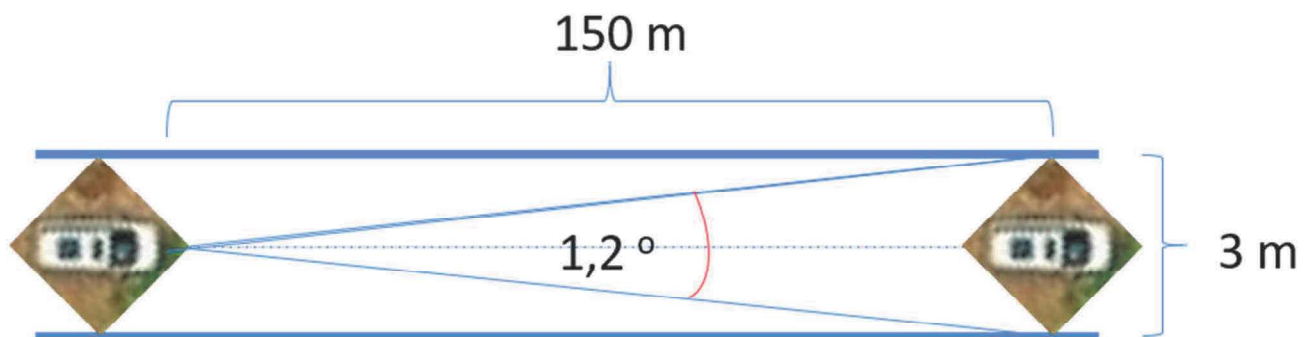


Abb. 9 - Größen- und Winkelverhältnisse bei einer Autobahnfahrt zur Dimensionierung einer Radar-Antenne

Zur Abstandsmessung sind Radar-Verfahren (Radar steht für Radio Detection and Ranging) ideal geeignet. Es wird ein elektromagnetisches Signal ausgesandt, das von einem Zielobjekt reflektiert wird zurück zum Sende-Empfänger. Dort kann über die Messung der Laufzeit die Entfernung berechnet werden, da mit der Lichtgeschwindigkeit die Signalausbreitungsgeschwindigkeit bekannt ist. Frequenzen im Bereich zwischen 10 und 200 GHz sind gut für Radargeräte geeignet, da in diesem Bereich die elektromagnetischen Wellen von metallischen Objekten besonders gut reflektiert werden. Zudem hat dieser Frequenzbereich den Vorteil, dass die Signale bei Tag und Nacht reflektiert werden und auch dichten Nebel durchdringen. Diese Eigenschaften machen die Radartechnik optischen Systemen überlegen.

Die Antenne

Es lässt sich schnell ausrechnen, dass für das typische Autobahnszenario eine Strahlbündelung von $< 1,2^\circ$ erreicht werden muss, um sicherzustellen, dass das vorausfahrende Fahrzeug verfolgt wird und nicht eines auf einer Nachbarspur. Diese Strahlbündelung wird in der Radartechnik erreicht durch die Richtcharakteristik einer Antenne. Die Richtcharakteristik einer Antenne wird durch deren geometrische Größe bestimmt. Je größer der Durchmesser im Verhältnis zur Wellenlänge ist, desto stärker ist ihre Richtwirkung. Die Richtwirkung einer verlustlosen Antenne ist gleich ihrem Gewinn und lässt sich berechnen aus

$$G = \frac{4\pi * A_e}{\lambda^2}$$

mit der effektiven Antennenfläche A_e und der Wellenlänge λ . Der Antennengewinn wird als logarithmisches Maß gerne in Dezibel angegeben:

$$g[dB] = 10 * \log G$$

Die Antenne mit erhöhtem Gewinn fokussiert also die zur Verfügung stehende Energie auf einen engeren Bereich. In einer groben Näherung gilt im Fernfeld ein Zusammenhang zwischen Gewinn und Öffnungswinkel θ

$$g = 10 * \log \frac{4\pi}{\theta^2}$$

wobei der Winkel in Rad einzusetzen ist.⁵ Für $\theta = 1,2^\circ = 0,0209 \text{ Rad}$ folgt ein notwendiger Antennengewinn von $g \approx 44 \text{ dB}$ oder $G \approx 28000$. Da eine Frequenz von 76 GHz über die Lichtgeschwindigkeit mit der Wellenlänge $\lambda = 0,39 \text{ cm}$ korreliert, ergibt sich für die Antennenfläche $A_e = 339 \text{ cm}^2$ und unter Annahme einer kreisförmigen Antennenapertur ein Antennendurchmesser $d \approx 20 \text{ cm}$. Das ist exakt der Radom-Durchmesser der heute an vielen Mittel- und Oberklasse Autos nachgemessen werden kann. Es ist sofort ersichtlich, dass tiefere Frequenzen (Beispiel halbe „Automobilfrequenz“ wäre 38 GHz) und damit größere Wellenlängen (Beispiel wäre 0,78 cm) zu einer Vergrößerung der notwendigen Apertur führen würden (im Beispiel wäre ein Durchmesser von 40 cm notwendig), was aus Designgründen nicht realisierbar ist.

Radarverfahren

Naheliegender ist das Aussenden eines Pulses und die Messung der Zeitdauer, bis dieser Puls wieder zurückkommt. Die Entfernung des vorausfahrenden Autos ist dann

$$r = c * t / 2$$

mit der Lichtgeschwindigkeit $c = 3 * 10^8 \text{ m/s}$ und der Laufzeit t , da der Puls ja hin- und zurückreisen muss.

⁵ Der Radiant (Einheitenzeichen: rad) ist ein Winkelmaß, bei dem der Winkel durch die Länge des entsprechenden Kreisbogens im Einheitskreis angegeben wird. Umrechnung $\theta[\text{rad}] = \theta[\text{grad}] * \frac{\pi}{180}$

Dieses zunächst sehr einfach wirkende Prinzip erfordert präzise Zeitmessungen und sehr kurze Pulsdauern, damit auch Abstände im Nahbereich, wenn der Puls also schnell wieder zurückkommt, noch aufgelöst werden können. Die ebenfalls notwendige Messung der Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs ist möglich über die Ermittlung der Abstandsänderung in aufeinanderfolgenden Zeitabschnitten. Allerdings müssen hier Differenzenbildungen von sich nur wenig unterscheidenden Größen vorgenommen werden, was gerne zu erheblichen Fehlern führt. Daher ist es naheliegend, einen anderen Effekt zu verwenden, mit dem die Geschwindigkeit sehr präzise gemessen werden kann: der Dopplereffekt. Wenn wir an einem Straßenrand stehen und ein Fahrzeug mit eingeschaltetem Martinshorn fährt auf uns zu, so steigt die von uns gehörte Tonhöhe an. Aufgrund des sich ständig verkürzenden Abstands werden die Wellenzüge für uns zusammengedrückt – die Tonhöhe steigt. Fährt der Einsatzwagen wieder weg von uns, so sinkt die Tonhöhe, da die Wellenzüge für uns auseinandergezogen werden. Diese Dopplereffekt-Frequenzverschiebung hängt direkt von der gefahrenen Geschwindigkeit ab und kann somit zur Ermittlung der Geschwindigkeit dienen.

Elektromagnetische Wellen, die auf ein bewegtes Ziel treffen, erfahren eine Frequenzverschiebung. Die Frequenzverschiebung ist ein Maß für die Zielgeschwindigkeit und wird Doppler – Frequenz f_D genannt.

$$f_D = \frac{2v}{\lambda} \cos \alpha.$$

(v : Geschwindigkeit des Zielobjekts; λ : Wellenlänge;
 α : Winkel zwischen Richtung Sendesignal und Zielobjekt)

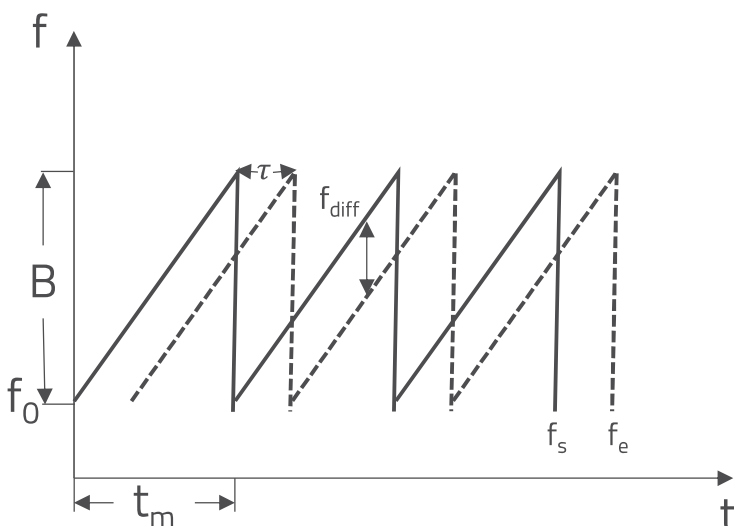


Abb. 10 - Verlauf der Frequenz f als Funktion der Zeit t in einem sägezahnförmig linear modulierten FMCW Radar. Gestrichelt gezeichnet ist das Empfangssignal sowie die sich ergebende Differenzfrequenz f_{diff} . Der Frequenzhub ist B , die Signallaufzeit ist τ und d

Um die Doppler-Frequenz in einem Pulsradar messen zu können, müssen die Pulse kohärent oder phasenstarr sein. Dies war die Realisierungsform des ersten in Serie verbauten Puls-Doppler Radargeräts von Mercedes-Benz in der Baureihe W220 von 1998.

Neben Radarsensoren mit einem pulsformigen Sendesignal sind zunehmend Sensoren im Einsatz, die ein kontinuierliches Signal senden, sogenannte Dauerstrichradarsensoren (engl. continuous wave (CW)). Damit eine Entfernungsinformation gewonnen werden kann, muss das kontinuierliche Signal mit einer „Marke“ versehen werden: es wird moduliert. Wird diese Modulation über eine Frequenzänderung realisiert, so erhält man ein FMCW Radar (Frequency Modulated Continuous Wave).

Die Differenzfrequenz zwischen Sende- und Empfangssignal ist verhältnismäßig einfach durch Mischvorgänge zu ermitteln und die Entfernung zum Zielobjekt kann berechnet werden aus

$$r = \frac{f_{diff} * c * t_m}{2B}$$

Auch kann die Dopplerfrequenz direkt dem reflektierten und empfangenen Signal entnommen werden. Da den Linearitätsanforderungen des FMCW Radars heute mit den Möglichkeiten der digitalen Signalverarbeitung gut begegnet werden kann, hat es sich heute aufgrund seiner gegenüber einem Puls-Doppler Radar einfacheren Schaltungsarchitektur weitgehend durchgesetzt.

Technologie und Ausblick

Die Hochfrequenz-Elektronik-Technologie hat sich seit der Serieneinführung von Abstandsradaren im Automobil 1998 rasant entwickelt. Waren erste Radare noch mit diskreten Hochfrequenzbauteilen bestückt, folgten die ersten integrierten Schaltkreise auf Verbindungshalbleiter-Basis und in den Jahren seit 2010 dann integrierte Schaltungen auf Silizium-Basis mit Silizium-Germanium Heterostrukturen, die eine deutliche Preisreduktion ermöglichten. Nun steht der Sprung auf die CMOS-Schaltungstechnik bevor, die den Frequenzbereich um 76 GHz durch die fortlaufenden Strukturverkleinerungen erreicht. Damit einher geht die Fertigung auf 12"-Substraten, so dass Millionen von Hochfrequenz-ICs auf einem Wafer (einem Substrat) in einem Fertigungsprozess hergestellt werden können. – Mit der weiteren Kostendegression wird es möglich sein, auch in der Radartechnik bildgebende Verfahren einzuführen – dies wird insbesondere zur Unterstützung des vollautonomen Fahrens ein Meilenstein sein.