

Vortrag zur  
Fachtagung "SENSOREN - Technologie und Anwendung", Bad Nauheim, 16.-18.3.1992

## **Berührungslose Geschwindigkeitsmessung nach dem Dopplerprinzip mit Ultraschall und Mikrowellen**

P. Heide, M. Joppich, R. Schubert  
Zentrale Forschung und Entwicklung, Siemens AG

### **Zusammenfassung**

Geschwindigkeit und Wegstrecke können mit Mikrowellen- und Ultraschall-Dopplersensoren berührungsfrei präzise gemessen werden. Mit einem systemtheoretischen Modell wurde eine Simulationsumgebung geschaffen, die es erlaubt, die Einflüsse der geometrischen Konfiguration des Dopplersensors, der Auswertelalgorithmik sowie der statistisch verteilten Streuzentren der Fahrbahnoberfläche auf die Meßgenauigkeit zu untersuchen. Ultraschall-Dopplersensoren bei 80 kHz und 200 kHz wurden entwickelt und mit 10 GHz und 24 GHz Mikrowellensystemen verglichen. Die Ergebnisse aus Simulation, Laborversuchen und Meßfahrten im Kfz ergeben übereinstimmend bei 1 Meter Fahrstrecke eine Standardabweichung der Geschwindigkeitsmeßwerte von 1 .. 2% bei 24 GHz Mikrowelle und 0.5 .. 1.2% bei 200 kHz Ultraschall. Dieser Fehler ist unabhängig von der Fahrbahnbeschaffenheit und in etwa proportional der Wurzel aus dem Verhältnis von Wellenlänge zu gefahrener Wegstrecke. Die Auswertung der Dopplersignale in der komplexen Ebene liefert information über die Bewegungsrichtung. Systematische Fehler durch Fahrzeugschwingungen (Änderung von Einfallswinkel oder Sensorhöhe) werden durch das sogenannte "Janus-Prinzip" kompensiert. Kostengünstig realisierbare Ultraschall-Dopplersysteme ermöglichen aufgrund der kleinen Wellenlänge, der hohen Richtschärfe der verwendeten Schallwandler und der durch die hohe Ausbreitungsdämpfung in Luft begrenzten Reichweite eine präzise Geschwindigkeits- und Wegstreckenerfassung sowie eine zuverlässige Stillstandserkennung. Problem ist die durch Verwehung des Ultraschalls bedingte Beschränkung auf niedrige Geschwindigkeit (< 30 km/h). Mikrowellen-Dopplersensoren zeigen Einschränkungen in der Meßgenauigkeit für kleine Geschwindigkeiten und Störungen durch benachbarte bewegte Objekte. Die Kombination von Ultraschall und Mikrowelle steigert die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der berührungslosen Geschwindigkeits- und Wegmessung beträchtlich.

### **Einleitung**

Für die Entwicklung von Systemen zur Traktions- und Bremskraftregelung (ASR, ABS) sowie zur genauen Wegstreckenerfassung für Ortungssysteme werden präzise und zuverlässige Weg- und Geschwindigkeitsmesser benötigt. Dies trifft für die Automobil- und Eisenbahntechnik zu. Bei der bislang üblichen Auswertung der Radumdrehungen begrenzen Schlupf und Veränderungen des Raddurchmessers die Genauigkeit. Die berührungslose Messung nach dem Dopplerprinzip liefert bessere Resultate. Der Einsatz der Doppler-Geschwindigkeitsmessung scheiterte bisher an Zuverlässigkeitsproblemen bei ungünstigen Betriebsbedingungen. Diese können durch verbesserte Dopplermoduln, störunempfindliche Algorithmik sowie durch diversitäre Sensorprinzipien, beispielsweise die Kombination von Mikrowelle und Ultraschall, eliminiert werden. Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit der Realisierung von Ultraschall-Dopplersensoren und deren Meßgenauigkeit im Vergleich zu Mikrowellensystemen.

## Prinzip

Die Messung der Geschwindigkeit über Grund erfolgt durch Auswertung der von einer rauen Fahrbahnoberfläche diffus rückgestrahlten Signale (Bild 1). Der Dopplersensor arbeitet im CW-Betrieb und sendet dabei eine kohärente Welle der Frequenz  $f_0$  aus. Das rückgestreute Signal ist aufgrund der Relativbewegung von Sensor und Reflexionspunkt um die zur Radialgeschwindigkeit proportionale Dopplerfrequenz verschoben:

$$f_d = f_0 \cdot 2 \cdot \cos(\alpha) \cdot v_x / c \quad (1)$$

Für Ultraschall ist (Gl.1) eine Näherung, die nur für  $v_x / c \ll 1$  gilt ( $c =$  Wellenausbreitungsgeschwindigkeit, Ultraschall:  $c = 340$  m/s

Mikrowelle:  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s).

Das Dopplersignal hat statistischen Charakter. Es setzt sich aus der phasenrichtigen Überlagerung der Reflexionen zusammen, die von allen im Strahlenkegel der Antenne befindlichen, zufällig verteilten Streuzentren herühren. Folglich handelt es sich um kein monochromatisches Signal. Für harmonische Anregung kann das komplexwertige Empfangssignal  $\underline{E}(x,t)$  als Produkt aus Anregungsterm  $e^{j\omega_0 t}$  und einem ausschließlich ortsabhängigen Dopplerterm  $g(x)$  dargestellt werden:

$$\underline{E}(x,t) = g(x) \cdot e^{j\omega_0 t} \quad (2)$$

Der Dopplersensor kann mit Hilfe eines systemtheoretischen Ansatzes [1] als Ortsfrequenzfilter beschrieben werden. In Ergänzung zu [1] konnte experimentell nachgewiesen werden, daß eine Beschränkung des Problems auf Ortsabhängigkeit in nur einer Koordinate ( $x$ ) zulässig ist.

$$g_r(x) := \text{RE} \{ g(x) \} = h(x) * u(x) \quad (3)$$

Bild 2 veranschaulicht den durch die Faltungsoperation nach (Gl.3) gegebenen Zusammenhang. Die statistische Anregung  $u(x)$  der Fahrbahn wird durch zufällig verteilte Streuzentren mit unterschiedlichem Streuvermögen modelliert. Dies wird mit entsprechend angeordneten  $\delta$ -Impulsen dargestellt. Beim Durchgang eines einzelnen Streukörpers durch den Antennen-Footprint liefert der Dopplersensor die Stoßantwort  $h(x)$ . Das Faltungsprodukt aus statistischer Anregung  $u(x)$  und Stoßantwort  $h(x)$  ist das Dopplersignal  $g_r(x)$ . Im Frequenzbereich erhält man das Dopplerspektrum  $G(f)$  durch Multiplikation des Ortsfilterspektrums  $H(f)$  mit dem Spektrum der Fahrbahn  $U(f)$ . Zu beachten ist, daß die Fouriertransformation hier nicht bezüglich der Zeit, sondern bezogen auf den Ort ausgeführt wird. Die Frequenz  $f$  versteht sich folglich als Ortsfrequenz, der Sensor wirkt als Ortsfrequenzfilter.

Die Bandbreite von  $H(f)$  ergibt sich sowohl durch die Breite des Winkelbereichs, aus dem die Antenne Signale empfängt, als auch durch den aufgrund der Amplitudenmodulation von  $h(x)$  hervorgerufenen Hüllkurveneffekt. Für eine gegebene Sensorhöhe  $h$  existiert eine optimale Parameterkonfiguration aus Wellenlänge  $\lambda$  und Antennenöffnungswinkel  $\alpha_{-3\text{dB}}$ , für die die

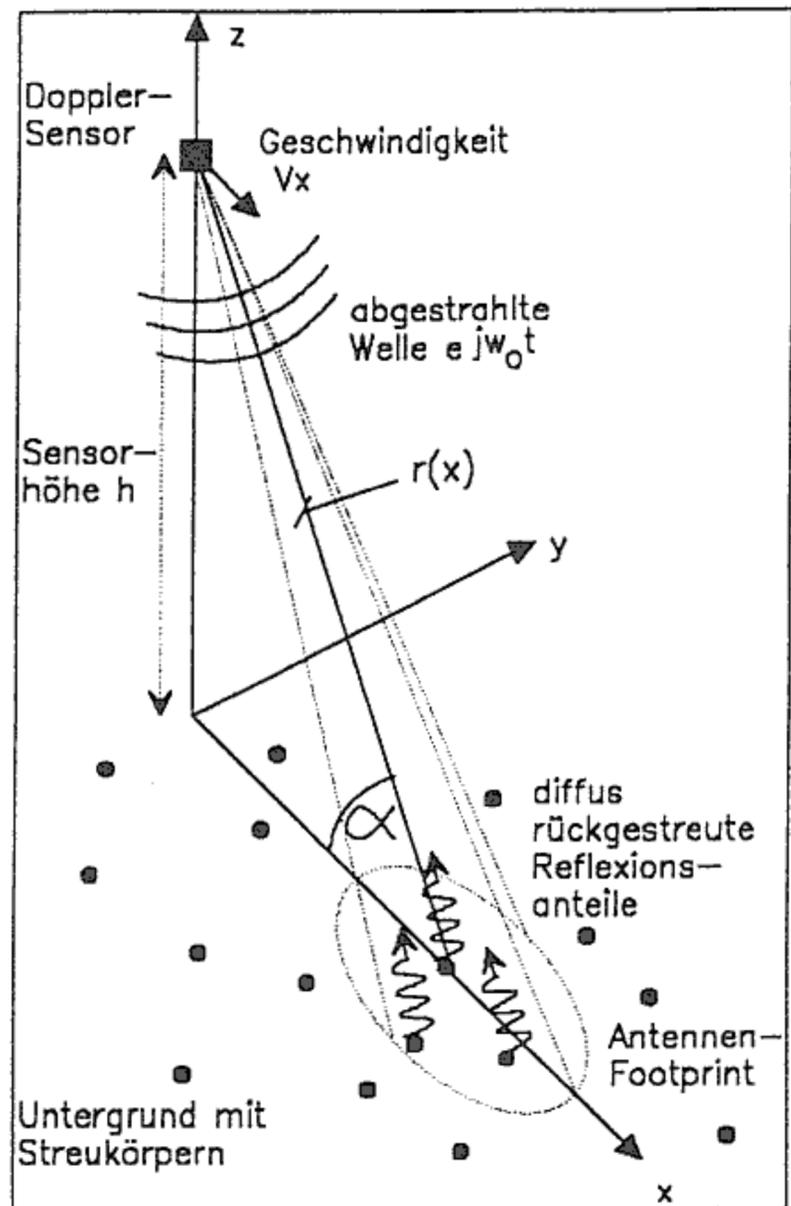


Bild 1: Berührungslose Messung der Geschwindigkeit über Grund mit Doppler-Sensor

Bandbreite von  $H(f)$  und somit auch die des Dopplerspektrums  $G(f)$  minimal wird. Für bisher bekannt gewordene Dopplersignal-Auswertelgorithmen zur Schätzung der Geschwindigkeit ist ein schmalbandiges Dopplerspektrum erwünscht. Zur Zeit wird an Auswertemethoden gearbeitet, die sensorspezifisches "a priori" - Wissen nutzen, und damit die Bestimmung der Geschwindigkeit mit hoher Genauigkeit auch aus Spektren größerer Bandbreite erlauben.

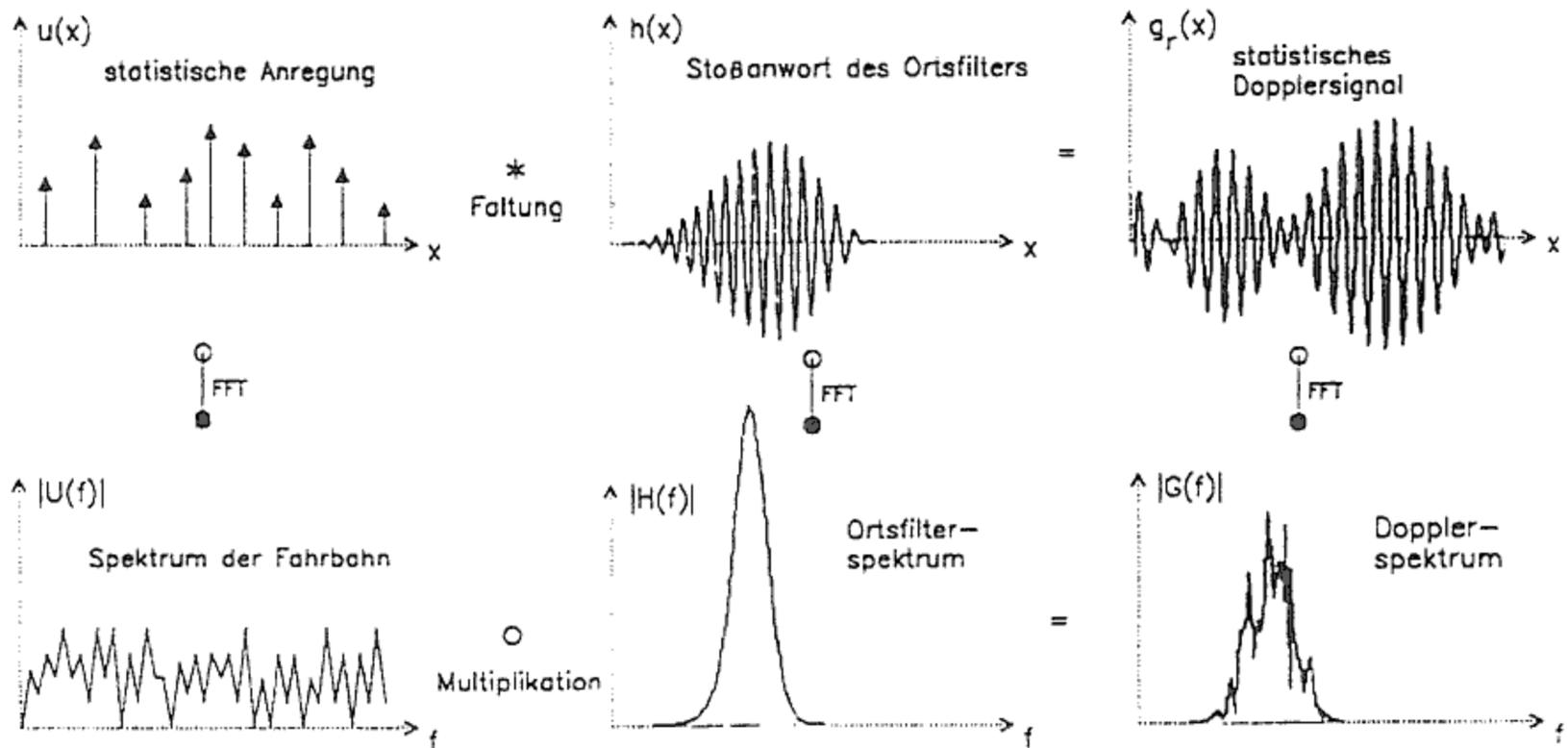


Bild 2: Systemtheoretische Darstellung des Dopplersensors als Ortsfrequenzfilter

## Simulation

Der Einfluß der Systemparameter Wellenlänge  $\lambda$ , Antennenöffnungswinkel  $\alpha_{-3dB}$  und Sensorhöhe  $h$  auf den Geschwindigkeitsmeßfehler wurde mit Hilfe einer Rechnersimulation abgeschätzt. Dazu wurden auf simulierte Dopplersignale für eine zurückgelegte Wegstrecke von 1 Meter in einem ersten Schritt einfache Auswertelgorithmen (Nullstellenauswertung, FFT-Schwerpunktsanalyse) angewendet. Während für realistische Sensorhöhen ( $h \geq 0.3m$ ) die Größe  $h$  bei gebräuchlichen Wellenlängen unkritisch in die Meßgenauigkeit eingeht, sind Antennenöffnungswinkel und Wellenlänge genauigkeitsrelevant. Die Werte in Tabelle 1 geben Anhaltspunkte für zu erwartende Fehler bei unterschiedlichen Sensoren mit Antennenöffnungswinkeln  $\alpha_{-3dB}$  von  $5^\circ$  bis  $20^\circ$ :

Sensor	Wellenlänge $\lambda$	mittlerer Fehler
10 GHz Mikrowelle	3.00 cm	1.5 - 3 %
24 GHz Mikrowelle	1.25 cm	1.0 - 2 %
80 kHz Ultraschall	4.13 mm	0.8 - 1.5 %
200 kHz Ultraschall	1.65 mm	0.5 - 1.2 %

Tabelle 1: Erwarteter Fehlerbereich für die Geschwindigkeitsschätzung bei Nullstellenauswertung simulierter Dopplersignale für 1 Meter Wegstrecke

Wegen der statistischen Natur des Dopplersignals ist der relative Meßfehler (für Auswertestrecken größer als die Länge des Antennen-Footprints) in guter Näherung proportional zur Quadratwurzel aus dem Verhältnis von Wellenlänge und Länge der Auswertestrecke. Eine Reduktion der Wellenlänge ist äquivalent zu einer entsprechenden Erhöhung der Auswertestrecke. Folglich ist für die Messung niedriger Geschwindigkeiten eine kleine Wellenlänge der Sensoren zweckmäßig.

### Realisierung eines Ultraschall-Dopplersensors

Zur Messung des Geschwindigkeitsbetrages wie auch der Bewegungsrichtung muß das Dopplersignal als Phasenzeiger in komplexer Form zur Verfügung stehen. Real- und Imaginärteil des Dopplersignals  $g(x) = g_r(x) + jg_i(x)$  gewinnt man entsprechend Bild 3 durch homodyne Mischung des Empfangssignals mit orthogonalen Komponenten des Anregungssignals  $e^{j\omega_0 t} = \cos(\omega_0 t) + j\sin(\omega_0 t)$ . Es werden Ultraschallwandler vom Typ RU 200 ( $f_0 = 200 \text{ kHz}$ ) bzw. RU 80 ( $f_0 = 80 \text{ kHz}$ ) [2] eingesetzt. Sie besitzen eine hohe Richtschärfe ( $\alpha_{-3\text{dB}} = 5^\circ$ ) und liefern daher ein schmales Dopplerspektrum. Voraussetzung für kontinuierliche Wegstreckenmessung und die Erkennung des Stillstandes ist, daß Dopplerfrequenzen bis Null übertragen werden. Aus diesem Grund sind die Signalpfade des Dopplersignals nach dem Mischerausgang gleichspannungsgekoppelt. Trägt man Real- und Imaginärteil von  $g(x)$  in x/y-Darstellung auf, so beschreibt der komplexe Dopplersignalzeiger je nach Bewegungsrichtung des Sensors kreisförmige Bahnen im oder gegen den Uhrzeigersinn (Bild 4). Der Radius wird durch die Hüllkurve des Dopplersignals festgelegt. Durch Auswertung der Phaseninformation läßt sich die Geschwindigkeit ( $v \sim d\phi/dt$ ) und Bewegungsrichtung bestimmen. Die Anzahl der Phasenumläufe des Zeigers ist ein Maß für die zurückgelegte Wegstrecke. Bei Stillstand des Sensors ruht der komplexe Dopplersignalzeiger auf einem Punkt des Kreises oder bewegt sich um diesen Punkt in unterschiedlichen Richtungen (durch Luftfluktuationen) ohne nennenswerte Phasenänderung. Dieser Betriebszustand ist durch Phasenmessung leicht zu erkennen. Die Fouriertransformierte des komplexen Dopplersignals besteht gemäß der Bewegungsrichtung aus einem Frequenzpeak entweder im Bereich positiver oder negativer Frequenzen (Bild 5).

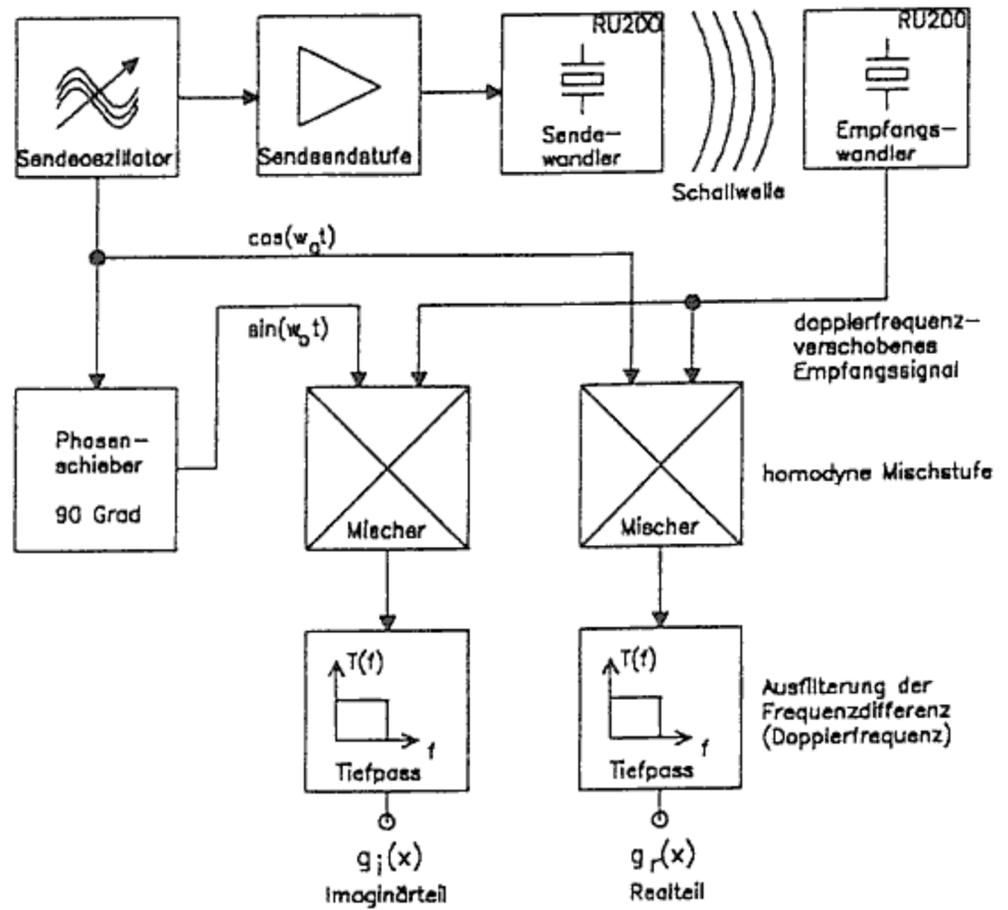


Bild 3: Blockschaubild des Ultraschall-Dopplersensors mit komplexem Ausgangssignal  $g(x) = g_r(x) + jg_i(x)$

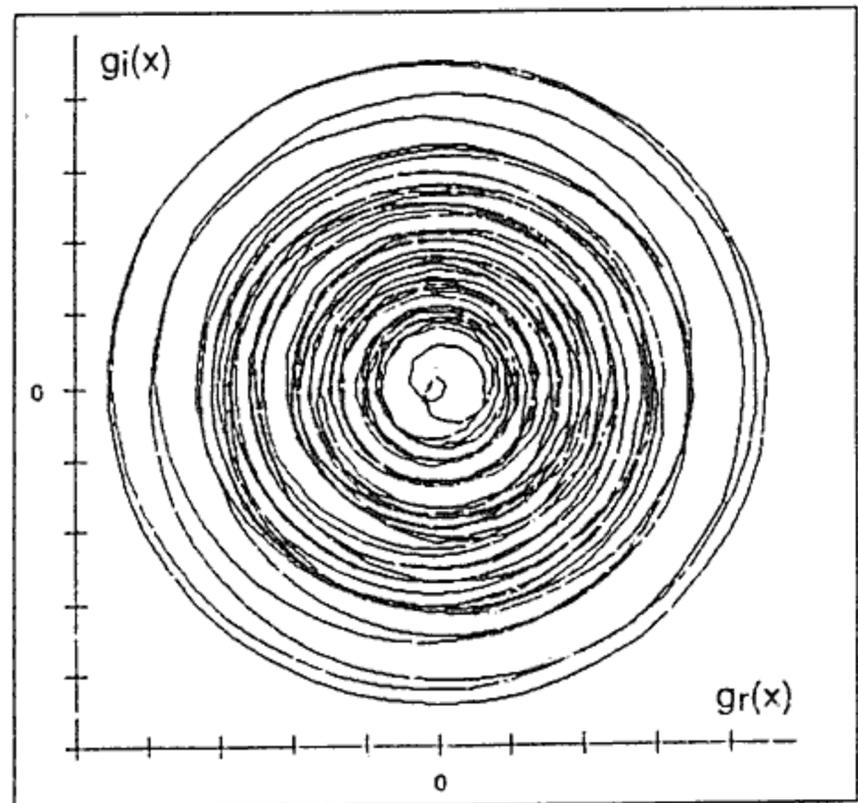


Bild 4: Verlauf des komplexen Dopplersignalzeigers  $g(x)$  bei Bewegung des Sensors

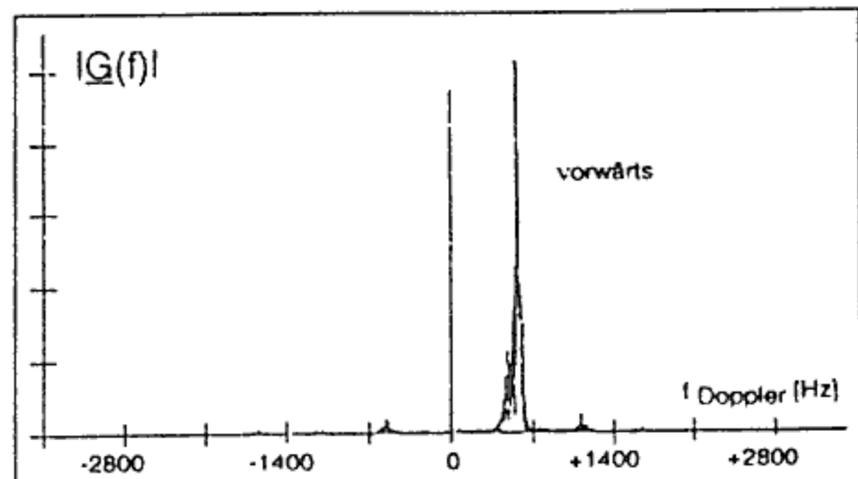


Bild 5: Dopplerspektrum  $|G(f)|$  für Bewegung vorwärts

## Praktische Versuche

Unterschiedliche Dopplersensoren sind im Labor wie auch bei Meßfahrten im Kraftfahrzeug getestet worden. Im Laborversuch konnte die durch Simulation vorausgesagte Abhängigkeit der Meßgenauigkeit vom Verhältnis Wellenlänge zu Auswertestrecke nachgewiesen werden. Hierzu wurden nacheinander Ultraschallsensoren mit 200 kHz und 80 kHz sowie ein Mikrowellensystem mit 24 GHz über einem mit Streugut belegten Drehteller plaziert. Der Meßwert für die Geschwindigkeit wird aus dem Dopplersignal bei allen verglichenen Sensoren durch

eine Nullstellenauswertung gewonnen. Der statistische Meßfehler wurde für mehrere konstante Geschwindigkeiten durch Berechnung der relativen Standardabweichung von 50 Meßwerten bestimmt und gegen die in einer Sekunde zurückgelegte Wegstrecke aufgetragen. Das Ergebnis ist in Bild 6 zu sehen. Bei gleicher Auswertung liefern die Ultraschallsensoren insbesondere bei Auswertestrecken unter 0,1 Meter deutlich kleinere Fehler. Bei kleinen Geschwindigkeiten darf nur eine kurze Wegstrecke ausgewertet werden, da sonst innerhalb des Auswertintervalls zu große Geschwindigkeitsänderungen durch Beschleunigung des Fahrzeugs möglich sind. Aufgrund kleinerer Wellenlänge liefert der Ultraschall deutlich mehr Dopplerschwingungszüge pro Wegstrecke als die Mikrowelle. Das Resultat ist ein kleinerer Meßfehler.

Zur praktischen Erprobung wurden außerdem verschiedene Dopplersensoren am Fahrzeug montiert (Bild 7/8). Während der Fahrt zeichnet ein DAT-Rekorder Real- und Imaginärteil des komplexen Dopplersignals auf. Die Signalauswertung wird nachträglich im Labor wie oben beschrieben durchgeführt. Folgende Sensoren wurden getestet:

- 1) 10 GHz Hohlleitermodul, Mitsubishi Typ FO-DP-12K(F)
- 2) 24 GHz Planarer Sensor in Microstriptechnik [4]
- 3) 200 kHz Ultraschallsensor [3]

Der Vergleich der Resultate bestätigt die durch Simulation vorhergesagten Werte auch im Kfz-Einsatz. Die Auswertung der gemessenen Dopplersignale liefert für die Mikrowellensensoren einen statistischen Fehler von etwa 2% für 10 GHz und 1,3% für 24 GHz bei 1 Meter ausgewerteter Wegstrecke. Unter gleichen Bedingungen liegt die Standardabweichung des 200 kHz Ultraschallsystems bei etwa 0,5%.

Für Fahrgeschwindigkeiten größer als 30km/h ist Ultraschall jedoch nur eingeschränkt tauglich. Da die Voraussetzung  $v \ll c$  nicht mehr erfüllt ist, machen sich Effekte des Ausbreitungsmediums auf die Ausbreitung des Ultraschalls bemerkbar (z.B. Fahrtwind, Wirbelbildung). Auch bei kleiner Fahrgeschwindigkeit kann das Dopplersignal durch Bewegung des Mediums beeinflusst werden. Dies äußert sich in Fluktuationen des komplexen Zeigers und führt zur Verbreiterung des Dopplerspektrums. Die Meßgenauigkeit wird erst dann signifikant beeinträchtigt, wenn die Windgeschwindigkeit in die Größenordnung der Fahrgeschwindigkeit kommt. In einem Laborversuch wurde gezeigt, daß dies in der Regel nicht der Fall ist [3]. Mikrowellensensoren hingegen sind prädestiniert zur Messung hoher Geschwindigkeiten, da eine Beeinflussung durch das Medium Luft praktisch nicht existiert.

Die Messung im Kfz kann darüberhinaus durch Fahrwerksbewegungen (beispielsweise Nickwinkeländerungen) gestört werden. Der Nickwinkel des Fahrzeugs geht nach (Gl.1) in die Dopplerfrequenz ein. Zur Kompensation dieses Effektes wird eine sogenannte "Janus-

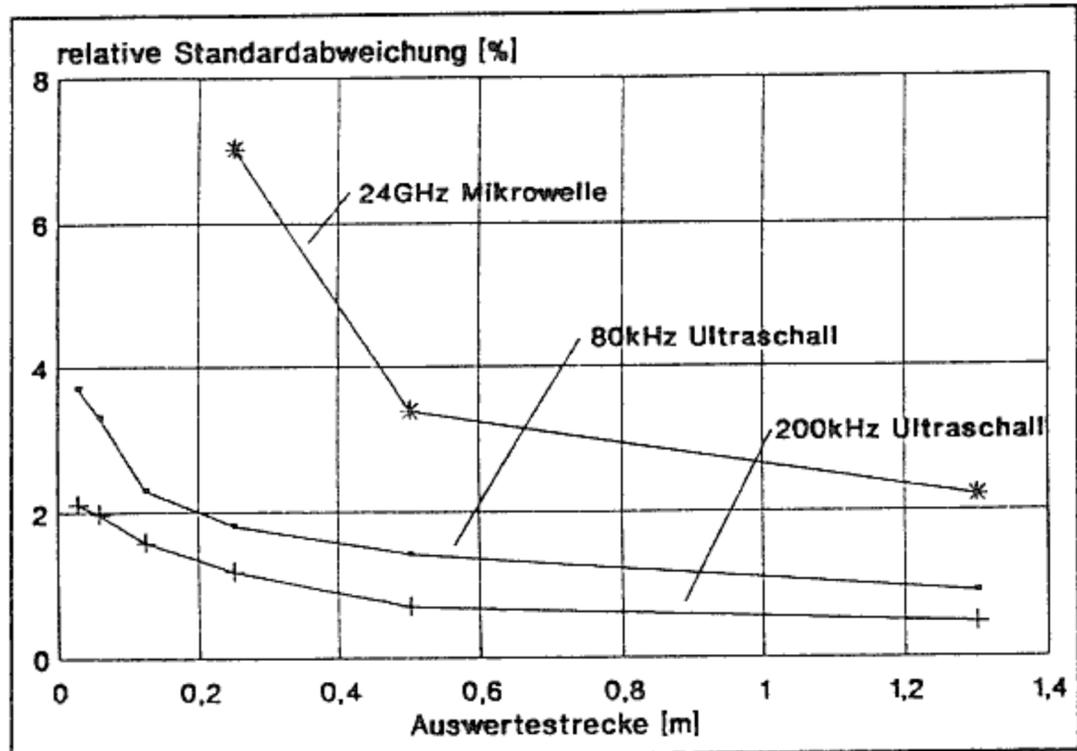


Bild 6: Relative Standardabweichung von 50 Geschwindigkeitsmeßwerten bezogen auf den Mittelwert (Nullstellenauswertung) in Abhängigkeit der Auswertestrecke. Vergleich des Meßfehlers für Ultraschall- und Mikrowellen-Dopplersensoren

Antenne" eingesetzt. Diese besitzt zwei Strahlungskeulen, von denen eine in Vorwärts-, die andere in Rückwärtsrichtung zeigt. Nickwinkelauslenkungen führen zu einer Dopplerfrequenzänderung mit unterschiedlichem Vorzeichen in den Signalanteilen beider Abstrahlrichtungen. Mit Hilfe der komplexen Auswertung können diese Anteile getrennt werden. Durch geeignete Signalverarbeitung beider Komponenten wird der Nickwinkeleffekt kompensiert.

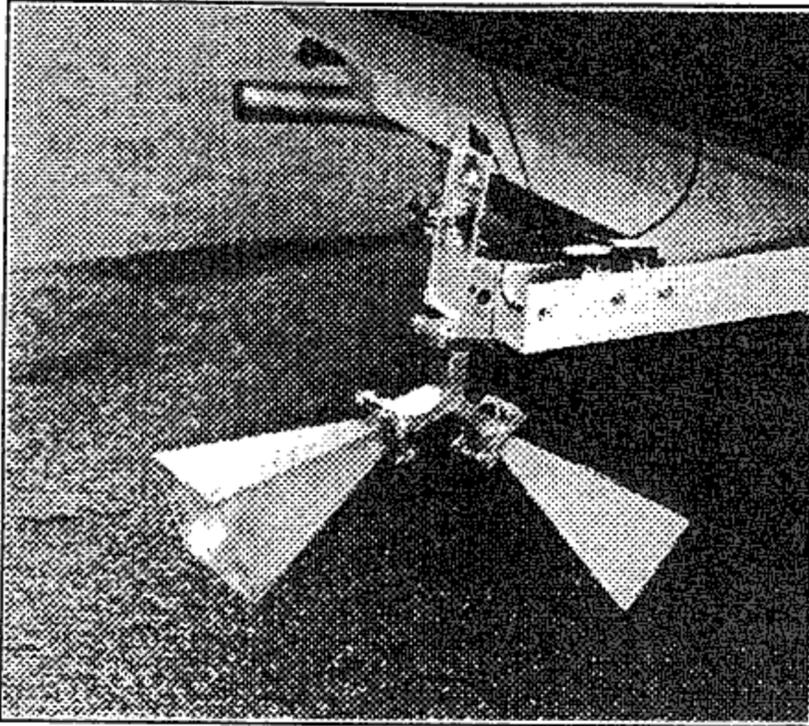


Bild 7: Am Kfz montierter 10 GHz-Janus-Mikrowellensensor

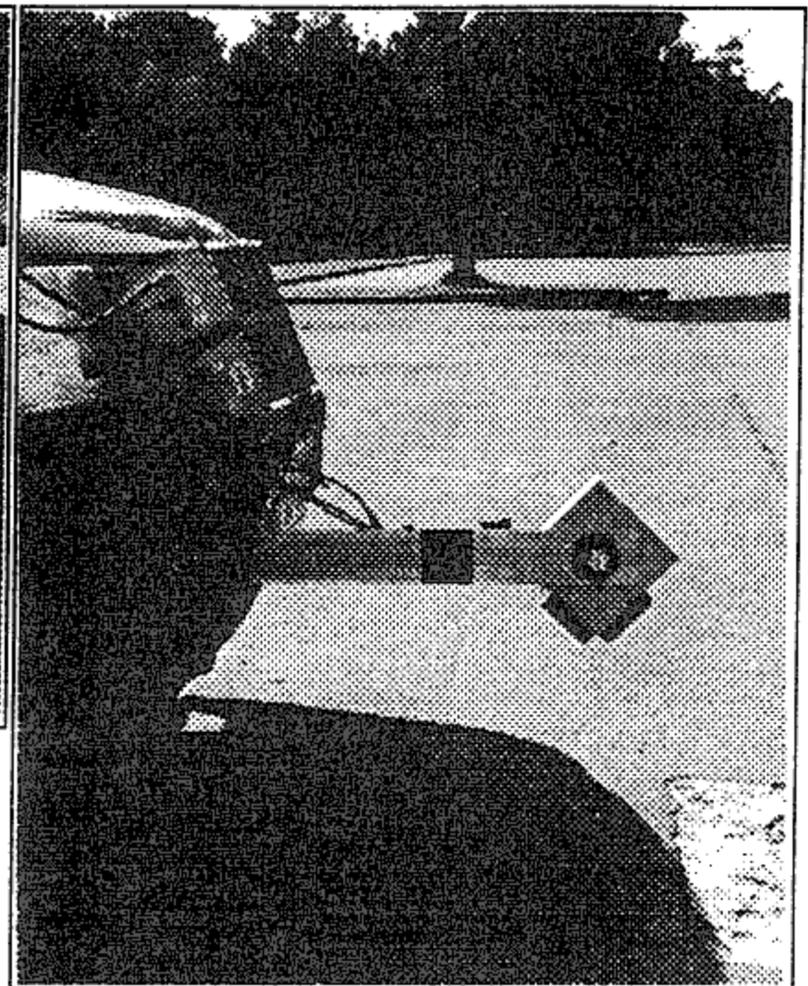


Bild 8: Am Kfz montierter 200 kHz-Janus-Ultraschallsensor

### Resümee:

Die Genauigkeit der Mikrowellensensoren ist für kleine Geschwindigkeiten durch die relativ große Wellenlänge beschränkt. Solange die Fahrgeschwindigkeit viel kleiner als die Schallausbreitungsgeschwindigkeit bleibt, stellt Ultraschall nicht nur eine preisgünstige Alternative zur Mikrowelle dar, sondern liefert eine tatsächliche Verbesserung der Meßgenauigkeit. Betriebszustände, die den Einsatz von Ultraschall behindern, können erkannt und eventuell durch Vergleichsmessung mit Ultraschall und Mikrowelle korrigiert werden. Für mittlere Geschwindigkeiten werden beide Systeme zur Steigerung der Zuverlässigkeit des Meßverfahrens parallel eingesetzt.

### Literaturangaben:

- [1] Schuck, W.D.: Der Einfluß des Antennendiagramms von Doppler-Radar-Geräten auf die Eigengeschwindigkeitsmessung von Fahrzeugen. Frequenz 38 7/8 (1984)
- [2] Kleinschmidt, P.; Mágori, V.: Ultrasonic remote sensors for noncontact object detection. Siemens Forschungs- und Entwicklungsbericht Bd.19 Nr.2, Springer-Verlag (1981)
- [3] Heide, P.: Vergleichende Untersuchungen zur Messung der Geschwindigkeit über Grund mit Ultraschall und Mikrowellen. Diplomarbeit am Institut für Nachrichtenverarbeitung, U-GH-Siegen (1991)
- [4] Kehrbeck, J.; Heidrich, E.; Lebherz, M.; Wiesbeck, W.: Planarer Doppler-Radar-Sensor bei 24 GHz. MIOP'90 Conf.Proc. (1990)

R. Schubert has started up his own business in Berlin in January 2002 and can currently be contacted at:

fon: +49 30 / 6120 1336

mobile: +49 0172 / 3235121

[www.schubertconsulting.de](http://www.schubertconsulting.de)

[rs@schubertconsulting.de](mailto:rs@schubertconsulting.de)

Further material relating to non-contact sensing and microwave measurement can be found in the publication list (papers: 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 18):

[http://www.stereoscopicsscanning.de/Portrait/portrait\\_links.html](http://www.stereoscopicsscanning.de/Portrait/portrait_links.html)

Some of the papers are available online others are available upon request.