

Weg- und Geschwindigkeitsmessung mittels Ultraschall- Dopplerverschiebung, vorzugsweise für landwirtschaftliche Fahrzeuge

Von Wolfgang Thelen und Alfred Neher, Berlin*)

DK 631.372:629.1.053.2:534.17

In vielen Bereichen der Technik, insbesondere der Fahrzeugtechnik, ist es notwendig, Wege und Verrückungen berührungslos und ohne äußere Bezugspunkte zu messen.

Mit diesem Beitrag wird ein Meßsystem vorgestellt, das mit dem Dopplereffekt arbeitet und gestattet, den zurückgelegten Weg, die Relativgeschwindigkeit und Beschleunigung zwischen der Meßsensorik und einer Reflexionsfläche berührungslos zu messen. Dabei bewegt sich das Meßsystem über die Reflexionsfläche hinweg und nicht auf diese zu. Das zugrundeliegende Meßprinzip ist universell einsetzbar; der entwickelte Prototyp wurde für den Einsatz am landwirtschaftlichen Fahrzeug ausgelegt. Bei Messungen mit Hilfe eines Förderbandes im Labor, auf einer Eisenbahnstrecke und am landwirtschaftlichen Fahrzeug konnte gezeigt werden, daß mit dem System Wegmessungen mit weniger als 1 % Fehler erreichbar sind. In Laborversuchen konnten am Förderband Fehlergrenzen von 0,1 % deutlich unterschritten werden.

1. Das Meßprinzip

Die Meßsensorik, bestehend aus einem Ultraschallsender und -empfänger, ist über der Reflexionsfläche so angeordnet, daß die Strahlungsrichtung schräg gegen die Reflexionsfläche gerichtet ist, Bild 1.

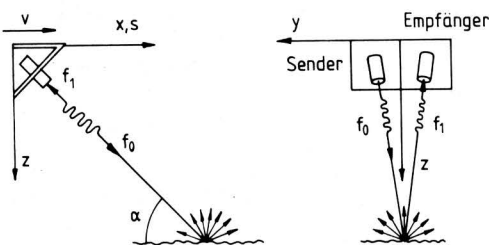


Bild 1. Anordnung der Meßsensorik über der Reflexionsfläche.

Das hochfrequente Ultraschall-Sendesignal f_0 wird unter dem Winkel α gegen die Reflexionsfläche gestrahlt. Besitzt die Reflexionsfläche eine Oberflächenrauigkeit R_h von mindestens der halben Schallwellenlänge λ

$$R_h \geq \frac{1}{2} \lambda = \frac{1}{2} \frac{c}{f_0},$$

*) Prof. Dr.-Ing. W. Thelen ist Professor für Meß- und Regelungstechnik am Institut für Meß- und Regelungstechnik der TU Berlin; Dr.-Ing. A. Neher war wissenschaftlicher Angestellter an diesem Institut und ist seit 1.4.1984 bei Daimler-Benz AG, Sindelfingen.

so werden die Schallwellen (Schallgeschwindigkeit c) nicht nach dem Snelliusschen Brechungsgesetz gespiegelt, sondern in alle Richtungen des Halbraums über der Reflexionsfläche zurückgestrahlt – also auch in Einstrahlrichtung.

Der in Einstrahlrichtung reflektierte Anteil gelangt auf den neben dem Sender angeordneten Empfänger. Besitzt die Sensorik die Relativgeschwindigkeit v gegenüber der Reflexionsfläche, so ist die Frequenz des Empfangssignals f_1 gegenüber der Sendefrequenz f_0 dopplerverschoben. Über die Frequenzdifferenz kann unter Zuhilfenahme der Dopplergleichung die Geschwindigkeit sowie der zurückgelegte Weg und die Beschleunigung ermittelt werden.

Die Dopplergleichung des Meßprinzips (Sender/Empfänger in Ruhe, Reflektor bewegt) lautet:

$$f_1 = f_0 \frac{c + v \cos \alpha}{c - v \cos \alpha}.$$

Sie stellt die Gleichung für die Doppler- oder Empfängerfrequenz f_1 dar und ist bei bekannten Werten von Sendefrequenz f_0 , Schallgeschwindigkeit c und Anstellwinkel α eine Berechnungsgleichung für die Bewegungsgeschwindigkeit v .

Für die praktische Anwendung ist es sinnvoll, die Differenz zwischen der Dopplerfrequenz und der Sendefrequenz zu bilden

$$f_d = f_1 - f_0 = 2 f_0 \frac{v \cos \alpha}{c - v \cos \alpha} \quad (1).$$

f_d ist in erster Näherung ($c \gg v \cos \alpha$) der Geschwindigkeit proportional, womit sich die für die meisten Anwendungsfälle ausreichende vereinfachte Geschwindigkeitsgleichung ergibt:

$$f_d = f_1 - f_0 \approx 2 \frac{f_0}{c} v \cos \alpha \quad (2)$$

$$v = \frac{1}{2} \frac{c}{f_0} \frac{1}{\cos \alpha} f_d.$$

Die Differenzfrequenz f_d ist, wie Gl. (2) zeigt, ein Maß für die Geschwindigkeit. Werden nun nicht, wie bei der Frequenzmessung, die Flanken des Signals je Zeiteinheit gezählt, sondern die Flankenzahl absolut aufaddiert, so kommt dies einer schrittweisen Integration gleich, d.h. diese Flankenzahl N ist ein Maß für den zurückgelegten Weg. Die Integration von Gl. (2) über eine Periodendauer $T_d = 1/f_d$ der Frequenz f_d zeigt, daß der je Periodendauer zurückgelegte Weg

$$\Delta s = T_d \int \frac{ds}{dt} dt$$

unabhängig von Frequenz und Geschwindigkeit ist. Der zurückgelegte Weg berechnet sich gemäß

$$s = N \int_{T_d} v dt = \frac{c}{2 f_0 \cos \alpha} N \quad (3).$$

2. Einflußgrößen Sendefrequenz, Schallgeschwindigkeit und Anstellwinkel

In die Dopplergleichung gehen außer der Bewegungsgeschwindigkeit noch andere Größen ein, die die mit dem Meßsystem erreichbare Genauigkeit nachhaltig beeinflussen.

Unproblematisch ist die Sendefrequenz, denn sie kann entweder ausreichend konstant gehalten oder bei variabler Grundfrequenz hinreichend genau bestimmt werden.

Die Luftschallgeschwindigkeit ist stark abhängig von der Temperatur, etwas weniger von der Feuchte. Sie ändert sich bei Temperaturänderung um ca. 0,2 %/K und bei 0 °C um ca. 0,1 % bei einer Zunahme der relativen Feuchte von 0 % auf 100 %, **Bild 2**.

Aus den angegebenen Werten ist ersichtlich, daß die Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit auf jeden Fall in die Messung mit einzubeziehen ist.

Die Luftfeuchtigkeit ist nur dann zu berücksichtigen, wenn die geforderte Genauigkeit weniger als 0,1 % Abweichung zuläßt und große Feuchteänderungen auftreten können. In solchen Fällen ist jedoch ohnehin die direkte Messung der Schallgeschwindigkeit angeraten.

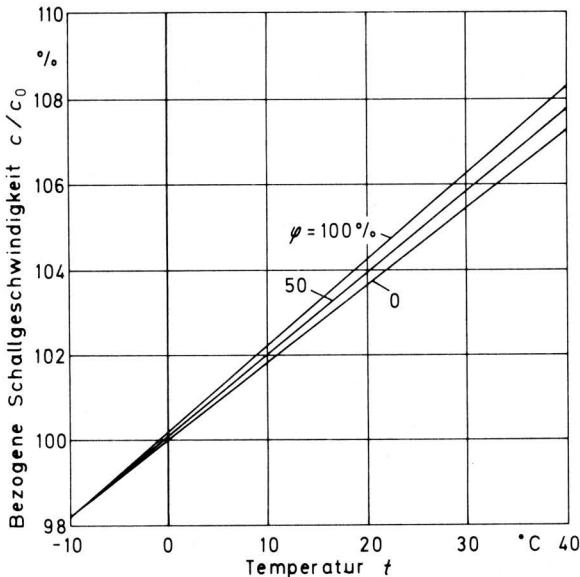


Bild 2. Relative Schallgeschwindigkeit (Bezugswert c_0 für 0 °C und 0 % Feuchte) in Abhängigkeit von der Temperatur, Luftfeuchte als Parameter.

Der wohl wichtigste Faktor ist der Anstellwinkel α . Er wird durch die Positionierung der Sensorik zur Reflexionsfläche vorgegeben und kann so lange ohne Schwierigkeiten in die Berechnung der Meßgröße aus der Dopplerfrequenz einbezogen werden, wie keine dynamischen Nickbewegungen auftreten, die meßtechnisch nicht oder nur sehr schwer erfassbar wären. Mit derartigen Bewegungen ist aber zu rechnen, wenn das Meßsystem an Fahrzeugen eingesetzt wird, die unebene Fahrbahnen befahren. Durch die Verwendung eines zweiten Systems, das in entgegengesetzter Richtung arbeitet und winkelfest mit dem ersten verbunden ist, **Bild 3**, kann der Winkeleinfluß wesentlich verringert werden.

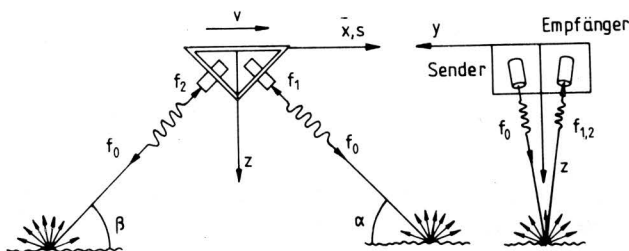


Bild 3. Anordnung einer zweikanaligen Meßsensorik.

Kommt es bei dieser Anordnung durch eine Nickbewegung zu einer Änderung um $\Delta\alpha$, so hat dies eine gleichgroße, aber entgegengesetzt gerichtete Änderung des Winkels β zur Folge. Durch die nahezu lineare Abhängigkeit der Differenzfrequenzen f_{d1} und f_{d2} vom Kosinus der Anstellwinkel α bzw. β verringert sich der Winkeleinfluß wesentlich, wenn zur Auswertung die beiden Differenzfrequenzen addiert werden, **Bild 4**. Es ist mit

$$f_{d1} = 2 \frac{f_0}{c} v \cos \alpha \quad \text{und}$$

$$f_{d2} = 2 \frac{f_0}{c} v \cos \beta,$$

den geschwindigkeitsproportionalen Differenzfrequenzen in bzw. entgegen der Bewegungsrichtung, die Geschwindigkeitsgleichung für ein zweikanaliges System:

$$f_D = f_{d1} + f_{d2} = f_1 - f_2$$

$$f_D = 2 \frac{f_0}{c} v (\cos \alpha + \cos \beta) \quad (4).$$

Daß sich durch die Verwendung und beschriebene additive Kombination von zwei Systemen auch die Auflösung verdoppelt, ohne daß die Auswertung kompliziert wird, ist ein weiterer Vorteil der zweikanaligen Sensorik, der anhand folgender Beziehungen ersichtlich wird:

$$f_{d1} = f_1 - f_0, \quad f_{d2} = f_0 - f_2$$

$$f_D = f_1 - f_2 = f_{d1} + f_{d2} \approx 2 f_d.$$

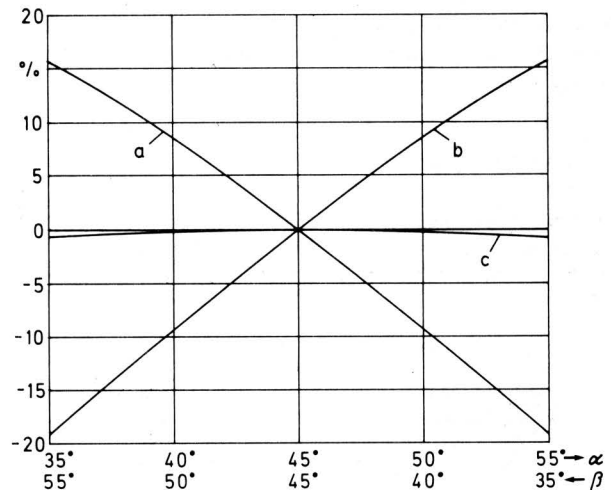


Bild 4. Relativer Fehler der Ultraschallgeschwindigkeitsmessung in Abhängigkeit vom Einstrahlwinkel (Sollwert: $\alpha_0 = \beta_0 = 45^\circ$).

- a vorwärtsmessend mit Einstrahlwinkel α
- b rückwärtsmessend mit Einstrahlwinkel β
- c zweikanalig messend mit den Einstrahlwinkeln α und β

3. Aufbau eines Versuchsmodells

Exemplarisch wurde ein Meßsystem (Prototyp I) entwickelt, **Bild 5**, das, für den Einsatz am landwirtschaftlichen Fahrzeug ausgelegt, die Möglichkeit bietet, an einer Reflexionsfläche mit einer Rauigkeit $R_h > 1,5$ mm den zurückgelegten Weg und die Geschwindigkeit mit Abweichungen von etwa $\pm 1\%$ vom Sollwert zu messen (unter günstigen Bedingungen konnte sogar die 1‰-Marke unterschritten werden).

Zur Schallabstrahlung wurden spezielle Ultraschallwandler in Langevinscher Bauart entwickelt, die sich durch ihre kolbenstrahlerähnlichen Strahlungseigenschaften und mechanische Robustheit auszeichnen. Das Meßsystem besteht aus zwei nebeneinander liegenden Aluminiumröhren, in denen die Ultraschallwandler untergebracht sind.

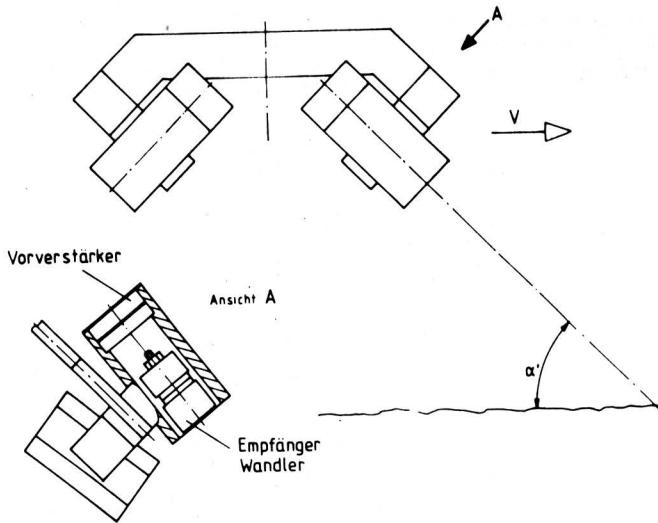


Bild 5. Aufbau (schematisch) des als zweikanalige Sensorik ausgeführten "Prototyps I".

Diese Röhren werden unter dem Anstellwinkel α zur Meßstrecke montiert. In der Röhre für den Empfänger befindet sich nicht nur der Wandler, sondern auch dicht dahinter der Vorverstärker.

Der Elektronikteil beinhaltet den über die Sendewandlertemperatur leistungsgesteuerten Senderteil und hochselektive Verstärker, die das Empfangssignal im μV -Bereich für die digitale Weiterverarbeitung aufbereiten. Für die Frequenzsubtraktion stehen zwei Varianten zur Verfügung: ein digital arbeitender Ringzählerdemodulator mit der Differenzfrequenz f_d als Ausgangssignal und eine Mikrocomputerversion, die die Möglichkeit der Schallgeschwindigkeitskorrektur beinhaltet und das Ergebnis direkt in m bzw. m/s anzeigt. Beide Verfahren haben gemeinsam, daß keine Fehler durch Schaltvorgänge die Ergebnisse beeinträchtigen – wie bei der konventionellen Frequenzmessung mit einer Torschaltung – und daß sowohl Stillstand wie Fahrtrichtung detektiert werden.

Zur Überprüfung der Meßgenauigkeit wurden Versuche im Labor (am Förderband), an der Bodenrinne, auf einer Eisenbahngleisstrecke und am landwirtschaftlichen Fahrzeug durchgeführt, wobei sowohl der Absolutfehler als auch die Reproduzierbarkeit (Standardabweichung) ermittelt wurden. Als Beispiel ist in Bild 6 der relative Fehler als Funktion der Fahrgeschwindigkeit für Versuche in der Bodenrinne wiedergegeben.

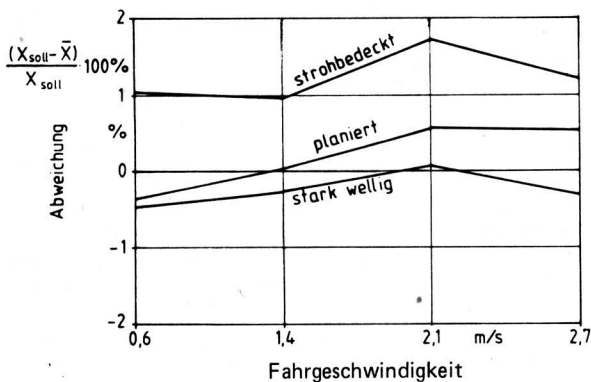


Bild 6. Relativer Fehler der Geschwindigkeitsmessung bei Versuchen mit Prototyp I auf verschiedenen Oberflächen in der Bodenrinne.

4. Anwendungsbeispiele

Der Prototyp I wurde zur Schlupfmessung am landwirtschaftlichen Fahrzeug entwickelt, Bild 7, ist aber auch in anderen Bereichen einsetzbar, wenn seine Abmessungen es zulassen und die geforderte Mindestrauhigkeit gewährleistet ist, z.B. als Bandwächter an Förderbändern oder an Schienenfahrzeugen. Bei geeigneter Wahl von Frequenz und Abmessungen ist der Einsatz des Meßprinzips zur Weg- und Geschwindigkeitsmessung, einschließlich Querabdrift, an Fahrzeugen aller Art ebenso möglich wie der Einsatz in geschlossenen Räumen (Hochregallager, Fertigungsbänder, Walzstraßen). Weitere Anwendungen könnten die Bestimmung der Strömungszustände der Oberflächen von Wasserläufen und Gerinnen oder bei anderer Zielrichtung der Auswertung die Beurteilung von Oberflächen sein. Werden zwei Systeme an einem Fahrzeug angebracht (rechts und links), so sind nicht nur der zurückgelegte Weg und die Geschwindigkeit sehr genau meßbar, sondern auch die Fahrtrichtung ist bestimmbar, so daß die Steuerung des Fahrzeugs auf einer vorgegebenen Bahn möglich wird.

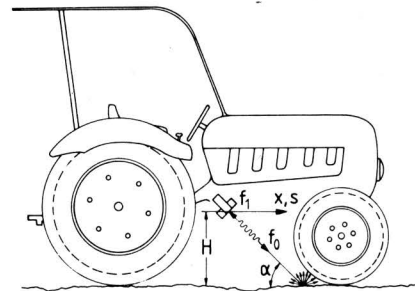


Bild 7. Anordnung der Ultraschallsensorik am Ackerschlepper.

5. Zusammenfassung

Das hier vorgestellte Ultraschallmeßverfahren erwies sich als durchaus konkurrenzfähig mit Meßsystemen, die zum Beispiel mit Mikrowellen arbeiten und ebenfalls den Dopplereffekt ausnutzen. Für viele Anwendungszwecke ist die Ultraschallsensorik den Mikrowellengeräten, die zwar weniger Elektronik für die Frequenzsubtraktion benötigen, aber meist mit teuren Antennen ausgestattet sind, überlegen: Angeführt seien hier nur die Erkennung der Fahrtrichtung und des Stillstandes, was bei den Mikrowellengeräten nur sehr schwer möglich ist, oder die höhere Auflösung durch die geringere Wellenlänge im Vergleich mit den zugelassenen Mikrowellenfrequenzen, die von der Beschaffenheit der Reflexionsflächen unabhängiger macht. Bei Geschwindigkeiten im Bereich von 1 m/s ist zudem bei Systemen mit elektromagnetischen Wellen (Radar, μ -Wellen, Laser) ein durch die Inkonstanz der Frequenzen bedingter Grenzwert des Meßfehlers gegeben.

Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [1] •Bergmann, L.: Der Ultraschall. Stuttgart: S. Hirzel 1954.
- [2] Gallego, J.A. u. . Juarez: Ultrasonic transducer for high-power applications in gases. Ultrasonic 1978.
- [3] Hulst, A.P.: On a Family of High-Power-Transducers. Ultrasonics International 1973, Conference Proceedings.
- [4] •Skudrzyk, E.: Die Grundlagen der Akustik. Wien: Springer 1954.
- [5] •Weast, R.C. (Hrsg.): CRG Handbook of Chemistry and Physics. 58th Edition 1977/1978.