



SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT
BUNDESAMT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

⑪ CH 668 839 A5

⑤① Int. Cl. 4: G 01 P 5/18
G 01 F 1/708

Erfindungspatent für die Schweiz und Liechtenstein
Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

⑫ **PATENTSCHRIFT** A5

⑫① Gesuchsnummer: 546/86

⑫② Anmeldungsdatum: 11.02.1986

⑫③ Priorität(en): 11.02.1985 DE 3504622

⑫④ Patent erteilt: 31.01.1989

⑫⑤ Patentschrift
veröffentlicht: 31.01.1989

⑦③ Inhaber:
Endress u. Hauser GmbH & Co., Maulburg (DE)

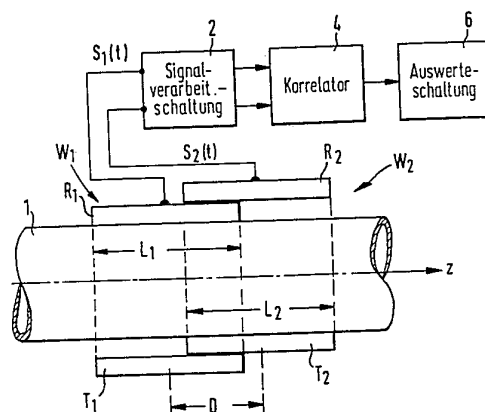
⑦② Erfinder:
Braun, Hans, Karlsruhe (DE)
Schneider, Georg, Stutensee-Spöck (DE)

⑦④ Vertreter:
Scheidegger, Zwicky, Werner & Co., Zürich

⑤④ **Anordnung zur berührungslosen Messung der Geschwindigkeit eines bewegten Mediums.**

⑤⑦ Die Anordnung zur berührungslosen Messung der Geschwindigkeit eines bewegten Mediums enthält zwei Wandler (W_1 , W_2), die elektrische Signale ($S_1(t)$, $S_2(t)$) liefern, in die Inhomogenitäten des bewegten Mediums, abhängig von ihrer räumlichen Position, nach unterschiedlichen räumlichen Gewichtsfunktionen eingehen. Die Erfassungsbereiche der beiden Wandler (W_1 , W_2) sind in der Bewegungsrichtung (Z) des Mediums gegeneinander versetzt, sie überlappen sich aber teilweise derart, dass der Gradient der räumlichen Kreuzkorrelationsfunktion bei der räumlichen Verschiebung Null vom Nullvektor verschieden ist. Ein Korrelator (4) bildet die zeitliche Kreuzkorrelationsfunktion der beiden Signale ($S_1(t)$, $S_2(t)$), und eine Auswerteschaltung (6) leitet den Messwert für die Geschwindigkeit des bewegten Mediums aus der Steigung der zeitlichen Kreuzkorrelationsfunktion bei der zeitlichen Verschiebung Null ab. Als Alternative kann der Messwert auch aus dem ersten Moment des Kreuzleistungsdichtespektrums der beiden Signale ($S_1(t)$, $S_2(t)$) abgeleitet werden, da dieses der Steigung der zeitlichen Kreuzkorrela-

tionsfunktion der beiden Signale ($S_1(t)$, $S_2(t)$) bei der zeitlichen Verschiebung Null mathematisch äquivalent ist.



PATENTANSPRÜCHE

1. Anordnung zur berührungslosen Messung der Geschwindigkeit eines bewegten Mediums mit zwei Wandlern, deren Erfassungsbereiche in der Bewegungsrichtung des Mediums gegeneinander versetzt sind und die elektrischen Signale liefern, in die Inhomogenitäten des bewegten Mediums, abhängig von ihrer räumlichen Position, nach unterschiedlichen räumlichen Gewichtungsfunktionen eingehen, und mit einer Einrichtung zur Gewinnung des Messwertes durch korrelative Verknüpfung der beiden Signale, dadurch gekennzeichnet, dass sich die Erfassungsbereiche der beiden Wandler (W_1 , W_2) derart teilweise überlappen, dass der Gradient der räumlichen Kreuzkorrelationsfunktion ($\Phi_{12}(u)$) der räumlichen Gewichtungsfunktionen ($g_1(z)$, $g_2(z)$) bei der räumlichen Verschiebung Null vom Nullvektor verschieden ist, und dass der Messwert aus der Steigung der zeitlichen Kreuzkorrelationsfunktion ($R_{12}(\tau)$) der beiden Signale ($S_1(t)$, $S_2(t)$) bei der zeitlichen Verschiebung Null oder aus dem ersten Moment des Kreuzleistungsdichtespektrums der beiden Signale ($S_1(t)$, $S_2(t)$) abgeleitet wird.

2. Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die beiden Wandler (11, 12; 13, 14) mit sich kreuzenden Achsen ausgebildet und mit gegenseitiger Überlappung in der Bewegungsrichtung gegeneinander versetzt angeordnet sind.

3. Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass jeder Wandler (W_1 , W_2) aus mehreren entlang der Bewegungsrichtung angeordneten Wandlerelementen (21 bis 25; 31 bis 35) besteht, und dass zur Schaffung sich überlappender Erfassungsbereiche Wandlerelemente (24, 25; 31, 32) der beiden Wandler miteinander verschachtelt sind.

4. Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die sich überlappenden Erfassungsbereiche der beiden Wandler (W_1 , W_2) durch unterschiedliche Zusammenfassung der Ausgangssignale mehrerer entlang der Bewegungsrichtung angeordneter Wandlerelemente (41 bis 48) realisiert sind.

BESCHREIBUNG

Die Erfindung bezieht sich auf eine Anordnung zur berührungslosen Messung der Geschwindigkeit eines bewegten Mediums mit zwei Wandlern, deren Erfassungsbereiche in der Bewegungsrichtung des Mediums gegeneinander versetzt sind und die elektrische Signale liefern, in die Inhomogenitäten des bewegten Mediums, abhängig von ihrer räumlichen Position, nach unterschiedlichen räumlichen Gewichtungsfunktionen eingehen, und mit einer Einrichtung zur Gewinnung des Messwertes durch korrelative Verknüpfung der beiden Signale.

Bei bekannten Messanordnungen dieser Art wird die dem Maximum der zeitlichen Korrelationsfunktion der Ausgangssignale der beiden Wandler entsprechende Verschiebungszeit ermittelt, die gleich der Laufzeit der Inhomogenitäten des Mediums vom ersten zum zweiten Wandler ist. Bei bekanntem Abstand der Wandler kann man aus der Laufzeit die zu messende Geschwindigkeit ableiten. Dieses Messverfahren ist in vielen Anwendungsfällen mit Unsicherheiten behaftet, weil das Messergebnis vom Strömungsprofil abhängig ist, und weil das Maximum der Kreuzkorrelationsfunktion oft wenig ausgeprägt ist, so dass der Ort des Maximums nicht genau bestimmt werden kann. Andere berührungslose Messverfahren lassen die Strömungsrichtung nicht erkennen und ergeben keine verwertbare Anzeige bei der Geschwindigkeit Null und bei sehr kleinen Geschwindigkeiten.

Aufgabe der Erfindung ist die Schaffung einer Messanordnung der eingangs angegebenen Art, die bei allen Geschwindigkeiten ein vom Strömungsprofil unabhängiges genaues Messergebnis liefert und deren Messbereich auch die Geschwindigkeit Null, sehr kleine Geschwindigkeiten um die Umkehr der Bewegungsrichtung einschliesst.

Nach der Erfindung wird diese Aufgabe dadurch gelöst, dass sich die Erfassungsbereiche der beiden Wandler derart teilweise überlappen, dass der Gradient der räumlichen Kreuzkorrelationsfunktion der räumlichen Gewichtungsfunktionen bei der räumlichen Verschiebung Null vom Nullvektor verschieden ist, und dass der Messwert aus der Steigung der zeitlichen Kreuzkorrelationsfunktion der beiden Signale bei der zeitlichen Verschiebung Null oder aus dem ersten Moment des Kreuzleistungsdichtespektrums der beiden Signale abgeleitet wird.

Die Erfindung beruht auf der Erkenntnis, dass unter bestimmten Voraussetzungen nicht nur die Lage des Maximums der zeitlichen Kreuzkorrelationsfunktion, sondern auch deren Steigung bei der zeitlichen Verschiebung Null ein Mass für die Geschwindigkeit des bewegten Mediums liefert. Da dieser Messwert bei der zeitlichen Verschiebung Null ermittelt wird, stammt er von Inhomogenitäten, die sich am gleichen Ort befinden. Dadurch werden wesentliche Ursachen für Ungenauigkeiten bei der Geschwindigkeitsmessung beseitigt. Ferner ist die berührungslose korrelative Geschwindigkeitsmessung auch in Fällen möglich, in denen die auf der Ermittlung des Maximums der Kreuzkorrelationsfunktion beruhende Geschwindigkeitsmessung versagt. Insbesondere ist es möglich, auf Anlaufstrecken zu verzichten und beispielsweise eine Messstelle direkt hinter einem Krümmer anzubringen. Der Messbereich ist prinzipiell nicht eingeschränkt und schliesst insbesondere sehr langsame Bewegungen, Stillstand und Umkehr der Bewegungsrichtung ein.

Voraussetzung für die Anwendung dieses Messprinzips ist, dass Wandler verwendet werden, die ein Signalkaar erzeugen, bei dem ein nicht verschwindender Gradient in der statistischen Abhängigkeit der beiden zeitlich nicht verschobenen Signale existiert. Diese Bedingung ist erfüllt, wenn sich die Erfassungsbereiche der beiden Wandler derart teilweise überlappen, dass der Gradient der räumlichen Kreuzkorrelationsfunktion der räumlichen Gewichtungsfunktionen bei der räumlichen Verschiebung Null vom Nullvektor verschieden ist. Bei dieser Definition handelt es sich um eine unveränderliche, durch die Ausbildung der Wandler bestimmte geometrische Eigenschaft, die für jedes Wandlerpaar kennzeichnend ist.

Die Steigung der zeitlichen Kreuzkorrelationsfunktion von zwei Signalen bei der zeitlichen Verschiebung Null ist dem ersten Moment des Kreuzleistungsdichtespektrums dieser Signale mathematisch äquivalent. Es macht daher keinen Unterschied, ob man den einen oder den anderen Wert berechnet.

Vorteilhafte Ausgestaltungen und Weiterbildungen der Erfindung sind in den abhängigen Patentansprüchen gekennzeichnet.

Weitere Merkmale und Vorteile der Erfindung ergeben sich aus der folgenden Beschreibung von Ausführungsbeispielen, die in der Zeichnung dargestellt sind. In der Zeichnung zeigt:

Fig. 1 eine schematische Darstellung einer Messanordnung bekannter Art zur berührungslosen korrelativen Messung der Strömungsgeschwindigkeit in einer Rohrleitung,

Fig. 2 Diagramme von räumlichen Funktionen, die für den Aufbau der Messanordnung von Fig. 1 kennzeichnend sind, Fig. 3 Diagramme von zeitlichen Funktionen, die für die

Funktionsweise der Messanordnung von Fig. 1 kennzeichnend sind,

Fig. 4 eine das Prinzip der Erfindung verkörpernde abgeänderte Ausführungsform der Messanordnung von Fig. 1,

Fig. 5 die der Fig. 1 entsprechenden Diagramme von räumlichen Funktionen für die Messanordnung von Fig. 4,

Fig. 6 die der Fig. 3 entsprechenden Diagramme von zeitlichen Funktionen für die Messanordnung von Fig. 4,

Fig. 7 mehrere mit der gleichen Messanordnung nach der Erfindung für verschiedene Geschwindigkeiten aufgenommene zeitliche Kreuzkorrelationsfunktionen,

Fig. 8 eine optische Messanordnung nach der Erfindung,

Fig. 9 die Seitenansicht der optischen Messanordnung von Fig. 8,

Fig. 10 eine kapazitive Messanordnung nach der Erfindung,

Fig. 11 eine optische Messanordnung nach der Erfindung mit einem Photodiodenarray,

Fig. 12 eine Analogsignalverarbeitungsschaltung zur Gewinnung des Messwerts bei einer Messanordnung nach der Erfindung und

Fig. 13 eine Digitalsignalverarbeitungsschaltung zur Gewinnung des Messwerts bei einer Messanordnung nach der Erfindung.

Fig. 1 zeigt als Anwendungsbeispiel für die korrelative berührungslose Geschwindigkeitsmessung eine Messanordnung zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit eines Mediums, das sich mit der Geschwindigkeit v durch eine Rohrleitung 1 in der Richtung der Rohrleitungsachse z bewegt. An der Rohrleitung 1 sind in einem genau bekannten Mittenabstand D zwei Wandler W_1 und W_2 angeordnet, die elektrische Signale $S_1(t)$ bzw. $S_2(t)$ liefern, die durch Inhomogenitäten des bewegten Mediums beeinflusst werden. Je nach der Art und Beschaffenheit des bewegten Mediums können die nutzbaren Inhomogenitäten von sehr verschiedener Art sein, doch beruht ihre Wirkung letzten Endes immer darauf, dass sie entweder ein akustisches oder ein elektromagnetisches Feld beeinflussen oder erzeugen. Für die mit elektromagnetischen Feldern arbeitenden Verfahren kann das gesamte Spektrum vom elektrostatischen Feld über den Hochfrequenz- und Mikrowellenbereich und den optischen Bereich bis zur γ -Strahlung genutzt werden. Bei akustischen Feldern reicht der nutzbare Frequenzbereich von wenigen Kilohertz in Gasen bis zu 10 MHz oder mehr bei flüssigen Trägermedien.

Gewöhnlich besteht jeder Wandler aus einem Sender, der das von den Inhomogenitäten des Mediums zu beeinflussende Feld erzeugt, und aus einem Empfänger, der auf das von den Inhomogenitäten beeinflusste Feld anspricht und ein die zeitlichen Änderungen des Feldes wiedergebendes elektrisches Signal abgibt. So besteht in Fig. 1 der Wandler W_1 aus einem Sender T_1 und einem Empfänger R_1 , und der Wandler W_2 besteht aus einem Sender T_2 und einem Empfänger R_2 . Die Ausbildung der Sender und Empfänger, je nach der Art des ausgenutzten Feldes, ist dem Fachmann bekannt. So kann bei Anwendung eines im optischen Bereich liegenden elektrischen Feldes jeder Sender eine Lichtquelle und jeder Empfänger ein Photodetektor sein. Bei Anwendung eines im Ultraschallbereich liegenden akustischen Feldes ist jeder Sender ein Ultraschallerzeuger und jeder Empfänger ein Ultraschalldetektor. Kapazitive Sensoren bilden zugleich Sender und Empfänger für elektrostatische Felder usw.

Wenn die Inhomogenitäten aktiv sind und selbst ein nutzbares Feld erzeugen, können die Sender entfallen, so dass jeder Wandler nur aus einem Empfänger besteht. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn die Inhomogenitäten durch radio-

aktive Partikel gebildet sind, deren Strahlung von den Empfängern der Wandler aufgefangen und in ein elektrisches Signal umgewandelt wird.

Jede Inhomogenität des bewegten Mediums geht nach einer vorbestimmten räumlichen Gewichtungsfunktion in das Ausgangssignal eines Wandlers ein, wenn sie sich in dessen Erfassungsbereich befindet. Bei dem Anwendungsbeispiel von Fig. 1 ist der Erfassungsbereich des Wandlers W_1 ein Messvolumen, das in der Richtung der z -Achse die Länge L_1 und senkrecht zur z -Achse den Querschnitt der Rohrleitung 1 oder einen vom Wandler erfassten Teil dieses Querschnitts hat. In gleicher Weise ist der Erfassungsbereich des Wandlers W_2 ein Messvolumen mit der Länge L_2 und einem entsprechenden Querschnitt. Da man im allgemeinen daran interessiert ist, die über den Rohrquerschnitt gemittelte Geschwindigkeit zu erfassen, wird man die Wandler nach Möglichkeit so ausbilden, dass sie eine gleichmässige Gewichtung des Rohrquerschnitts realisieren.

Das Diagramm A von Fig. 2 zeigt in idealisierter Darstellung als Funktion der Koordinate z die räumliche Gewichtungsfunktion $g_1(z)$ des Wandlers W_1 , d.h. die Auswirkung einer punktförmigen Inhomogenität auf das Ausgangssignal des Wandlers W_1 in Abhängigkeit von ihrer räumlichen Position entlang der z -Achse. Wenn sich die punktförmige Inhomogenität ausserhalb des Erfassungsbereichs des Wandlers W_1 befindet, geht sie nicht in das Ausgangssignal $S_1(t)$ ein, und die räumliche Gewichtungsfunktion $g_1(z)$ hat den Wert 0. Wenn sich die punktförmige Inhomogenität im Erfassungsbereich des Wandlers W_1 befindet, geht sie dagegen mit einem vorbestimmten, von Null verschiedenen Wert in das Ausgangssignal $S_1(t)$ ein, so dass die räumliche Gewichtungsfunktion $g_1(z)$ für den gesamten Erfassungsbereich einen von Null verschiedenen Wert annimmt.

In entsprechender Weise zeigt das Diagramm B von Fig. 2 die räumliche Gewichtungsfunktion $g_2(z)$ des Wandlers W_2 . Wenn die beiden Wandler W_1 und W_2 gleich ausgebildet sind, hat die räumliche Gewichtungsfunktion $g_2(z)$ die gleiche Kurvenform wie die räumliche Gewichtungsfunktion $g_1(z)$, doch unterscheidet sie sich von dieser durch ihre andere Lage in bezug auf die Abszissenachse z . Entsprechend der Anordnung der Wandler in Fig. 1 sind die räumlichen Gewichtungsfunktionen $g_1(z)$ und $g_2(z)$ gegeneinander um den Betrag D versetzt, und zwischen ihnen besteht eine Lücke des Betrags E .

Das Diagramm C von Fig. 2 zeigt die räumliche Kreuzkorrelationsfunktion $\Phi_{12}(u)$ der räumlichen Gewichtungsfunktionen $g_1(z)$ und $g_2(z)$. Die räumliche Kreuzkorrelationsfunktion hat die mathematische Form.

$$\Phi_{12}(u) = \int_{-\infty}^{+\infty} g_2(z) g_1(z+u) dz \quad (1)$$

Sie bedeutet, dass die Werte der Gewichtungsfunktion $g_2(z)$ mit den um eine räumliche Verschiebung u verschobenen Werten der räumlichen Gewichtungsfunktion $g_1(z)$ multipliziert werden und der Mittelwert der Produkte über den ausgewerteten Bereich Z gebildet wird. Für jeden Wert der räumlichen Verschiebung u erhält man einen Stützwert der räumlichen Korrelationsfunktion. Die räumliche Verschiebung $z = 0$ entspricht der in den Diagrammen A und B dargestellten Ausgangslage der räumlichen Gewichtungsfunktionen, also der räumlichen Lage der Wandler W_1 und W_2 von Fig. 1, und zunehmende Werte von u entsprechen einer Verringerung der gegenseitigen Versetzung der miteinander korrelierten Werte der beiden räumlichen Gewichtungsfunktionen. Für $u = 0$ hat die Kreuzkorrelationsfunktion den Wert Null, da stets wenigstens einer der beiden miteinander multiplizierten Werte jedes Wertepaares Null ist. Bei $u = E$

beginnt die gegenseitige Überlappung der von Null verschiedenen Abschnitte der beiden Gewichtungsfunktionen, und die Kreuzkorrelationsfunktion steigt an. Für $u = D$ sind die beiden Gewichtungsfunktionen $g_1(z)$ und $g_2(z)$ kongruent, und die räumliche Kreuzkorrelationsfunktion erreicht ihr Maximum.

Sowohl die räumlichen Gewichtungsfunktionen $g_1(z)$, $g_2(z)$ als auch deren Kreuzkorrelationsfunktion $\Phi_{12}(u)$ sind unveränderliche Kenngrößen der Wandler W_1 und W_2 , die durch die Geometrie der Wandler bedingt und somit zu deren Charakterisierung geeignet sind.

Diese Charakterisierung der Wandler durch die räumlichen Gewichtungsfunktionen und die räumlichen Kreuzkorrelationsfunktion ist nicht auf den Fall beschränkt, dass der Erfassungsbereich jedes Wandlers ein Messvolumen ist. Sie gilt ebenso für den Fall, dass die zur Messung der Geschwindigkeit ausgenutzten Inhomogenitäten sich an der Oberfläche des bewegten Mediums befinden und die Wandler jeweils einen bestimmten Flächenbereich des Mediums abtasten. Dies ist beispielsweise bei der Messung der Geschwindigkeit von Papierbahnen, Textilbahnen oder Blechen in Walzstrassen der Fall. Der Erfassungsbereich jedes Wandlers ist dann kein Volumen, sondern ein Flächenbereich. Die zuvor angestellten Betrachtungen über die räumlichen Gewichtungsfunktionen und deren räumliche Korrelationsfunktion gelten uneingeschränkt auch für diesen Fall.

Die Diagramme A und B von Fig. 3 zeigen den zeitlichen Verlauf der Ausgangssignale $S_1(t)$ und $S_2(t)$ der Wandler W_1 , W_2 . Die Schwankungen dieser Signale stammen von den durch die Erfassungsbereiche der Wandler gehenden Inhomogenitäten des bewegten Mediums. Unter der Voraussetzung, dass diese Inhomogenitäten auf dem Weg vom ersten zum zweiten Wandler wenigstens teilweise bestehen bleiben, weisen die von ihnen verursachten Schwankungen der Ausgangssignale der beiden Wandler gewisse Ähnlichkeiten auf, die gegeneinander um eine Zeitspanne versetzt sind, die gleich der Laufzeit der Inhomogenität vom ersten zum zweiten Wandler ist. Diese Tatsache wird zur Geschwindigkeitsmessung durch korrelative Verknüpfung der beiden Signale ausgenutzt.

Das Diagramm C von Fig. 3 zeigt die zeitliche Kreuzkorrelationsfunktion $R_{12}(\tau)$ der beiden Signale $S_1(t)$ und $S_2(t)$. Die zeitliche Kreuzkorrelationsfunktion hat die mathematische Form

$$R_{12}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T S_2(t) S_1(t+\tau) dt \quad (2)$$

Sie bedeutet, dass die Augenblickswerte des Signals $S_2(t)$ mit den um eine Verschiebezeit τ verschobenen Augenblickswerten des Signals $S_1(t)$ multipliziert werden und der Mittelwert der Produkte über den Bereich der Beobachtungszeit T gebildet wird. Für jeden Wert von τ erhält man einen Stützwert der zeitlichen Kreuzkorrelationsfunktion. Bei dem betrachteten Anwendungsfall hat die Kreuzkorrelationsfunktion ein Maximum bei einer bestimmten Verschiebungszeit τ_m , die gleich der Laufzeit der Inhomogenitäten des Mediums vom Wandler W_1 zum Wandler W_2 ist, wenn also gilt:

$$\tau_m = \frac{D}{v} \quad (3)$$

Bei bekanntem Abstand D lässt sich aus der Verschiebungszeit τ_m unmittelbar die Geschwindigkeit v der Inhomogenitäten errechnen, die im Regelfall gleich der Geschwindigkeit des Mediums ist.

Zur Ermittlung der Kreuzkorrelationsfunktion werden die Signale $S_1(t)$ nach der erforderlichen Vorbehandlung in einer Signalverarbeitungsschaltung 2 einem Korrelator 4 zugeführt. Eine mit dem Korrelator 4 verbundene Auswerteschaltung 5 untersucht die Kreuzkorrelationsfunktion auf ein Maximum und gibt die der Laufzeit entsprechende Verschiebungszeit τ_m oder die daraus berechnete Geschwindigkeit v aus. Diese Schaltungen und ihre Funktionsweise sind bekannt. Vorzugsweise übernimmt ein geeignet programmierter Mikrocomputer die Funktionen des Korrelators 4 und der Auswerteschaltung 5. In diesem Fall enthält die Signalverarbeitungsschaltung 2 einen Analog/Digital-Wandler, der die analogen Ausgangssignale $S_1(t)$ und $S_2(t)$ in digitale Signale umwandelt, die für die Verarbeitung im Mikrocomputer geeignet sind.

Fig. 4 zeigt in einer der Fig. 1 entsprechenden schematischen Darstellung eine korrelative Geschwindigkeitsmessanordnung, die das der Erfindung zugrunde liegende Prinzip verkörpert. Für die der Anordnung von Fig. 1 entsprechenden Bestandteile und Abmessungen werden die gleichen Bezeichnungen wie dort verwendet. Der wesentliche Unterschied gegenüber der Anordnung von Fig. 1 besteht darin, dass sich die Erfassungsbereiche der beiden Wandler W_1 und W_2 teilweise überlappen. Dies muss durch eine entsprechende Ausbildung der Wandler erreicht werden, was bei der schematischen Darstellung von Fig. 1 dadurch angedeutet ist, dass sich auch die Sender T_1 , T_2 und die Empfänger R_1 , R_2 der beiden Wandler gegenseitig teilweise überlappen.

Die teilweise Überlappung der Erfassungsbereiche der Wandler W_1 , W_2 hat zur Folge, dass sich auch die in den Diagrammen A und B von Fig. 5 dargestellten räumlichen Gewichtungsfunktionen $g_1(z)$ und $g_2(z)$ um einen Betrag F teilweise überlappen. Demzufolge hat die im Diagramm C von Fig. 5 dargestellte räumliche Kreuzkorrelationsfunktion $\Phi_{12}(u)$ bei der räumlichen Verschiebung $u = 0$ einen von Null verschiedenen Wert und einen Gradienten, der vom Nullvektor verschieden ist. Die räumliche Kreuzkorrelationsfunktion nimmt den Wert Null erst bei einer negativen räumlichen Verschiebung $u = -F$ an, und sie erreicht ihr Maximum bei der positiven räumlichen Verschiebung $u = D$.

Die Diagramme A und B von Fig. 6 zeigen wieder den zeitlichen Verlauf der Signale $S_1(t)$ und $S_2(t)$, die von den Wandlern W_1 bzw. W_2 von Fig. 4 abgegeben werden. Diese Signale haben grundsätzlich die gleichen Eigenschaften wie die in Fig. 3 dargestellten Signale $S_1(t)$, $S_2(t)$ der Messanordnung von Fig. 1.

Dagegen unterscheidet sich die im Diagramm C von Fig. 6 dargestellte zeitliche Kreuzkorrelationsfunktion $R_{12}(\tau)$ der Signale $S_1(t)$ und $S_2(t)$ von derjenigen des Diagramms C von Fig. 3 dadurch, dass sie bei der Verschiebungszeit $\tau = 0$ einen von Null verschiedenen Wert und eine von Null verschiedene Steigung hat, die durch den Winkel α zwischen der Tangente an die zeitliche Kreuzkorrelationsfunktion im Schnittpunkt mit der im Punkt $\tau = 0$ errichteten Koordinatenachse und der Horizontalen repräsentiert ist.

Das Maximum der zeitlichen Kreuzkorrelationsfunktion liegt wieder bei der Verschiebungszeit $\tau_m = D/v$ und könnte, wie bei der Anordnung von Fig. 1, zur Messung der Geschwindigkeit des bewegten Mediums ermittelt werden. Die Besonderheit der Messanordnung von Fig. 4 besteht aber darin, dass der Messwert der Geschwindigkeit nicht aus der dem Maximum der zeitlichen Kreuzkorrelationsfunktion entsprechenden Verschiebungszeit τ_m , sondern aus der Steigung der zeitlichen Kreuzkorrelationsfunktion bei der Verschiebungszeit $\tau = 0$ abgeleitet wird.

Diese Massnahme beruht auf der Erkenntnis, dass ein eindeutiger, mathematisch definierbarer Zusammenhang zwi-

schen der Steigung der zeitlichen Kreuzkorrelationsfunktion bei der Verschiebungszeit $\tau = 0$ und der Geschwindigkeit des Mediums besteht. Fig. 7 zeigt die mit der gleichen Messanordnung für verschiedene Geschwindigkeiten v_1, v_2, v_3 des Mediums ermittelten zeitlichen Kreuzkorrelationsfunktionen. Wie zu erkennen ist, schneiden alle Kreuzkorrelationsfunktionen die durch $\tau = 0$ gehende Ordinatenachse im gleichen Punkt, aber mit unterschiedlichen Steigungen. Dabei ist die Steigung um so grösser, je grösser die Geschwindigkeit ist. Zur Veranschaulichung kann man sagen, dass bei Geschwindigkeitsveränderungen sich die Kreuzkorrelationsfunktion wie ein Ziehharmonikabalg dehnt und staucht.

Der mathematische Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit v und der Steigung der zeitlichen Kreuzkorrelationsfunktion ist durch die folgende Gleichung gegeben:

$$v = \frac{\Phi_{12}(0)}{\left. \frac{d}{du} \Phi_{12} \right|_{u=0}} \cdot \frac{\dot{R}_{12}(0)}{R_{12}(0) - \mu_1 \mu_2} \quad (4)$$

Darin sind:

$\Phi_{12}(0)$: der Wert der räumlichen Kreuzkorrelationsfunktion bei der räumlichen Verschiebung $u = 0$;

$\left. \frac{d}{du} \Phi_{12} \right|_{u=0}$: der Gradient der räumlichen Kreuzkorrelationsfunktion bei der räumlichen Verschiebung $u = 0$;

$\dot{R}_{12}(0)$: der Gradient der zeitlichen Kreuzkorrelationsfunktion bei der Verschiebungszeit $\tau = 0$;

$R_{12}(0)$: die zeitliche Kreuzkorrelationsfunktion bei der Verschiebungszeit $\tau = 0$;

μ_1, μ_2 : die Mittelwerte der Signale $S_1(t)$ und $S_2(t)$.

Der erste Faktor auf der rechten Seite der Gleichung (4) ist ein einmalig zu bestimmender Geometrieterm, der sich, wie anhand von Fig. 4 und Fig. 5 erläutert wurde, aus dem Aufbau und der Anordnung der Wandler ergibt. Der zweite Faktor drückt die Steigung der zeitlichen Kreuzkorrelationsfunktion aus, wobei die Division durch $R_{12}(0) - \mu_1 \mu_2$ der Normierung dient. Wenn der Ausdruck $R_{12}(0) - \mu_1 \mu_2$ Null ist, kann die Normierung auf die Autoleistung eines der beiden Signale $S_1(t)$, $S_2(t)$ oder auf die Wurzel aus dem Produkt der Autoleistungen der beiden Signale erfolgen.

Die Gleichung (4) lässt erkennen, dass der Gradient der räumlichen Kreuzkorrelationsfunktion nicht verschwinden darf, weil er im Nenner steht. Diese Bedingung ist nur dann erfüllt, wenn sich die Erfassungsbereiche der Wandler in der anhand von Fig. 4 und 5 erläuterten Weise überlappen.

Zur Ermittlung der Steigung der zeitlichen Kreuzkorrelationsfunktion können bei der Messanordnung von Fig. 4 die Ausgangssignale $S_1(t)$ und $S_2(t)$ wieder nach Vorbehandlung in einer Signalverarbeitungsschaltung 2 einem Korrelator 4 zugeführt werden, der die zeitliche Kreuzkorrelationsfunktion berechnet. Dem Korrelator 4 ist aber nunmehr eine Auswerteschaltung 6 zugeordnet, die die Steigung der zeitlichen Kreuzkorrelationsfunktion bei der Verschiebungszeit $\tau = 0$ ermittelt und daraus die Geschwindigkeit des Mediums ableitet. Der Korrelator 4 und die Auswerteschaltung 6 können natürlich auch in diesem Fall durch einen geeignet programmierten Mikrocomputer gebildet sein.

Es gibt zahlreiche Möglichkeiten, die Wandler so auszubilden, dass sich ihre Erfassungsbereiche überlappen. Die Figuren 8 und 9 zeigen als Beispiel eine optische Messanordnung zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit eines durch ein Plexiglasrohr 10 strömenden Mediums. Der Wandler W_1 enthält als Sender eine Lichtquelle 11 und als Empfänger eine Photodiode 12. Der Wandler W_2 enthält als Sender eine Lichtquelle 13 und als Empfänger eine Photodiode 14. Jeder Wandler ist so ausgebildet, dass unter Berücksichtigung der Linsenwirkung des Plexiglasrohres 10 eine weitgehend homogene Gewichtung des Rohrquerschnitts erreicht wird. Die optischen Achsen der beiden Wandler kreuzen sich rechtwinklig. Wie Fig. 9 zeigt, sind die Lichtquellen 11, 13 und die Photodioden 12, 14 der beiden Wandler längs der Rohrachse z etwas gegeneinander versetzt, so dass sich die Erfassungsbereiche der beiden Wandler etwa zur Hälfte überlappen. Zur Verdeutlichung ist die Ausdehnung der Lichtquellen 11, 13 und der Photodioden 12, 14 in der Richtung der Rohrachse z in Fig. 9 übertrieben gross dargestellt. Die Überlappung der Erfassungsbereiche wird in diesem Fall durch die gekreuzte Anordnung der Wandler ermöglicht.

Fig. 8 zeigt auch die Ausbildung der beiden Signalverarbeitungsschaltungen, denen die Ausgangssignale $S_1(t)$ und $S_2(t)$ der Wandler W_1 und W_2 zugeführt werden. In jeder Signalverarbeitungsschaltung wird das Ausgangssignal des zugeordneten Wandlers zunächst in einem Vorverstärker 15 verstärkt und dann in einem Hochpassfilter 16 gefiltert, wodurch der Mittelwert des Signals unterdrückt wird. Nach erneuter Verstärkung in einem Verstärker 17 wird jedes Signal einem Analog/Digital-Wandler 18 zugeführt, der das mittelwertfreie Analogsignal in ein für die Verarbeitung im Mikrocomputer geeignetes Digitalsignal umwandelt. An die Analog/Digital-Wandler 18 schliesst sich ein Mikrocomputer 19 an, der die Funktionen des Korrelators 4 und der Auswerteschaltung 6 von Fig. 4 ausübt.

Eine andere Möglichkeit zur Realisierung von sich teilweise überlappenden Erfassungsbereichen besteht darin, dass jeder Wandler aus mehreren Wandlerelementen besteht, die mit den Wandlerelementen des anderen Wandlers verschachtelt sind. Fig. 10 zeigt als Beispiel hierfür eine Messanordnung mit kapazitiven Wandlern zur Messung der Geschwindigkeit eines durch ein Rohr 20 strömenden Mediums. Der Wandler W_1 besteht aus fünf Wandlerelementen 21, 22, 23, 24, 25, von denen jedes in der üblichen Weise durch zwei am Umfang des Rohres 20 einander diametral gegenüberliegende Elektroden gebildet ist. Die Wandlerelemente 21, 22, 23, 24, 25 sind längs der Rohrachse in Abständen angeordnet, so dass zwischen ihnen Lücken bestehen. Der Wandler W_2 besteht in gleicher Weise aus fünf Wandlerelementen 31, 32, 33, 34, 35, die längs der Rohrachse in Abständen angeordnet sind, so dass zwischen ihnen Lücken bestehen. Die Wandlerelemente 31 und 32 des Wandlers W_2 liegen in den Lücken zwischen den Wandlerelementen 23 und 24 bzw. 24 und 25 des Wandlers W_1 , wodurch die gewünschte Überlappung der Erfassungsbereiche der beiden Wandler W_1 und W_2 erreicht wird.

Anstatt jeden der beiden Wandler mit eigenen Wandlerelementen auszustatten, ist es auch möglich, die Ausgangssignale der gleichen Wandlerelemente in unterschiedlicher Weise zusammenzufassen, um die sich überlappenden Erfassungsbereiche von zwei Wandlern zu realisieren. Fig. 11 zeigt eine Messanordnung mit einem Array von Photodioden 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, die längs der Bewegungsrichtung z des bewegten Mediums angeordnet sind und das Licht einer gemeinsamen Lichtquelle 40 empfangen. Jede Photodiode bildet in Verbindung mit der Lichtquelle ein Wandlerelement und gibt ein durch die Inhomogenitäten des bewegten

Mediums beeinflusstes elektrisches Ausgangssignal $S_{41}, S_{42}, \dots, S_{48}$ ab. Die Ausgänge der Photodioden sind mit den Eingängen von zwei Summierschaltungen 51 und 52 verbunden, die die Ausgangssignale der Photodioden zur Bildung der beiden zu korrelierenden Signale $S_1(t)$ und $S_2(t)$ mit unterschiedlicher Vorzeichenbewertung zusammenfassen. Beispielsweise können die Signale $S_1(t)$ und $S_2(t)$ in der folgenden Weise gebildet sein:

$$S_1(t) = +S_{41} + S_{42} - S_{43} - S_{44} + S_{45} + S_{46} - S_{47} - S_{48}$$

$$S_2(t) = -S_{41} + S_{42} + S_{43} - S_{44} - S_{45} + S_{46} + S_{47} - S_{48}$$

Diese Realisierung der sich überlappenden Erfassungsbereiche ergibt den Vorteil, dass die Signale $S_1(t)$ und $S_2(t)$ mittelwertfrei sind, so dass die Notwendigkeit einer Hochpassfilterung entfällt. Ferner wird die Auswirkung von Konzentrationsschwankungen auf das Messergebnis unterdrückt. Die gleiche Massnahme lässt sich anstatt mit Photodioden natürlich ebenso mit akustischen, kapazitiven oder anderen Wandlerelementen durchführen.

Anstatt die Signalverknüpfung simultan mit zwei Summierschaltungen vorzunehmen, kann sie auch im Zeitmultiplex mit der gleichen Summierschaltung erfolgen.

Die mit den Anordnungen von Fig. 10 oder Fig. 11 erhaltenen Signale $S_1(t)$ und $S_2(t)$ können dann in der zuvor erläuterten Weise weiterverarbeitet werden, um die zeitliche Kreuzkorrelationsfunktion zu bilden, deren Steigung bei der Verschiebungszeit $\tau = 0$ zu ermitteln und daraus den Messwert der Geschwindigkeit v abzuleiten.

Anstatt diese Operationen in einem Mikrocomputer durchzuführen, ist es auch möglich, das Ergebnis durch unmittelbare Verarbeitung der elektrischen Signale in einer Hardware-Schaltung zu erhalten.

Fig. 12 zeigt eine hierfür geeignete Analogsignalverarbeitungsschaltung 60 mit zwei Eingängen 61 und 62, denen die Ausgangssignale $S_1(t)$ bzw. $S_2(t)$ eines der zuvor beschriebenen Wandlersysteme zugeführt werden. Das dem Eingang 61 zugeführte Analogsignal $S_1(t)$ wird in einer Differenzierschaltung 63 nach der Zeit differenziert. Der Ausgang der Differenzierschaltung 63 ist mit dem einen Eingang einer Multiplizierschaltung 64 verbunden, die am anderen Eingang das Signal $S_2(t)$ empfängt. Das Ausgangssignal der Multiplizierschaltung 64 wird über einen Tiefpass 65 dem einen Eingang einer Dividierschaltung 66 zugeführt. Das am Eingang 62 anliegende Signal $S_2(t)$ wird den beiden Eingängen einer zweiten Multiplizierschaltung 67 zugeführt, die somit am Ausgang ein Signal abgibt, das dem Quadrat des Signals $S_2(t)$ entspricht. Dieses Signal wird über einen zweiten Tiefpass 68 an den anderen Eingang der Dividierschaltung 66 angelegt.

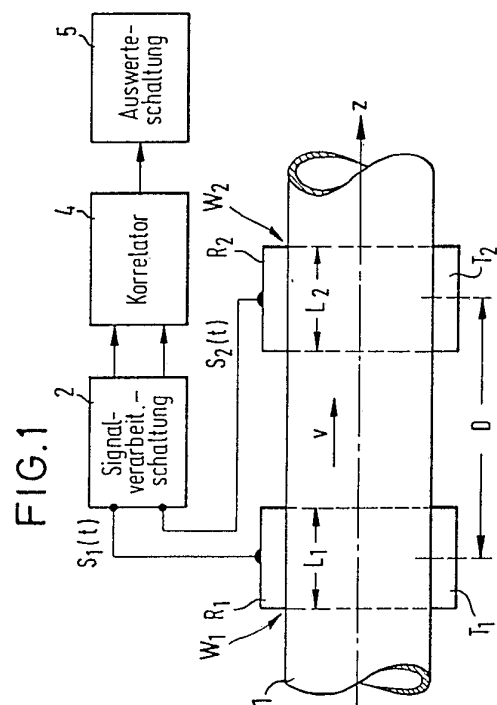
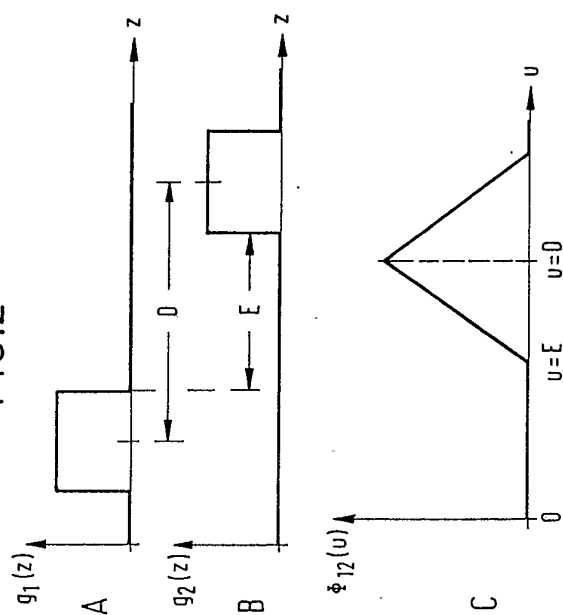
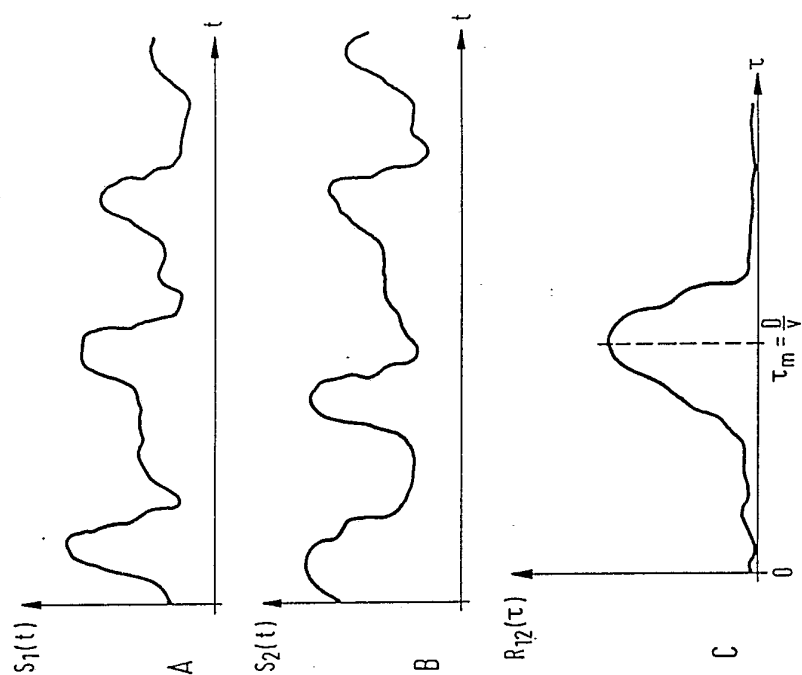
Die Multiplikation der Signale in der Multiplizierschaltung 64 entspricht der Bildung der Kreuzkorrelationsfunktion bei der Verschiebungszeit $\tau = 0$, wobei das Ergebnis infolge der vorhergehenden Differentiation des Signals $S_1(t)$ unmittelbar der Steigung der Kreuzkorrelationsfunktion ent-

spricht. Die anschließende Division durch das Quadrat des Signals $S_2(t)$ ergibt die Normierung auf die Autoleistung dieses Signals. Das Ausgangssignal der Dividierschaltung 66 stellt somit die Steigung der normierten Kreuzkorrelationsfunktion bei der Verschiebungszeit $\tau = 0$ dar und könnte beispielsweise in einem entsprechend geeichten Anzeigegerät 69 unmittelbar zur Anzeige der zu messenden Geschwindigkeit v dienen.

Wie bei den herkömmlichen korrelativen Messverfahren ist es nicht erforderlich, den gesamten Informationsinhalt der analogen Ausgangssignale der Wandler für die Bildung und Auswertung der Kreuzkorrelationsfunktion zu verwenden. In vielen Fällen genügt eine sogenannte Polaritätskorrelation, bei der die analogen Eingangssignale nur binarisiert, d.h. mit einem Bit quantisiert werden. Diese Binarisierung kann sowohl bei der Signalverarbeitung durch einen Mikrocomputer als auch bei der Signalverarbeitung durch eine Hardware-Schaltung angewendet werden. Als Beispiel zeigt Fig. 13 eine Hardware-Schaltung 70, die nach dem gleichen Prinzip wie die Analogsignalverarbeitungsschaltung 60 von Fig. 12 arbeitet, aber für die Verarbeitung von binarisierten Signalen ausgebildet ist.

Die Schaltung 70 empfängt am Eingang 71 das Analogsignal $S_1(t)$ und am Eingang 72 das Analogsignal $S_2(t)$. Das Analogsignal $S_1(t)$ wird zunächst in einer Differenzierschaltung 73 differenziert, deren Ausgangssignal in einer Digitalisierungsschaltung 74 binarisiert wird. Das binarisierte Ausgangssignal der Digitalisierungsschaltung 74 wird an den einen Eingang einer XOR-Schaltung 75 angelegt. Das dem Eingang 72 zugeführte Analogsignal $S_2(t)$ wird nach Hochpassfilterung in einem Hochpass 76 in einer zweiten Digitalisierungsschaltung 77 binarisiert. Das binarisierte Ausgangssignal der Digitalisierungsschaltung 77 wird an den zweiten Eingang der XOR-Schaltung 75 angelegt. Die Verknüpfung der binären Signale in der XOR-Schaltung 75 entspricht in bekannter Weise der korrelativen Multiplikation. Eine Normierung auf die Autoleistung ist nicht erforderlich, weil die Binarisierung automatisch die Normierung auf die Wurzel aus dem Produkt der Autoleistungen der beiden Signale ergibt. Das Ausgangssignal der XOR-Schaltung 75 stellt somit nach Filterung in einem Tiefpass 78 die Steigung der normierten Kreuzkorrelationsfunktion bei der Verschiebungszeit $\tau = 0$ dar und kann einem entsprechend geeichten Anzeigegerät 79 zur unmittelbaren Anzeige der zu messenden Geschwindigkeit zugeführt werden.

Der Steigung der normierten Kreuzkorrelationsfunktion bei der Verschiebungszeit $\tau = 0$ ist das erste Moment des Kreuzleistungsdichtespektrums der Signale $S_1(t)$ und $S_2(t)$ mathematisch äquivalent. Es ist daher auch möglich, den Mikrocomputer so zu programmieren bzw. die an seiner Stelle verwendete Hardware-Schaltung so auszubilden, dass ein Ergebnis erhalten wird, das dem ersten Moment des Kreuzleistungsdichtespektrums entspricht. Aus diesem Wert kann dann die zu messende Geschwindigkeit v in gleicher Weise abgeleitet werden wie aus der Steigung der normierten Kreuzkorrelationsfunktion bei der Verschiebungszeit $\tau = 0$.

**FIG. 2****FIG. 3**

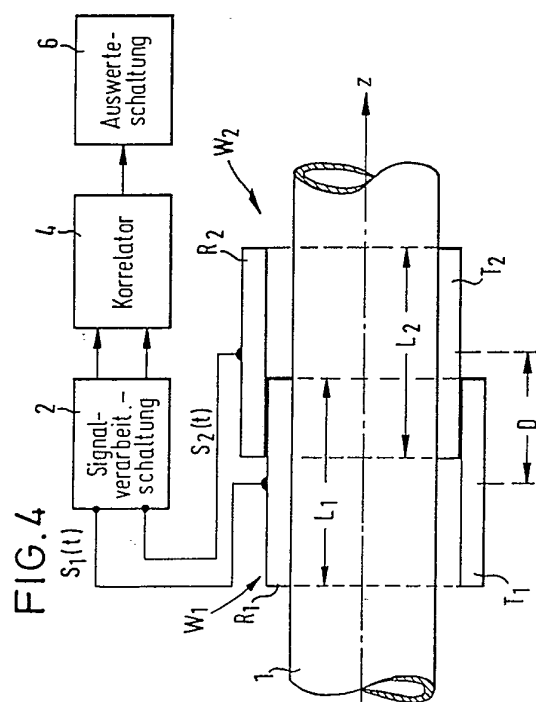
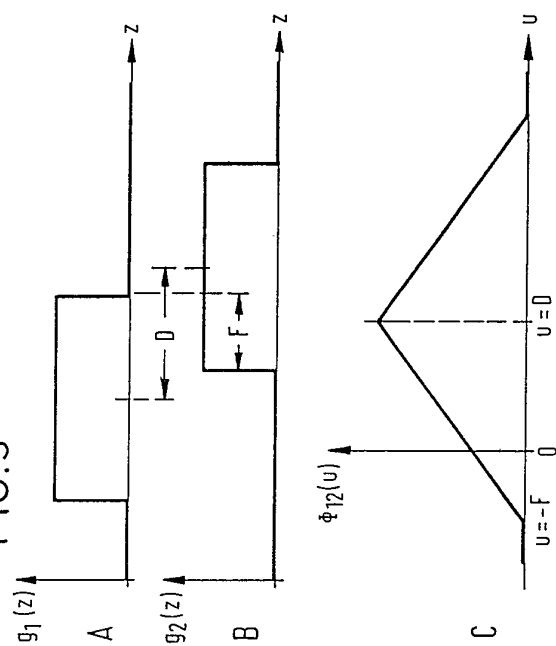
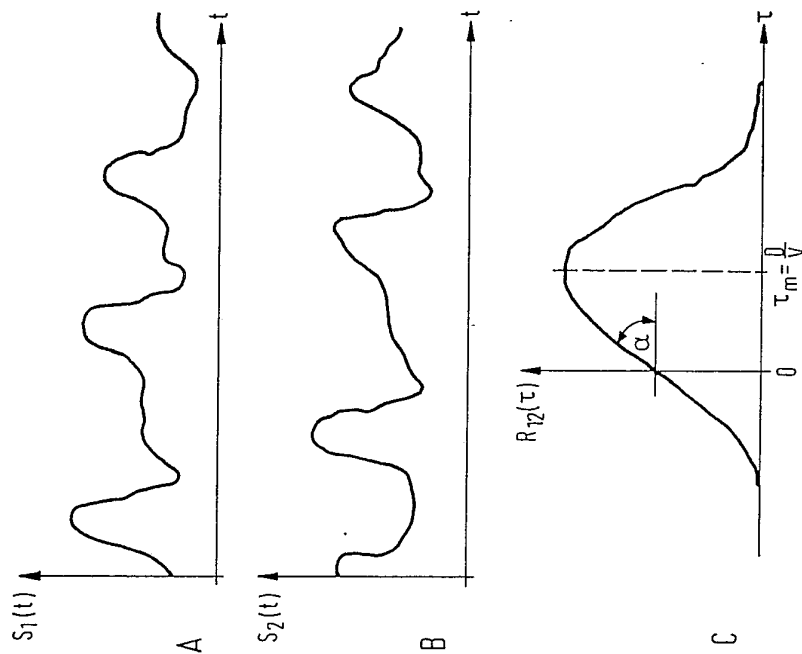
**FIG. 5****FIG. 6**

FIG.7

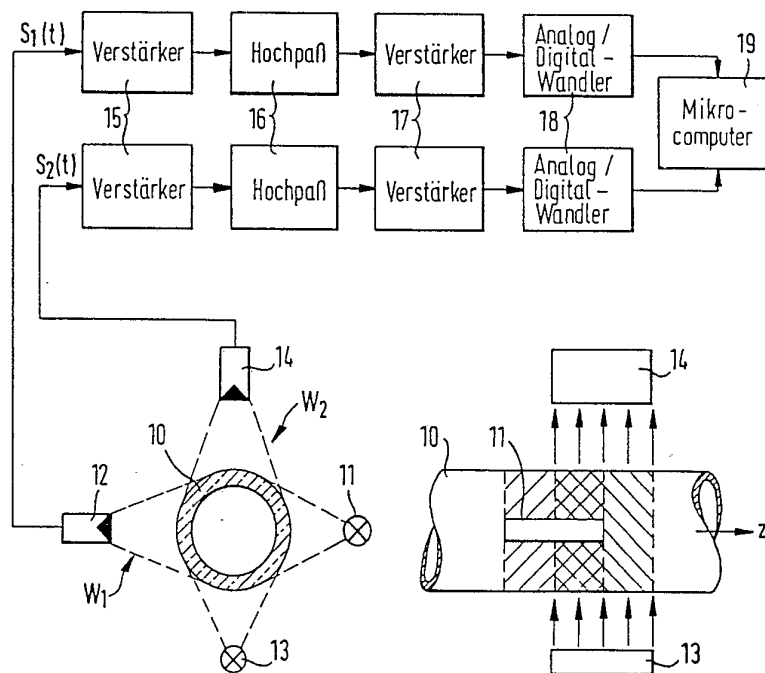
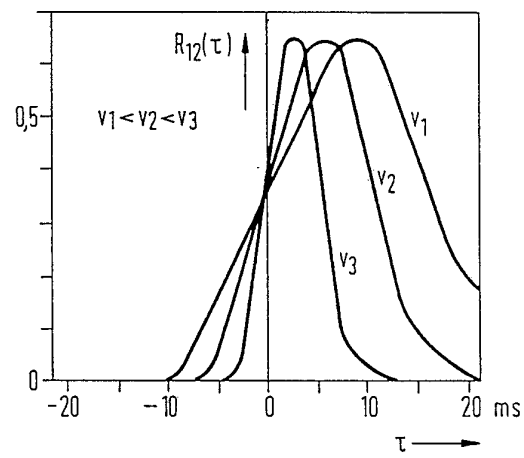


FIG.8

FIG.9

FIG.10

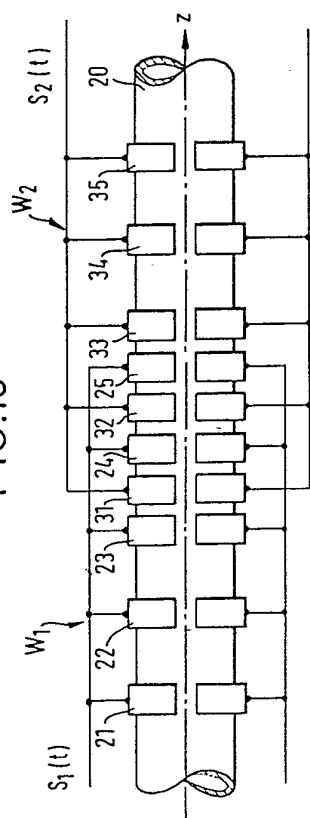


FIG.11

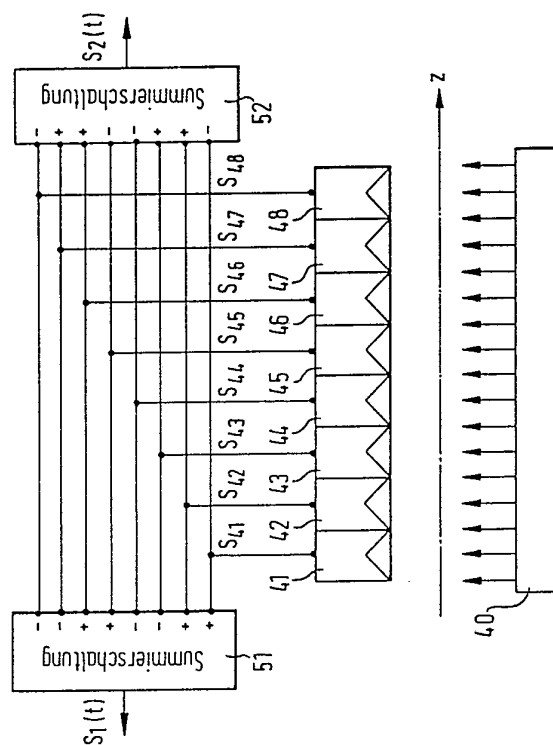


FIG.12

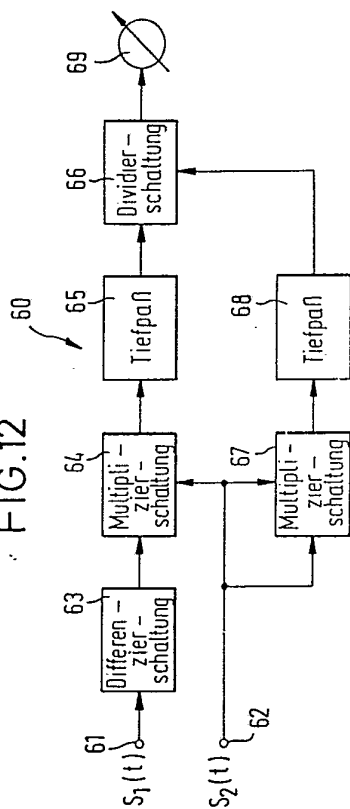


FIG.13

