



(12) **PATENT**

(19) NO

(11) **315584**

(13) B1

(51) Int Cl⁷

G 01 F 1/74, G 01 N 22/00

Patentstyret

(21) Søknadsnr
(22) Inng. dag
(24) Løpedag
(41) Alm. tilg.
(45) Meddelt dato

20015132
2001.10.19
2001.10.19
2003.04.22
2003.09.22

(86) Int. inng. dag og
søknadsnummer
(85) Videreføringdag
(30) Prioritet

Ingen

(71) Patenthaver
(72) Oppfinner

Roxar Flow Measurement AS, Gamle Forusvei 17, 4065 Stavanger, NO
Ebbe Gustaf Nyfors, 4309 Sandnes, NO
Øystein Lund Bø, 4070 Randaberg, NO

(74) Fullmektig

Rolf Chr. B Larsen - ABC-Patent, Siviling. Rolf Chr. B. Larsen AS, 0602 Oslo

(54) Benevnelse

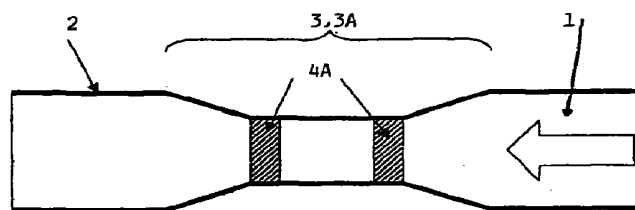
Kompakt strømningsmåler

(56) Anførte publikasjoner

US 5103181, RU C2 2164340

(57) Sammendrag

Apparat for måling av sammensetningen og strømningshastigheten av et fluid I omfattende en blanding av for eksempel olje og vann i et rør 2, der en integrert mekanisk struktur 3 tjener som en mikrobølgeresonatorsensor for fremskaffelse av permittivitetsmålinger og der den mekaniske strukturen også fungerer som et differensielt trykkelement for fremskaffelse av strømningshastighets-målinger.



Denne oppfinnelsen vedrører en kompakt strømningsmåler for måling av sammensetningen eller strømningsratene for enkeltkomponenter i et fluid.

5 BAKGRUNN

I oljeindustrien er det i forskjellige situasjoner et behov for å måle sammensetningen eller strømningsratene for enkeltkomponenter i et fluid, som er en blanding av olje og vann og muligens en gass, som strømmer i et rør. Slike målinger er påkrevd, for eksempel for å fastlegge hva en oljebrønn produserer og derved være i stand til å kontrollere produksjonen for optimal utvinning. Målinger er også påkrevd for overvåking av ytelsen til produksjonsseparatorer, kontroll av injeksjonen av kjemikalier (forhindring av utvikling av avskalling, korrosjon eller dannelselse av hydrat), eller for å håndtere strømningsystemet, når fluidet skal transporteres over en lang avstand i en rørledning.

Den vanlige teknikken er å separere fluidet i en separator og å måle strømmingen av hver av komponentene separat. I de senere år har såkalte flerfasemålere blitt tilgjengelige, som måler sammensetningen og strømningsratene uten en innledningsvis separasjon [1]. Et spesialtilfelle av en flerfasestrømning er den såkalte våtgasstrømningen, som vanligvis betyr at GVF (gass volum fraksjonen) er om lag $GVF > 95\%$. Den relative nøyaktigheten, som er oppnåelig for strømningsratene for de flytende komponentene, er for lav for de fleste anvendelsene for tilfellet med en våtgasstrømning, når målt med flerfasemålere.

30 FAGOMRÅDETS STADIUM:

I teksten under vil de følgende definisjoner for terminologien bli benyttet:

måler	en fullstendig måleanordning omfattende sensor(er) og nødvendig elektronikk og programvare
35 sensor	et målerelement for en måler (tilnærmet synonym: transduser)

Innledningsvis kan det, eksempelvis, henvises til US-patent nr. 5,103,181 til Gaisford m.fl. (henvist til som referanse [8] nedenfor) der det beskrives en anordning for

overvåkning av et materiale som består av flere komponenter i et rør. Det benyttes en mikrobølgeresonator for å måle de dielektriske egenskapene for materialet, og det benyttes også to sensorer og en krysskorrelasjonsteknikk for å måle

5 strømningshastigheten for det gjennomstrømmende materialet. Mikrobølgeresonatoren kan omfatte gitterstrukturer (se Figurene 24A-24H) som tillater et fluid å strømme gjennom men stopper mikrobølger

Russisk patentpublikasjon RU 2164340 C2 omhandler en fremgangsmåte for å bestemme komponentbestanddelene for en

10 strømmende gass/væske blanding fra gass- og oljeproduksjon nær brønner eller raffinier. En homogenisert strømning dannes med bruk av en konusformet innsnevring. I en måleseksjon er det anbrakt en mikrobølgeresonator som

15 eksiteres med radiobølger. Resonansfrekvensen for den fyllte resonatoren, trykk og temperatur for gas/væske-blandingen måles og disse verdiene benyttes til å beregne væskeandelen tverrsnittet av det målet volumet.

Strømningsratene for komponentene i en flerfasestrømning

20 kan måles med en testseparator eller en flerfasemåler. Testseparatoren er dyr og omfangsrik. Det er derfor ikke praktisk å ha en testseparator som måler produksjonen kontinuerlig i hver brønn, men heller en testseparator per oljefelt. Spesielt, er dette riktig ved offshore

25 installasjoner. Hver brønn rutes gjennom testseparatoren til regelmessige intervaller. Når en brønn rutes gjennom en testseparator, endrer betingelsene for brønnen seg, noe som kan ha innvirkning på produksjonen slik at målingen ikke representerer den gjennomsnittlige produksjonen korrekt. En

30 testseparator er også sen på grunn av den lange innsvingningstiden, spesielt for tilfellet med en våtgasstrømning.

Flerfasemålere måler sammensetningen av strømmingen og strømningshastigheten separat. Fra disse beregnes

35 strømningsratene. Flerfasemålere kan installeres for en kontinuerlig, direktekoplet måling på hvert sted, der målinger behøves. En viktig anvendelse er å installere måleren undervanns i produksjonssystemet på sjøbunnen, som i hovedsak er en bæreramme (eng.: skid) montert på toppen av en

undersjøisk brønn. Dersom hver brønn i en samling av brønner er utstyrt med en undersjøisk flerfasemåler, kan en felles rørledning benyttes for å knytte samlingen av undersjøiske brønner med en produksjonsplattform, som kan være lokalisert 5 titalls kilometer fra samlingen. Rommet som er tilgjengelig for en flerfasemåler i et produksjonssystem på sjøbunnen er begrenset. En kompakt utforming er derfor en fordel.

En flerfasemåler måler fire størrelser, dvs. strømningshastigheten og de relative andeler av de tre 10 komponentene (olje, vann, og gass). Den trenger vanligvis også temperaturen, trykket, tettheten av olje og gass, og vannets saltgehalt som inputparametere for kompensasjonsformål, men disse vil bli ignorert i den følgende diskusjonen av de viktigste målingene. Teoretisk kan 15 et slikt system karakteriseres av et sett av fire ligninger, der en ligning er at summen av de tre komponentene er 100%. Dermed må en flerfasemåler baseres på bruk av i det minste tre uavhengige målinger. Det finnes flere kjente måleprinsipper, som kan benyttes i forskjellige kombinasjoner 20 i flerfasemålinger. Mikrobølger eller kapasitiv teknologi kan for eksempel benyttes for å måle permittiviteten for strømmingen. Fordi permittiviteten for strømmingen avhenger av permittiviteten for komponentene (som kan antas kjent) og sammensetningen, inneholder permittiviteten for strømmingen 25 informasjon om sammensetningen. Permittiviteten er spesielt følsom for vanninnholdet. Forskjellige typer av tetthetsmålere kan benyttes for måling av strømmingens tetthet. Gammastråling med forskjellige energinivåer kan kombineres for å frembringe informasjon om sammensetningen. 30 Krysskorrelasjonsteknikker eller DP-målinger (differensialtrykk) over en innsnevring i strømmingen kan benyttes for å måle strømningshastigheten. Det eksisterer et antall flerfasemålere på markedet. De er hovedsakelig basert på forskjellige kombinasjoner av måleprinsippene som er nevnt 35 ovenfor. De er utformet for å dekke hele området av sammensetninger, noe som har nødvendiggjort kompromisser som gjør dem mindre passende og mindre nøyaktige for det spesielle tilfellet med våtgasstrømning.

Vanlige flerfasemålere kan benyttes med våtgassstrømning dersom de har en foranplassert delvis separator (eng. partial separator) som reduserer GVF. Denne løsningen er imidlertid dyr og omfangsrik, og er derfor ikke passende for

5 undervannsanvendelser. Blant måleprinsippene nevnt ovenfor er ikke krysskorrelasjonsmetoder, tetthetsmålere, og multienergi gammastrålefrengangsmåter velegnet for våtgassmålere på grunn av deres lave følsomhet. Det beste konseptet for en

10 våtgassmåler synes derfor å være bruk av en mikrobølgesensor for å måle permittiviteten til strømmingen, og en DP-metode for å måle massestrømmingen. Den beste følsomheten oppnås dersom mikrobølgesensoren er en resonator [2,Ch.3]. En PVT (Trykk-Volum-Temperatur) programvarepakke kan benyttes for å separere væske og gassinholdet av hydrokarbonene (olje +

15 gass), om ønsket.

En PVT-programvare er et program basert på en tilstandsligning benyttet for simulering og sammenligning av PVT-eksperimenter. Slike programvarepakker benyttes typisk for å beregne de temperatur- og trykkavhengige individuelle

20 tetthetene for gass- og væskefasene og gass/væskeforholdet for et fluid med kjent molekylær sammensetning. Et PVT-program trenger informasjon om temperaturen, trykket, og den molekylære sammensetningen av fluidet. Disse verdiene kan antas å være kjente størrelser. Alternativt kan temperaturen

25 og trykket fremskaffes fra sensorer plassert i eller ved fluidet og kunne være integrert i apparatet.

Fordi en våtgassstrømning har en tendens til å danne en ringformet strømningsform (væske langs rørvæggen og gass i midten) er det sannsynligvis også nødvendig med en mekanisk

30 strømningsmikser. Derfor vil en våtgassflerfasemåler omfatte en strømningsmikser, et DP-element, og en mikrobølgeresonator. En kveildel med disse komponentene anbrakt i serie er upassende lang for montering i et produksjonssystem på sjøbunnsanvendelser.

35

FORMÅL

Det er et formål med foreliggende oppfinnelse å tilveiebringe et forbedret apparat for å unngå de ovenfor

nevnte begrensningene ved ytelsen til de nåværende kjente teknikker.

Det er et annet formål med oppfinnelsen å frembringe én enkelt struktur for å utføre både mikrobølge og DP-målinger, og for blanding av strømmingen.

Det er nok et annet formål å tilveiebringe en enkelt struktur for utførelse av både mikrobølge- og DP-målinger, og for å blande strømmingen, som er kompakt i utformningen for at den skal bli lettere å passe inn i, for eksempel, undervannsinstallasjoner, og rimeligere å produsere.

Det er videre et formål med oppfinnelsen å tilveiebringe en enkelt, kompakt struktur for utførelse av både mikrobølge og DP-målinger, og for blanding av strømmingen, som er mindre, enklere mekanisk, og rimeligere å produsere og passende til målinger i en tofase strømning.

Det er nok et videre formål å tilveiebringe en enkel, kompakt struktur for utførelse av både mikrobølge- og DP-målinger, og for blanding av strømmingen, som er mindre, enklere mekanisk, og rimeligere å produsere og passende for målinger i en trefasestrømning, spesielt for en våtgasstrømning.

Formålene uttrykt ovenfor oppnås ved å tilveiebringe et apparat for å måle sammensetningen og strømningsraten for et fluid i et rør, der en integrert mekanisk struktur tjener som mikrobølgeresonator og som et differensialtrykkelement, for å frembringe målinger av permittivitet og strømningsrate, henholdsvis.

Foretrukne utførelsesformer av apparatet ifølge oppfinnelsen er definert i de selvstendige kravene.

30

DETALJERT BESKRIVELSE AV OPPFINNELSEN

En detaljert beskrivelse av oppfinnelsen vil bli gitt under. Anvendelse av V-konus utformingen som en våtgassmåler er benyttet som et eksempel. De følgende figurene benyttes i beskrivelsen.

35

Fig. 1 En semisektor-mikrobølgeresonator.

Fig. 2 En alminnelig svingende struktur i et rør.

Strukturen er kortsluttet til veggen i en ende, og åpen i den andre enden.

- Fig. 3 Et venturirør med gitre i enden av innsnevringen. Åpningen mellom gitrene er en mikrobølge-kavitets(hulroms-)resonator.
- Fig. 4 Et venturirør med endegitre i begge ender av røret.
- 5 Fig. 5 Et venturirør med en finneresonator i innsnevringen.
- Fig. 6 Et invertert venturirør. Den utvidede delen av røret er også en mikrobølgeresonator.
- Fig. 7 En koaksial innsetningsdel i røret. Strukturene som holder innsetningsdelen på plass kan enten være dielektriske, eller laget av et ledende materiale slik at de danner endegitre for resonatoren.
- 10 Fig. 8 En blendeplate med et endegitter plassert nedstrøms for platen.
- 15 Fig. 9 V-konus med en finneaktig støtte langs hele lengden, her kalt Finne-V-konus. De oppgitte dimensjoner ble benyttet i simuleringene beskrevet i teksten.
- Fig. 10 Standard V-konus med en støtte. De oppgitte dimensjonene ble benyttet i simuleringen som er beskrevet i teksten, i tillegg til de som er gitt i Figur 9.
- 20 Fig. 11 Bjelkemontert V-konus.
- Fig. 12 Den målte frekvensresponsen for den bygde 3" V-konus og mikrobølgeresonatorsensor.
- 25

Figur 3 illustrerer ett eksempel på en kort, mekanisk enkel, integrert mekanisk struktur som kan bli benyttet både som en mikrobølge resonator sensor og som et differensialtrykkelement. Strømningen for et fluid 1 i et rør

30 2 er illustrert ved pilens retning. Fluidet møter en integrert mekanisk struktur 3 som tjener som en mikrobølgeresonatorsensor og et differensialtrykkelement for å tilveiebringe permittivitets- og strømningsratemålinger.

For å forklare oppfinnelsen i større detalj følger en

35 diskusjon av prinsippene bak oppfinnelsen.

Permittiviteten for en fluidblanding

Når to materialkomponenter (A og B), (væske, gass eller faste partikler), med forskjellig permittivitet (ϵ_A and

ϵ_B) blandes, har blandingen en permittivitet ϵ_m som avhenger av blandingsforholdet Φ for de to komponentene [2, Ch. 2]. Blandingsforholdet uttrykkes vanligvis som det totale volumet for en av komponentene relativt til volumet av blandingen, det vil si

$$\Phi_A = \frac{V_A}{V_A + V_B} \quad (1)$$

der V_A er volumet for komponent A og V_B er volumet for komponent B i et sampel av volumet $V_m = V_A + V_B$ for blandingen. Dersom for eksempel A er vann og B er olje, så er Φ_A vanninnholdet eller WVF (vannets volumfraksjon) for blandingen. For tilfellet med fluidet dannet i en oljebrønn, kan B på sin side være en kjent blanding av olje og gass, og vil derfor vanligvis kalles hydrokarbonkomponenten. Måten som ϵ_m avhenger av Φ på avhenger av hvordan komponentene blander seg med hverandre og er derfor spesifikk for disse komponentene. Som en modell for denne avhengigheten kan en kjent modell [2, Ch. 2.4] benyttes, eller en empirisk kalibrert modell. Ved å bruke denne modellen, kan Φ så utledes fra en målt verdi av ϵ_m .

I det generelle tilfellet er permittiviteten en kompleks størrelse, dvs. den har en reell og imaginær part:

$$\epsilon_m = \epsilon'_m - j \epsilon''_m \quad (2)$$

Fysisk gir den reelle parten effekten av mediet på forplantningshastigheten, faseendringen, og bølgelengden sammenlignet med vakuum, mens den imaginære delen gir hvor raskt energien for en forplantende bølge svekkes. Begge deler avhenger av sammensetningen, men slik at den imaginære delen er mest følsom for tapskomponenter i blandingen, som for eksempel saltgehalten for vannet i blandingen.

Målingen av permittivitet ved bruk av en mikrobølgeresonator.

For målingen av ϵ_m , kan en mikrobølgeresonator benyttes som en sensor. En slik sensor har en resonansfrekvens som er avhengig av permittiviteten for mediet som den er fylt med. Dersom f_0 er resonansfrekvensen for sensoren når den er tom,

og f_m når den er fylt med en fluidblanding, er den reelle delen av permittiviteten for blandingen [2, p. 133]

$$\varepsilon'_m = \left[\frac{f_0}{f_m} \right]^2 \quad (3)$$

- 5 I tillegg til resonansfrekvensen er resonansen karakterisert ved kvalitetsfaktoren, som er et mål på hvor raskt den lagrede energien tapes på grunn av forskjellige tapsmekanismer, og avhenger derfor av den imaginære delen av blandingens permittivitet. En høy kvalitetsfaktor betyr at
 10 resonanstoppen er small og veldefinert. Ved å måle både resonansfrekvensen og kvalitetsfaktoren, oppnås to delvis uavhengige målinger. For eksempel gir inkludering av målingen av kvalitetsfaktoren i en måler derfor muligheten for også å
 15 måle saltgehalten for vannet i en blanding av vann og hydrokarboner. Denne funksjonen har spesielle anvendelser i petroleumsindustrien, for eksempel for deteksjon av inntrengning av formasjonsvann, eller injisert vann.

Grunnleggende om mikrobølgeresonatorer.

- 20 Det grunnleggende om mikrobølgeresonatorer har blitt beskrevet, for eksempel i [2,kap.3], [3,kap.3], og [4,kap.7]. Alle mikrobølgeresonatorer som er i vanlig bruk som sensorer kan betraktes som dannet av en seksjon av en transmisjonslinje begrenset av impedansdiskontinuiteter i
 25 begge ender. Transmisjonslinjen kan lages av en hvilken som helst struktur som bærer elektromagnetiske bølger, slik som en hul bølgeleder, en koaksiallinje, en slissebølgeleder, båndbølgeleder, en dielektrisk bølgeleder, eller en to-leder linje. Rollen til impedansdiskontinuitetene er å forårsake at
 30 den forplantende bølgen reflekteres. Der hvor transmisjonslinjen har en åpen krets, er refleksjonskoeffisienten lik $\Gamma = +1$ (dvs. fasevinkelen $\varphi = 0$), og der hvor linjen er kortsluttet, $\Gamma = -1$ ($\varphi = \pi$). Dersom impedansdiskontinuiteten er forskjellig fra de som er nevnt,
 35 eller rene reaktive termineringer ($|\Gamma| = 1$, $\varphi \neq 0 \ \& \ \pi$), vil refleksjonskoeffisienten være delvis ($0 \leq |\Gamma| \leq 1$) og resonatoren lekkende. En lekkasje av energi reduserer

kvalitetsfaktoren for resonatoren og gjør resonanstoppen bredere, noe som vanligvis gjør resonatoren mindre fordelaktig som en sensor.

Feltet i resonatoren eksiteres av den eksterne kretsen gjennom en eller annen slags kopling, som for eksempel kan være en åpning (lite hull), en koplingsssløyfe, en koplingsprobe, eller kopling gjennom de lekkende endene. Koplingsinnretningen stråler en bølge inn i resonatoren. Bølgen forplanter seg langs transmisjonslinjen og reflekteres i skiftende retninger ved diskontinuitetene. Resonans opptrer, dvs. resonansbetingelsen er oppfylt dersom det eksiterende feltet er i fase med de reflekterte komponentene. Dermed vil de interferere konstruktivt og destruktivt og gir et standbølgeomønster. Dette vil skje bare ved bestemte frekvenser (resonansfrekvenser). En standbølge med et kraftig felt vil bygge seg opp, og lagrer dermed en stor mengde energi. Likevekt oppnås ved nivået der effekttapet i resonatoren (i metallet eller dielektrikummet, ved stråling, eller ved lekkasje gjennom koplिंगene) er lik eksitasjonseffekten. Ved resonans skifter energien mellom det elektriske feltet og det magnetiske feltet, som inneholder den samme mengden energi.

Resonansbetingelsen oppfylles når modusbølgelengden har spesielle verdier sammenlignet med dimensjonene for resonatoren. Disse verdiene avhenger av hvilken type terminering som avgrenser resonatoren. De reflekterte bølgekomponentene er i fase med det eksiterende feltet dersom den totale fasen som bølgen gjennomgår ved sin gang frem og tilbake langs transmisjonslinjen er en multippel av 2π :

$$\frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2L + \varphi_1 + \varphi_2 = n \cdot 2\pi \quad (4)$$

der L er lengden på transmisjonslinjen, φ_1 og φ_2 er fasevinklene for refleksjonskoeffisientene, og n er et heltall. Det første leddet på venstre side av (4) er faseendringen for bølgen under dens gang frem og tilbake. Ligning (4) kan skrives på formen

$$L = \left(\frac{n}{2} - \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{4\pi} \right) \lambda \quad (5)$$

Dersom resonatoren er en åpen krets i begge ender, $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$, og gir ligning (5) for lengden:

$$L = \frac{n\lambda}{2} = \frac{\lambda}{2}, \lambda, \frac{3\lambda}{2}, \quad (6)$$

5

Dersom resonatoren er kortsluttet i begge ender, $\varphi_1 = \varphi_2 = \pi$, og det samme resultatet som ovenfor oppnås:

$$L = \left(\frac{n}{2} - \frac{1}{2}\right)\lambda = \frac{\lambda}{2}, \lambda, \frac{3\lambda}{2}, \quad (7)$$

Dersom resonatoren er kortsluttet i en ende og en åpen krets

$$L = \left(\frac{n}{2} - \frac{1}{4}\right)\lambda = \frac{\lambda}{4}, \frac{3\lambda}{4}, \frac{5\lambda}{4}, \frac{7\lambda}{4}, \quad (8)$$

10 i den andre, $\varphi_1 = \pi$ and $\varphi_2 = 0$, og (5) gir

For hver situasjon er det et uendelig antall løsninger som tilfredsstillter resonansbetingelsen. Hver resonator har derfor et uendelig antall resonansfrekvenser for hver
15 bølgemodus. Den laveste resonansen er ved frekvensen der bølgelengden er to eller fire ganger lengden av resonatoren, avhengig av avslutningene.

For eksakt beregning av resonansfrekvensen må forholdet mellom bølgelengde og frekvens være kjent. For TEM-bølger (i
20 koaksiale eller andre linjer med minimum to ledere) er forholdet veldig enkelt. Fordi de ikke har noen grensefrekvens, er bølgelengden i transmisjonslinjen den samme som den for en planbølge i det samme dielektriske mediet. I hule bølgeledere er forholdet noe mer komplisert,
25 fordi bølgelengdemodusen alltid er lengre enn den for den tilsvarende plane bølgen:

$$\lambda_{wg} = \frac{\lambda_{pw}}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}} \quad (9)$$

30

Der λ_{wg} er bølgelengden i bølgelederen, λ_{pw} er bølgelengden for den tilsvarende planbølgen, og f_c er grensefrekvensen for bølgemodusen i bølgelederen. For tilfellet av bølgeledere med
 5 en grensefrekvens, bør bølgelengden λ_{wg} benyttes i (4)-(8).

Ligning (9) viser at λ_{wg} blir uendelig ved grensefrekvensen. I dette tilfellet er også $n = 0$ en mulig løsning av (4), dersom strukturen kan bære bølgemodusen som det er tale om. Dersom en seksjon av en hul bølgeleder er
 10 kortsluttet i begge ender, kan den bære TM-modi. Resonansfrekvensen er $f_r = f_c$ i slike tilfeller, uavhengig av lengden av resonatoren. Feltmønsteret mangler da struktur i den aksiale retningen av resonatoren. TE-bølger kan ikke eksistere med $n = 0$, når endene er kortsluttet, fordi det
 15 transversale elektriske feltet må være null i begge ender. Om endene har en åpen krets, kan strukturen bære TE-modi med $n = 0$, men ikke TM-modi, fordi de har et aksialt elektrisk felt som må avsluttes ved en metalloverflate. Fordi en åpen krets i en hul bølgeleder ikke er så eksakt i plassering som en
 20 metallvegg, vil det være "ende-effekter" med spredningsfelter, men i praksis er resonansfrekvensen for slike TE-modi veldig nært grensefrekvensen. For en bedre forståelse av konsepter som permittivitet, bølgeledere, bølgemodi, TE, TM, TEM, grensefrekvens, etc., vennligst se referansene [2, kap.1-3], [3, kap.3], [4, kap.7], [6], and [7].

Resonansfrekvensen og kvalitetsfaktoren for en resonator kan måles ved ganske enkelt å benytte to forskjellige fremgangsmåter: Fremgangsmåten med refleksjonskoeffisient og fremgangsmåten med transmisjonskoeffisient [3, seksjon 3.5].
 30 Når den første fremgangsmåten benyttes, trengs bare en koplingsprobe, mens den siste fremgangsmåten behøver to prober. Fremgangsmåten med refleksjonskoeffisient innebærer å sende inn en bølge som forplanter seg langs en bølgeleder mot resonatoren og måling av den reflekterte effekten. Når
 35 bølgens frekvens er lik resonansfrekvensen i resonatoren vil en større del av energien trenge inn i resonatoren enn på andre frekvenser. Resonansen vil derfor opptre som en dipp i refleksjonskoeffisienten målt som funksjon av frekvensen. Fremgangsmåten med transmisjonskoeffisient innebærer at

feltet i resonatoren eksiteres gjennom en koplingsprobe og måles gjennom en annen koplingsprobe. Da frekvensen på den eksiterende bølgen er lik resonansfrekvensen vil et sterkere felt bygges opp i resonatoren enn på andre frekvenser.

5 Resonansen vil derfor opptre som en topp i transmisjonskoeffisienten målt som funksjon av frekvensen.

Mikrobølgeresonatorsensorer i rør

Når en mikrobølgeresonatorsensor realiseres i et rør for
10 det formål å måle permittiviteten i fluidet som strømmer i røret, må diskontinuitetene ha en struktur som er åpen nok, slik at fluidet kan passere gjennom sensoren og samtidig forhindre at energien slipper ut. Disse egenskapene kan oppnås på grunnlag av i hovedsak tre forskjellige prinsipper.
15 Det første prinsippet er å bruke en resonansfrekvens som er under grensefrekvensen for røret, i hvilket tilfelle røret forhindrer energien fra å unnslippe fra resonatoren. Det andre prinsippet er å isolere en seksjon av røret med gitre, i hvilket tilfelle hullene i gitrene er bølgeledere under
20 grensefrekvensen. Det tredje prinsippet er å ha en i hovedsak ikke-strålende resonatorstruktur utenfor røret, og å la bare en liten del av energien å lekke inn i røret i form av et strøfelt, for eksempel gjennom et hull.

En praktisk type diskontinuitet (prinsipp 1) er en
25 økning i grensefrekvensen [5], [6]. Om resonansbølgelederen har en grensefrekvens som er lavere enn den for røret, og resonansfrekvensen for den benyttede modusen er den samme som grensefrekvensen, kan ikke energien forplante seg i røret. Det behøves derfor ingen annen reflekterende diskontinuitet.
30 Dette tillater strukturer som er veldig åpne for strømmingen som skal anvendes. Finnesensoren er et godt eksempel på en slik struktur [6]. En annen praktisk diskontinuitet (prinsipp 2) er et gitter, med så små hull at energien ikke kan slippe gjennom [7], [8].

35 Mikrobølger kan forplante seg langs en stor variasjon av strukturer. Fordi metall reflekterer mikrobølger kan mikrobølger ledes i transmisjonslinjer laget av metallrør, kalt hule bølgeledere (ofte ganske enkelt kalt bølgeledere). Mikrobølger kan også dannes som forplanter seg i andre

strukturer enn (hule) bølgeledere. En hvilken som helst struktur som inneholder minst to separate ledere vil støtte TEM-type modi, som har uendelige små feltkomponenter i lengderetningen eller ingen i det hele tatt. Blant de vanlige TEM transmisjonslinjer er koaksialkabelen og to-lederkabelen. Andre vanlige TEM-linjer er mikrobåndlederen (eng.: microstrip line) og båndlederen. I transmisjonslinjer slik som mikrobåndlederen, der bølgene forplanter seg delvis i dielektrikummet og delvis i luften, vil det være en liten feltkomponent i lengderetningen. De kalles derfor ofte kvasi-TEM linjer. De kan imidlertid med stor nøyaktighet behandles som TEM-linjer. Fordi de ikke har feltkomponenter i lengderetningen, forplanter TEM-modene seg med samme forplantningskonstant som plane bølger.

En resonator er en struktur som har i det minste en naturlig egenfrekvens hvor en oscillasjon kan oppstå ved påtrykning av et drivesignal. I en mikrobølgeresonator vandrer elektromagnetiske bølger frem og tilbake mellom reflekterende punkter, resulterende i et standbølgeomønster, der energien skifter mellom elektrisk og magnetisk energi. Størrelsen og formen på strukturen og dielektrikummet og de magnetiske egenskapene for mediet hvor mikrobølgene forplanter seg bestemmer resonans- eller oscillasjonsfrekvensen.

Som nevnt ovenfor kan mikrobølgeresonatoren være en del av en slik transmisjonslinje som er avgrenset av to diskontinuiteter. Egenskapene for en slik mikrobølgeresonator uten noen tilkoplingskretser kan uttrykkes ved resonansfrekvensen og kvalitetsfaktoren. Kvalitetsfaktoren vil typisk være bestemt av tap av mikrobølgeenergi i dielektrikummet, tap i metallet og tap ved stråling ut av resonatoren.

Det er ingen grunn for at strukturen ikke også kan være ikke-uniform. Derfor kan tverrsnittet for resonansstrukturen inne i røret være forskjellig på forskjellige steder langs strukturen. For tilfellet med ikke-uniforme strukturer er bølgemodusen uhomogen og kan vanligvis verken bli beskrevet av noen bølgemodi kjent fra litteraturen eller bli løst analytisk. I slike tilfeller kan resonansfrekvensene og

feltfordelingene beregnes tilnærmet ved numeriske metoder ved for eksempel å benytte FEM-programvare (eng.: finite element method). En hvilken som helst struktur med en resonansfrekvens som er lavere enn grensefrekvensen for røret kan i prinsippet benyttes som en resonatorsensor.

To eksempler på mulige strukturer vil her bli gitt. Det første er den såkalte semisektorstrukturen, som har blitt beskrevet i [3], [6], og [7]. Figur 1 viser et eksempel på en semisektorstruktur 20. Det har blitt vist i [3] at en slik struktur bærer en TE-modus, som har en grensefrekvens som er lavere enn den for røret alene. Fordi strukturen er åpen i endene, er resonansfrekvensen lik grensefrekvensen for semisektorseksjonen. Derfor kan ikke energi unnsnippe inn i røret 2 og strukturen er anvendelig som resonatorsensor.

Figur 2 viser en annen mulig resonansstruktur. Det er en bøyd metallstav 30 som er kortsluttet til veggen av røret 2 i en ende og åpen i den andre enden. Ifølge ligning (8) vil den ha en første resonansfrekvens ved en bølgelengde der staven er $\lambda/4$ lang. På grunn av den ikke-uniforme strukturen er det vanskelig å forutsi resonansfrekvensen nøyaktig, men en tilnærming kan finnes ved numeriske metoder. Dersom staven er laget lang nok vil resonansfrekvensen være lavere enn grensefrekvensen for røret 2, i hvilket tilfelle strukturen kan benyttes som en resonatorsensor.

Grunnleggende om DP-massestrømningsmålinger

En hvilken som helst ikke-uniform seksjon av røret 2 vil resulterer i en endring av strømningshastigheten. Basert på teorien om fluiddynamikk er det kjent at en endring i strømningshastighet forårsaker en endring i trykk. Dette differensielle trykket er relatert til massestrømningen. Derfor kan en måling av det differensielle trykket (DP) forårsaket av en ikke-uniform seksjon av røret brukes til å avlede massestrømningen. De mest vanlig benyttede strukturene (DP elementer) for DP-målinger er venturi-røret, dvs. en rørseksjon med en diameter som er mindre enn det resterende røret, og avblendingsplaten. Massestrømningsmålinger med slike strukturer har blitt beskrevet i internasjonal standard ISO 5167-1 [9].

En spesiell type DP-element er V-konusen, som har blitt beskrevet i [10].

Når DP-målinger benyttes til å finne massestrømmingen for de enkelte komponentene i en tofase- eller
5 flerfasestrømning, bør formlene vanligvis korrigeres for fremtreden av saking, som betyr at gassen og væsken beveger seg med noe forskjellig hastighet. Dette gjøres vanligvis ved innføring av en såkalt tofase multiplikator som er funksjoner av de enkelte andeler og tettheten for hver av komponentene
10 [11, kap 11]. Derved vil en måling av sammensetning, for eksempel vann-, olje- og gassinhold, for fluidet i kombinasjon med en DP-måling forbedre massestrømningsmålingen i tofase- eller flerfasestrømninger.

15 *Eksempelutførelser av oppfinnelsen.*

Et antall eksempelutførelser av den integrerte mekaniske strukturen 3 ifølge oppfinnelsen som kan benyttes både som mikrobølgeresonatorsensor og differensialtrykkelementer vil bli videre detaljert nedenfor.

20 I alle utførelsesformene er det antatt at utgangsignalene fra mikrobølgeproben og fra differensialtrykket er inngangssignaler til en mikroprosessor eller beregningsmidler som benytter standard grensesnittsmidler og teknikker for grensesnitt. For enkelhet
25 er ikke de nøyaktige posisjonene til probene i apparatet detaljert i Figurene, imidlertid så vil det bli forstått, spesielt i betraktning av referansene, at det finnes et stort antall muligheter for plassering av probemidlene.

Mikroprosessormidlene eller beregningsmidlene kan typisk
30 bli tilpasset for å kjøre en PVT-programvare. Videre så kan mikroprosessormidlene omfatte standard fremvisningsmidler, standard inngangssignal- og utgangssignalmidler, og standard datalagringsmidler av velkjente typer.

35 *Venturi-rør*

Den integrerte mekaniske strukturen illustrert i Figur 3 omfatter en del av røret som er formet som et Venturi-rør 3A. Dersom tilleggsvis mekaniske elementer 4, for eksempel i form av gitre 4A, legges til et Venturi-rør, vil den også

virke som en mikrobølgeresonator. Gitrene 4A kan utformes slik at de ikke forstyrrer strømmingen mer enn nødvendig, dvs. ikke forstyrrer DP-målingen, og fremdeles begrenser mikrobølgene [3], [8]. Det finnes mange mulige variasjoner av hvor gitrene 4A kan monteres. Dersom de monteres i innsnevringen (den smale delen) av Venturi-røret, som vist i Figur 3, vil mikrobølgeresonatoren være en standard sylindrisk endegitter-resonator [3, kap. 7].

Gitrene kan bestå av enkle kryssgitre, for eksempel utført i form av to kryssede plater. Det er tilstrekkelig om lengden av gitret er lik den indre diameteren til røret. I rør med små diametere hvor sensorene er små er dette ikke så viktig, men i større sensorer vil lange gitre bidra betydelig til produksjonskostnadene for sensoren. Stjernegitre bestående av fire kryssede plater kan benyttes ved større dimensjoner. Fordi hullene da er mindre enn for gitre med bare to kryssede plater, antas de å gi bedre isolasjon, slik at stjernegitre kan lages kortere. Generelt vil det ofte være et ønske å gjøre gitrene så korte som mulig for å redusere produksjonskostnader og plassbehov mest mulig. Andre former for gitre er drøftet i kapittel 7 i [3].

Dersom gitrene 4A monteres i røret 2 på begge sider av innsnevringen, som vist i Figur 4, vil det opptre resonansmodi med mesteparten av energien begrenset til delene med stor diameter på begge sidene av gitrene og innsnevringen. Avhengig av forholdet mellom resonansfrekvensen, grensefrekvensen i innsnevringen, og lengden av innsnevringen, vil energien på begge sider av innsnevringen bli koplet i større eller mindre grad. Dersom de er kraftig koplet, vil energien opptre som en enkelt modus med to maksimalverdier for feltet. I dette tilfellet vil en hvilken som helst uhomogenitet i strømmingen, for eksempel væskedråper eller gassbobler som beveger seg gjennom resonatoren, forårsake to topper i tidsresponsen. Dersom variasjonene er store nok til å gi tilstrekkelig følsomhet, kan dette fenomenet benyttes til å utlede strømningshastigheten fra autokorrelasjonen av tidsresponsen for resonatoren. Denne redundansen i hastighetsmålingen (autokorrelasjon i tillegg til DP-måling) kan benyttes til å

øke den totale nøyaktigheten. Dersom koplingen gjennom innsnevringen er veldig liten, virker kavitetene på hver side av innsnevringen (begrenset av gitrene 4A og innsnevringen) som separate resonatorer. I dette tilfellet er det mest
5 passende å benytte separate koplingsprober for de to kavitetene. Hastigheten kan utledes fra krysskorrelasjonen av tidsresponsene fra de to resonatorene. Alternativt, om den ekstra hastighetsmålingen ikke er ønsket, er det tilstrekkelig å benytte bare et gitter på hver side av
10 innsnevringen.

En mikrobølgeresonator kan realiseres i et Venturi-rør ved å benytte andre strukturer enn gitre også. I ett eksempel festes en aksial finne 4B til veggen i en del av innsnevringen, som vist i Figur 5, seksjonen med finnen 4B
15 har en lavere grensefrekvens enn resten av innsnevringen, og vil danne en sylindrisk finneresonatorsensor [3], [6]. Dersom innsnevringen fortsetter med uendret diameter over en lengde lik en indre diameter for innsnevringen på begge sider av finnen 4B (dvs. den totale lengden av den smale delen av
20 innsnevringen er to diametre pluss lengden av finnen 4B), vil resonatoren i praksis være ikke-strålende og ha en høy kvalitetsfaktor [3]. For mange praktiske formål vil også en kortere smal seksjon være god nok. For lengden, høyden og andre designparametere for finnen 4B, se [6].

25 Det kan imidlertid nevnes at det ofte vil være ønskelig at finnen i så liten grad som mulig stikker inn i røret. For å oppnå dette kan det benyttes en lav finne, dvs. en finne som bare stikker en kort distanse inn i røret. Imidlertid øker grensefrekvensen for rørseksjonen med finnen raskt når
30 høyden på finnen reduseres, dermed også økende resonansfrekvensen for finneseksjonen. Dette gir dårligere isolasjon av mikrobølgeresonatoren mot hva som skjer utenfor finneseksjonens område.

Å bruke en finne som strekker seg forbi senterlinjen for
35 røret vil forbedre frekvensresponsen, og frekvensen blir lavere, noe som kan være ønskelig. Ulempen er imidlertid her at det elektriske feltet blir mer konsentrert i det smale gapet mellom finnens ytterkant og sensorrørets vegg. Sensitiviteten blir derfor ujevnt fordelt over

sensortverrsnittet. For de fleste anvendelser synes en finne som strekker seg inn til senteraksen for sensorrøret å være et fornuftig kompromiss.

I betraktning av at finnens lengde har en relativt liten
5 effekt på resonansfrekvensen, bestemmer hovedsakelig andre faktorer enn resonansfrekvensen hvor lang finnen skal være. Lengden bør imidlertid være kortere enn 1.1 ganger rørets indre diameter for å oppnå den største avstanden til andre modi. Simuleringer har vist at denne avstanden blir litt
10 mindre for kortere finner, men mer viktig er det at sensoren blir kortere, slik at det momentane målevolumet som påvirker måleresultatet blir mindre. En lengre finne resulterer i en middelvei over et større volum, noe som gjør sensoren mindre følsom for inhomogeniteter. Det synes dersom som om en
15 finnelengde på 1 rørdiameter er et godt valg.

I anvendelser der målevolumet inneholder faste komponenter er det fordelaktig om finnen har en hellende eller buet fremre kant. Dette vil til en viss grad forhindre
fortetning ettersom faste partikler ledes forbi finnen. I
20 andre anvendelser hvor forskjellig typer av avsetninger eller oppbygning av fortetninger er et problem, renses rørsystemet noen ganger med et stempellignende verktøy kalt en "pig". En slik pig kan ikke passere en sensor med fastmonterte innstikkende deler. Deler av en løsning kan være en
25 innskyvbar, fjærbelastet finne med skråkanter.

Invertert venturi

Dersom måleren er utformet med en økning av rørets diameter i stedet for en reduksjon, vil strukturen være et
30 invertert venturi-rør 3B, som illustrert i Figur 6. Differensialtrykket som dannes av strømmingen i en slik struktur er også invertert sammenlignet med et venturi-rør. Den utvidede seksjonen 3B har en lavere grensefrekvens for mikrobølgene enn hovedrøret 2. På denne måten oppnås en åpen
35 mikrobølgeresonator med et resonansvolum som er større i diameter enn røret. Resonansfrekvensen for den benyttede modusen kan da bli lavere enn grensefrekvensen for selve røret. Den inverterte venturi-seksjonen gir følgelig en mikrobølgeresonator med en resonansfrekvens som er under den

laveste grensefrekvensen i hovedrøret, og energi kan derfor ikke stråle ut i røret, selv fra en slik åpen struktur, fordi energi ved de aktuelle frekvensene ikke kan forplante seg i hovedrøret på hver side av den inverterte venturi-seksjonen.

5 På grunn av de åpne endene vil den også bære en TE-modus med resonansfrekvens $f_x = f_{cw}$, der f_{cw} er grensefrekvensen for den utvidede seksjonen. Fordi $f_{cp} > f_{cw}$, der f_{cp} er grensefrekvensen, kan ikke energi unnslippe. Den utvidede seksjonen kan derfor benyttes som både en

10 mikrobølgeresonatorsensor og et invertert venturi DP-element.

Koaksiale strukturer

Dersom et sylindrisk metallegeme 3C monteres i midten av røret 2 som vist i Fig. 7, så danner metall-legemet 3C og

15 røret 2 sammen en koaksial struktur som bærer en mikrobølge TEM bølgemodus, som ikke har noen grensefrekvens, og bølgelengden er den samme som for en planbølge. Mikrobølgene reflekteres fra endene av legemet og danner derved en resonator. Legemet holdes på plass av støttestrukturer 5 i

20 hver eller én av endene. Støttene 5 kan enten være dielektriske, eller laget av et ledende materiale slik at de danner endegitre for resonatoren. Dersom en støtte 5 er laget av metall, er resonatoren kortsluttet i den enden. Dersom begge ender er kortsluttet av støtter, opptrer den første

25 resonansfrekvensen når avstanden mellom støttene er $\lambda/2$, ifølge ligning (7). Det elektriske feltets maksimalpunkt er midt mellom støttene. Også, dersom støttene 5 er laget av et ikke-ledende materiale, opptrer resonans ved frekvensen der legemet 3C er $\lambda/2$ langt, ifølge ligning (6). Da har det

30 elektriske feltet sine maksimalpunkter ved endene og er null midt mellom endestøttene 5. De to separate maksimalpunktene gir muligheten for også å utlede strømningshastigheten fra autokorrelasjonen av en tidsserie. Dersom en støtte 5 er laget av et ledende materiale og den andre av et ikke-ledende

35 materiale (eller er fraværende), vil resonatoren være $\lambda/4$ lang, ifølge ligning (8). Ved å utforme det sylindriske metallegemet langt nok, så vil resonansfrekvensen bli lavere enn grensefrekvensen for røret alene. I et sylindrisk rør er modusen med den laveste grensefrekvensen TE_{11} -modusen. Den

tilsvarende grensefrekvensen for fritt rom er $\lambda_{c,rør}=1.71 \cdot D_p$, der D_p er rørets indre diameter. Ved å lage den sylindriske metallegemet lengre enn $0,85 \cdot D_p$ sikres det at resonansfrekvensen er under grensefrekvensen for røret. Det sirkulært symmetriske TEM-feltet i den koaksiale strukturen vil ikke kople effektivt til TE_{11} -modusen, som ikke har sirkulær symmetri. Det er følgelig mulig å oppnå god isolasjon for mikrobølgeresonatoren med relativt korte seksjoner av rør utenfor koaksialseksjonen.

10 Det sylindriske legemet 3C reduserer tverrsnittsarealet og danner derved et differensialtrykk relatert til strømmingen på samme måte som et venturi-rør. Av hydrodynamiske årsaker bør endene av legemet 3C være avsmalnet (dvs. konisk) som vist i prinsippet i Fig. 7.

15 Fordi det sylindriske legemet 3C danner både en mikrobølgeresonator og et DP-element, kan strukturen 3 benyttes som en kompakt flerfasemåler.

Avblendingsplate (eller åpningsplate)

20 Avblendingsplaten eller åpningsplaten 3D er mye benyttet som et DP-element for måling av hovedsakelig gassstrømninger, men kan også benyttes for flerfasestrømninger, i det minste for våtgasstrømninger. Dersom et endegitter 3F monteres på en side av blendingsplaten, som vist i Fig. 8, er 25 rommet mellom blendingsplaten 3D og endegitteret 3F et mikrobølgehulrom. Strukturen 3 kan derfor benyttes som en kompakt flerfasemåler. For utformingen av endegitteret 3F og maksimumstørrelsen på hullet i avblendingsplaten 3D, se [3].

30 *Finne V-konus*

I tillegg til venturi-røret og avblendingsplaten, så er V-konusen 3G, som illustrert i Fig. 9, et velkjent DP-element [10]. V-konusen virker også godt som en mikser for fluidet slik at målingene er så og si uavhengig av strømningsregimet 35 oppstrøms for måleren. I en versjon av oppfinnelsen er V-konusen festet til rørveggen med en finne 6 som strekker seg over hele lengden av konusen, som vist i Fig. 9. Denne versjonen er en semisektor-struktur [3] med en sektorvinkel på 360° og et forhold mellom radiene $r = b/a$ (se Fig. 1) som

varierer langs strukturen. I dette dokumentet er denne versjonen kalt en finne-V-konus. Tilfellet med en mikrobølgeresonator med et rør med et koaksialt sylindrisk element, dvs et sylindrisk element med en uniform radius, r , ble kort beskrevet ovenfor. Finne-V-konusen forventes å ha 5 mikrobølgeresonans ved en frekvens lavere enn grensefrekvensen for røret 2, men på grunn av den ikke-uniforme utformningen (r varierer langs resonatoren) er det vanskelig å teoretisk forutsi den nøyaktige 10 resonansfrekvensen.

En sektor- eller semisektorresonator med åpne ender forventes å ha resonans ved en frekvens veldig nær grensefrekvensen [3]. Man ville intuitivt forvente at resonansfrekvensen f_r for finne-V-konusen 3G hovedsakelig er 15 bestemt av konusens største radius, noe som ville gi den laveste resonansfrekvensen. Dersom den 2" finne-V-konusen vist i Fig. 9 benyttes som et eksempel, $a = 25$ mm og $b = 20.8$ mm. Man får da

$$r = \frac{b}{a} = \frac{20.8}{25} = 0.832 \quad (10)$$

Grensefrekvensen som beregnes ved å benytte denne verdien er 20 en minimumsgrense for den forutsagte resonansfrekvensen, fordi grensefrekvensen beregnet for en hvilken som helst annen del av V-konusen gir en høyere verdi. Den såkalte p -verdien for den laveste modusen ($TE_{1/2,1}$) kan tilnærmes ved polynomet (fra tabell 5.10a i [3]):

25

$$p'_{1/2,1} = 1.1657 - 1.7351r + 2.3644r^2 - 2.1955r^3 + 1.1584r^4 - 0.2579r^5 = 0.5490 \quad (11)$$

Minimumsgrensen for grensefrekvensen kan så bli beregnet fra (ligning (6.2) i [3]):

$$f_{c,1/2,1} = \frac{cp'_{1/2,1}}{2\pi a} = 1.048 \text{GHz} \quad (12)$$

30

Fordi denne verdien forventes å være en grovtilnærming, ble strukturen simulert ved å benytte en HFSS (Høy Frekvens

Struktur Simulator - en programvare fra Hewlett-Packard basert på elementmetoden). Simuleringen viste en frekvensrespons med en resonans ved 1.285 GHz, noe som er 22.6% høyere enn den beregnede minimumsgrensen. Ingen andre resonanser var i nærheten av denne resonansen, noe som gjør den velegnet for måleformål. Basert på forståelsen av finne-V-konusen som en semisektor-struktur kan feltet forventes å være konsentrert til den smale åpningen, der diameteren til konusen er størst, og til siden som er motsatt til finnen. Dette ble bekreftet av simulering. Fordi resonansfrekvensen utledet fra simulering også var noe høyere enn minimumsgrensen beregnet fra ligning (12), som forventet, bekreftet simulering at finne-V-konusen virker som en ikke-uniform semisektor-resonator.

Fordi finne-V-konusen er kjent fra tidligere å være et godt DP-element, og har nå blitt vist å være en god mikrobølgeresonator, kan det konkluderes at finne-V-konusen vil virke som et godt eksempel på oppfinnelsen. Bare en eller to koplingsprober behøver å legges til finne-V-konusen for å gjøre den passende som en kompakt flerfasemåler.

Finnen 6 kan ha en varierende tykkelse. Den kan ha tykkere deler omfattende innføringer for trykktappinger. Dersom trykktappingene er plassert i rørets vegg, kan finnen 6 være tynn langs hele dets lengde.

Standard V-konus

En standard V-konus festes til rørveggen bare i den tynne enden ved hjelp av en kort støtte 8, som vist i Fig. 10. Denne strukturen kan også forventes å oppføre seg som en resonator. Strukturen er ikke en semisektor, men ligner mer strukturen vist i Fig. 2. Strømmen kan forventes å være langsgående (dvs. aksial) i konusen og kortsluttet til jord gjennom støtten. I den brede enden av konusen er resonatoren åpen. I følge ligning (8) skulle derfor den første resonansen være ved frekvensen der strukturen er $\lambda/4$ lang. Imidlertid, på grunn av den smale åpningen mellom konusen og rørveggen, er resonatoren kapasitivt belastet i den åpne enden. Dette vil gjøre at resonatoren ser elektrisk lengre ut, og fører til en lavere resonansfrekvens enn den som beregnes fra den

fysiske lengden. Feltet i den smale åpningen kan forventes å være likt fordelt på grunn av den koaksiale geometrien i den enden. For å verifisere dette og for å bestemme resonansfrekvensen for en standard V-konus mer eksakt, ble også strukturen vist i Fig. 10 simulert ved bruk av HFSS. For enkelhet ble støtten modellert som en kort finne. Modellen var derfor identisk med den i Fig. 1, bortsett fra lengden for finnen.

Ved å fortolke V-konusen og støttefinnen som en $\lambda/4$ resonator, er lengden av strukturen 78 mm som målt langs senterlinjen. Dersom den kapasitive lasten ses bort fra, får man en resonansfrekvens på 961 MHz. Dette er en øvre grense fordi den kapasitive lasten fra konusen til rørveggen kan forventes å redusere frekvensen betraktelig. Simuleringen med HFSS bekreftet antagelsene. Igjen ble en fin resonans-topp fremvist. Resonansfrekvensen er 570 MHz. Simuleringen viste også at det elektriske feltet er likt fordelt rundt omkretsen og har et aksialt maksimumspunkt konsentrert til den smale åpningen mellom rørveggen og den videste delen av konusen, som forventet.

En fysisk modell av en V-konus lik den i Fig. 10 har blitt bygget. Modellen var laget av isopor og dekket av aluminiumsfolie. Denne ble satt inne i røret med to koplingsprober. Den indre diameteren for sensoren var 96 mm. Formen på den målte frekvensresponsen var veldig lik simuleringsresultatet. Den målte resonansfrekvensen var 302 MHz, som redusert til å svare til en diameter på 50 mm, som simulert, gir $96/50 \cdot 302 = 580$ MHz. Dette er nesten identisk med simuleringsresultatet, som gir tillit også til korrektheten av de andre simuleringsresultatene.

En virkelig standard V-konus har blitt bygget for et 3"-rør og med en sylindrisk støtte, og med relative dimensjoner som er noe forskjellig fra modellen i Fig. 10. Den målte resonansfrekvensen for den luftfylte sensoren var 600 MHz. Den målte tilsvarende frekvensresponsen er vist i Fig. 12. Den brede kulen til høyre for resonanstoppene skyldes en resonans inne i probene, og kan elimineres ved en liten endring i utformingen av fremtidige enheter. Selv i måleenheten forstyrrer ikke kulen operasjonen av sensoren, på

grunn av avstanden til kulen, den lave og brede formen av kulen, og det faktum at resonanstoppene bare beveger seg til venstre, når en fluidstrømning måles.

5 Tester har blitt utført med den bygde standard V-konuserheten i en testsløyfe med dynamisk strømning. Resultatene har vist at enheten oppfører seg som forventet både som et DP-element og som en mikrobølgeresonator.

Y-V-konus

10 Utformingen av standard V-konuserheten, som har bare en støtte, ser intuitivt følsom ut for vibrasjoner forårsaket av turbulens. Det ville derfor synes fordelaktig å ha flere, for eksempel tre støtter (korte finner eller ben i en Y-form med 120° mellom støttene) i stedet for én for å gjøre
15 konstruksjonen mer robust. Økning i antallet støtter vil ved grensen effektivt omgjøre støttene til en vegg, der V-konuserheten er kortsluttet. Strukturen vil da være en koaksial resonator som er kortsluttet i en ende og åpen i den andre. Sammenlignet med standard V-konuserheten vist i Fig. 10 vil $\lambda/4$ -
20 resonatoren derfor være forkortet med en radius av røret og halve bredden av støttene ($25 + 9.7/2 = 29.8$ mm), derved økende resonansfrekvensen. Dersom den effektive lengden for strukturen med en støtte er 131.6 mm ($\lambda/4$ ved 570 MHz), kan den nye effektive lengden forventes å være omtrent $131.6 -$
25 $29.8 = 101.8$ mm, som gir en resonansfrekvens på 737 MHz.

Y-V-konuserheten (strukturen med tre støtter) har blitt simulert med HFSS. Modellen i Fig. 10 ble benyttet og to støtter til ble lagt til ved vinkler på $\pm 120^\circ$ relativt til den opprinnelige støtten. Resultatet viste at
30 resonansfrekvensen har økt fra 570 MHz til 774 MHz som et resultat av økende antall støtter. Igjen ga de enkle teoretiske betraktningene kvantitativt sett det riktige resultat, men mislyktes med å forutsi resonansfrekvensen nøyaktig. Frekvensresponsen var god og viste ingen andre
35 resonanser under 2.5 GHz.

Bjelke-montert V-konus

I et annet festearrangement kan V-konuserheten 3G være forsynt med en eller flere korte tapper 9 ved den tykke

7enden. Tappene er festet til en eller flere bjelker 10 som er festet til den indre veggen av røret 2. I ett eksempel, som illustrert i Fig. 11, kan tappen(e) 9 være en enkelt kort aksial tapp festet til en enkelt bjelke 10 plassert langs en diameter av et tverrsnitt av røret 2.

Koplingsprober

For å utføre målinger med en resonator må den koples til ekstern elektronikk via koplingsprober 7. En koplingsprobe danner et elektromagnetisk felt som i mange tilfeller kan bli tilnærmet med et elektrisk eller magnetisk dipolmoment, som kopler til det tilsvarende feltet i resonansmodusen. Dersom senterlederen for koaksialkabelen som mater resonatoren strekker seg en liten distanse inn i resonatoren, danner den en koplingsprobe. Lengden av proben er liten sammenlignet med bølgelengden, og inputimpedansen er derfor tilnærmet lik den for en åpen krets. Strømmen i proben er liten, men spenningen danner et elektrisk felt mellom proben og den nærliggende veggen i resonatoren. Feltet stråler energi inn i resonatoren som en liten monopolantenne. Dipolmomentet er tilnærmet proporsjonalt med kvadratet av lengden av proben, men avhenger også av tykkelsen av proben, diameteren for den ytre lederen og permittiviteten til isolatoren. Proben kopler til det elektriske feltet som er perpendikulært på veggen der hvor proben er anbrakt. Koplingen er sterkere jo nærmere proben er plassert et maksimalpunkt for feltet. Kopling til uønskede modi kan unngås ved å anbringe proben på et sted der det elektriske feltet for en slik modus er null. Andre varianter av koplingsproben og flere praktiske momenter som vil kunne komme til nytte ved utøvelse av oppfinnelsen er forklart i seksjon 3.7.3, side 40 og videre i referanse [3]

Dersom det benyttes koplingsprober 7, som indikert i Fig. 9 og 10, som kopler til det elektriske feltet, bør de fortrinnsvis være plassert ved rørveggen nært den smale åpningen mellom konusen og veggen, der den elektriske feltstyrken er høyest, og den beste koplingen derfor oppnås. Alternativt, så kan prober som kopler til det magnetiske

feltet benyttes, og bør fortrinnsvis være plassert nært til den smale enden av konusen, der det magnetiske feltet er kraftig.

5 *V-konus flerfasemålere*

Ovenfor ble det vist at en V-konus, med en støtte langs hele lengden av konusen eller en del av den, eller med flere støtter i den smale enden av konusen, kan benyttes som en mikrobølgeresonatorsensor. Fordi V-konusen også er et velkjent DP-element, behøver det bare legges til 10 koplingsprober til en V-konus for å gjøre den brukbar som en kompakt flerfasemåler som beskrevet ifølge oppfinnelsen. I denne grunnleggende konfigurasjonen er den en vann- og hydrokarbonmassestrømningsmåler, som kan være 15 tilfredsstillende for mange anvendelser, spesielt med en våtgasstrømning. Om kombinert med en PVT-programvarepakke eller en tetthetsmåler blir den en full 3-fase flerfasemåler.

Spesielt i våtgasstrømning har væsken en tendens til å strømme langs rørveggen i et ringformet strømningsregime. For 20 mange sensorutforminger kan den ujevne fordelingen over tverrsnittet være en utfordring og kan forårsake behov for en separat mikser oppstrøms for sensoren. En spesiell fordel med V-konus flerfasemåleren er at den også virker som en mikser. Strømningen akselereres i den smale åpningen og fører til at 25 væskefilmen brytes opp. I tillegg er det elektriske feltet jevnt fordelt i hele åpningen og gjør sensoren ufølsom for hvordan fluidet er fordelt i åpningen.

Selv om bruk av en PVT-programvarepakke sammen med V-konus enheten er en foretrukket utførelsesform av 30 oppfinnelsen, skal det forstås at PVT-programvarepakken også kan benyttes i alle typer av apparat ifølge oppfinnelsen med de forskjellige typene implementeringer av den integrerte mekaniske strukturen som definert av patentkravene.

REFERANSER

- 5 [1] Nyfors, E., A. Wee, "Measurement of mixtures of oil, water, and gas with microwave sensors. New developments and field experience of the MFI MultiPhase, and WaterCut Meters of Roxar", *Proc. Subsurface Sensing Technologies and Applications II, ved SPIE's 45th Annual Meeting, San Diego, juli-august 2000, sidene. 12-21, Invitert innlegg.*
- 10 [2] Nyfors, E., P. Vainikainen, *Industrial microwave sensors*, Artech House, Norwood, 1989, Kapitlene 1-3.
- 15 [3] Nyfors, E., *Cylindrical microwave resonator sensors for measuring materials under flow*, Thesis, Helsinki Univ. of Tech., Radio Lab. Report S243, mai 2000, 181 sider
- [4] Collin, R.E., *Foundations for microwave engineering*, New York: McGraw-Hill, 1966, Kapittel 7.
- 20 [5] Tiuri, M.E., E.G. Nyfors, P.-V. Vainikainen, S.H. Ståhl, *Mittausmenetelmä ja -laite kiinteän, rakeisen aineen massavirtauksen ja kosteuden tai jonkin muun ominaisuuden määrittämiseksi. (Method and device for measuring the material flow and the moisture, or some other property, of a solid, granular material; in Finnish)*, finsk patent Nr. 69372, innlevert 30.12.1983.
- 25 [6] Nyfors, E.G., Å. Bringsvor, *Måler, særlig for kontinuerlig måling av blandingsforholdet mellom to fluider som strømmer i rør, f.eks. vanninnhold i olje; samt fremgangsmåte for gjennomføring av slik måling. (Meter, especially for the continuous measurement of the mixing ratio of two fluids flowing in a pipe; and method for performing such measurements; in Norwegian)*, norsk patent 308.922, innlevert 3. juni 1998.
- 35 [7] Nyfors, E., *A method for measuring properties of flowing fluids, and a metering device and a sensor used for*

performing this method, norsk patentsøknad nr. 2000.2511, innlevert 15. mai 2000.

- 5 [8] Gaisford, S.G., J.P. Watjen, B.G. Bjørnsen, *Composition monitor and monitoring process using impedance measurements*, United States Patent, patent Nr. 5,103,181. innlevert 5. oktober 1988.
- 10 [9] International standard ISO 5167-1: *Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices*.
- [10] McCall, F., *Fluid flowmeter*, United States Patent 4,638,672, innlevert 11. september 1984.
- 15 [11] Chisholm, D., *Two-Phase flow in pipelines and heat exchangers*, Longman Inc. New York, 1983, Kapittel 11.

P a t e n t k r a v

1. Apparat for måling av sammensetningen og strømningshastigheten for et fluid (1) omfattende en blanding av for eksempel olje og vann i et rør (2), k a r a k t e r i s e r t v e d en integrert mekanisk struktur (3) som virker som en mikrobølgeresonatorsensor og som et differensialtrykkelement for å frembringe henholdsvis permittivitets- og strømningshastighetsmålinger, en ekstern eksitasjonskrets for å frembringe et mikrobølgefelt for nevnte resonator, og prober for mikrobølger og differensialtrykk som har utganger som forsyner innganger ved en mikroprosessor eller beregningsmidler for beregning av en egenskap for strømmingen.

2. Apparat ifølge krav 1 for måling av et fluid (1) omfattende også en gass, der apparatet omfatter en tetthetsmåler for å fremskaffe tetthetsmålinger i fluidet.

3. Apparat ifølge krav 1 for måling av et fluid (1) omfattende også en hydrokarbongass som er i termisk likevekt med oljen, der apparatet videre omfatter en PVT programvarepakke som kjører i en datamaskin eller mikroprosessorheten for å frembringe en beregning av hvordan hydrokarboninnholdet er fordelt mellom en væske (olje) og en gassfase.

4. Apparat ifølge et hvilket som helst av kravene 1-3, der mikrobølgeresonatoren er en hulromsresonator.

5. Apparat ifølge et hvilket som helst av kravene 1-4, der den integrerte mekaniske strukturen (3) omfatter en del av røret formet som et Venturi-rør (3A) for å virke som en mikrobølgehulromsresonator.

6. Apparat ifølge krav 5, der tilleggsvis mekaniske element(er) omfatter gitter(e) (4A) montert på en eller begge ender av Venturi-røret.

7. Apparat ifølge krav 6, der gitrene (4A) er montert i en innsnevring (smal del) av Venturi-røret (3A).
8. Apparat ifølge krav 6, der gitrene (4A) er montert i røret på begge sider av en innsnevring (smal del) av Venturi-røret (3A).
9. Apparat ifølge krav 5, der de tilleggsvisse mekaniske element(ene) omfatter en aksial finne (4B) festet til en innside av veggen i innsnevringen (smal del) av Venturi-røret (3A).
10. Apparat ifølge et hvilket som helst av kravene 1-4, der den integrerte mekaniske strukturen (3) omfatter en utvidet seksjon av røret danner et invertert Venturi-rør (3B), derved tilveiebringende et mikrobølgehulrom som har resonans ved en frekvens under grensefrekvensen for det utvidede røret.
11. Apparat ifølge et hvilket som helst av kravene 1-4, der den integrerte mekaniske strukturen (3) omfatter et koaksialt strukturelt element (3C) montert i midten av røret.
12. Apparat ifølge krav 11, der det koaksiale strukturelle elementet (3C) er montert med endestøtter (5), der minst en av disse er laget av et dielektrisk materiale.
13. Apparat ifølge krav 11, der det koaksiale strukturelle elementet (3C) er montert med endestøtter (5), der minst en av disse er laget av et ledende materiale.
14. Apparat ifølge ett av kravene 12-13, der endestøttene (5) er i form av gitre.

15. Apparat ifølge et hvilket som helst av kravene 1-4, der den integrerte mekaniske strukturen (3) omfatter en avblendingsplate eller åpningsplate (3D) og et endegitter (3F).
16. Apparat ifølge et hvilket som helst av kravene 1-4, der den integrerte mekaniske strukturen (3) omfatter en V-konus (3G) som er festet til veggen i røret (2) med bruk av festemidler.
17. Apparat ifølge krav 16, der festemidlene omfatter en eller flere finner (6) festet til en del av eller hele lengden av konusen.
18. Apparat ifølge krav 16, der festemidlene omfatter en eller flere radielt romlig likt atskilte deler, for eksempel finner.
19. Apparat ifølge krav 16, der festemidlene (6) omfatter en eller flere tapper (9) montert ved den tykke enden av konusen, der tappene festes til en eller flere bjelker (10), der bjelkene er festet til innsideveggen av røret (2).
20. Apparat ifølge hvilke som helst av de foregående kravene der apparatet omfatter midler for å bestemme en resonansfrekvens for mikrobølgehulrom og dermed en reell del av den dielektriske permittiviteten for fluidet i hulrommet, midler for å bestemme en kvalitetsfaktor for resonansen for mikrobølgehulrommet, og midler for å benytte resonansfrekvensen og kvalitetsfaktoren for å frembringe et mål for saltgehalten for det eventuelle vannet i fluidet.
21. Apparat ifølge krav 20, der målet for saltgehalten for det mulige vannet eller mulige endringer av dette benyttes som en indikator på når veggen begynner å produsere formasjonsvann.

22. Apparat ifølge et hvilket som helst av de foregående kravene, der den integrerte mekaniske strukturen (3) danner en kombinert enkelt struktur.

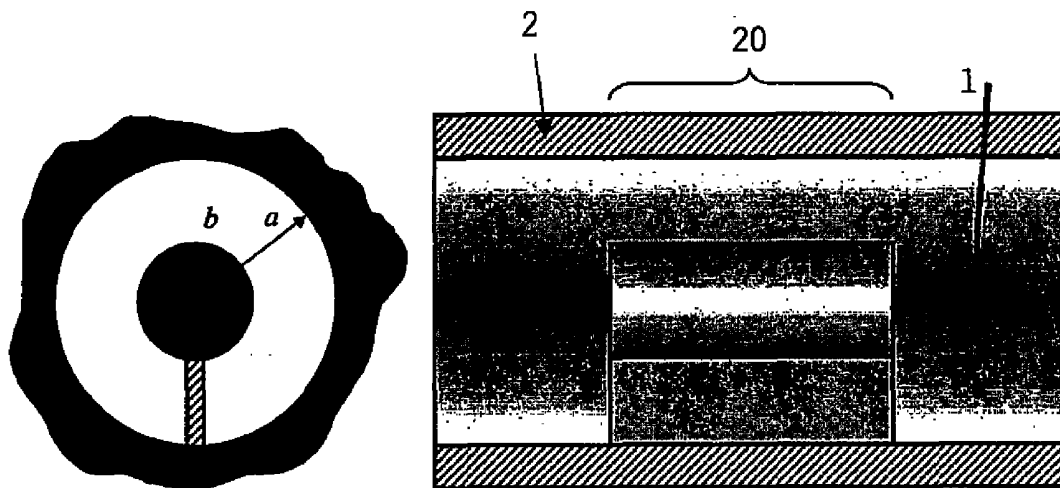


FIG. 1

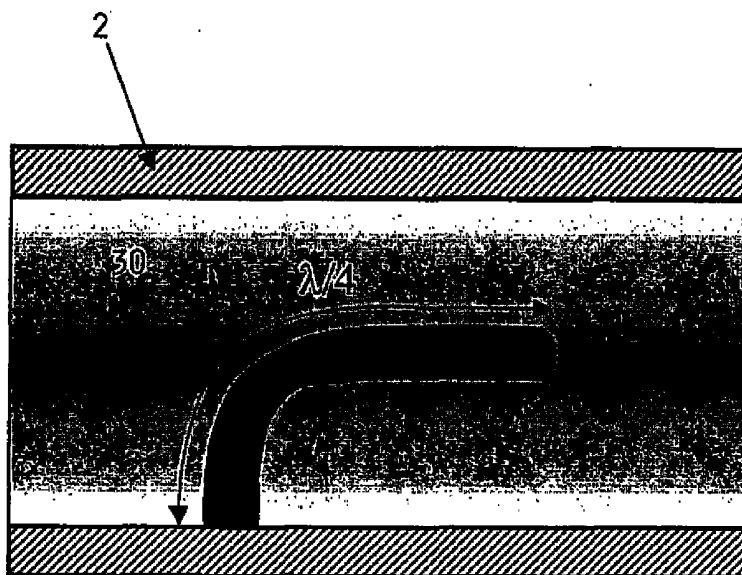


FIG. 2

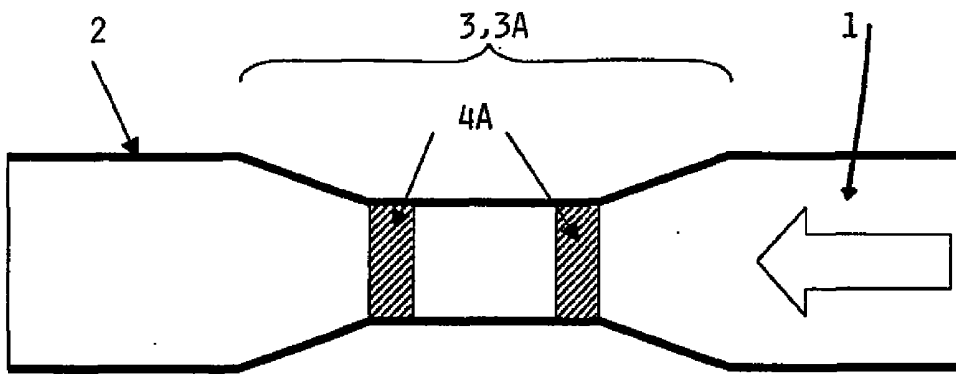


FIG. 3

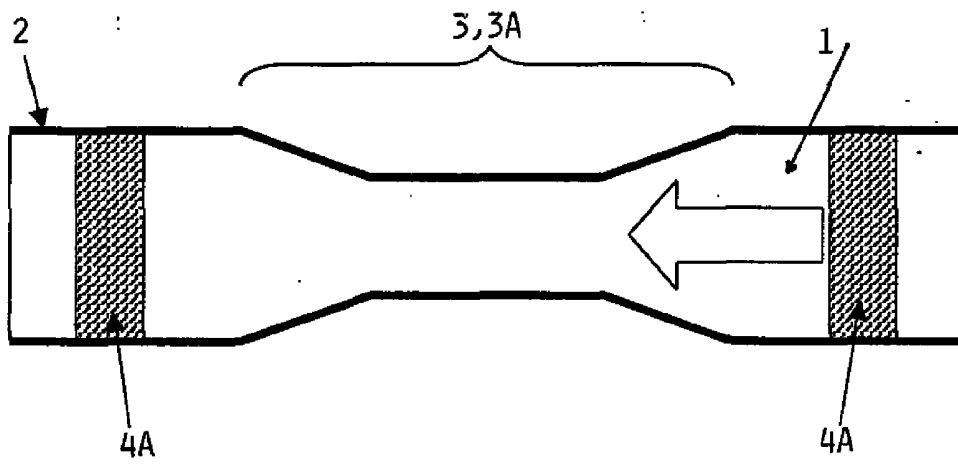


FIG. 4

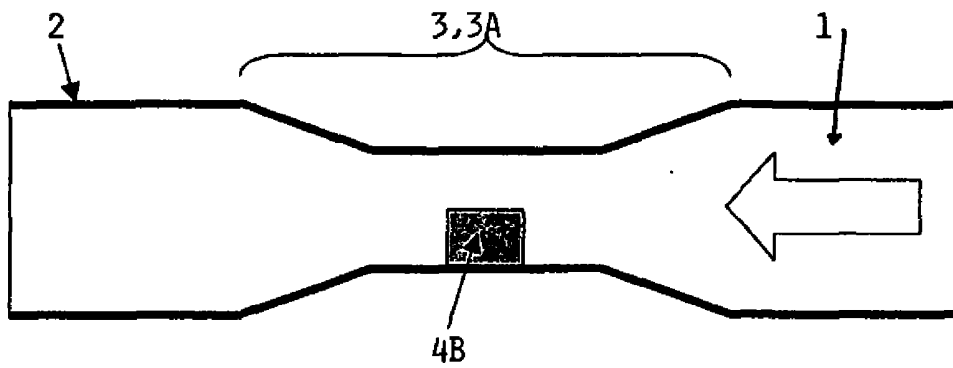


FIG. 5

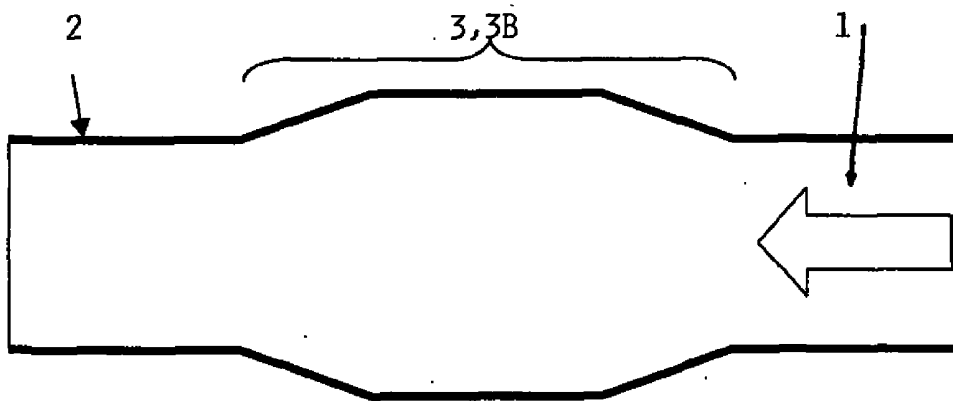


FIG. 6

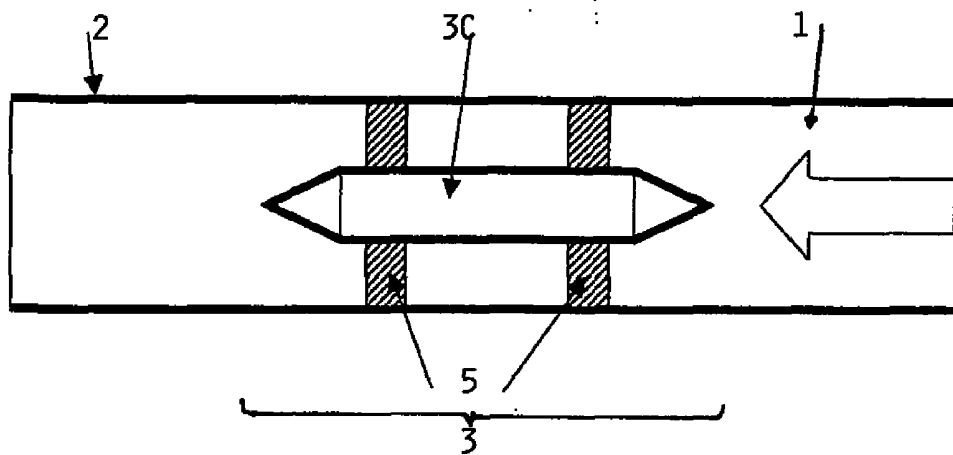


FIG. 7

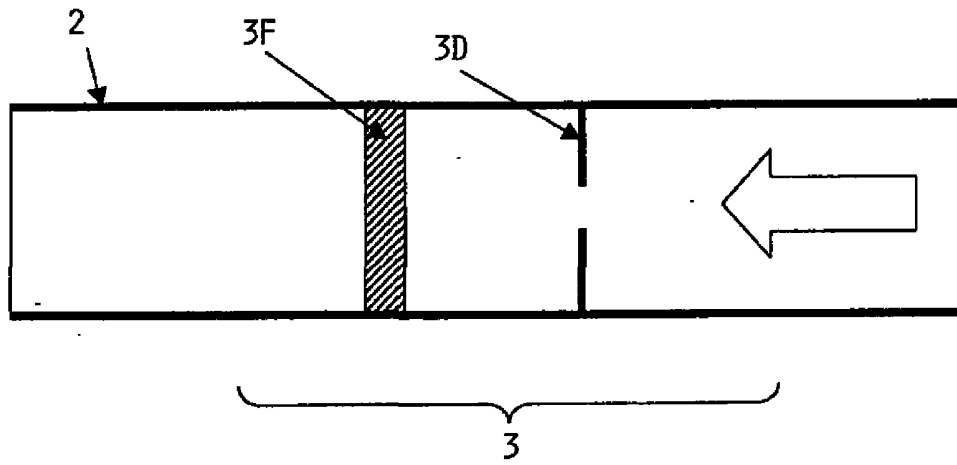


FIG. 8

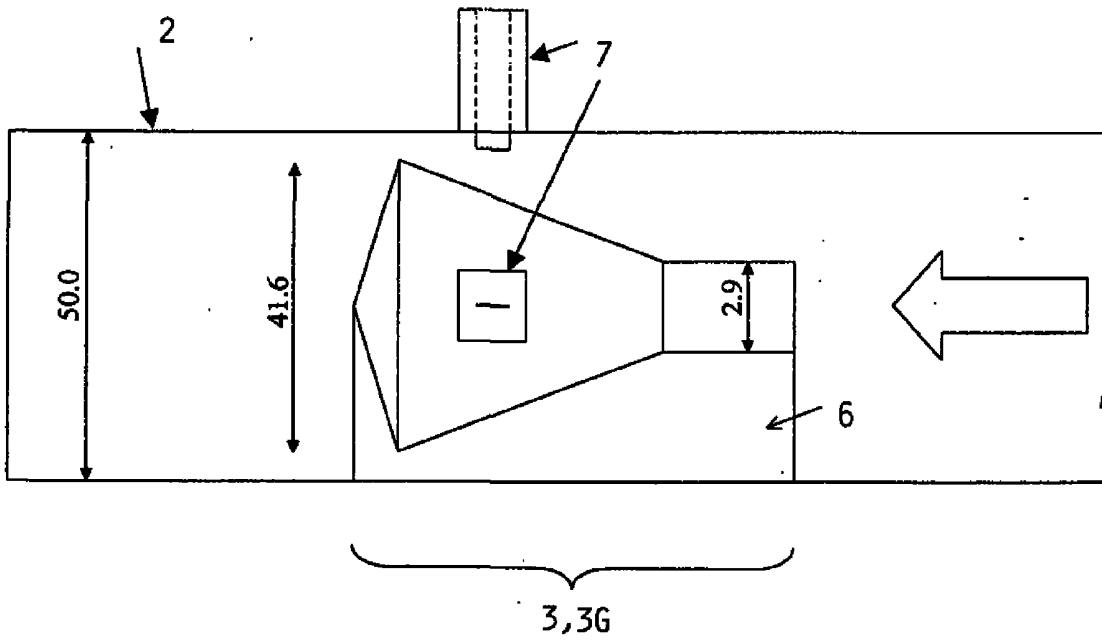


FIG. 9

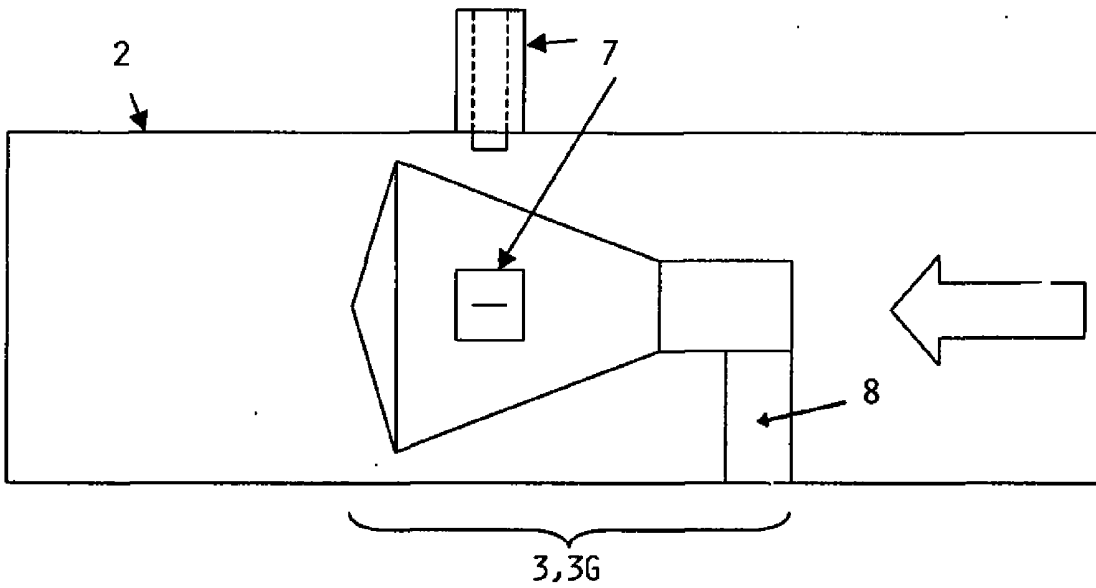


FIG. 10

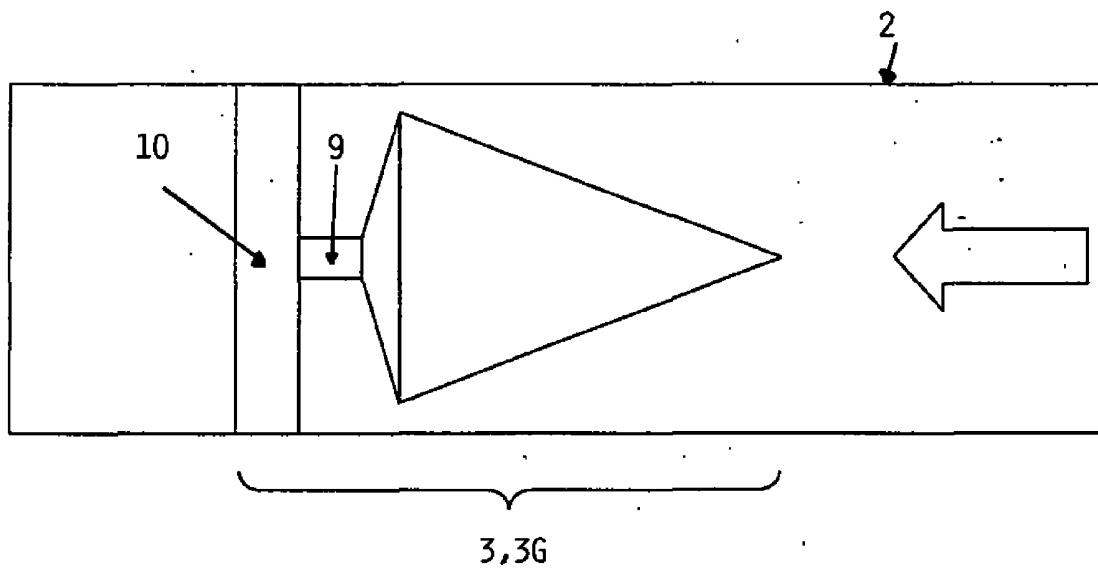


FIG. 11

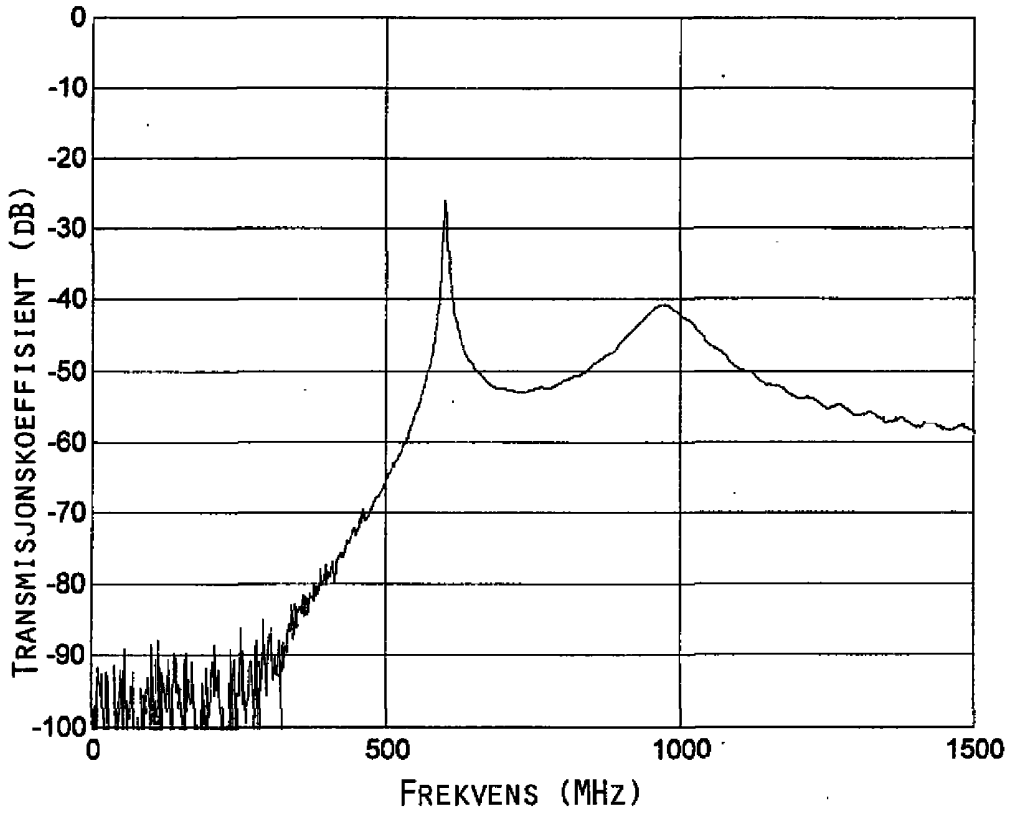


FIG. 12

