



NORGE

(12) **PATENT**

(19) NO

(11) **323247**

(13) **B1**

(51) Int Cl.

G01N 33/22 (2006.01)

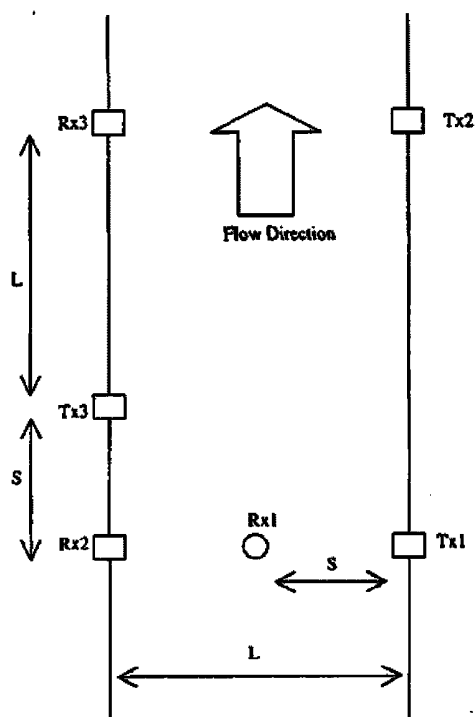
G01F 1/86 (2006.01)

Patentstyret

(21)	Søknadsnr	20035481	(86)	Int.inng.dag og søknadsnr	
(22)	Inng.dag	2003.12.09	(85)	Videreføringsdag	
(24)	Løpedag	2003.12.09	(30)	Prioritet	Ingen
(41)	Alm.tilgj	2005.06.10			
(45)	Meddelt	2007.02.12			
(73)	Innehaver	Multi Phase Meters AS, Postboks 279, 4066 STAVANGER, NO			
(72)	Oppfinner	Arnstein Wee, Welhavensgate 6A, 0166 OSLO, NO			
(74)	Fullmektig	Oslo Patentkontor AS, Postboks 7007 Majorstua, 0306 OSLO, NO			

(54)	Benevnelse	Frengangsmåte og strømningsmåler for å bestemme strømningsratene til en flerfaseblanding
(56)	Anførte publikasjoner	WO-A1 00/45133
(57)	Sammendrag	

Oppfinnelsen gjelder en metode og en strømningsmåler for måling av komposisjon og strømningsrate til en blanding bestående av for eksempel olje, vann og gass i et rør. Metoden kjennetegnes ved at elektriske taps- og fasemålinger utføres i minst to retninger i røret, at graden av annulær strømning (gasskonsentrasjon i midten av røret) beregnes basert på nevnte målinger, at permittiviteten av flerfaseblanding beregnes basert på nevnte målinger og korrigeres for graden av annulær strømning, at blandingens tetthet måles og kompenseres for graden av annulær strømning, at hastigheten til væske og gass måles og at temperatur og trykk måles. Basert på kjennskap til tetthet og permittivitet til blandingens komponenter og resultatet av de foran nevnte beregninger og målinger, beregnes volum- og massestrømningsratene av olje, vann og gass i røret.



Oppfinnelsen er relatert til en fremgangsmåte og en strømningsmåler for måling av komposisjon og strømningsrater av individuelle komponenter til en flerfaseblanding.

Problemet med å måle olje-vann-gass blandinger har vært av interesse for petroleumsindustrien siden tidlig på 80-tallet. Siden da er betydelig forskning rettet mot utvikling av en tre-fase strømningsmåler for industriell anvendelse som eksempelvis beskrevet av R. Thorn, G. A. Johansen og E. A. Hammer - 1997, "Recent developments in three-phase flow measurement", Meas. Sci. Technol., Vol.8, No. 7, side. 691-701.

Det er et mangfold av kjente instrumenter for måling av flerfase strømningsrater. Et slikt instrument må være forholdsvis nøyaktig (typisk $\pm 5\%$ av aktuell strømningsrate for hver fase), ikke forstyrre strømmingen i nevneverdig grad, pålitelig, upåvirket av hvordan flerfaseblandingen er fordelt i røret (strømningsregimet), pålitelig og dekke alle mulige kombinasjoner av olje, vann og gass. På tross av det mangfold av løsninger som til nå er blitt utprøvd, eksisterer det pr dato ingen flerfase strømningsmålere som oppfyller alle disse kravene.

Produksjonsratene til et olje/gassreservoar varierer avhengig av lokasjon og alder av brønnene. I tillegg til olje- og gasskomponentene, vil vann, sand og voks i mange tilfeller også være tilstede i den produserte brønnstrømmen. Siden lokasjon og produksjonsrate på brønnene kan variere mye, er det stor variasjon på systemene som er utviklet for måling av flerfase strømningsrater. Målsetningen til oljeindustrien initielt med å utvikle en universell flerfasestrømningsmåler for å erstatte tradisjonelle separatorer/enfase måleløsninger for skattebegrunnet overvåking av en brønns produksjonsrater, har ennå ikke blitt virkeliggjort.

Flerfasestrømningsmålere er i økende grad benyttet til testing og allokeringsmåling. For å kunne optimalisere produksjon og levetid for et olje-/gassfelt, må feltoperatøren være i stand til å monitorere produksjonen fra hver enkelt brønn. Den konvensjonelle måten å gjennomføre dette på er ved bruk av testseparatorer. Testseparatorer er kostbare og opptar verdifull plass på en plattform. Videre er det tidkrevende å utføre testene fordi det ofte tar lang tid å stabilisere brønnen på testseparatoren. Videre oppnåes det kun moderat nøyaktighet med en testseparator (typisk ± 5 til 10 % av hver fase), og testseparatoren kan ikke benyttes til kontinuerlig brønnovervåking. En flerfasestrømningsmåler kan i det første eksempelet ovenfor erstatte en testseparator og på sikt benyttes til kontinuerlig overvåking av hver brønn. Et slikt oppsett ville redusere produksjonstap assosiert med brønn testing. Denne type tap er estimert til 2 % for en typisk offshore installasjon.

Allokeringsmåling er påkrevd når en felles rørledning blir benyttet til å transportere produksjonen fra flere brønner med ulike eiere til en felles produksjonsfasilitet. Denne målingen utføres pr i dag ved at hver brønn blir målt på en testseparator før den går inn på en felles rørledning. I tillegg til de ovenfor nevnte ulempene med testseparatorer vil det nå også være behov for dedikerte testerørledninger for hver brønn. En permanent installert flerfasestrømningsmåler gir dermed ytterligere besparelser i forbindelse med allokeringsmåling.

I henhold til en større gruppe av oljeselskaper er kravet til målenøyaktighet for en trefase strømningsmåler 5-10 % relativ usikkerhet på væske og gass strømningsrate og en feil i vannkuttmålingen som er innenfor 2 % abs for gass/volumfraksjoner i området 0-99 % og vannkutt i området 0-90 %. Mer nøyaktige målinger er påkrevd ved allokeringsmåling. Kommersielt tilgjengelige flerfase strømningsmålere er nå på generelt grunnlag i stand til å måle de individuelle fasestrømningsratene med en usikkerhet mindre en 10 % over

et forholdsvis bredt område mht strømningshastigheter og fasefraksjoner. Det er i hovedsak to områder hvor mer arbeid er påkrevd for å kunne redusere måleusikkerheten ytterligere: strømningsregime-avhengighet og individuell
5 fasehastighetsmålinger. Oppfinnelsen tar sikte på å redusere denne måleusikkerheten betydelig, spesielt usikkerheten relatert til strømningsregime-avhengigheten.

Noen eksempler på kommersielt tilgjengelige ikke-inntrengende flerfase strømningsmålere som beskrevet i NO 304333,
10 NO 304332, US 5,103,181, WO 00/45133 og US 6,097,786, måler komposisjonen til flerfaseblandingen i tverrsnittet av røret og hastigheten til fasene for å beregne strømningsratene. For å kunne oppnå nøyaktige målinger må man da ha en homogen blanding i tverrsnittet av røret. Effekten av
15 inhomogenitet i lengderetningen av røret er vanligvis minimalisert ved å måle komposisjonen i tverrsnittet av røret med høy hastighet.

Flerfasestrømningsmålere er normalt ikke montert i horisontal posisjon p.g.a. laminær (lagvis) strømningsprofil hvor
20 vann ligger i bunn og gass er på topp av røret, en fordeling som vil virke forstyrrende på målingene. For å oppnå en homogen flerfaseblanding i tverrsnittet av røret, er det vanlig å installere flerfasestrømningsmåleren på en slik måte at strømmingen går vertikalt oppover eller nedover.
25 Laminær strømming kan dermed forhindres. Når en flerfaseblanding bestående av gas og væsker strømmer i vertikal retning, kan annulært strømningsregime forekomme. Med annulært strømningsregime menes at mesteparten av væsken er distribuert som en ring langs veggen mens mesteparten av
30 gassen er konsentrert i midten av røret. Annulær strømming forstyrrer målingene på en tilsvarende måte som laminær strømming i en horisontal installasjon. I horisontale rør vil annulær strømming hvor all gass er lokalisert i midten av røret normalt kun forekomme ved høye gassfraksjoner. For
35 vertikale rør derimot, er betydelig konsentrasjon av gass i midten av røret observert selv ved midlere strømningsrater

(noen få meter pr sekund) og gassfraksjoner på 10 %. Selv en konsentrasjon av gass i midten av røret ved lave gassfraksjoner vil introdusere betydelige målefeil.

NO 304333, US 5,103,181, US 6,097,786 og US 5,135,684 benytter en nukleær tetthetsmåler. Det er ikke mulig å oppnå full dekning av tverrsnittet i røret når en nukleær tetthetsmåler benyttes til å måle tettheten. For å oppnå nøyaktige målinger er man derfor avhengig av en homogen blanding i tverrsnittet av røret. Typiske kommersielt tilgjengelige nukleære detektorer for måling av tetthet, basert på Caesium 662 kEV-energitoppen, har en sirkulær utforming med diameter på 2" eller lavere. For dual energisystemer (røntgen- og gammastråler) som beskrevet i US 5,135,684 og US 6,097,786, er dekningsområdet normalt enda smalere siden det er behov for et komposittvindu i rørveggen slik at lavenergi røntgenstråler skal kunne trenge igjennom rørveggen.

Dekningsområdet i et 2" rør med en typisk kommersielt tilgjengelig gammastråle tetthetsmåler er vist i figur 16. 70-80 % dekning kan normalt oppnåes ved optimal plassering av detektor og kilde. I et 6" rør derimot, er det krevende å oppnå mer en 30 % dekning av tverrsnittet av røret, som vist i figur 17.

For å øke dekningen kan tetthetsmålingen plasseres inne i en venturi passasje som vist i US 5,135,684. Dersom diameteren i venturipassasjen er liten i forhold til diameteren til røret, vil store trykktap redusere anvendelsesområdet til flerfasestrømningsmåleren. Ved å plassere den nukleære tetthetsmålingen i en venturipassasje vil man også få en økende grad av annulær strømming i selv måleseksjonen. Når kilde og detektor er plassert i midten av røret, vil målingen underestimere tettheten ved annulær strømming. Målefeilen vil øke for økende areal (diameter) av røret. Målefeilen kan til en viss grad reduseres ved å plassere densitometeret til siden for senter i røret. På den andre siden

vil man da måle en for høy tetthet ved forekomst av annulær strømning ved lavere gassfraksjoner.

Effekten av annulær strømning kan også reduseres ved å benytte en mikseinnretning. US Re 36,597 beskriver en metode hvor en fortregningsvolummåler er benyttet for å måle den totale strømningsraten og for å homogenisere strømningen i forkant av en komposisjonsmåling. Annulær strømning er da minimalisert. På den andre siden er flerfasestrømningsmåleren svært forstyrrende og inntrengende i strømningen og er sårbar siden den er avhengig av en begrensende og roterende mekanisk innretning lokalisert i midten av rørstrømmen. Repeterbarheten til målingene for et slikt apparat vil også være påvirket av sanderosjon.

En annen metode for å redusere tilstedeværelse av annulær strømning er å benytte et mikseelement. US 5,135,684 beskriver en metode hvor en oppholdstank benyttes til å homogenisere flerfasestrømningen. Denne innretningen er derimot meget forstyrrende og inntrengende og forårsaker trykkfall i rørstrømmen, som igjen begrenser produksjonskapasiteten til brønnene. Ytelsen til mikseinnretningen vil også være avhengig av strømningsmønsteret, som f.eks. lengde av gass- og væskeslugger, som igjen begrenser operasjonsområdet til måleinstrument. En annen metode basert på en mikseinnretning er beskrevet i US 6,272,934.

Effekten av annulær strømning kan også reduseres ved å utføre komposisjonsmålingene i tverrsnittet av en invertert venturi som vist i WO 00/45133, figur 1. Denne metoden er derimot meget inntrengende og forstyrrende i rørstrømningen, og repeterbarheten til målingene vil være utsatt for sanderosjon.

Flerfase komposisjon- og strømningsmålere basert på mikrobølger er kjent fra før. US 4,458,524 viser en flerfasestrømningsmåler basert på måling av permittivitet (dielektrisk konstant), tetthet, temperatur. Denne måleren er

basert på måling av faseskift mellom to mottakerantenner for bestemmelse av permittivitet.

Andre kjente teknikker er basert på måling av resonansfrekvens. Eksempler på slike teknikker er beskrevet i WO 3/034051 og US 6,466,035. Teknikker basert på måling av resonansfrekvens vil normalt være begrenset til flerfaseforhold hvor tapet i røret er lavt og vil derfor normalt ikke kunne fungere for høye vannkuttapplikasjoner og saltholdig vann pga høyt dielektrisk tap i flerfaseblandingen. US 5,103,181 beskriver en metode basert på måling av konstruktiv og destruktiv interferens mønster i røret.

Ingen av de ovenfor nevnte teknikkene er både ikke inntrengende / forstyrrende på rørstrømningen og samtidig i stand til å detektere og kompensere for graden av gass konsentrasjon i midten av røret (annulær strømning).

Oppfinnelsen beskriver en ikke-inntrengende / forstyrrende metode for å detektere tilstedeværelse av annulær strømning, kompensere målingene som en funksjon av graden av annulær strømning for igjen å oppnå nøyaktige strømningsmålinger av de individuelle komponentene av en flerfaseblanding.

Hensikten med oppfinnelsen er å frembringe en metode for å identifisere konsentrasjon av gass i midten av røret og videre kompensere permittivitet- og tetthetsmålinger for målefeil relatert til graden av gasskonsentrasjon i midten av røret. Videre er hensikten med oppfinnelsen å frembringe en forbedret flerfasestrømningsmåler for å unngå de ovenfor nevnte begrensningene i ytelse til kjente teknikker for flerfasestrømningsmålinger. Videre er hensikten med oppfinnelsen å frembringe en kompakt og rimelig struktur for å utføre nøyaktige målinger av olje, gass og vann produksjonsrater. Det er videre hensikten med oppfinnelsen å frembringe en ikke-inntrengende/forstyrrende innretning for

å utføre målingene uten behov for en mekanisk mikseinnretning i forkant.

Ifølge oppfinnelsen er det således tilveiebrakt en fremgangsmåte for å bestemme

- 5 a. elektromagnetiske tap- og fasemålinger utføres i minst to retninger av røret,
- b. graden av annulær strømming beregnes basert på målingene i trinn a,
- c. permittiviteten av flerfaseblandingen beregnes
10 basert på resultatet i trinn a og b inkludert korreksjon relatert til graden av annulær strømming,
- d. flerfaseblandingsens tetthet måles og kompenseres for graden av annulær strømming,
- e. temperatur og trykk måles,
- 15 f. hastighet av væske og gass måles, og
- g. basert på kjennskap til tetthet og permittivitet av de individuelle komponentene av flerfaseblandingen, og resultatet fra trinnene a-f ovenfor, beregnes volum- og massestrømningsratene av gass- og væske-
20 komponentene.

En strømningsmåler i henhold til oppfinnelsen er definert i det selvstendige krav 12.

De uselvstendige krav 2-11 og 13-20 definerer foretrukne utførelser av oppfinnelsen.

- 25 Oppfinnelsen vil bli beskrevet med referanse til figurer, hvor:

Fig. 1 viser en grafisk representasjon av tre eksempler av annulær strømming i et 4" rør,

Fig. 2 viser en enkel illustrasjon av oppfinnelsen,

Fig. 3 viser en fase vs. frekvenskurve,

5 Fig. 4 viser en graf av rå-målingene,

Fig. 5 viser tilhørende kompenserte målinger, begge basert på nevrale nettverk,

Fig. 6 viser det elektriske feltet under cut-off-frekvensen til røret ved høyt tap,

10 Fig. 7 illustrerer det elektriske feltet i sensoren ved lite tap for frekvenser over cut-off-frekvensen,

Fig. 8 viser en faserespons ved lite tap,

Fig. 9 illustrerer en enkel skisse av sensor-antenne-arrangement,

15 Fig. 10 er en enkel skisse av en antenneplassering,

Fig. 11 representerer en skisse av et arrangement med gammastråle-tetthetsmåler,

Fig. 12 illustrerer et arrangement basert på tetthetsmåling med venturi,

20 Fig. 13 viser målte frekvenser i tverrsnittet av røret,

Fig. 14 viser målte frekvenser i lengderetningen av røret,

Fig. 15 viser kompenserte målinger (benytter nevrale nettverk) vs. teoretiske målinger,

Fig. 16 er en enkel skisse av en gammastråle-basert tetthetsmåling i en 2" rør, and

Fig. 17 er en enkel skisse av en gammastråle-basert tetthetsmåling i en 2" rør.

- 5 Flørfasestrømningsmåleren i henhold til oppfinnelsen omfatter tre hovedelement som beskrevet nedenfor:

Måling for å detektere konsentrasjon av gass i midten av røret (annulær strømnin9). Gass er ofte konsentrert i midten mens væske er mer konsentrert langs veggen i vertikale rørstrekk. I ekstreme tilfeller kan all gassen være konsentrert i midten av røret. For å identifisere gasskonsentrasjon i midten av røret, måles fase og tap mellom en senderantenne og to mottakerantennner lokalisert i ulik avstand. Målingen utføres ved tre eller flere forhåndsbestemte faseforskjeller mellom de to mottakerantennene. 10 Sendeantennen og de to mottakerantennene er lokalisert i minst to tverrsnitt av røret. Taps- og fasemålingene er utført over et bredt frekvensspekter (typisk 10 Mhz til 3,5 Ghz). Ved å benytte nevrale nettverk er det mulig å gjenkjenne den karakteristiske responsen for annulær strømnin9 15 (gasskonsentrasjon i midten av røret).

Måling av fraksjonsandeler av olje, vann og gass i tverrsnittet av røret blir gjort. Distribusjonen av fraksjonene olje, vann og gass i tverrsnittet er basert på måling av 25 permittiviteten og tettheten og kjente verdier for permittivitet og tetthet for olje, vann og gass. Ved å måle temperatur og trykk kan målingene kompenseres for variasjon i temperatur og trykk. Målingene av permittivitet og tetthet er kompensert for graden av annulær strømnin9 ved å benytte et nevralt nettverk som beregner tilsvarende tetthet og 30 permittivitet for en homogent blandet flørfasestrøm. (Homogent blandet flørfasestrøm i denne sammenhengen betyr den permittiviteten eller tettheten som ville ha blitt målt for en ekvivalent homogen flørfaseblanding).

Måling av væske- og gasshastighet måles ved å måle små variasjoner i flerfaseblandingen ved to kryss-seksjoner i en gitt avstand fra hverandre som igjen er krysskorrelert. Ved å analysere det krysskorrelerte signalet og identifisere de to største punktene på krysskorreleringskurven i tillegg til statistisk sortering av målingene, er det mulig å foreta en måling av væske- og gasshastigheten.

Ved å kombinere målingene fra punkt 2 og 3 sammen med kjente verdier for areal av tverrsnitt på røret (sensor) og tetthet av olje, gass og vann, er det mulig å beregne olje, vann og gass volumstrømningsrater og massestrømningsrater

Svakhet til eksisterende løsninger

Svakheten til eksisterende løsninger er i hovedsak relatert til to faktorer, henholdsvis:

- 15 Eksisterende flerfase strømningsmålere forutsetter en homogen blanding av olje, gass og vann i tverrsnittet av røret. Ved annulær strømning (gasskonsentrasjon i midten av røret), vil det forekomme store målefeil. Figur 1 viser en grafisk representasjon av tre eksempler av annulær strømning i et 4" rør og hvilken effekt dette har på tetthetsmålingen med utgangspunkt i en 2" gammadetektor. Selv om dette er et ekstremt tilfelle siden all gassen er konsentrert i midten av røret, illustrerer det at store feil vil forekomme.
- 25 Det er behov for et mekanisk mikseelement. Noen flerfase-målere benytter et mekanisk mikseelement for å homogenisere flerfasestrømningen. En mikser vil normalt redusere graden av annulærstrømning, men til gjengjeld blir flerfasemåleren meget inntrengende / forstyrrende i rørstrømmen. Noen mikseinnretninger inneholder dessuten bevegelige deler som vil være utsatt for mekanisk sanderosjon og kan også ødelegges ved raske hastighetsvariasjoner assosiert med oppstart og nedstenging av brønner.
- 30

Unikhet ved oppfinnelsen

Unikheten til oppfinnelsen er evnen til å detektere tilstedeværelse av annulær strømning (gasskonsentrasjon i midten av røret) og videre kompensere målingene relatert til graden av annulær strømning. Figur 2 viser en enkel skisse av oppfinnelsen.

Taps og fase målinger utføres ved å måle mottatt effekt og fasedifferanse av et bredbåndig signal (typisk 10 Mhz til 3,5 Ghz) som er utsendt fra en senderantenne og mottatt ved to mottakerantenner. Målingen er utført i minst to og fortrinnsvis tre plan i røret hvor ett plan ligger i tverrsnittet av røret, et andre plan ligger i lengderetningen av røret og et tredje plan med en vinkel (f.eks. 45 grader) i forhold til strømningsretningen. Frekvensen varieres fra 10 Mhz til 3,5 Ghz avhengig av diameteren på røret. Ved å måle frekvensen ved minst tre faste fasevinkler og benytte en kalibreringskonstant for systemet, kan permittiviteten til flerfaseblandingen i røret måles.

Annulær strømning kan detekteres og kompenseres for ved å analysere distribusjonen til fasemålingene. Årsaken til dette er at fase vs. frekvenskurven er tilnærmet lineær ved homogen strømning, mens den ved annulær strømning er mer kurvete som vist i figur 3. Dette representerer en ny effekt som tidligere ikke er beskrevet i litteraturen. Siden det er en omfattende jobb å utvikle nøyaktige modeller for å modellere et såpass komplekst og ikke-lineært fenomen, kan nevrale nettverk benyttes ved å trene nettverket til å detektere tilstedeværelse av annulær strømning og kompensere målingene. Laboratorietester basert på denne metoden har gitt 100 % identifikasjon av annulær strømning. Nevrale nettverk benyttes også til å kompensere feilen i målingen forårsaket av gasskonsentrasjon i midten av røret. Basert på målingen (målt frekvens og frekvensdistribusjon i alle måleplanene), kan den korresponderende homogene målefrekvensen (teoretiske frekvens) beregnes. Vedlagte graf i

figur 4 viser den opprinnelige målingen og figur 5 viser de tilhørende kompenserte målingene ved bruk av nevrale nettverk.

Når røret oppfører seg som en bølgeleder (lavt tap), er metoden for å detektere annulær strømming noe annerledes. Under cut-off-frekvensen vil det elektriske feltet utbre seg i henhold til teori for en plan bølge som illustrert i figur 6. Ved lavt tap i røret og frekvenser over cut-off frekvensen f_c , vil det elektriske feltet være som vist i figur 7, noe som tilsvarer TE_{11} . Idet feltet i røret endrer seg fra å være en plan bølge til TE_{11} , inntreffer det en brå endring i fasedifferansen på mottakerantennene. Denne faseendringen er illustrert i figur 8. Ved å variere frekvensen på sendeantennen og måle frekvensen ved minst tre forhåndsbestemte fasevinkler, kan frekvenslokasjonen til den brå faseendringen bestemmes, som igjen er et mål på cut-off-frekvensen til røret.

Tilstedeværelse av annulær strømming ved lave tap måles ved å velge en målefrekvens som er betydelig lavere enn cut-off-frekvensen til røret. Siden cut-off-frekvensen er en funksjon av permittiviteten til blandingen inne i røret, vil målefrekvensen variere som en funksjon av permittiviteten. Ved denne målefrekvensen vil ikke røret oppføre seg som en bølgeleder, og det elektriske feltet vil dermed være som vist i figur 6. Tapet måles ved å sende på utvalgte frekvenser og måle mottatt effekt på to mottakerantennene. Ved å sammenligne målt tap i tre plan, kan annulær strømming bli detektert og kompensert for ved å benytte nevrale nettverk som beskrevet ovenfor.

For å kunne beregne olje, vann og gassfraksjon i tverrsnittet av røret, er det behov for å måle tettheten til flerfaseblandingen i tverrsnittet av røret. Denne målingen vil også være påvirket av gasskonsentrasjon i midten av røret. Når tilstedeværelse og grad av gasskonsentrasjon i midten av røret er kjent, kan tetthetsmålingen kompenseres for

effekten av gasskonsentrasjon på en tilsvarende måte ved å bruke nevrale nettverk.

Tetthetsmålingen er, i henhold til oppfinnelsen, utført på to måter avhengig av anvendelsesområdet:

- 5 Gammastråle-absorpsjon. Ved å måle absorpsjon av en gammastråle i flerfaseblandingen med kjennskap til absorpsjonskoeffisienten for olje, vann og gass i tillegg til permittiviteten til flerfaseblandingen og permittiviteten til olje, vann og gass, er det mulig å kalkulere blandingens
- 10 tetthet på en iterativ måte. Som en del av denne iterasjonen, kan gammastråle-absorpsjonsmålingen bli korrigert for tilstedeværelse av annulær strømming ved hjelp av et nevralt nettverk.

- 15 Venturi massestrømningsmåling. En venturi kan benyttes til å måle tettheten til blandingen. Trykkfallet over innløpet til venturien er en funksjon av massestrømmingen og tettheten til flerfaseblandingen. Videre er trykket over utløpet av venturien en funksjon av massestrømmingen, tettheten og kompressibiliteten til flerfaseblandingen. Ved å kombinere målingen over innløpet og utløpet av venturien sammen
- 20 med målingen av væske- og gasshastighet fra kryss-korrelasjon, er det mulig å beregne blandingens tetthet på en iterativ måte. Gasskonsentrasjon i midten av røret vil derimot medføre målefeil. Som en del av iterasjonen for å beregne
- 25 tettheten, kan målingen da bli korrigert for graden av annulær strømming (gasskonsentrasjon).

En kombinasjon av gammastråle-absorpsjon (pkt 1) og venturi (pkt 2) kan også benyttes. Denne kombinasjonen vil i noen tilfeller utvide måleområdet til systemet.

- 30 Figur 9 illustrerer en enkel mekanisk struktur som kan benyttes til å måle dielektriske egenskaper (permittivitet), strømningsregimet i tverrsnittet (annulær eller homogent) og hastighet til en flerfaseblanding. Probene (antennene) er

koaksialkabler som er stukket inn i røret slik at en ledende senterleder er isolert fra rørveggen av et dielektrisk materiale som f.eks. plast eller keramikk, som vist i figur 10. Tre av antennene er benyttet som sendere og tre
 5 av antennene er benyttet som mottakere. Strømningsretningen til rørstrømmen er illustrert med en pil.

Sensoren benyttes til å måle både komposisjonen og hastigheten (væske og gass) til flerfase blandingen.

Måling av hastighet

10 Ved å kontinuerlig sende og måle responsen på antenneparene Tx1/Rx2 og Tx2/Rx3 lokalisert en kjent avstand S+L, er det mulig å fremstille to tidsvarierende signaler som er separert i tid tilsvarende den tid det tar flerfaseblanding å gå mellom de to antennesettene. Målefrekvensen er valgt på
 15 en slik måte at lite energi går i lengderetningen. Ved lite tap i røret vil frekvensen typisk være betydelig under og en funksjon av den målte cut-off-frekvensen til røret. Ved å krysskorrelere de to signalene ved å bruke følgende formel:

20 Ligning 1:

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t-\tau) * y(t) dt$$

hvor $x(t)$ og $y(t)$ er de mottatte signalene, kan tidsforsinkelsen τ beregnes. Tidsforsinkelsen τ mellom signalet $x(t)$ og $y(t)$ er et mål på tiden det tar for en liten forstyrrelse i flerfasestrømmingen å bevege seg fra det første til
 25 det andre antenneparet. Ved å benytte høyfrekvente signaler til å måle variasjonene i strømmingen er det også mulig å benytte høye mottaksrater. Dermed vil signalet inneholde informasjon om små variasjoner forårsaket av små gassbobler
 30 i væskefasen eller små vanndråper i oljefasen, som i dette tilfelle representerer hastigheten til væsken, og store

variasjoner som en gass-slugg som typisk vil representere hastigheten til gassfasen.

Ved å filtrere de mottatte dataene og statistisk klassifisere de målte krysskorrelasjonshastighetene, er det mulig å
5 måle både væske- og gasshastigheten.

Måling av komposisjon

For å kunne måle strømningsraten til olje, vann og gas, må man også måle komposisjonen i tverrsnittet av røret (%olje, % vann & % gass). Ved å måle blandingens permittivitet ϵ_{mix}
10 og blandingens tetthet ρ_{mix} , kan følgende ligninger benyttes:

Ligning 2:

$$\Phi_{oil} + \Phi_{water} + \Phi_{gas} = 1$$

hvor:

- 15 Φ_{oil} = Volumfraksjon av olje i tverrsnittet av røret
 Φ_{water} = Volumfraksjon av vann i tverrsnittet av røret
 Φ_{gas} = Volumfraksjon av gass i tverrsnittet av røret

Ligning 3:

$$\Phi_{oil} \times \rho_{oil} + \Phi_{water} \times \rho_{water} + \Phi_{gas} \times \rho_{gas} = \rho_{mix}$$

20 hvor:

- ρ_{oil} = Tetthet til olje
 ρ_{water} = Tetthet til vann
 ρ_{gas} = Tetthet til gass
 ρ_{mix} = Målt tetthet

25 Måling av temperatur og trykk er også påkrevd for å kompensere de ovenfor nevnte parametrene for temperatur- og

trykkvariasjoner, men for enkelthets skyld vil dette bli ignorert i den videre diskusjonen av måleprinsippet.

Bruggemans mikseligning relaterer permittiviteten (dielektrisk konstant) av en to-komponentblanding til volum fraksjonen av de to komponentene. Dersom de to komponentene i blandingen er dråper fordelt som en indre dispergert fase i et kontinuerlig medium av en ytre fase, blir ligningen som følger:

Ligning 4:

$$\frac{\epsilon_{inner} - \epsilon_{mix}}{\epsilon_{inner} - \epsilon_{outer}} * \left(\frac{\epsilon_{outer}}{\epsilon_{mix}} \right)^{\frac{1}{3}} = 1 - \frac{\phi_{inner}}{\phi_{inner} + \phi_{outer}}$$

hvor:

- ϵ_{inner} = Permittivitet av den indre fasen (dispergert fase)
- ϵ_{outer} = Permittivitet av den ytre fasen (kontinuerlig fase)
- ϵ_{mix} = Målt permittivitet til flerfaseblanding
- ϕ_{inner} = Volumfraksjon til den indre fasen (dispergert fase)
- ϕ_{outer} = Volumfraksjon til den ytre fasen (kontinuerlig fase)

Måling av temperatur og trykk er også påkrevd for å kompensere de ovenfor nevnte parametrene for temperatur- og trykkvariasjoner, men for enkelthets skyld, vil dette bli ignorert i den videre diskusjonen av måleprinsippet.

Den ovenfor nevnte ligningen kan også benyttes for en tre-faseblanding som f.eks. olje, vann og gass, hvor den indre fasen er en homogen blanding av to av fasene dispergert i en ytre fase. Eksempelvis kan en indre olje/vannblanding være dispergert i en ytre kontinuerlig fase av gass på

samme måten som gassbobler kan være dispergert i en ytre kontinuerlig fase av en olje/vannblanding.

Den laveste cut-off-frekvensen til en sirkulær bølgeleder er TE_{11} med:

5 Ligning 5:

$$f_c = \frac{0.293}{r\sqrt{\mu\epsilon}}$$

hvor:

- f_c = Cut-off-frekvens
- r = Radius til røret
- 10 ϵ = Permittivitet (dielektrisk konstant) inne i bølgelederen (røret)
- μ = Permeabilitet inne i bølgelederen (røret)

Under cut-off-frekvensen vil det elektriske feltet utbre seg som en plan bølge som illustrert i figur 6. Ved lite
 15 tap i røret og over cut-off-frekvensen f_c er det elektriske feltet i røret i henhold til TE_{11} som vist i figur 7. Når feltet i røret endrer seg fra en plan bølge til TE_{11} , oppstår det en brå endring i fasedifferansen mellom antennene $Rx1$ og $Rx2$ i figur 9. Denne faseendringen er illustrert i
 20 figur 8. Ved å sende ut et frekvenssveip på sendeantennen $Tx1$ og måle frekvensen av minst tre forhåndsbestemte fase-differanser på de to mottagende antennene, kan frekvenslokasjonen (målt frekvens) på faseendringen mellom mottaker-antennene måles. Denne frekvensen er et mål på cut-off-fre-
 25 kvensen f_c til røret.

Ligning 5 kan omskrives som følger:

Ligning 6:

$$\varepsilon = \frac{k_2^2}{f_c^2}$$

hvor:

$$k_2 = \frac{0.293}{r\sqrt{\mu}}$$

- 5 f_c = Frekvens til elektromagnetisk bølge (cut-off-frekvens til TE_{11})
 ε = Permittivitet (dielektrisk konstant) inne i røret

k_2 kan bestemmes ved å måle frekvensen f_c med en kjent permittivitet inne i røret.

- 10 Med høyt tap inne i røret måles permittiviteten til fler-faseblandingen ved å sende ut et frekvenssveip på en av sendeantennene og måle frekvensen ved minst tre forhåndsbestemte fasedifferanser på mottakerantennene lokalisert med en avstand S og L fra sendeantennen. For frekvenser under
 15 cut-off-frekvensen til røret eller når tapet inne i røret er lavt, vil det elektriske feltet bevege seg som en plan bølge. Fasedifferansen mellom mottakerantennene representerer tiden det tar for den plane bølgen å bevege seg fra den ene til den andre antennen og kan bli beskrevet som:

20 Ligning 7:

$$\Delta S = \lambda \frac{\Delta \theta}{2\pi}$$

hvor:

- ΔS = $L-S$ (ref. fig. 12)
 $\Delta \theta$ = Fasedifferanse mellom mottakerantennene
 25 λ = Bølgelengde

I henhold til plan-bølge-teori kan hastigheten til en elektromagnetisk bølge beskrives som:

Ligning 8:

$$v = \lambda f = \frac{c}{\sqrt{\mu\epsilon}}$$

5 hvor:

- f = Frekvens til elektromagnetisk bølge
- λ = Bølgelengde til elektromagnetisk bølge
- ϵ = Permittivitet (dielektrisk konstant) inne i røret
- μ = Permeabilitet inne i røret
- 10 c = Hastighet til lys i vakuum

Siden frekvensen er målt ved forhåndsbestemte fasedifferanser, kan ligning 6 og 7 kombineres som vist nedenfor:

Ligning 9:

$$\epsilon = \frac{k_1^2}{f^2}$$

15 hvor:

$$k_1 = \frac{c\Delta\theta}{\Delta S\sqrt{\mu}}$$

- f = Frekvens til elektromagnetisk bølge
- ϵ = Permittivitet (dielektrisk konstant) i røret

k_1 kan bestemmes ved å måle frekvensen ved fasedifferansen
20 $\Delta\theta$ med en kjent permittivitet inne i røret.

Permittiviteten inne i røret er målt i minst to retninger. Først sendes det på antenne Tx1 og mottas på antenne Rx2 og Rx1 (figur 9) slik at permittiviteten i tverrsnittet av

røret måles. Videre sendes det på Tx3 og mottas på Rx2 og Rx3 slik at permittiviteten i lengderetningen av røret måles.

Det er også mulig å måle permittiviteten ved å sende på Tx3 og motta på Rx1 og Rx2 slik at man foretar en måling som er delvis i lengderetningen og delvis i tverrsnittet av røret.

Effekten av annulær strømming på de målte responsene i tverrsnittet kan forklares som følger. Når flerfaseblandingen er homogent blandet vil fasedifferansen vs. frekvens være tilnærmet lineær. Annulær strømming virker forstyrrende på symmetrien mellom L- og S-retningen, med utgangspunkt i sendeantennen, og medfører at fasekurven krummer mer. Antennene i lengderetningen er betydelig mindre påvirket av annulær strømming (figur 14) siden symmetrien er opprettholdt også ved annulær strømming. Ved å måle frekvensen ved flere forhåndsbestemte fasedifferanser er det mulig å både detektere og kompensere for effekten på målingene.

Eksperimentelle data har vist at effekten på målingene er relatert til stigningen ($d\theta/df$) til fasedifferansen. En metode for å kompensere for feilen introdusert av annulær strømming er å først trene et nevralt nettverk til å gjenkjenne tilstedeværelse av annulær strømming. Et andre nevralt nettverk kan i neste omgang bli trenet til å kompensere feilen i målingene som vist i figur 15. Figur 13 og 14 illustrerer en typisk respons fra antennene ved annulær strømming. Fra figur 14 fremgår det at frekvens ved gitte fasedifferanser skifter til en høyere verdi når volumet av annulær strømming [% av totalt volum] øker. Responsen er forutsigbar over hele konduktivitetsområdet. Antennene i tverrsnittet av røret oppfører seg vesentlig annerledes som vist i figur 13. For små mengder av annulær strømming er oppførselen tilsvarende som i lengderetningen. Derimot, for økende volum av annulær strømming, oppfører stigningen til

kurven og frekvensen til fase punktene seg vesentlig annerledes i forhold til antennene i lengderetningen.

Tilstedeværelse av annulær strømming kan også måles ved å måle tap i lengderetningen og tverrsnittet av røret. Først sendes det på Tx1 og mottas på Rx2 og Rx1 for å måle det relative tapet i tverrsnittet av røret. Deretter sendes det på Tx3 og mottas på Rx2 og Rx3 for å måle det relative tapet i lengderetningen av røret. Det er også mulig å utføre en måling av permittiviteten ved å sende på Tx3 og motta på Rx1 og Rx2 og dermed foreta en måling som ligger mellom tverrsnittet og lengderetningen av røret.

Ved annulær strømming (gasskonsentrasjon i midten av røret), vil målingen i lengderetningen være ulik målingen i tverrsnittet av røret. Målingen må utføres slik at røret ikke oppfører seg som en bølgeleder. En måte å oppnå dette på er ved å velge en målefrekvens som er lavere en cut-off-frekvensen for TE_{11} .

Måling av gammastråleabsorpsjon er en vanlig teknikk for måling av tetthet. Denne teknikken utnytter at absorpsjon av fotonstråling i et hvilket som helst materiale i røret kan uttrykkes ved følgende formel:

Ligning 10:

$$N = N_0 e^{-\mu \rho d}$$

hvor:

- 25 N_0 = Tellerate for tomt rør (stråling)
- N = Målt tellerate (stråling)
- M = Strålings-masseabsorpsjonskoeffisient for materialet inne i røret.
- d = Lengde gjennomstrålt materiale i tverrsnittet av røret.
- 30 ρ = Tetthet til materialet inne i røret

Ved å måle telleraten til et medium som har en kjent masseabsorpsjonskoeffisient som for eksempel ferskvann, kan parameter d bli bestemt i henhold til ligning 11:

Ligning 11:

$$d = - \frac{\ln\left(\frac{N_{\text{fresh-water}}}{N_0}\right)}{\rho_{\text{fresh-water}} * \mu_{\text{fresh-water}}}$$

hvor :

- N_0 = Tellerate i tomt rør (stråling)
 - $N_{\text{fresh-water}}$ = Målt tellerate (stråling) med ferskvann i røret
 - 10 $\mu_{\text{fresh-water}}$ = Strålings-masseabsorpsjonskoeffisient for ferskvann
 - d = Lengde gjennomstrålt materiale i tverrsnittet av røret.
 - $\rho_{\text{fresh-water}}$ = Tetthet til ferskvann
- 15 Siden tetthetsmålingen ikke dekker hele tverrsnittet av røret, forutsetter målingen en homogen blanding i tverrsnittet av røret. Dekningsområdet i et 2" rør med en vanlig tilgjengelig gammastråle tetthetsmåler er vist i figur 16. 70-80% dekning kan normalt oppnås ved optimal arrangement
- 20 av detektor og kilde.

I et 6" rør derimot, fig 17, er det vanskelig å oppnå mer enn 30 % dekning i tverrsnittet av røret. Hvis man derimot kjenner graden av gasskonsentrasjon i midten av røret, er det mulig å kompensere målingene for å oppnå en mer korrekt

25 måling av væske- og gassforholdet i tverrsnittet. Kompensasjonsalgoritmen kan utvikles med utgangspunkt i en geometrisk beskrivelse av det nukleære dekningsområdet inne i røret eller ved å benytte et nevralt nettverk trenet til å korrigere målingene.

En annen metode for å måle tetthet er å benytte en venturi. En hvilken som helst restriksjon i røret vil medføre hastighetsendring av flerfaseblandingen og introdusere et trykkfall over innsnevringen. I henhold til teori for
 5 fluiddynamikk er kvadratroten av trykkfallet proporsjonalt med massestrømmingen i røret. En venturi er en struktur hvor rørdiameteren gradvis reduseres mot en seksjon med en mindre diameter. Deretter økes diameteren gradvis tilbake til opprinnelig størrelse. Måling av massestrømning ved
 10 hjelp av venturi er beskrevet i ISO 5167-1.

I henhold til Bernoullis ligning, kan massestrømmingen beregnes som:

Ligning 12:

$$Q_m = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\rho\Delta p}$$

15 hvor:

Q_m	=	Total massestrømningsrate
C	=	Utløpskonstant
ϵ	=	Ekspansjonskoeffisient
β	=	Diameter forhold mellom venturi hals- og rørdia-
20		meter
D	=	Rørdiameter
Δp	=	Målt trykkfall mellom innløp og venturihals
ρ	=	Tetthet til flerfaseblandingen

Trykkgjenvinningen ved utløpet av venturien vil være en
 25 funksjon av massestrømningsraten, tetthet og kompressibiliteten til flerfaseblandingen. Når gassinnholdet i flerfaseblandingen er høyt, vil trykkgjenvinningen ved utgangen av venturien være høyere i forhold til trykkgjenvinningen ved lavt gassinnhold. Ved å kombinere ligning 12 med en måling
 30 av trykkgjenvinning ved utgangen av venturien, vil det være

mulig å få en mer nøyaktig måling av tettheten til fler-faseblandingen.

Ligning 1-12, sammen med nevrale nettverksbaserte korreksjonsfunksjoner, kan på en iterativ måte benyttes til å beregne olje, vann og gass masse- og volumstrømningsrater.

PATENTKRAV

1. Fremgangsmåte for å bestemme strømningsratene til en flerfaseblanding omfattende en gass og minst en væske i et rør, hvilken fremgangsmåte omfatter følgende trinn:

- 5 a. elektromagnetiske tap- og fasemålinger utføres i minst to retninger av røret,
- b. graden av annulær strømning beregnes basert på målingene i trinn a,
- 10 c. permittiviteten av flerfaseblandingen beregnes basert på resultatet i trinn a og b inkludert korreksjon relatert til graden av annulær strømning,
- d. flerfaseblandingsens tetthet måles og kompenseres for graden av annulær strømning,
- 15 e. temperatur og trykk måles,
- f. hastighet av væske og gass måles, og
- g. basert på kjennskap til tetthet og permittivitet av de individuelle komponentene av flerfaseblandingen, og resultatet fra trinnene a-f ovenfor,
- 20 beregnes volum- og massestrømningsratene av gass- og væskekomponentene.

2. Fremgangsmåte i henhold til krav 1, hvor komposisjonen av flerfaseblandingen også blir beregnet.

3. Fremgangsmåte i henhold til krav 1, hvor de
25 elektromagnetiske målingene utføres i tverrsnittet og lengderetningen av røret.

4. Fremgangsmåte i henhold til hvilket som helst av kravene 1-3, hvor de elektromagnetiske målingene utføres ved å gjennomføre et frekvenssveip på en sendeantenne i flerfasestrømmen og hvor frekvensen måles ved minst tre
s forhåndsbestemte fasedifferanser ved to mottakerantenner i flerfasestrømmen.
5. Fremgangsmåte i henhold til krav 4, hvor man i trinn b bestemmer graden av annulær strømming basert på distribusjonen av de målte frekvensene.
- 10 6. Fremgangsmåte i henhold til hvilket som helst av kravene 1-4, hvor man i trinn b bestemmer graden av annulær strømming basert på minst to målinger av permittiviteten av flerfaseblandingen, som igjen er ulikt påvirket av graden av annulær strømming.
- 15 7. Fremgangsmåte i henhold til krav 4, hvor man i trinn b bestemmer graden av annulær strømming basert på måling av differensielt tap mellom mottakerantennene.
8. Fremgangsmåte i henhold til hvilket som helst av kravene 1-7, hvor hastigheten av væske og gass måles ved å
20 krysskorrelere målinger foretatt ved to antennesett i flerfaseblandingen lokalisert med en kjent avstand fra hverandre.
9. Fremgangsmåte i henhold til hvilket som helst av kravene 1-8, hvor tettheten av flerfaseblandingen måles ved å
25 benytte gammastråleabsorpsjonsteknikker.
10. Fremgangsmåte i henhold til hvilket som helst av kravene 1-8, hvor tettheten av flerfaseblandingen måles ved å benytte en venturi.
11. Fremgangsmåte i henhold til krav 10, hvor
30 trykkgjenvinningen over utløpet av en venturi måles.

12. Strømningsmåler for å bestemme strømningsratene for en flerfaseblanding bestående av en flerkomponent blanding av en gass og minst en væske i et rør, hvilken strømningsmåler består av en rørformet seksjon og følgende elementer:

- 5 a. middel for måling av elektromagnetisk tap og fase i minst to retninger av rørseksjonen,
- b. middel for å måle graden av annulær strømning basert på målingene i trinn a, inkludert en egnet data-modell,
- 10 c. en datamaskin og et matematisk program for beregning av permittiviteten av flerfaseblandingen basert på resultatene fra trinn a og b, inkludert korreksjon relatert til graden av annulær strømning,
- d. middel for bestemmelse av flerfaseblandingsens tetthet, inkludert korreksjon relatert til graden av annulær strømning,
- 15 e. middel for bestemmelse av hastighet av væske(r) og gass,
- f. middel for bestemmelse av temperatur og trykk, og
- 20 g. middel for beregning av volum- og massestrømningsrater for gass og væske(r) i flerfaseblandingen basert på elementene a-f og kjennskap til tetthet og permittivitet av de individuelle komponentene av flerfaseblandingen.
- 25 13. Strømningsmåler i henhold til krav 12, hvor rørseksjonen omfatter en sendeantenne og to mottakerantenner i det samme tverrsnittet av rørseksjonen, og en sendeantenne og to mottakerantenner lokalisert i lengderetningen av rørseksjonen.

14. Strømningsmåler i henhold til krav 13, omfattende elektronisk middel for å sende ut et frekvens-sveip på en sendeantenne og samtidig måle fasedifferanse og tap for frekvens-sveipet på to mottakerantenner.
- 5 15. Strømningsmåler i henhold til krav 14, omfattende middel for å beregne graden av annulær strømming basert på den målte fasedifferansen og/eller tapet.
16. Strømningsmåler i henhold til krav 14, omfattende middel for å beregne graden av annulær strømming basert på
10 måling av permittivitet i tverrsnittet og lengderetningen av rørseksjonen.
17. Strømningsmåler i henhold til hvilket som helst av kravene 13-16, omfattende middel for beregning av hastigheten av væske og gass ved å krysskorrelere målinger utført
15 ved to antennepar plassert ved to ulike tverrsnitt av rørseksjonen separert med en kjent avstand fra hverandre.
18. Strømningsmåler i henhold til krav 12-17, omfattende en tetthetsmåler basert på måling av gammastråleabsorpsjon i flerfaseblandingen.
- 20 19. Strømningsmåler i henhold til krav 17, omfattende middel for å beregne tettheten av flerfaseblandingen basert på måling av trykkfall over en venturi.
20. Strømningsmåler i henhold til krav 19, omfattende middel for å måle trykkgjenvinning i utløpet av en venturi.

Fig. 1

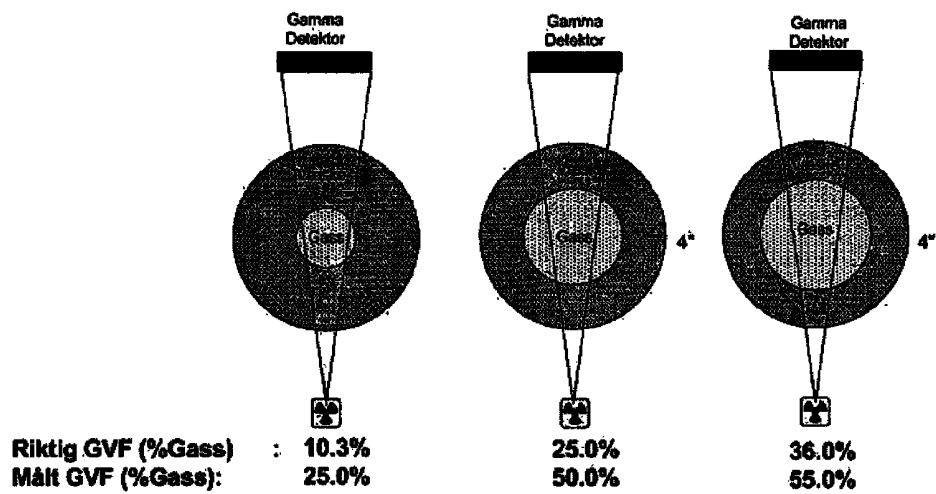


Fig. 2

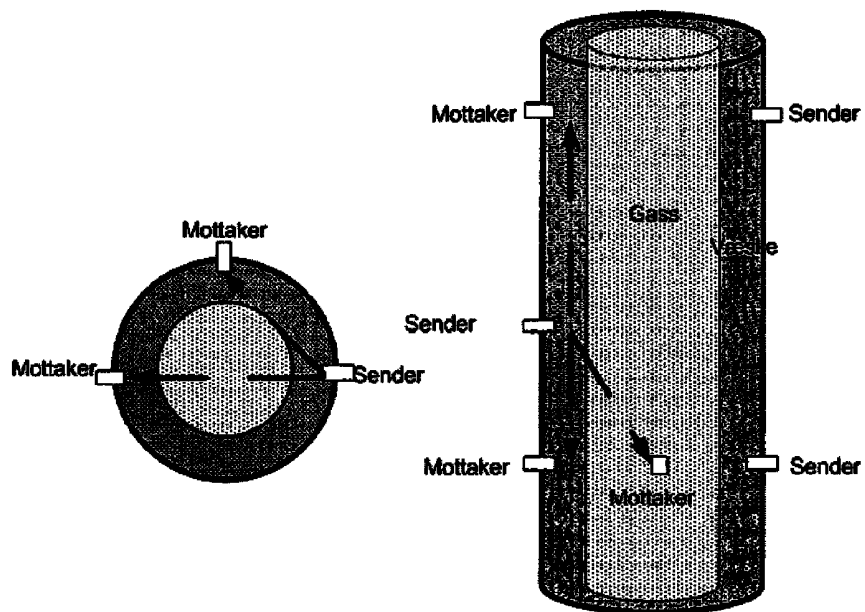


Fig. 3

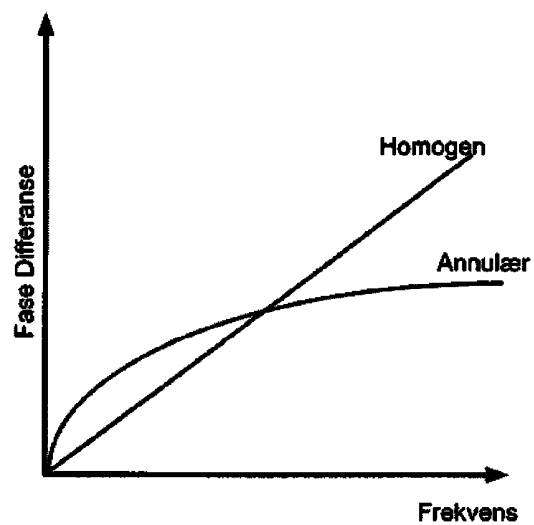


Fig. 4

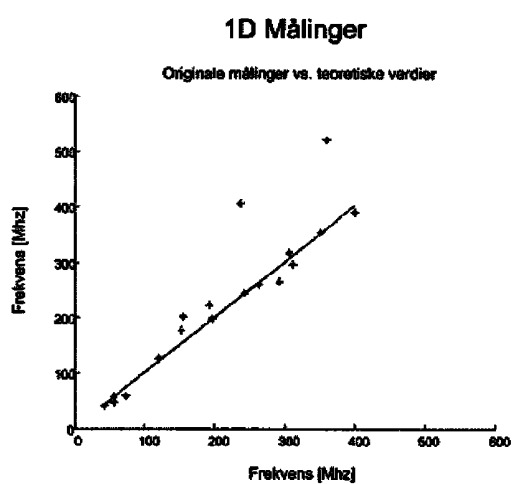


Fig. 5

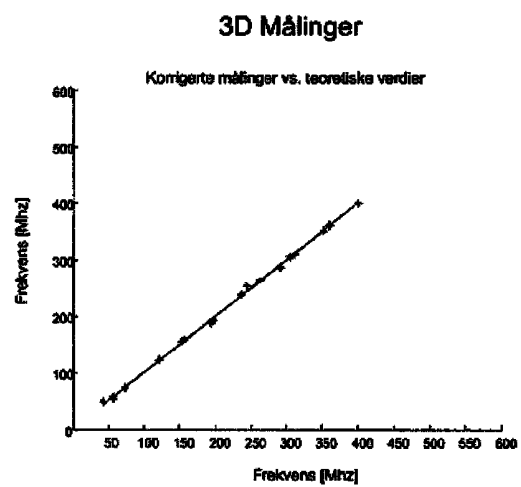


Fig. 6

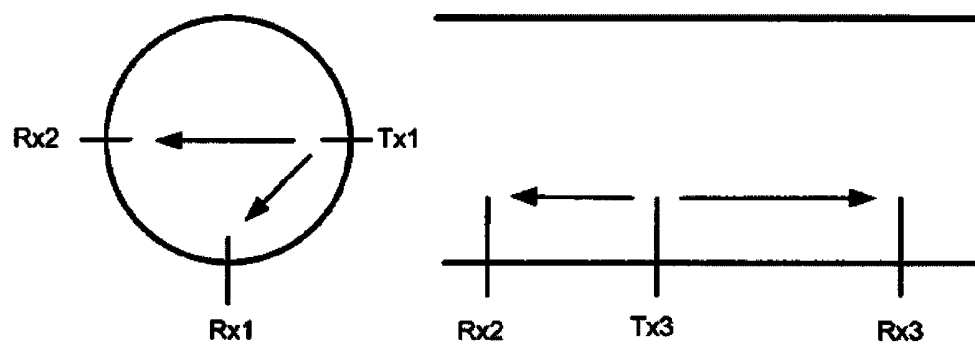


Fig. 7

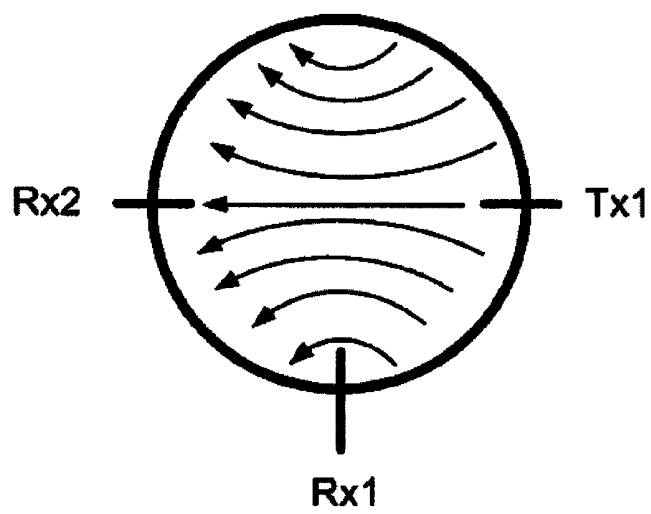


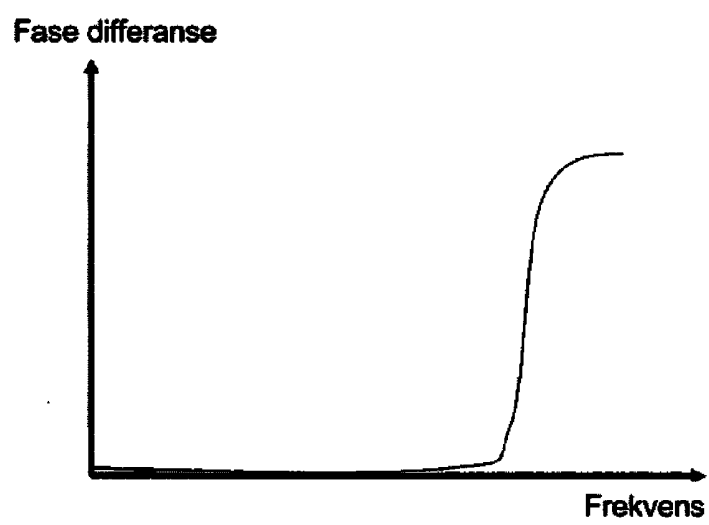
Fig. 8

Fig. 9

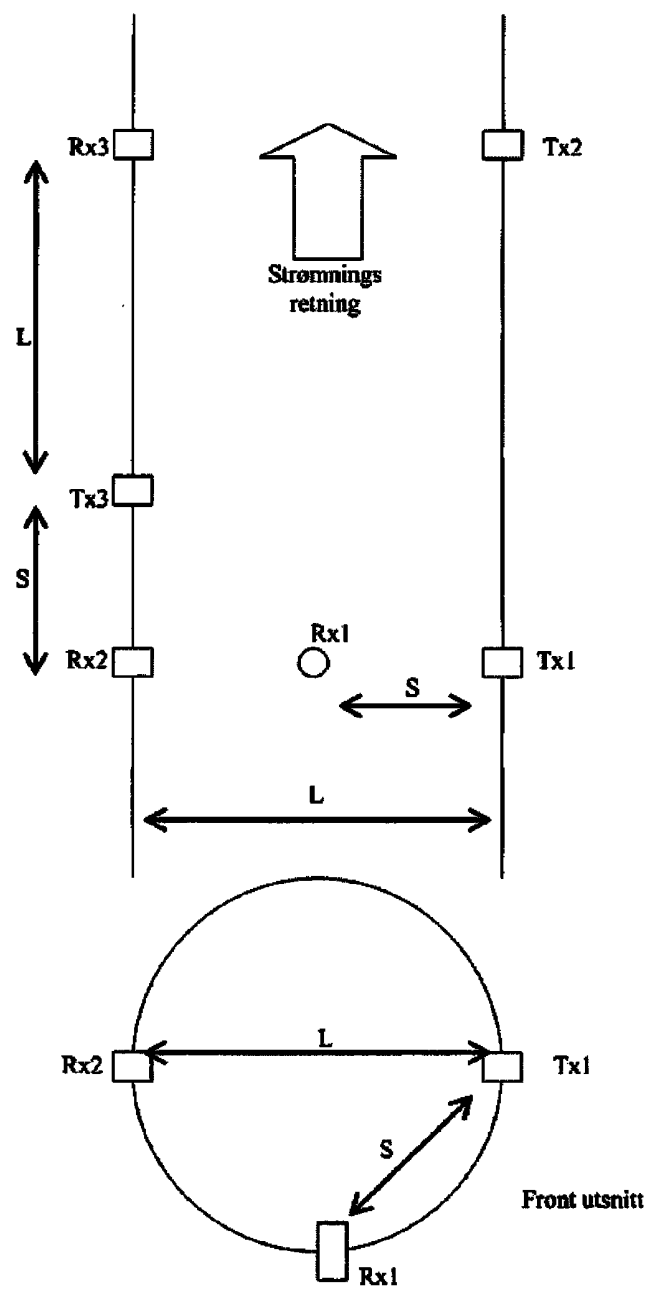


Fig. 10

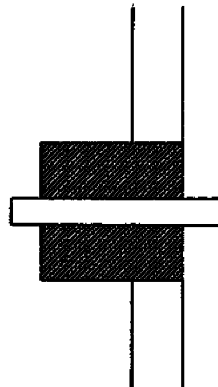


Fig. 11

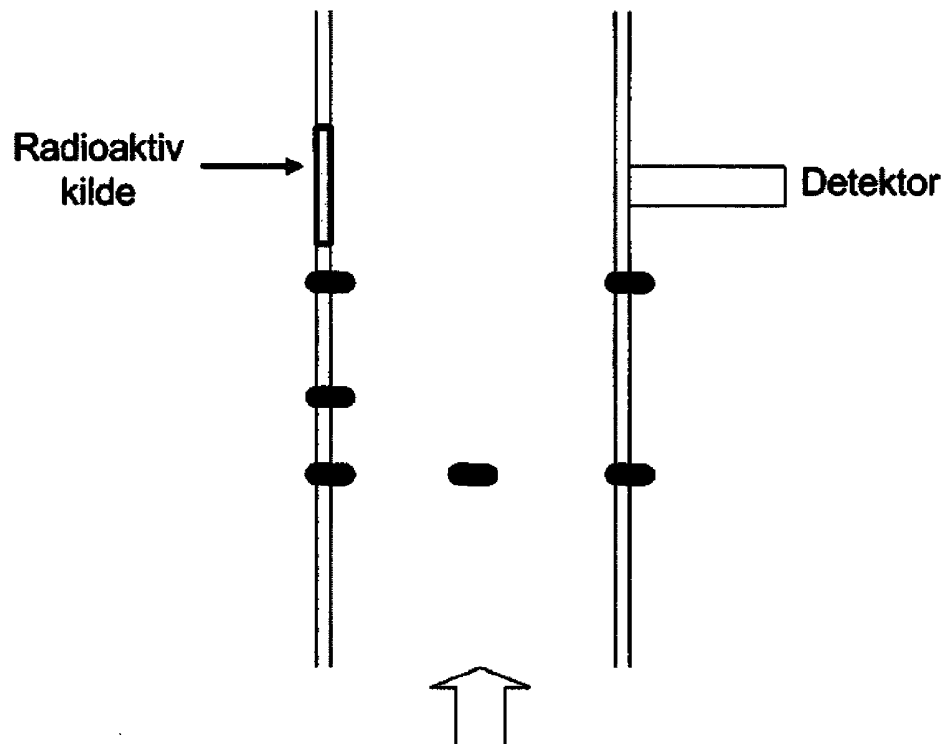


Fig. 12

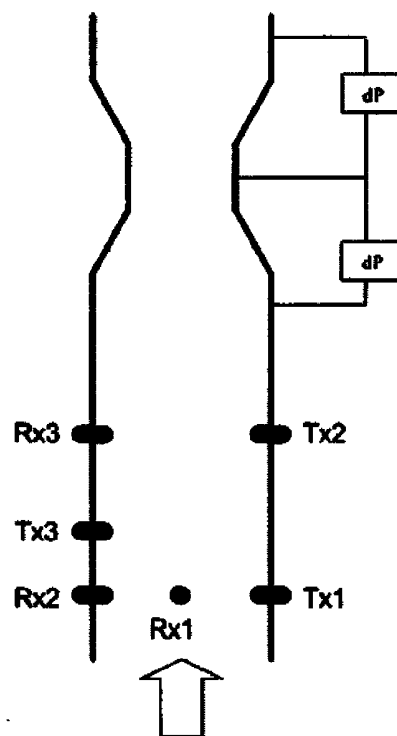


Fig. 13

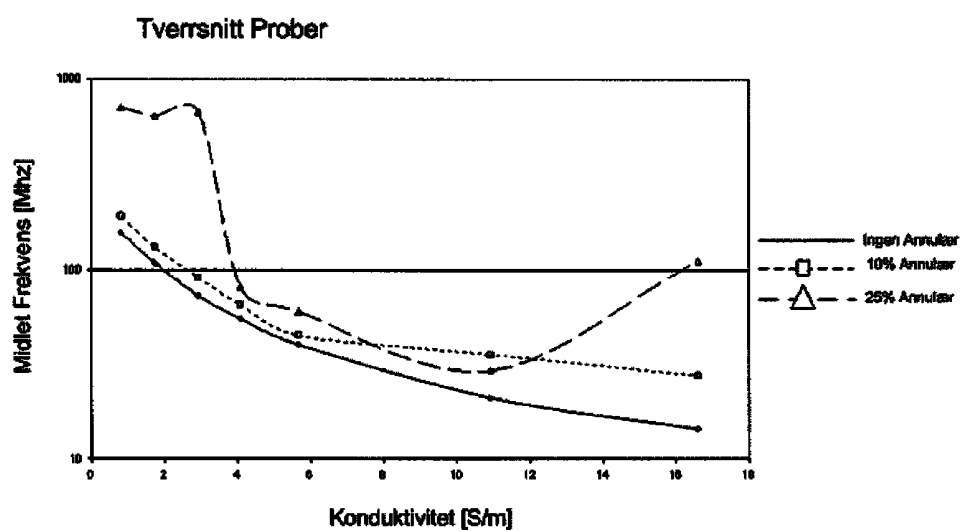


Fig. 14

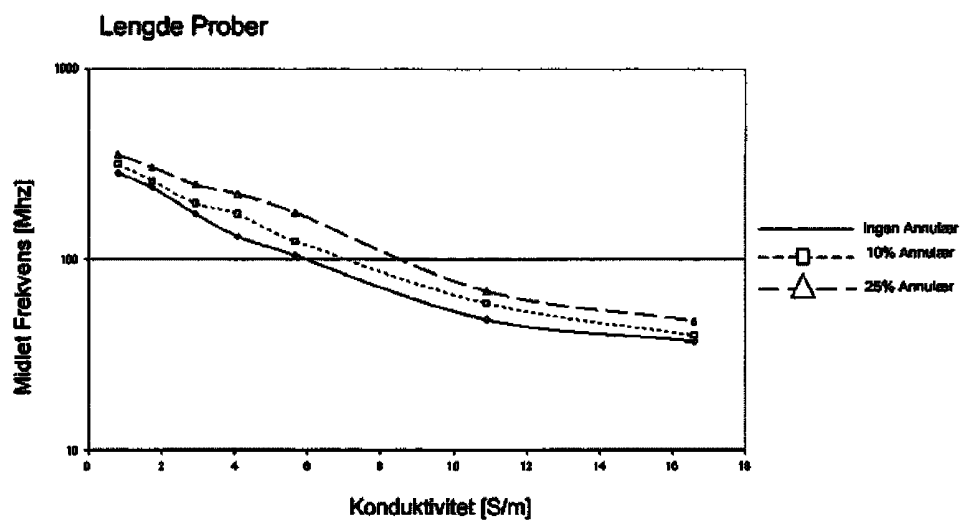


Fig. 15

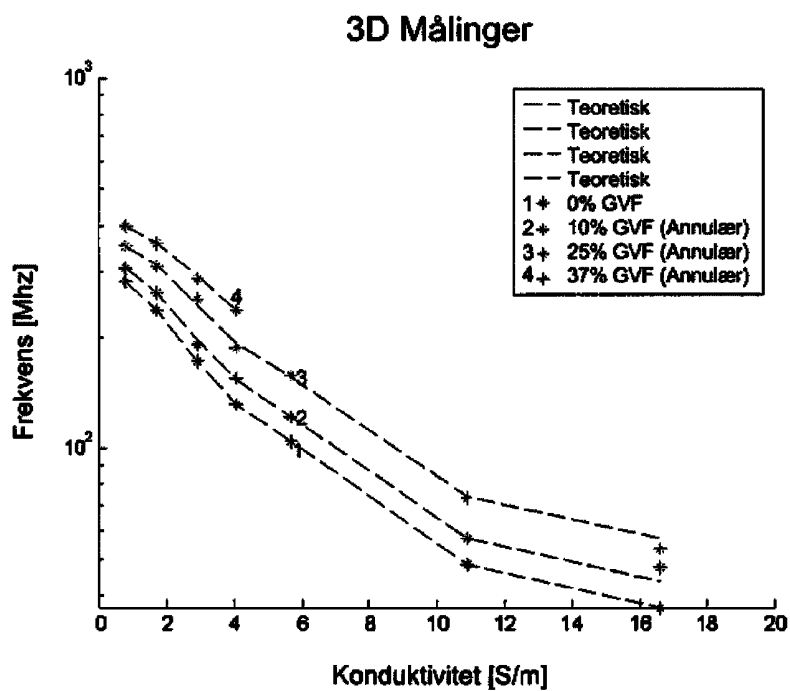
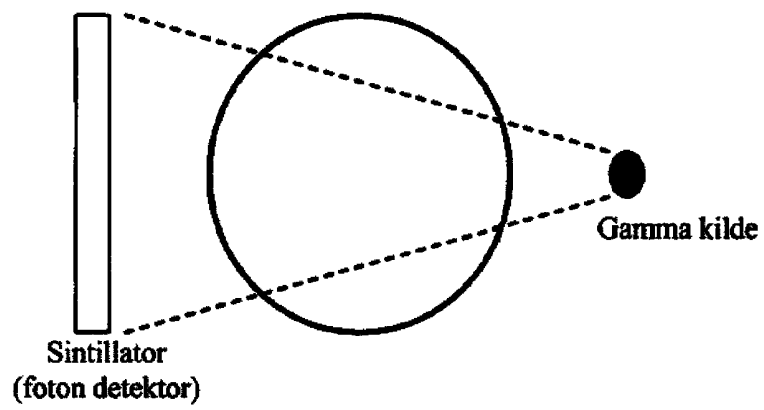


Fig. 16**Fig. 17**