

(19) DANMARK



(12) FREMLÆGGELSESSKRIFT (11) 148334 B

DIREKTORATET FOR  
PATENT- OG VAREMÆRKEVÆSENEN

(21) Patentansøgning nr.: 1610/82

(51) Int.Cl.⁴: G 01 P 5/00

(22) Indleveringsdag: 07 apr 1982

(41) Alm. tilgængelig: 08 okt 1983

(44) Fremlagt: 10 jun 1985

(86) International ansøgning nr.: -

(30) Prioritet: -

(71) Ansøger: \*FORSØGSANLÆG RISØ; Roskilde, DK.

(72) Opfinder: Steen \*Hanson; DK.

(74) Fuldmægtig: Internationalt Patent-Bureau

(54) Fremgangsmåde ved måling af hastighedsgradienter i et strømmende medium samt apparat til gennemførelse af fremgangsmåden

(57) Sammendrag:

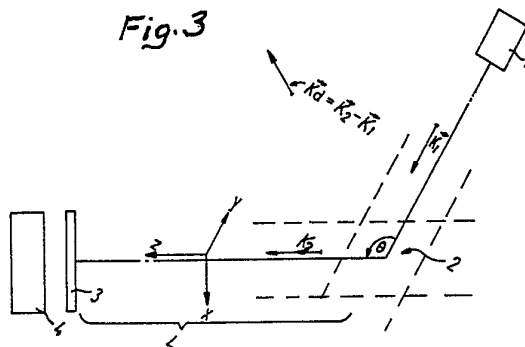
1610-82

Ved en fremgangsmåde ved måling af hastighedsgradienter i et måleområde (2) i et strømmende medium, ved hvilken der detekteres og måles spredt stråling fra af mediet medførte partikler, der bestråles med rumlig kohærent elektromagnetisk stråling, navnlig laserlys, og ved hvilken differensen i Doppler-forskydning i stråling fra forskellige partikler i måleområdet (2) benyttes som mål for hastighedsgradienten, anbringes et optisk element (3) i strålingens vej fra partikler i måleområdet (2) til detektoren (4). Det optiske element (3) har sådanne egenskaber, at i det væsentlige kun stråling, der samtidig spredes fra partikelpar i målevoluminet (2) med en af det optiske element (3) fastlagt indbyrdes afstand bringes til at indgå i de målesignaler, der skal kombineres til dannelse af det signal, der er et mål for differensen i Doppler-forskydning og dermed for hastighedsgradienten i det ved målepunkterne bestemte måleområde (2).

Det optiske element (3) kan f.eks. være et optisk gitter af absorptions-, fase-, refleksionstypen eller mellemliggende former, en Bragg-celle eller et dobbeltbrydende element, eller det kan være en kombination af en totalreflekerende flade og en stråledeler eller eventuelt en glasplade, hvis ene side er belagt med et totalreflekerende materiale.

Et apparat ifølge opfindelsen indeholder en kilde for elektromagnetisk stråling (1) og en detektor (4) til opfangning af spredt stråling hidrørende fra partikler i et målevolumen (2) og midler til registrering af de fra detektoren kommende signaler samt endvidere et i strålingens vej fra målevoluminet til detektoren anbragt optisk element (3) af den type, der er angivet ovenfor.

Ved udøvelse af fremgangsmåden og ved anvendelse af apparatet er det muligt at måle hastighedsforskellen mellem to partikler i målevoluminet (2) og dermed bestemme ikke blot middelhastighed og turbulensgrad, men også hastighedsfeltets variationer i målevoluminet (2).



LN 140034 B

Opfindelsen angår en fremgangsmåde ved måling af hastighedsgradienter i et måleområde i et strømmende medium, ved hvilken der detekteres og måles spredt stråling fra af mediet medførte partikler, der bestråles med  
5 rumlig kohærent elektromagnetisk stråling, navnlig laserlys, og ved hvilken differensen i Doppler-forskydning i stråling fra forskellige partikler i måleområdet benyttes som mål for hastighedsgradienten.

Måling af hastighedsgradienter i strømmende medier  
10 er af betydning navnlig ved undersøgelse af turbulente strømninger. Sådanne undersøgelser foretages f.eks. ved konstruktion af skibsskrog, fly, propeller, vindmøller, skibsskruer, turbiner, automobiler, rørdele, gas- og væskeudstødsorganer, forbrændingskamre i eksplosions-  
15 motorer, dysebrændere osv.

De hidtil udviklede teorier og matematiske modeller for turbulent strømning er relativt ufuldstændige og netop på grund af problemer med måling af hastighedsgradienterne vanskelige at verificere. Det har derfor  
20 hidtil ved praktisk konstruktionsarbejde været nødvendigt at anvende tids- og omkostningskrævende modelforsøg og afprøvning af prototyper i vindtunneler, tanke og lignende.

Sådanne forsøg giver imidlertid ingen informationer  
25 om årsagen til et vellykket eller mislykket forsøg.

Det har derfor både teknisk og teoretisk interesse at videreudvikle teorien for turbulent strømning og i den forbindelse at angive metoder til eksperimentel kortlægning af hastighedsfelter og deres udvikling som  
30 funktion af tiden til verificering af teorien.

I de senere år er det blevet almindeligt at anvende laser Doppler anemometri ved måling af strømningshastigheder i strømmende medier, især da dette er en metode, der ikke giver strømningsændringer hidrørende fra an-  
35 bringelse af målesonder eller lignende i mediet.

Princippet i laser Doppler anemometri er, at stråling, der spredes af en partikel, som bevæger sig med det strømmende mediums hastighed, undergår en frekvens-

ændring, Doppler-forskydningen, der er proportional med partiklens hastighed og dermed et mål for mediets strømningshastighed.

I det målevolumen, hvori målingen foretages i praksis, bevæger der sig mange partikler med lidt forskellige hastigheder, der fordeler sig omkring en middelhastighed og således giver anledning til et frekvensspektrum af en vis udstrækning. Det er muligt at måle middelhastigheden og turbulensgraden, som er et udtryk for hastighedsvariationer i målevoluminet.

Der er også gjort forsøg på at udvikle metoder til måling af hastighedsgradienter ved hjælp af anemometre.

Mishina og Asakura har i Japan J. Appl. Phys., 15, No. 10, s. 2001-2002 (1976) beskrevet en metode, hvor der anvendes to målerumfang, der begge er fastlagt ved hjælp af laserstråler og f.eks. ligger i en indbyrdes afstand på 20  $\mu\text{m}$ . Hensigten er ved hjælp af et laser Doppler mikroskop at undersøge blodets strømning i biologisk levende væv ved måling af bl.a. hastighedsgradienten i blodstrømmen i kapillarer med en diameter på ca. 10  $\mu\text{m}$ .

M. Fermigier et al. har i Appl. Phys. Lett., 36(5) s. 361-363 (1980) angivet en metode, hvor der anvendes to lasere til måling af tværgående hastighedsgradienter og laminar og turbulent diffusion. En pulseret laser "indskriver" i en strømmende væske et fasegitter, som derefter "aflæses" ved hjælp af en anden laser under dannelse af dets diffraktionsbillede.

G. G. Fuller et al. har i J. Fluid Mech., 100(3) s. 555-575 (1980) beskrevet en eksperimentel metode, hvis gennemførelse dog er kompliceret og vanskelig at reproducere. Den er baseret på det klassiske homodyn princip anvendt på en strømmende suspension, idet der benyttes en korrelationsfunktion, hvori indgår resultatet af målinger af spredt laserlys fra partikler i suspensionen ved hjælp af en detektor med fotomultiplikatorrør. De eksperimentelle målinger som foretages i laminare strømninger skal tjene til at underbygge en

teori, der er baseret på det ovenfor omtalte lysspredningsspektrum, og i hvilken indgår virkningen af forskellige typer af lineære strømningsfelter, partikeldiffusion og intensitetsprofilen i målerumfanget.

5 Ingen af de hidtil anvendte målemetoder er egnede til praktisk brug uden for laboratorier. Ved den foreliggende opfindelse tilsigtes tilvejebragt en fremgangsmåde og et apparat, som er velegnet til praktisk brug, som er fleksibelt i den forstand, at det på  
10 enkel måde kan omstilles til løsning af forskellige opgaver, og som er enkelt og let at betjene.

Fremgangsmåden ifølge opfindelsen er ejendommelig ved, at der i strålingens vej fra partikler i måleområdet til detektoren anbringes et optisk element med sådanne  
15 egenskaber, at i det væsentlige kun stråling, der samtidig spredes fra partikelpar i målevoluminet med en af det optiske element fastlagt indbyrdes afstand, bringes til at indgå i de målesignaler, der skal kombineres til dannelse af det signal, der er et mål for differensen i  
20 Doppler-forskydningerne og dermed for hastighedsgradienten i det ved målepunkterne bestemte måleområde.

Herved bliver det muligt at måle hastighedsforskellen mellem to partikler i det ved fremgangsmåden anvendte målevolumen og dermed bestemme ikke blot middelhastighed  
25 og turbulensgrad, men også hastighedsfeltets variationer i målevoluminet.

Et optisk element med de angivne egenskaber kan f.eks. være et på passende måde udformet optisk gitter af absorptionstypen, fasetypen, refleksionstypen, mellem-  
30 liggende former, en Bragg-celle eller et dobbeltbrydende element, såsom et Wollaston eller et Rochon prisme. Eller en kombination af en totalreflekterende flade og en beamsplitter eller en glasplade, hvis ene side er belagt med et totalreflekterende materiale.

35 Anvendelsen af sådanne optiske elementer, der nøje bestemmer den indbyrdes afstand mellem de partikler, hvorfra den målte stråling spredes, gør det muligt på enkel måde at foretage en tilpasning til den foreliggen-

de opgave, idet der afhængigt af opgaven vælges det optiske element, som har de ønskede egenskaber. Det bliver endvidere let at måle gradienter i forskellige retninger og desuden at måle den totale hastighed, således som det  
5 skal forklares senere.

Et apparat til udøvelse af fremgangsmåden ifølge opfindelsen indeholder en kilde for elektromagnetisk stråling, navnlig en laser og en detektor til opfangning af spredt stråling hidrørende fra partikler i et måle-  
10 volumen og midler til registrering af de fra detektoren kommende signaler og er ejendommeligt ved et i strålegangen fra målevoluminet til detektoren således anbragt og indrettet optisk element, at en del af strålingen fra to samtidigt i målevoluminet optrædende partikler med en  
15 indbyrdes afstand, der bestemmes af det optiske element, har parallelle faseflader efter strålingens passage af det optiske element og på detektoren omdannes til et elektrisk signal repræsenterende differensen i Doppler-forskydning mellem de to partikler.

20 Det optiske element, der anvendes ifølge opfindelsen, er fortrinsvis et gitter af absorptionstypen, refleksionstypen, fasetypen eller mellemliggende former. Det kan fremstilles på forskellige måder, der omtales nærmere senere, men må udformes under hensyntagen til  
25 den opgave, der skal løses.

Anvendelsen af et sådant optisk element i den omhandlede fremgangsmåde i forbindelse med et fra laser Doppler anemometri kendt detektorsystem medfører, at spredt stråling fra to partikler, der samtidigt befinder  
30 sig med den af det optiske element definerede rette indbyrdes afstand i målevoluminet, vil forlade elementet med næsten parallelle faseflader. Dette resulterer i et kraftigt signal, et såkaldt "burst", i det af detektoren afgivne elektriske signal, af hvilke ved en  
35 analyse svarende til den, der anvendes til registrering af Doppler-forskydningen ved almindelig laser Doppler-anemometri, findes differensen i Doppler-forskydning mellem strålingen fra de to partikler, hvilken differens

er proportional med hastighedsforskellen mellem de to partikler. Ved division med den kendte, ved det optiske elements data bestemte indbyrdes afstand mellem de to partikler fås derefter hastighedsgradienten.

5 De ifølge opfindelsen anvendte optiske elementer kan f.eks. fremstilles, som beskrevet af E. Wolf i "Progress in Optics", Vol. XII: "Recent Advances in Phase Profiles Generation", ved belysning af en fotografisk film med to indbyrdes kohærente kuglebølger. Svært-  
10 ningsmønsteret på den fotografiske film vil svare til interferensmønsteret mellem de to felter.

I praksis kan filtrene fremstilles ved at dele lyset fra en laser op i to stråler, der synes at udgå fra to forskellige steder i rummet, og rette dem mod en  
15 fotografisk glasplade af den art, der anvendes til optagelse af hologrammer. Efter fremkaldelse kan en af de følgende processer anvendes:

- Pladen anvendes direkte som absorptionsfilter,
- den fotografiske emulsion bleges væk, hvorved  
20 informationen bibeholdes som en variation i den optiske vejlængde ved lysets passage gennem pladen, som i et fasegitter, eller
- pladen pådampes et reflekterende metallag, hvorved informationen ligger i det reflekterede  
25 lys' fase.

De optiske elementer kan eksempelvis også fremstilles efter den af E. Wolf i "Progress in Optics" Vol. II: "Ruling, Testing and use of Optical Gratings for High Resolution Spectroscopy." angivne metode, dvs. ved  
30 mekanisk fremstilling, idet fase- eller amplitudeinformation indgraveres ved numerisk styring efter udregning af kurveformen.

Endvidere kan der som nævnt anvendes et dobbeltbrydende prisme, f.eks. af typen "Wollaston" eller  
35 "Rochon", eller en Bragg-celle.

På disse og andre måder kan der fremstilles to forskellige typer optiske elementer:

- a) Streggitter med gitterkonstanten  $g$  (antal linier pr. m) af enten absorptions- eller fasetypen. Herunder hører også et dobbeltbrydende prisme med vinklen  $\Omega$  mellem det ordinære og det ekstraordinære strålebundt.
- b) Rotationssymmetrisk absorptionsmaske med transmissionsfunktionen  $T(r)$

$$T(r) = T_0 [ 1 + t_1 \cos(\gamma r^2 + \delta) ]$$

10

hvor  $T_0$ ,  $t_1$ ,  $\gamma$  og  $\delta$  er konstanter og  $r$  er den radiære koordinat, eller rotationssymmetrisk fasemaske med den optiske vejlængde  $S(r)$

$$S(r) = S_0 [ 1 + s_1 \cos(\gamma r^2 + \delta) ]$$

15

hvor  $S_0$ ,  $s_1$ ,  $\gamma$  og  $\delta$  er konstanter.

Et optisk element af typen a) vil, placeret ved linsen i detektorsystemet, bevirke, at det frekvensskiftede lys fra to partikler i målevoluminet med afstanden  $L$  fra det optiske element og med den indbyrdes afstand  $\Delta q$

$$\Delta q = g\lambda L \quad \text{for gitteret og}$$

$$\Delta q = \Omega L \quad \text{for prismet,}$$

hvor  $\lambda$  er bølgelængden af det anvendte lys, har konstant faseforskel over detektorens areal, medens det placeret i linsens billedplan vil være lys fra partikler i målevoluminet med den indbyrdes afstand  $\Delta q$

$$\Delta q = g\lambda f \quad \text{for gitteret og}$$

$$\Delta q = \Omega f \quad \text{for prismet,}$$

hvor  $f$  er linsens brændvidde, der har konstant faseforskel over detektorens areal.

Et optisk element af typen b) vil, placeret ved linsen i detektorsystemet, bevirke, at lys fra to partikler med den indbyrdes afstand  $\Delta p$  i den optiske akse retning

$$\Delta p = \frac{\lambda \gamma L^2}{\eta} \quad \text{for placering ved linsen}$$

$$\Delta p = \frac{\lambda \gamma f^2}{\eta} \quad \text{for placering i billedplanet,}$$

35

hvor  $\lambda$ ,  $\gamma$  og  $f$  er som angivet tidligere, og som begge ligger i udbredelsesretningen for det spredte lys mellem målevoluminet og detektoren, vil have konstant faseforskel over detektorens areal.

5 Udoover disse typer optiske elementer, hvor den indbyrdes afstand er bølgelængdeafhængig, og som her benævnes "vinklelementer", kan der ved den omhandlede fremgangsmåde også anvendes andre typer, f.eks. som nævnt tidligere en kombination af et spejl og en beam-splitter  
10 eller en glasplade med et reflekterende lag, ved hvilke typer den indbyrdes afstand er uafhængig af bølgelængden, og som her benævnes "afstandselementer".

Sådanne "afstandselementer" vil ved placering ved linsen i detektorsystemet eller i dennes brændplan be-  
15 virke, at lys fra partikler i målevoluminet med den indbyrdes afstand  $\Delta p = d_0$  henholdsvis  $\Delta p = d_0 L/f$ , hvor  $d_0$  er givet for det enkelte optiske element, har konstant faseforskel over detektorens areal.

Ovenfor er omtalt to placeringer af det optiske  
20 element i lysvejen mellem målevoluminet og detektoren. I princippet kan det optiske element placeres et vilkårligt sted i denne lysvej, men af praktiske årsager og især for at undgå støj i detektorsignalet er de ovenstående placeringer de foretrukne.

25 Den indbyrdes afstand  $\Delta q$  eller  $\Delta p$  mellem de to partikler, der spreder det lys, der måles på, vil ved anvendelse af optiske elementer, der fremstilles, som angivet ovenfor, i almindelighed være større end  $10 \mu\text{m}$ , typisk fra  $10 \mu\text{m}$  til  $20 \text{cm}$  og fortrinsvis fra  $100 \mu\text{m}$  til  
30  $1 \text{cm}$ .

Den type detektor, der kan anvendes til et apparat ifølge opfindelsen, kan være af en vilkårlig kendt type, når blot den opfylder det krav, at den er kvadrerende.

Til udøvelse af opfindelsen kan f.eks. anvendes en  
35 laser af en vilkårlig type, idet der dog til nogle anvendelser foretrækkes en laser med to eller flere kraftige emissionslinier f.eks. en Ar-laser.

Opfindelsen forklares i det følgende nærmere

under henvisning til den skematiske tegning, hvor

fig. 1 viser en udførelsesform for et optisk element til brug ved udøvelse af den omhandlede opfindelse og bestående af en kombination af et spejl og en beam-splitter,

fig. 2 en anden udførelsesform for et optisk element til brug ved udøvelse af opfindelsen og bestående af en glasplade med et reflekterende lag,

fig. 3 en principskitse, der skal tjene som grundlag for forklaring af fremgangsmåden ifølge opfindelsen ved måling af hastighedsgradienter i strømmende medier,

fig. 4 et diagram over en udførelsesform for et apparat ifølge opfindelsen til måling af en komponent af hastighedsgradienten,

fig. 5 et tilsvarende diagram for et apparat ifølge opfindelsen til måling af to komponenter af hastighedsgradienten, og

fig. 6 et diagram over en yderligere udførelsesform for et apparat ifølge opfindelsen til måling af en hastighedskomponent og to komponenter af hastighedsgradienten.

I fig. 1 er der vist en udførelsesform for et optisk element af "afstandselement"-typen, som kan anvendes ved udøvelse af fremgangsmåden ifølge opfindelsen. Dette element består af et spejl 20 og en beam-splitter 21 og er konstrueret på en sådan måde, at to lysstråler A og B, der kommer fra et partikelpar med den indbyrdes afstand  $d_0$  i målevoluminet, af det optiske element bringes til at overlejre hinanden ved, at lysstrålen A af spejlet 20 reflekteres ned på beam-splitteren 21 og der opdeles i to lysstråler A' og A", medens lysstrålen B af beam-splitteren 21 opdeles i to lysstråler B' og B".

For partikelpar med den indbyrdes afstand  $d_0$  i målevoluminet dannes således to sæt overlejlrede lysstråler henholdsvis A'+B' og A"+B", der kan føres til detektoren, og som vil have konstant faseforskel over dennes areal.

Med det i fig. 1 viste afstandselement kan den indbyrdes afstand  $d_0$  mellem partiklerne varieres ved at forskyde spejlet 20 mod eller bort fra målevoluminet på overfladen af beam-splitteren 21.

5 I fig. 2 er vist en anden udførelsesform for et afstandselement til brug ved udøvelse af den omhandlede opfindelse og bestående af en glasplade 22, der på den ene side er forsynet med et reflekterende lag 23. To lysstråler A og B fra et partikelpar i målevoluminet  
10 med den indbyrdes afstand  $d_0$  bringes af dette optiske element til at overlejre hinanden ved, at de på glaspladen 22's overflade opdeles i hver to stråler A' og A'' henholdsvis B' og B'', hvor strålerne A' og B' reflekteres, medens strålerne A'' og B'' fortsætter til det reflekterende lag 23, hvor de reflekteres. For den givne afstand  $d_0$  overlejres derved de to stråler A'' og B' til en stråle A''+B', der kan føres videre til detektoren med konstant faseforskel over dennes areal.

I samtlige figurer er der anvendt de samme henvisningsbetegnelser for de samme komponenter.  
20

I fig. 3 er vist en laser 1, som udsender en laserstråle, der rammer et målevolumen 2 som en parallel stråle med en bølgevektor  $\vec{k}_1$  med en frekvens  $\omega_0$ . I målevoluminet 2 spredes laserlyset i alle retninger  
25 af partikler, der bevæger sig med det strømmende medium. Den del af det spredte lys, der spredes med en spredningsvinkel  $\theta$  og med en bølgevektor  $\vec{k}_2$ , rammer et optisk element 3, der er anbragt i en afstand L fra målevoluminet 2 i lysvejen fra målevoluminet 2 til en detektor  
30 4.

Dette lys er sammensat af spredt lys fra samtlige partikler i, j, .... i målevoluminet med hver sin hastighed  $\vec{v}_i, \vec{v}_j, \dots$ , der hver bevirker en frekvensændring, f.eks.  $\Delta\omega_j$  med størrelsen

$$35 \quad \Delta\omega_j = (\vec{k}_2 - \vec{k}_1) \cdot \vec{v}_j = \vec{k}_d \cdot \vec{v}_j$$

hvor  $\vec{k}_d$  er differensvektoren mellem  $\vec{k}_2$  og  $\vec{k}_1$ , for det fra hver partikel udsendte lys med spredningsvinklen  $\theta$ ,

og er således sammensat af lys med mange forskellige frekvenser, der indeholder informationer om det strømmende mediums hastighedsfelt.

Det optiske element 3, der er konstrueret, som 5 angivet tidligere, bevirker nu, at kun det lys, der er spredt fra to partikler  $j$  og  $k$ , der samtidig befandt sig med den af det optiske element bestemte afstandsrelation  $\Delta q$  eller  $\Delta p$  i målevoluminet, rammer detektoren 4 med konstant faseforskel over dens areal. Herved måles 10 frekvensforskellen  $\Delta\omega_{j,k}$  med størrelsen

$$\Delta\omega_{j,k} = \Delta\omega_j - \Delta\omega_k = \vec{k}_d \cdot (\vec{V}_j - \vec{V}_k) = \vec{k}_d \cdot \Delta\vec{V}_{j,k}$$

hvor  $\Delta\vec{V}_{j,k}$  for partikelparret  $j$  og  $k$  er hastigheds- 15 differensvektoren for lys udsendt fra de to partikler  $j$  og  $k$ .

Da prikproduktet mellem to vektorer er lig med 20 længden af den ene vektor ganget med længden af den anden vektors projektion på den første vektor, er det målte signal altså proportionalt med projektionen af hastighedsdifferensvektoren  $\Delta\vec{V}_{j,k}$  på differensvektoren  $\vec{k}_d$

$$25 \quad \Delta\omega_{j,k} = \vec{k}_d \cdot \Delta\vec{V}_{j,k} = |\vec{k}_d| |\Delta\vec{V}_{j,k}| \cos\varphi$$

hvor  $\varphi$  er vinklen mellem de to vektorer, hvorfor 30 hastighedsgradienten  $\partial v_\alpha / \partial \beta$  kan bestemmes ved anvendelse af det optiske element 3. I udtrykket  $\partial v_\alpha / \partial \beta$  er  $v_\alpha$  strømningshastighedens komponent i retningen  $\alpha$ , der har samme retning som  $\vec{k}_d$  og således kan reguleres gennem spredningsvinklen  $\theta$ , og hvor koordinaten  $\beta$ , der har samme retning som forbindelseslinien mellem de to partikler  $j$  og  $k$ , er givet af det 35 optiske element 3.

I fig. 3 er antydnet et koordinatsystem, der er bekvemt at anvende ved fremgangsmådens forklaring, og hvortil der henvises i den følgende beskrivelse af apparater vist i fig. 3-6. I dette koordinatsystem følger z-aksen den optiske akse for detektoren 4, således at x,z-planen svarer til papirets plan og y-aksen går vinkelret op fra dette plan. Koordinatsystemets origo kan vælges vilkårligt på detektorens 4 optiske akse.

10 I fig. 4 er vist en enkel udførelsesform for et apparat til gennemførelse af fremgangsmåden ifølge opfindelsen. Apparatet er opbygget af en laser 1, der gennem et teleskop 5, der forøger laserstrålens diameter, sender lys mod et målevolumen 2, hvor  
15 lyset spredes.

Det lys, der fra målevoluminet 2 spredes i retningen  $\theta$ , rammer det ifølge opfindelsen anbragte optiske element 3, der muliggør måling af hastighedsgradienter. Det lys, der passerer det optiske  
20 element 3, fokuseres af en linse 6 på åbningen i en blænder 7 til afskærmning af lys fra områder uden for målevoluminet 2 og rammer endelig detektoren 4.

Med dette apparat er det muligt med et optisk  
25 element af gittertypen eller et dobbeltbrydende prisme at måle hastighedsgradienten

$$\frac{\partial v_{\alpha}}{\partial x}$$

(der henvises til koordinatsystemet i fig. 3) ved for  
30 gitterets vedkommende at anbringe dette således, at gitterstregerne står vinkelret på x-aksen og ligger i plan med x,y-planet, og for prismets vedkommende at placere dette således, at de ordinære og ekstraordinære stråler begge ligger i x,z-planen. Ved derefter at  
35 dreje elementet  $90^{\circ}$  omkring z-aksen kan

$$\frac{\partial v_{\alpha}}{\partial y}$$

måles. Efterfølgende anvendelse af et rotationssymmetrisk optisk element 3 muliggør måling af

$$\frac{\partial v_{\alpha}}{\partial z} .$$

5 Endelig muliggør en ændring af spredningsvinklen  $\theta$ , ved at flytte et eller flere af apparatets komponenter, måling af hastighedsgradienter for flere hastighedskomponenter  $V_{\alpha}$ .

Ved anvendelse af vinkelementer, der er frem-  
10 stillet som kombinationer af de ovennævnte, kan der måles i vilkårlige retninger.

I fig. 5 er vist en udførelsesform for et apparat ifølge opfindelsen, hvor der er anvendt en laser 1 med to kraftige emissionslinier, f.eks. en Ar-laser 15 med bølgelængderne  $\lambda_1 = 488$  nm og  $\lambda_2 = 514$  nm. Efter lysets passage gennem teleskopet 5 rammer det et bølgelængdeafhængigt prisme 8, der afbøjer lys med den ene bølgelængde f.eks.  $\lambda_1$  og lader lys med bølgelængden  $\lambda_2$  passere uhindret. Ved hjælp af et spejl 9 20 reflekteres lyset med bølgelængden  $\lambda_2$  således, at der frembringes et fælles målevolumen 2, hvor lyset spredes med hver sin spredningsvinkel  $\theta_1$  og  $\theta_2$  i forhold til detektoren 4. Til måling på hver enkelt bølgelængde  $\lambda_1$  og  $\lambda_2$  er der anbragt et udskifteligt 25 interferensfilter 10 mellem det optiske element 3 og linsen 6.

Med dette apparat er det muligt uden at flytte nogen af apparatets komponenter at måle hastighedsgradienterne for to forskellige hastighedskomponenter 30 svarende til de to spredningsvinkler  $\theta_1$  og  $\theta_2$ .

I fig. 6 er vist en yderligere udførelsesform for et apparat ifølge opfindelsen, hvor det lineært polariserede laserlys fra laseren 1 efter passage gennem teleskopet 5 rammer en  $\lambda/4$ -plade 11 og 35 ændres til cirkulært polariseret lys, der fortsætter til en polariserende beam-splitter 12, som lader den vertikalt polariserede del af lyset fortsætte uhindret, mens den horisontalt polariserede del afbøjes. Det

vertikalt polariserede lys reflekteres derefter af spejlet 9 således, at der dannes et fælles målevolumen 2.

Ved anbringelse af et polarisationsfilter 13 efter det optiske element 3 muliggøres, som ved det i fig. 3 viste apparat, måling af hastighedsgradienterne svarende til de to spredningsvinkler  $\theta_1$  og  $\theta_2$  ved måling på enten det horisontalt eller vertikalt polariserede lys.

10 Ved drejning af polarisationsfilteret 13 således, at der måles på både det horisontalt og det vertikalt polariserede lys, er det yderligere muligt som ved almindelig laser Doppler anemometri at måle den hastighedskomponent, der er parallel med differensvektoren 15 mellem de to til målevoluminet 2 indkommende bølgevektorer under fjernelse af elementet 3.

I tegningens figurer er det optiske element 3 vist placeret foran linsen 6. Dog er det som nævnt tidligere ikke kritisk for den omhandlede fremgangs- 20 måde, hvor i lysvejen mellem målevoluminet 2 og detektoren 4 det optiske element 3 placeres.

Udover de på tegningen viste udførelsesformer for apparater ifølge opfindelsen kan der opbygges mange andre typer, f.eks. ved anvendelse af en laser med mere 25 end to kraftige emissionslinier til dannelse af mere end to spredningsvinkler eller anvendelse af en kombination af de i fig. 5 og 6 viste apparater til samtidig måling af strømningshastighedsvektoren og hastighedsgradienterne.

## P A T E N T K R A V

1. Fremgangsmåde ved måling af hastighedsgradienter i et måleområde i et strømmende medium, ved hvilken der detekteres og måles spredt stråling fra af mediet medførte partikler, der bestråles med rumlig kohærent 5 elektromagnetisk stråling, navnlig laserlys, og ved hvilken differensen i Doppler-forskydning i stråling fra forskellige partikler i måleområdet benyttes som mål for hastighedsgradienten, k e n d e t e g n e t ved, at der i strålingens vej fra partikler i måleom- 10 rådet til detektoren anbringes et optisk element med sådanne egenskaber, at i det væsentlige kun stråling, der samtidig spredes fra partikelpar i målevoluminet med en af det optiske element fastlagt indbyrdes afstand, bringes til at indgå i de målesignaler, der 15 skal kombineres til dannelsen af den signal, der er et mål for differensen i Doppler-forskydningerne og dermed for hastighedsgradienten i det ved målepunkterne bestemte måleområde.

2. Apparat til udøvelse af fremgangsmåden ifølge 20 krav 1 med en kilde for elektromagnetisk stråling, navnlig en laser, og en detektor til opfangning af spredt stråling hidrørende fra partikler i et målevolumen og midler til registrering af de fra detektoren kommende signaler, k e n d e t e g n e t ved et i strålegangen 25 fra målevoluminet til detektoren således anbragt og indrettet optisk element, at en del af strålingen fra to samtidigt i målevoluminet optrædende partikler med en indbyrdes afstand, der bestemmes af det optiske element, har parallelle faseflader efter strålingens passage af 30 det optiske element og på detektoren omdannes til et elektrisk signal repræsenterende differensen i Doppler-forskydning mellem de to partikler.

3. Apparat som angivet i krav 2 og med en laser, der afgiver lys med mindst to klart forskellige 35 frekvenser, k e n d e t e g n e t ved en stråledeler,

der deler laserlyset i mindst to stråler med stråling af hver sin bølgelængde, samt midler til at rette disse stråler mod målevoluminet og interferensfiltre i strålegangen fra dette til detektoren til valgfri afspærring af lys  
5 med andre frekvenser end den ønskede.

4. Apparat som angivet i krav 2 eller 3 med en laser, der afgiver polariseret lys, k e n d e t e g -  
n e t ved en i strålegangen mellem laseren og målevoluminet anbragt plade og stråledeler,  
10 der deler strålen i to stråler med hver sin type polari-  
seret lys, samt midler til at rette begge stråler mod målevoluminet og i strålegangen mellem dette og detek-  
toren et fortrinsvis drejeligt polarisationsfilter.

5. Apparat som angivet i krav 2, 3 eller 4,  
15 k e n d e t e g n e t ved, at der på i og for sig kendt måde i strålegangen indgår et teleskop mellem laser og stråledeler og linse og blænder foran detek-  
toren.

6. Apparat som angivet i et eller flere af kravene  
20 2-5, k e n d e t e g n e t ved, at det optiske element er et gitter af absorptionstypen, fasetypen, refleksionstypen eller mellemliggende former.

7. Apparat som angivet i et eller flere af kravene  
2-5, k e n d e t e g n e t ved, at det optiske  
25 element er et dobbeltbrydende element, f.eks. et Wollaston eller et Rochon prisme.

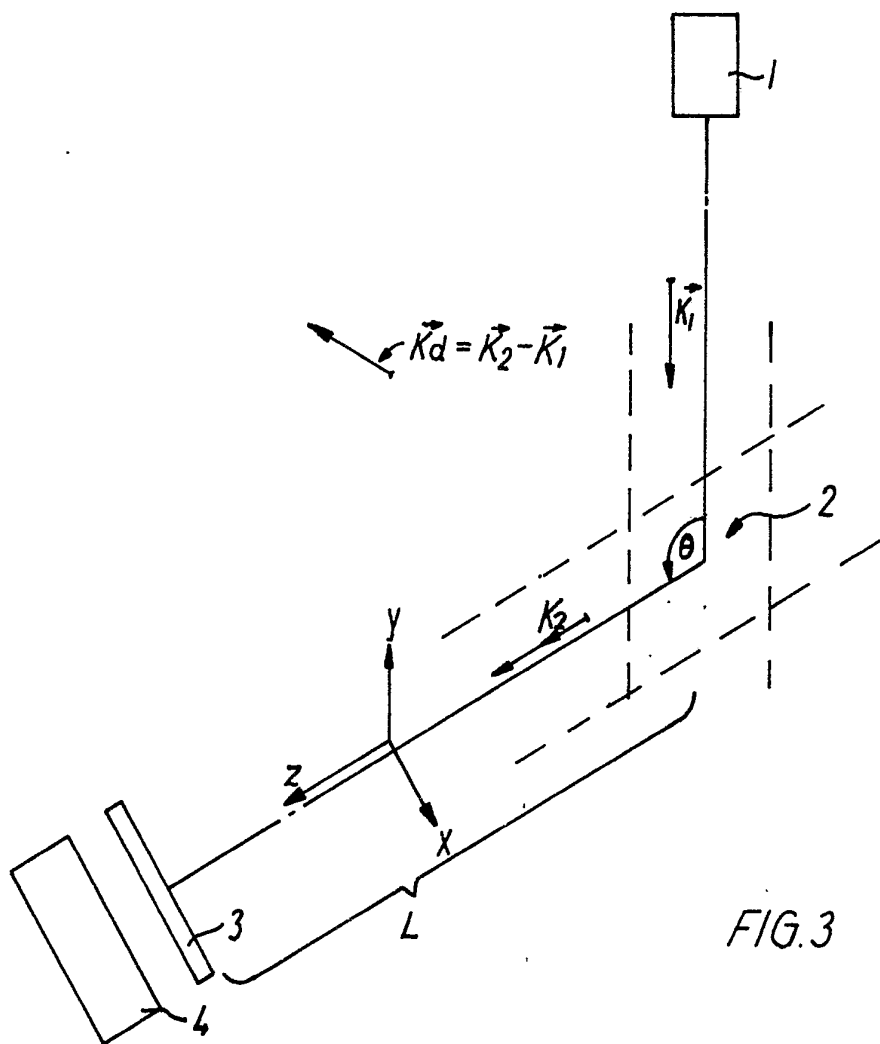
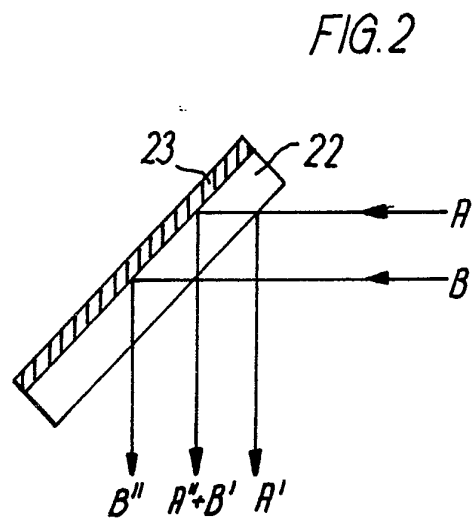
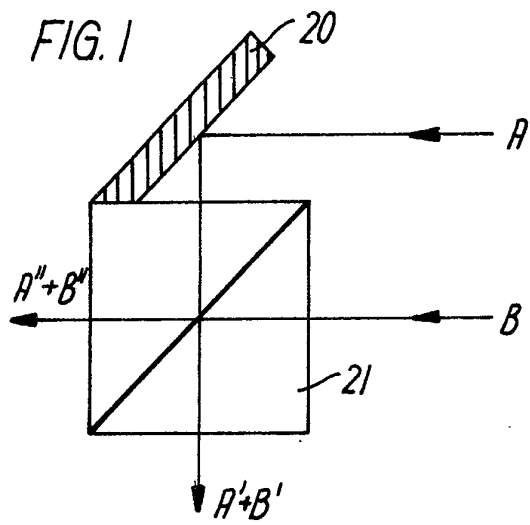
8. Apparat som angivet i et eller flere af kravene  
2-5, k e n d e t e g n e t ved, at det optiske element er en Bragg-celle.

30 9. Apparat som angivet i et eller flere af kravene  
2-5, k e n d e t e g n e t ved, at det optiske element består af en kombination af et spejl (20) og en beam-splitter (21) eller af en glasplade (22) med et reflekterende lag (23).

35

Fremdragne publikationer:

---



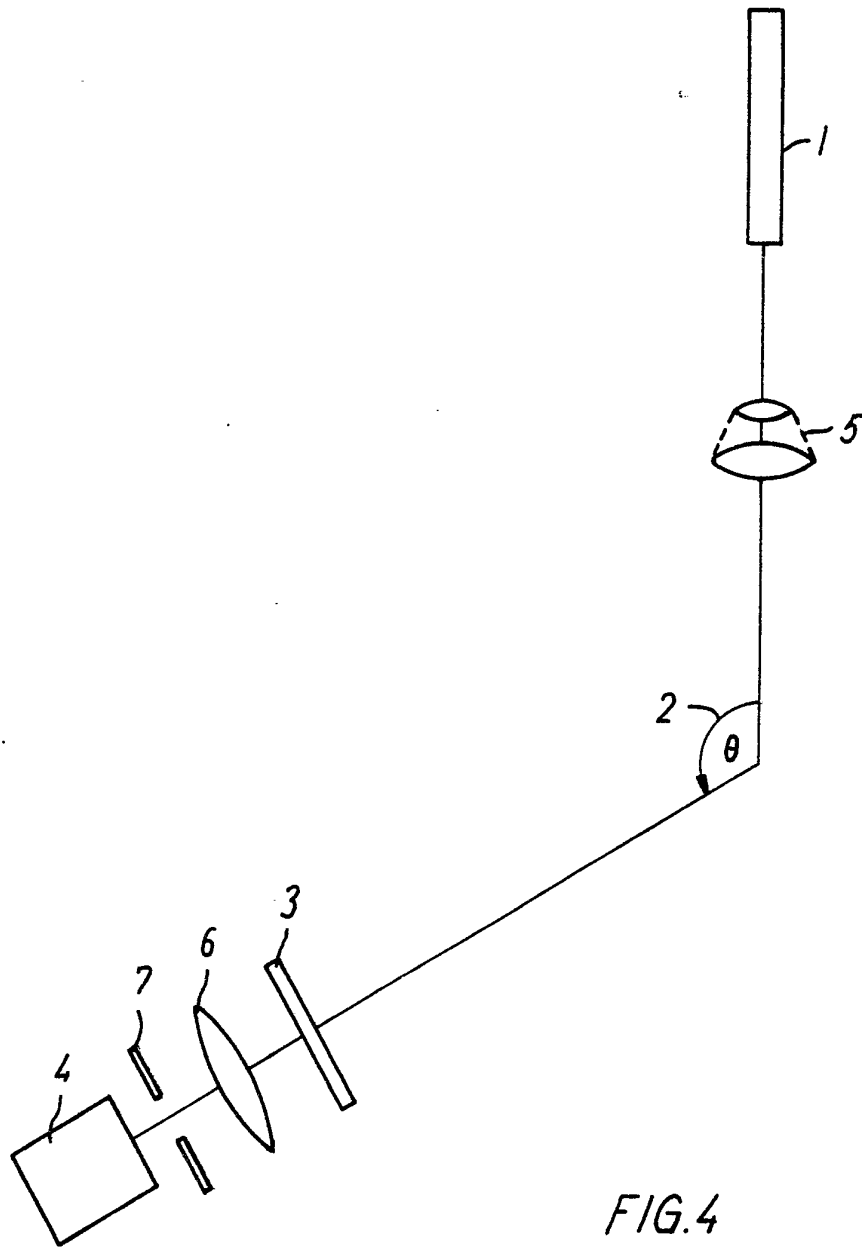


FIG.4

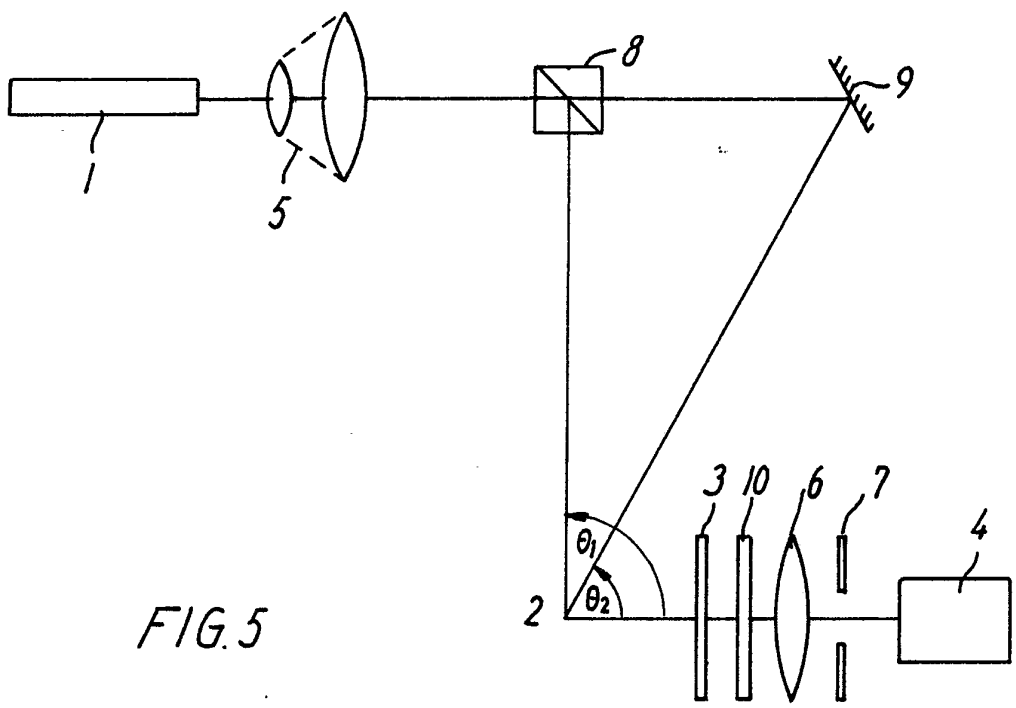


FIG. 5

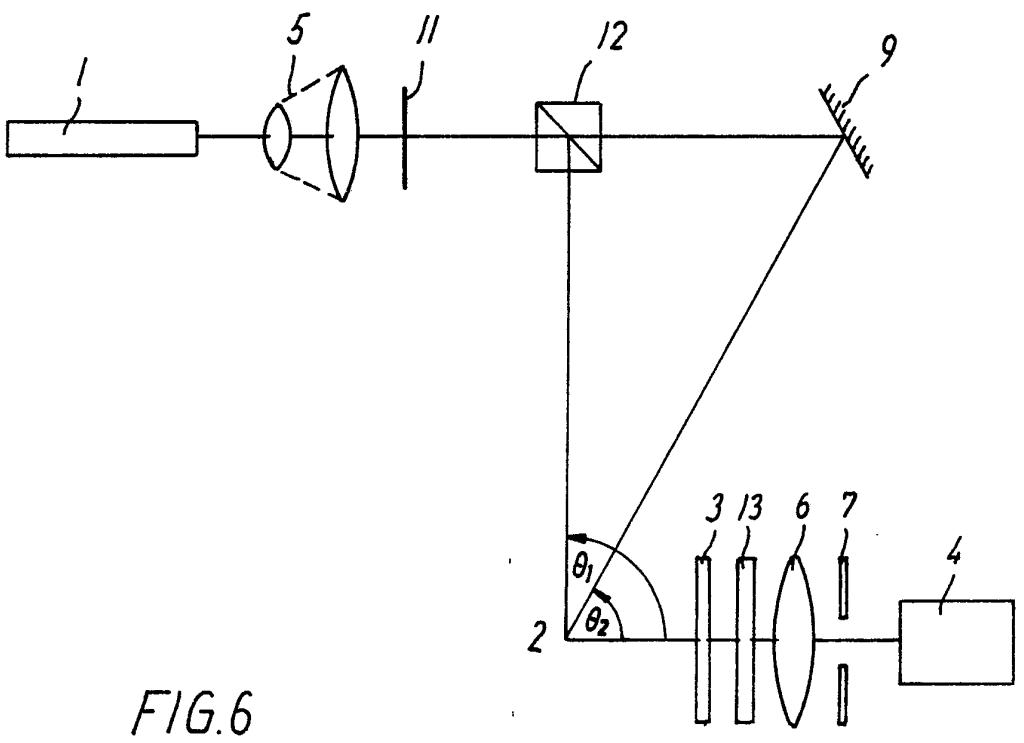


FIG. 6