

(19) DANMARK



PATENTDIREKTORATET
TAASTRUP

(12) FREMLÆGGELSESSKRIFT

(11) 159946 B

(21) Patentansøgning nr.: 5158/82

(51) Int.Cl.⁵ G 01 P 5/20

(22) Indleveringsdag: 19 nov 1982

(41) Alm. tilgængelig: 21 maj 1983

(44) Fremlagt: 31 dec 1990

(86) International ansøgning nr.: -

(30) Prioritet: 20 nov 1981 DE 3145987

(71) Ansøger: *Deutsche Forschungsanstalt fuer Luft- und Raumfahrt e.V.; Linder Hoehe; D-W-5000 Koeln 90, DE

(72) Opfinder: Richard *Schodl; DE

(74) Fuldmægtig: Hofman-Bang & Boutard A/S

(54) Fremgangsmåde og apparat til måling af strømningsvektorer i gasstrømme

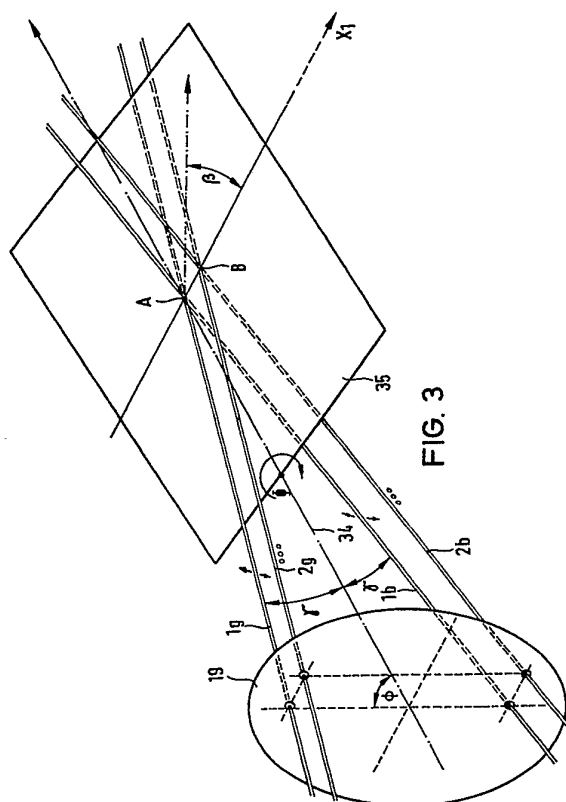
5158-82

(56) Fremdragne publikationer

(57) Sammendrag:

5158-82

Til bestemmelse af størrelsesretningen for en vilkårlig tredimensional strømningsvektor ($\vec{c}$) dannes der i måle- rumfanget to fokuseringssteder (A, B), hvori passerende partikler frembringer impulser, hvis afstand i tid af- hænger af partikelhastigheden. Til konstatering af en vil- kårlig tredimensional vektor ($\vec{c}$) drejes begge strålepar (1b, 2b; 1g, 2g) omkring systemets optiske akse (34) så- ledes, at vektoren ($\vec{c}$) under en hel omdrejning én gang ligger i planet for det første strålepar (1b, 2b) og én gang ligger i planet for det andet strålepar (1g, 2g). Ud fra de vinkler (θ), for hvilke der registreres måle- resultater, bestemmes vinkelen (θ) for det vektorplan (35), i hvilket vektoren ($\vec{c}$) ligger, og vinkelen (β) af vektoren ($\vec{c}$) inden for vektorplanet (35). Desuden be- stemmes størrelsen af vektoren ($\vec{c}$) på grundlag af måle- resultaterne.



DK 159946 B

Opfindelsen omhandler en fremgangsmåde til måling af strømningsvektorer i gasstrømme og af den i krav 1's indledning angivne art.

5 Fra tysk fremlæggelsesskrift nr. 24 49 358 er det kendt at anbringe to fokuseringssteder lige bag hinanden i en strømningskanal og afbilde de gennem fokuseringsstederne efter hinanden passerende partikler på en fotoelektrisk omsætter. En partikel, der passerer det første fokuseringssted, frembringer en startimpuls og efter passagen
10 gennem det andet fokuseringssted en stopimpuls. Ud fra tidsrummet imellem disse to impulser kan da partikelhastigheden udregnes, og strømningsretningen er simpelt hen retningen af forbindelseslinien imellem de to fokuseringssteder. Denne retning kan forandres, så at der
15 kan opfanges strømningsvektorer med forskellige retninger.

For den kendte fremgangsmåde gælder, at man kun måler de komponenter af strømningsvektorerne, som ligger i planet vinkelret på systemets optiske akse. Dette plan skal be-
20 stemmes gennem en målingsrække. De i akseretningen forløbende komponenter kan ikke bestemmes. Det drejer sig således kun om en tokomponent-hastighedsmålemetode.

Opfindelsen har til formål at videreføre den kendte fremgangsmåde således, at man også kan bestemme de i akseret-
25 ningen forløbende komponenter af strømningsvektorerne, så at disse fuldstændigt kan bestemmes efter amplitude og retning, uden at en sådan trekomponent-målemetode for målingerne kræver væsentligt mere tid end den kendte tokomponent-metode.

30 Dette opnås ifølge opfindelsen ved en fremgangsmåde af den i krav 1's kendetegnende del angivne art.

I modsætning til den kendte fremgangsmåde, hvor strålerne forløber i retning af systemets optiske akse, danner de to strålepar ifølge opfindelsen en vinkel i forhold til den optiske akse, og de fokuseres på to steder, som af-
5 grænser målerumfanget. Fokuseringsstederne bliver herved ikke punktformede, men cylinderformede.

En særlig fordel ved fremgangsmåden ifølge opfindelsen er, at strømningsvektoren i området for målerumfanget kan bestemmes med to søgemålinger, der gennemføres i et
10 enkelt søgeforløb af stråleparret. Dette sker ved, at stråleparret svinges eller drejes omkring den optiske akse, indtil omsætteren for det ene strålepar signaliserer en gennemgang af partikler. Derefter drejes stråleparret videre, indtil omsætteren for det andet strålepar
15 registrerer en gennemgang af partikler. Ud fra de to svingningsvinkler kan man dels bestemme det vektorplan, som er fælles for den optiske akse og den søgte vektor, og dels vinkelen imellem den søgte vektor og den optiske akse i det nævnte plan. Vektorens amplitude kan da be-
20 stemmes ud fra den nævnte vinkel og de målte gennemgangshyppigheder. Til en nøjagtig bestemmelse af de tre komponenter for en vilkårlig rumlig vektor kræves der altså kun to søgemålinger, hvis resultater opnås under et enkelt søgeforløb.

25 Opfindelsen omhandler også et apparat til udøvelse af fremgangsmåden, hvilket apparat er ejendommeligt ved den i krav 6's kendetegnende del angivne udformning. Ved drejningen af stråleparret opnås, at under en hel om-
drejning vil planet for hvert strålepar én gang falde
30 sammen med den søgte vektor. Derved bestemmes vektorplanet og samtidigt også vektorens vinkel i vektorplanet.

Opfindelsen forklares nærmere nedenfor i forbindelse med tegningen, hvor

fig. 1 er en skematisk afbildning af stråleforløbet for et måleapparat ifølge opfindelsen,

fig. 2 en delafbildning set i pilretningen II på fig. 1,

5 fig. 3 er en perspektivisk fremstilling af stråleforløbet i målerumfanget,

fig. 4 er en forstørret afbildning af målerumfanget, og

fig. 5 er en graf af målevinkelen 2ϕ som funktion af vektorens vinkel β inden for vektorplanet.

10 Som vist på fig. 1 udsender en argon-ion-laser 10 et strålebundt, som udvides i en ikke vist optik og ledes over en linse 11 til en dikroitisk stråledeler 12. Stråledeleren 12 opspalter den af flere farver bestående laserstråle i to parallelle stråler b og g, af hvilke
15 strålen g består af grønt lys og strålen b af blåt lys. For at udelukke forstyrrende stråling som følge af de andre laserlinier og ufuldstændig farveadskillelse er der i strålegangen for strålen g indskudt et laserliniefilter 13 og i strålegangen for strålen b indskudt et
20 laserliniefilter 14. Filtrene 13 og 14 lader kun lys af den pågældende farve passere.

Det således lineært polariserede laserlys omdannes herefter gennem $\lambda/4$ -plader henholdsvis 15 og 15' til cirkulært polariseret lys. Herved tilvejebringes der en
25 ydelses-ens opdeling af strålerne igennem en polarisationsstråledeler 17. Imellem pladerne 15, 15' og stråledeleren 17 er der anbragt et skråtliggende uddrejningsspejl 16 med to borer til gennemgang af strålerne g og b, igennem hvilke borer de forskelligt farvede stråler b og g når frem til polarisationsstråledeleren 17, der
30

opdeler de to stråler b og g i to på hinanden vinkelret stående polariserede stråler henholdsvis lg, 2g og lb, 2b, som vist på fig. 2, hvor polarisationsretningen vinkelret på tegneplanet er angivet ved tre små cirkler og polarisationsretningen i tegneplanet er angivet ved en dobbeltpil. Det vinkelret på tegneplanet svingende lys går uhindret igennem polarisations-stråledeleren 17, mens den i tegneplanet svingende andel ifølge fig. 2 bøjes opad fra tegneplanet.

De således dannede fire laserstråler lg, 2g og lb, 2b med hver sine egenskaber passerer over et billeddrejeprisme 18, eksempelvis et Pechan-prisme, til en linse 19, der fokuserer dem på målerumfanget. Målerumfanget befinder sig i det indre af en strømningskanal 20, som i den ene sidevæg har et vindue 21, igennem hvilket de fire stråler kan passere. De nedenfor beskrevne fokuseringssteder A og B kendetegner målerumfanget.

Med det grønne strålepar lg, 2g og det blå strålepar lb, 2b kan der uafhængigt af hinanden foretages en hastighedsmåling ifølge dobbeltfokus-fremgangsmåden. Den i strømningskanalen 20 værende gasstrøm indeholder små partikler, der belyses i fokuseringsstederne A, B og spreder det pårammende lys. Det fra partiklerne afbøjede lys sendes igennem linsen 19, billeddrejeprismet 18 og polarisations-stråledeleren 17 tilbage til uddrejningsspejlet 16. Her bliver det spredte lys fra de målerumfanget oplysende laserstråler adskilt og reflekteret til et dikroitisk spejl 22. Spejlet 22 lader det blå lys bs passere og reflekterer det grønne lys gs. Det blå lys bs ledes over et spejl 23 og en linse 24 til et mikroskopobjektiv 25, bag hvilket der er anbragt en blænde 26 til rumlig filtrering af det spredte lys. Det igennem blænden 26 passerende lys, der indeholder to forskellige polarisationsandele, ledes over et farvefilter 27, der

kun lader blå lys passere, til et Rochon-prisme 28, der opdeler de vinkelret på hinanden stående polariserede lysandele i to stråler 29 og 30. Strålen 29 føres til en fotoelektrisk omsætter 31 og strålen 30 til en fotoelektrisk omsætter 32. Omsætteren 32 frembringer en fotoelektrisk impuls, når der i fokuseringsstedet A (fig. 3) reflekteres spredt lys fra en partikel, og omsætteren 31 frembringer en impuls, når der i fokuseringsstedet B reflekteres lys fra en partikel. Signalerne fra omsætterne 31, 32 føres til en udlæsningskobling 33, der frembringer en impuls, hvis amplitude er proportional med tidsrummet imellem de to impulser fra omsætteren 32 og 31, når disse impulser følger efter hinanden inden for et foreskrevet tidsrum. Amplituden af udgangssignalet fra koblingen 33 er dermed omvendt proportional med partikelhastigheden imellem fokuseringsstederne A og B.

Komponenterne 24 - 33 til behandling af strålegangen for det blå lys gentages i lignende komponenter, angivet ved apostroftegn, til behandling af det grønne lys, hvor da farvefilteret 27' kun lader grønt lys passere, medens farvefilteret 27 kun lader blå lys passere.

Fig. 3 er en perspektivisk afbildning af strålegangen imellem linsen 19 og fokuseringsstederne A og B. De parallelle grønne stråler 1g, 2g passerer igennem det øverste område af linsen 19 og de parallelle blå stråler 1b, 2b igennem det nederste område af linsen. Gennemgangstederne for strålerne 1g og 1b ligger på en fælles diameter af linsen 19, medens gennemgangstederne for strålerne 2g og 2b forløber til siden med samme afstand imellem strålerne 1g og 1b. Den optiske akse 34 af systemet går igennem midtpunktet af linsen 19 og igennem fokuseringsstedet A for strålerne 1g og 1b, hvilke stråler også ligger i et plan, der rummer akse 34. Disse stråler konvergerer under en vinkel γ med den

optiske akse og skærer hinanden i fokuseringsstedet A.

Strålerne 2g og 2b danner ligeledes en vinkel γ med en parallel til den optiske akse 34, og de skærer hinanden i fokuseringsstedet B, der ligger i afstand fra fokuseringsstedet A langs en X_1 -akse, der står vinkelret på den optiske akse 34 og tilsammen med denne bestemmer det såkaldte vektorplan 35. I det følgende antages, at den fra fokuseringsstedet A udgående vektor $\vec{c}$ forløber i vektorplanet 35 og danner en vinkel β med X_1 -aksen. Det er denne vektor $\vec{c}$, hvis amplitude og retning skal måles.

Virkemåden fremgår ved betragtning af fokuseringsstederne A og B på fig. 4. En partikel, der passerer fokuseringsstedet A i pilretningen 36, bliver ved det påfølgende fokuseringssted B ikke kun registreret, når den bevæger sig nøjagtigt langs X_1 -aksen, men allerede, hvis den overhovedet har en komponent i retning af X_1 -aksen. Som nævnt er fokuseringsstederne A og B ikke punktformede, men linieformede eller cylindriske. Den partikel, der bevæger sig langs pilen 36, frembringer altså også ved fokuseringsstedet B et lyssignal, hvis afstand i tid fra det lyssignal, der er frembragt ved fokuseringsstedet A, er proportional med bevægelseskomponenten i retning af X_1 -aksen. Forudsætningen er blot, at den partikel, der har passeret igennem lysstrålen 1g, ligeledes passerer igennem lysstrålen 2g. Dvs., at partiklen for at afgive et måleresultat må bevæge sig i planet for strålerne 1g og 2g.

En vilkårlig rumlig vektor $\vec{c}$ i målerumfanget kan da opfanges af stråleparrene 1g, 2g og 1b, 2b, når planet for det pågældende strålepar lægges således, at vektoren $\vec{c}$ befinder sig i planet. Dette opnås ved, at billeddrejeprismet 18 drejes omkring den optiske akse 34. Herved

drejer hele det på fig. 3 viste strålesystem sig omkring den optiske akse 34. Drejningsvinkelen er betegnet med $\emptyset$. Ved drejningen af drejeprismet 18 vandrer gennemgangspunkterne for stråleparret ved randen af linsen 19 langs en
 5 cirkelbane. Derved forbliver fokuseringsstedet A stationært.

Når stråleparret på fig. 3 drejes i urviserretningen, ændres den snitlinie, hvor planet for stråleparret 1g, 2g skærer vektorplanet 35. På lignende måde forandres den
 10 snitlinie, i hvilken planet for stråleparret 1b, 2b skærer vektorplanet 35. De to snitlinier, der ligesom før går igennem fokuseringsstedet A, drejer sig og vandrer i modsatte retninger. Derved indtræffer først den tilstand, hvor planet for strålerne 1b, 2b har en sådan ret-
 15 ning, at vektoren $\vec{c}$ forløber i dette plan. Når dette er tilfældet, melder der sig et gennemgangssignal ved udlæsningskoblingen 33 for det blå system. Når billeddrejeprismet 18 drejes videre, indtræffer på et eller andet tidspunkt en tilstand, i hvilken vektoren $\vec{c}$ lig-
 20 ger i planet for strålerne 1g, 2g. Når dette er tilfældet, anmeldes der et gennemgangssignal ved udlæsningskoblingen 33' for det grønne system. Ud fra de pågældende vinkler ϕ_g og ϕ_b , for hvilke der anmeldes en måleværdi i henholdsvis det grønne og det blå system, og ud fra
 25 størrelsen af de anmeldte måleværdier kan da hastighedsvektoren $\vec{c}$ bestemmes på følgende måde:

Det antages, at vektoren $\vec{c}$ indtager en vilkårlig stilling i punktet A. Ved drejningen af billedprisme 18 omkring den optiske akse 34 opnås der under en fuld om-
 30 drejning én gang en tilstand, i hvilken vektoren $\vec{c}$ ligger i planet for de grønne stråler 1g, 2g, og én gang en tilstand, i hvilken vektoren $\vec{c}$ ligger i planet for de blå stråler 1b, 2b. De to vinkler betegnes som nævnt henholdsvis ϕ_g og ϕ_b . Nulpunktet for vinkelmålingen er vilkårligt

markeret på billeddrejeprismet 18. De omtalte vinkler, hvor der optræder signaler ved udlæsningskoblingerne henholdsvis 33' og 33, aflæses, og ud fra disse vinkler bestemmes efter formlen

$$5 \quad \phi = \frac{\phi_g + \phi_b}{2}$$

den vinkel ϕ for referenceplanet 35, i hvilken den søgte vektor $\vec{c}$ ligger.

10 Ud fra denne måling finder man ikke blot vinkelen ϕ , men også vinkelen β , der indeslutter vektoren $\vec{c}$ i referenceplanet 35 sammen med X_1 -aksen. Denne vinkel beregnes til at være

$$\beta = \arctg \frac{\sin \frac{\phi_g - \phi_b}{2}}{\operatorname{tg} \gamma}.$$

Endvidere gælder

$$|\vec{c}| \cos \beta = \frac{c_g}{\cos \frac{\phi_g - \phi_b}{2}} = \frac{c_b}{\cos \frac{\phi_g - \phi_b}{2}},$$

15 hvor c_g og c_b er de ved udlæsningskoblingerne henholdsvis 33' og 33 aflæste måleværdier, der afhænger af størrelsen af vektoren $\vec{c}$. Disse måleværdier c_g og c_b er lige store.

20 Den aktuelle vinkel γ imellem stråleparrene 1g, 2g og 1b, 2b og den optiske akse 34 er begrænset i praksis. Med sfærisk optik kan der tilvejebringes en vinkel γ på ca.

6,5° med en acceptabel udgift. Fig. 5 viser vinkelen $\phi_b - \phi_g$ som funktion af vinkelen β for en vinkel γ på 6,5°. Det ses, at kurven forløber tilnærmelsesvis lineært, så at der også for små vinkler β opnås godt målelige vinkeldifferencer $\phi_g - \phi_b$.

Nøjagtigheden af vinkelmålingen ifølge dobbeltfokus-målemetoden afhænger i det væsentlige af antallet af målere-sultaterne og af strømmens turbulensgrad. For små turbulenser (< 5%) andrager måleusikkerheden 0,1°-0,2° og ved store turbulenser (> 10%) 0,3°-0,5°. Dette giver for usikkerheden ved bestemmelsen af vinkelen b for små turbulenser 0,4°-0,7° og for store turbulenser 1°-2°. For de kendte optiske fremgangsmåder er under de samme forudsætninger (dvs. kompakt måleapparat, fælles objektiv, baglæns spredning) de optrædende måleusikkerheder mange gange større.

Fremgangsmåden ifølge opfindelsen har mange anvendelsesområder ved strømningsundersøgelser. Eksempelvis er der nu for første gang mulighed for at måle de i turbomaskiner ikke hidtil opfangelige radialkomponenter for strømningshastighederne i løbehjulene.

P a t e n t k r a v :

1. Fremgangsmåde til måling af strømningsvektorer i gasstrømme ved bestemmelse af hastigheden og retningen af i en strøm indeholdte optisk konstaterbare partikler, hvor de parallelle stråler af et første strålepar (1b, 2b)
 - 5 fokuseres på to tæt ved hinanden liggende første fokuseringssteder (A, B) og fokuseringsstederne afbildes på to første fotoelektriske omsættere (31, 32), k e n d e t e g n e t ved, at
 - a) et andet strålepar (1g, 2g) af ligeledes indbyrdes parallelt forløbende stråler under en vis vinkel (2γ)
 - 10 med det første strålepar (1b, 2b) rettes mod fokuseringsstederne (A, B) og fokuseres dér,
 - b) fokuseringsstederne (A, B) for det andet strålepar (1g, 2g) afbildes på to andre fotoelektriske omsættere (31', 32'),
 - 15 re (31', 32'),
 - c) de to strålepar (1b, 2b; 1g, 2g) i fællesskab svinges omkring en optisk akse (34), der går igennem det ene af de to fokuseringssteder (A) og forløber i planet for de tilhørende stråler (1g, 1b) af det andet strålepar,
 - 20 par,
 - d) der foretages en måling af de svingningsvinkler (ϕ_b, ϕ_g), for hvilke der for hver strålepar fremkommer signaler ved omsætterne (31, 32; 31', 32'), hvilke signaler angiver en gennemgang af partikler igennem de
 - 25 to fokuseringssteder (A, B) for disse strålepar, og
 - e) der ud fra de målte svingningsvinkler (ϕ_b, ϕ_g) for de to strålepar og den målte hyppighedsværdi bestemmes partikelhastighedens vektor ($\vec{c}$) såvel retningsmæssigt som amplitudemæssigt.

2. Fremgangsmåde ifølge krav 1, k e n d e t e g n e t ved, at de med den optiske akse (34) i et plan liggende stråler (1g, 1b) forløber med den samme vinkel (χ) forhold til den optiske akse.

- 5 3. Fremgangsmåde ifølge krav 2, k e n d e t e g n e t ved, at det plan (vektorplanet 35), i hvilket den optiske akse (34) og den søgte vektor ($\vec{c}$) ligger, bestemmes ved formlen

$$\phi = \frac{\phi_g + \phi_b}{2} ,$$

- 10 hvor ϕ er svingningsvinkelen for vektorplanet (35) omkring den optiske akse (34), ϕ_b er den svingningsvinkel, for hvilken der fremkommer gennemgangssignaler ved omsætterne (31, 32) for det første strålepar, og ϕ_g er den svingningsvinkel, ved hvilken der fremkommer gennemgangssignaler
15 ved omsætterne (31', 32') for det andet strålepar.

4. Fremgangsmåde ifølge krav 3, k e n d e t e g n e t ved, at vinkelen β for den søgte vektor ($\vec{c}$) inden for vektorplanet bestemmes ved formlen

$$\beta = \arctg \frac{\sin \frac{\phi_g - \phi_b}{2}}{\tg \chi} ,$$

- 20 hvor χ udgør størrelsen af den halve vinkel imellem stråleparrene (1b, 2b; 1g, 2g).

5. Fremgangsmåde ifølge krav 4, k e n d e t e g n e t ved, at amplituden af vektoren ($\vec{c}$) bestemmes ved formlen

$$|\vec{c}| = \frac{(c_b \text{ eller } c_g)}{\cos \frac{\phi_g - \phi_b}{2} \cos \beta},$$

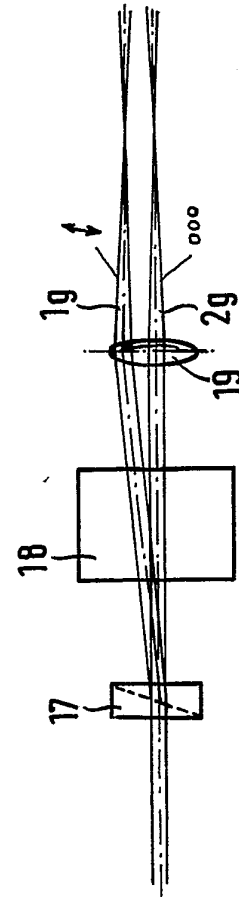
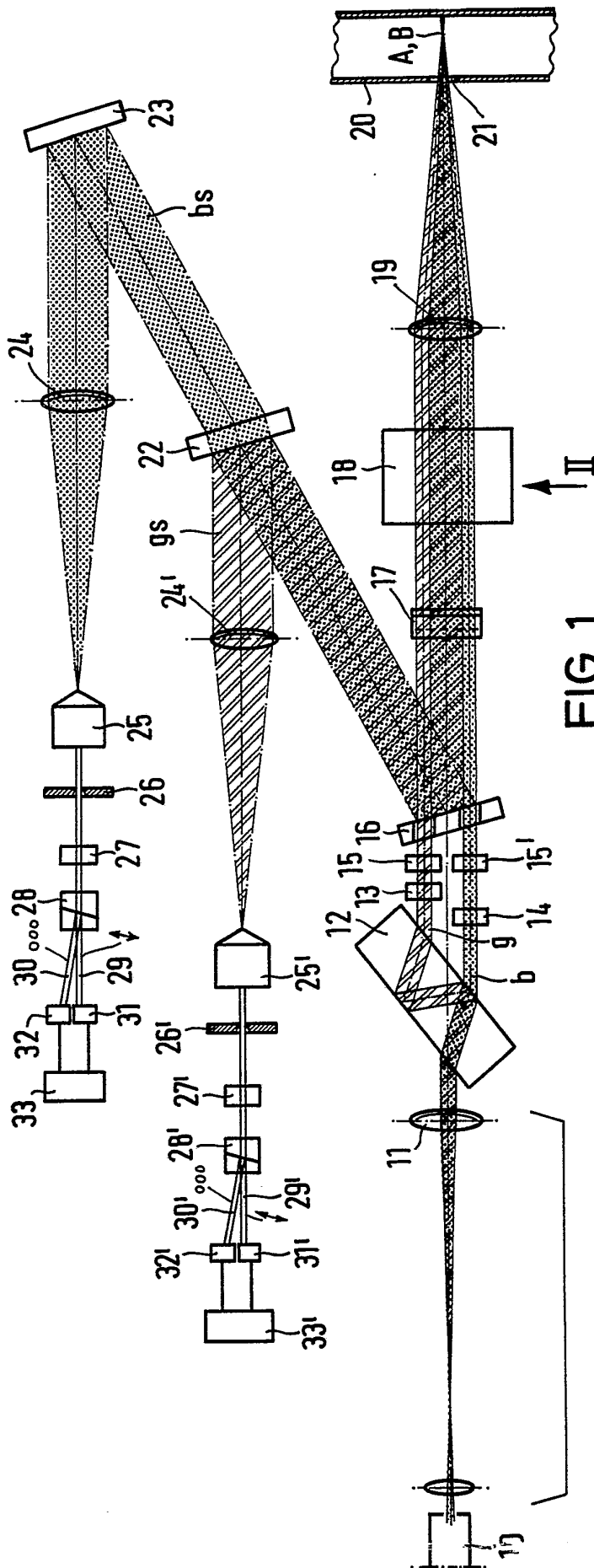
hvor c_b og c_g er de amplitudemæssigt lige store størrelser for de ved omsætterne henholdsvis (31, 32) og (31', 32') for henholdsvis det første og det andet strålepar
 5 ved svingningsvinklerne henholdsvis ϕ_b og ϕ_g målte hastigheder.

6. Apparat til måling af strømningsvektorer i gasstrømme til udøvelse af fremgangsmåden ifølge krav 1-5, k e n d e t e g n e t ved, at det omfatter to strålefrembringelsessystemer (12, 13, 15, 17, 19; 12, 14, 15', 17, 19),
 10 som hver især frembringer et strålepar (1g, 2g; 1b, 2b) af parallelle stråler, at det plan, i hvilket strålerne fra et strålepar (1g, 2g) ligger, forløber i en spids vinkel (2γ) imod det plan, i hvilket strålerne i det
 15 andet strålepar (1b, 2b) ligger, samt at der findes en indretning (18) til samtidig drejning af stråleparrene (1g, 2g, 1b, 2b) omkring en fælles akse (34).

7. Apparat ifølge krav 6, k e n d e t e g n e t ved, at den flerfarvede stråle fra en laser (10) i en dikroitiske stråledeler (12) opdeles i to stråler (g, b) med
 20 forskellige farver, at disse to stråler tilføres en polarisations-stråledeler (17), som opdeler hver stråle (g, b) i to parallelle, forskelligt polariserede stråler (1g, 2g; 1b, 2b), at de fire stråler i afstande fra den
 25 optiske akse (34) ved hjælp af et billeddrejoprisme (18) og en samleoptik (19) parvis rettes mod de to fokuseringssteder (A, B), og at et mod fokuseringsstederne (A, B) rettet linsesystem har en stråleparrene (29, 30; 29', 30') fra hinanden skillende og imod forskellige udlæsnings-
 30 indretninger (31, 32, 33; 31', 32', 33') ledende indret-

ning (22, 23; 24-28; 24'-28').

8. Apparat ifølge krav 6 eller 7, k e n d e t e g n e t
ved, at to stråler (lg, lb), der tilhører hvert sit strå-
lepar, i billeddrejeprismet (18) skærer en fælles diame-
5 ter i dette.



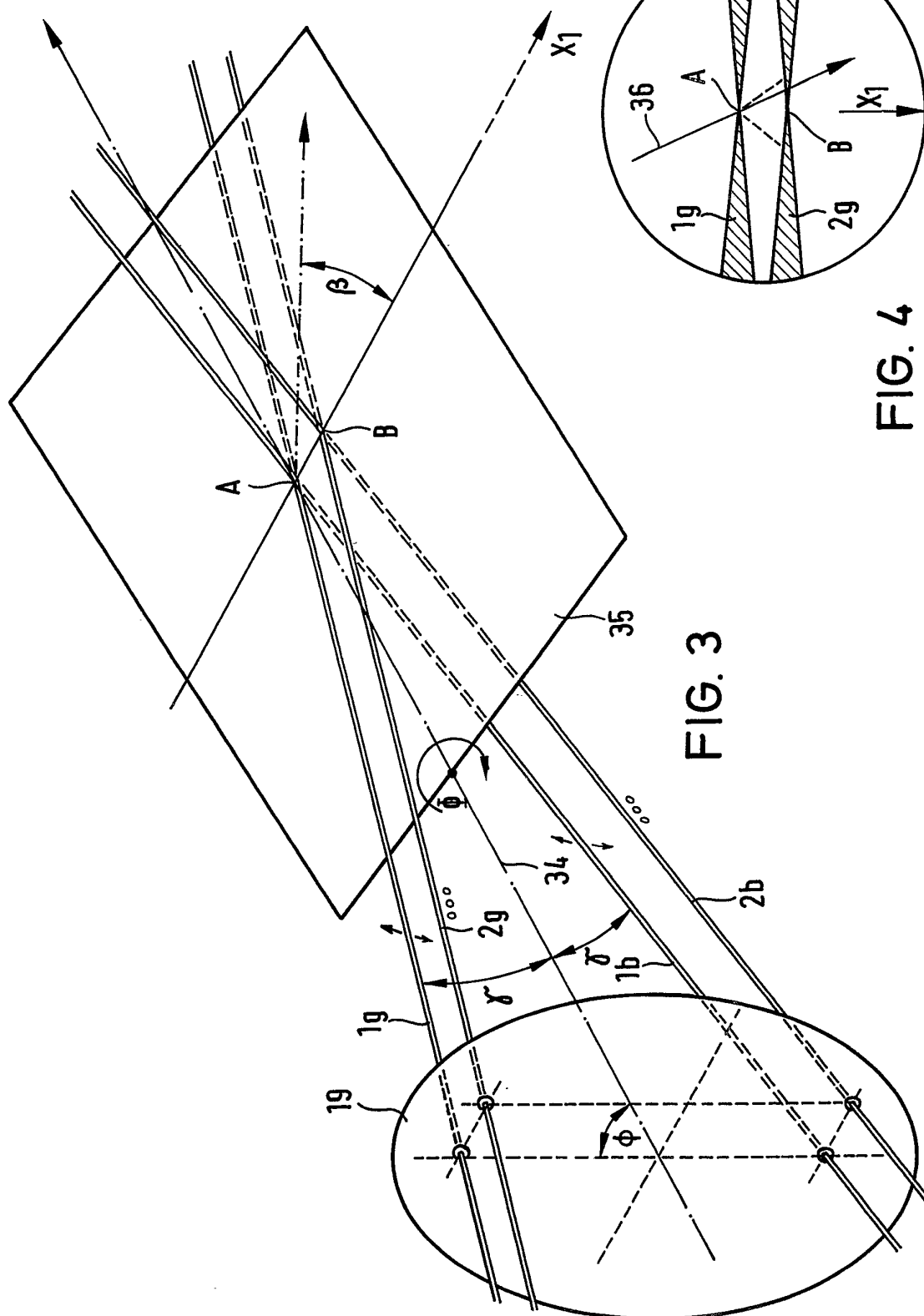


FIG. 3

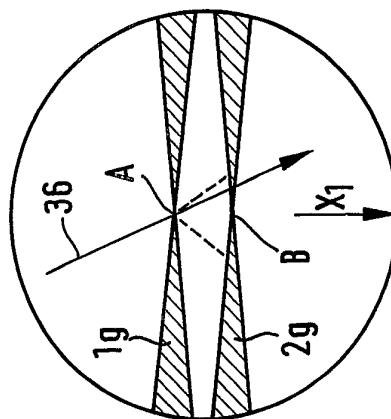


FIG. 4

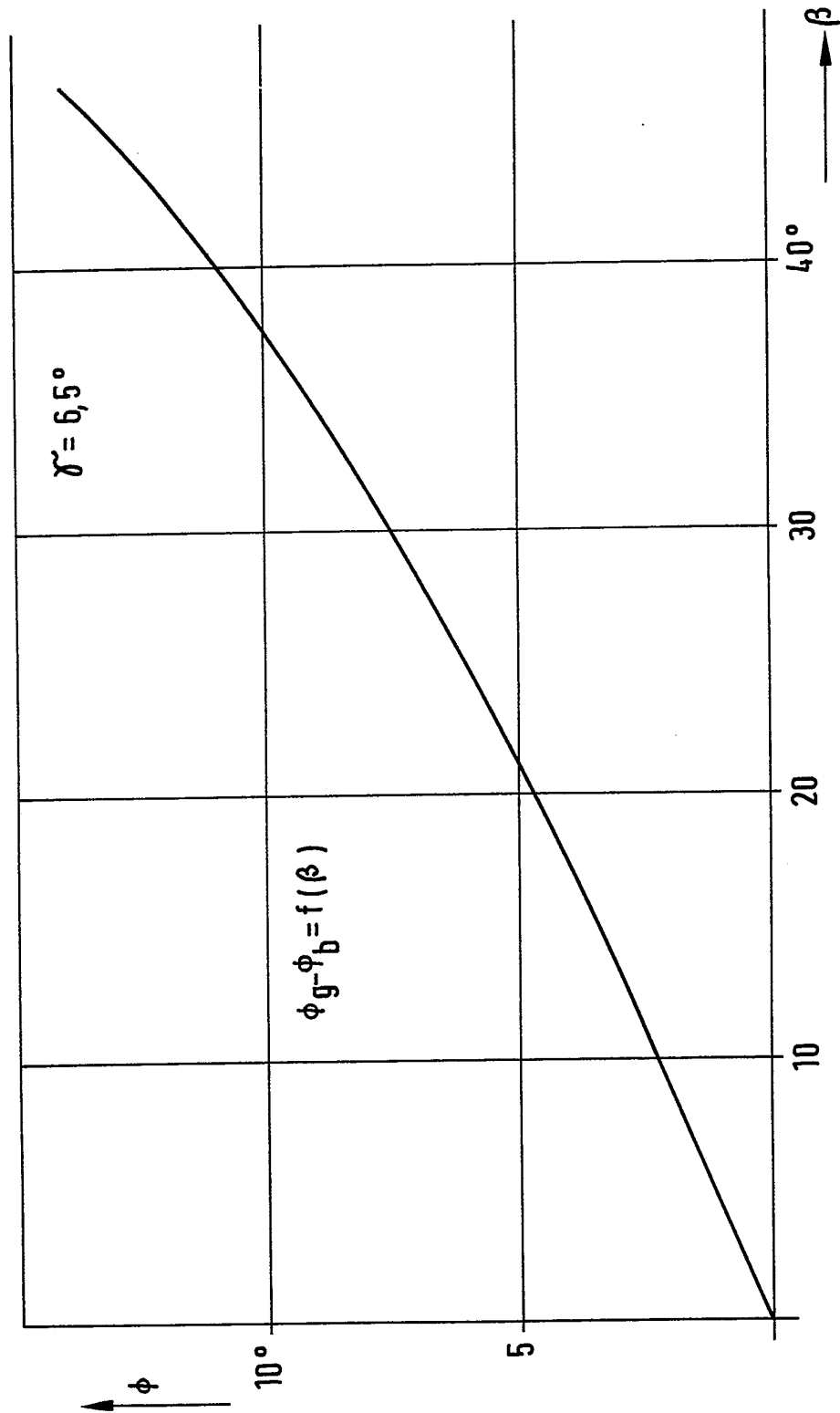


FIG. 5