



Patentdirektoratet
TAASTRUP

(21) Patentansøgning nr.: 0077/85

(22) Indleveringsdag: 07 jan 1985

(24) Løbedag: 18 maj 1983

(41) Alm. tilgængelig: 07 jan 1985

(44) Fremlagt: 30 dec 1991

(86) International ansøgning nr.: PCT/DK83/00054

(86) International indleveringsdag: 18 maj 1983

(85) Videreførelsesdag: 07 jan 1985

(30) Prioritet: -

(51) Int.Cl.5

G 01 N 15/02

G 01 N 15/14

G 01 N 21/53

(71) Ansøger: *DANTEC ELEKTRONIK, MEDICINSK OG VIDENSKABELIGT MÅLEUDSTYR A/S; Tonsbakken 16-18; 2740 Skovlunde, DK

(72) Opfinder: Preben *Buchhave; DK, John *Knuhtsen; DK, Peder Emil Schack *Olldag; DK

(74) Fuldmægtig: Internationalt Patent-Bureau

(54) Laser-Doppler-apparat til bestemmelse af størrelsen af bevægede sfæriske partikler i en fluidumstrøm

77-85

(56) Fremdragne publikationer

(57) Sammendrag

77-85

I et laser-doppler-apparat bestemmes størrelsen af bevægede sfæriske partikler i en fluidumstrøm ved, at to rumligt adskilte laserstråler (15, 16) bringes til at krydse hinanden under en given vinkel (θ) i et af en del af fluidumstrømmen passeret målevolumen.

Ved hjælp af to fotoelektriske måledetektorer (17, 18) anbragt i forskellige rumlige positioner uden for målevolumenet detekteres spredningsstråler fra en bevæget partikel i form af dopplersignaler med forskellig fase.

Partikelstørrelsen bestemmes ved frembringelse af et resulterende faseforskelssignal (ϕ_M) ud fra signaler fra de to måledetektorer (17, 18).

Ved kombination af signalet fra den ene måledetektor (17) med signalet fra en referencedetektor (19) beliggende mellem de to måledetektorer frembringes et fase-referencesignal (ϕ_R) til indikering af, om det resulterende faseforskelssignal (ϕ_M) hidrører fra en faseforskel mellem dopplersignalerne, som overstiger 2π .

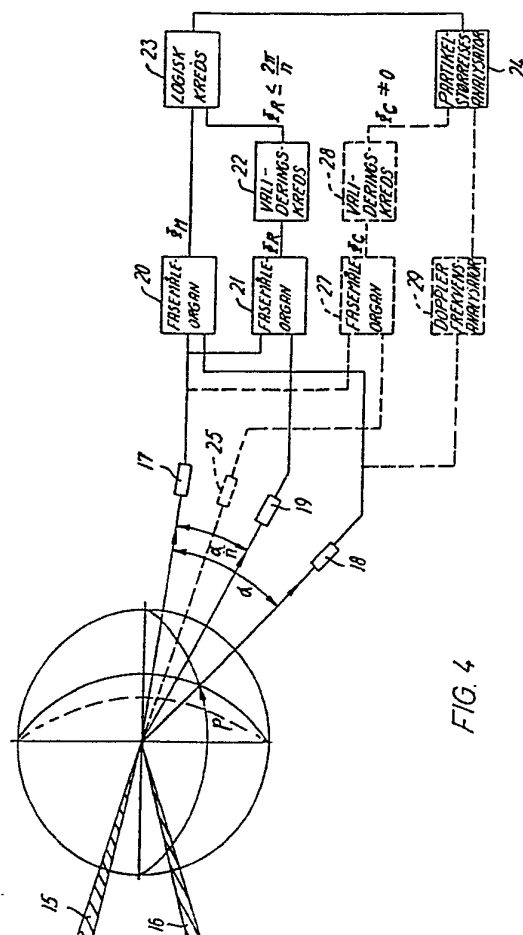


FIG. 4

Opfindelsen angår et laser-Doppler-apparat til bestemmelse af størrelsen af bevægede sfæriske partikler i en fluidumstrøm, omfattende en laserstråle-generator til frembringelse af to rumligt adskilte
5 laserstråler, fokuseringsmidler til fokusering af laserstrålerne således, at de fokuserede stråler i et fokuseringsplan krydser hinanden under en given vinkel i et krydsningspunkt i et af en del af fluidumstrømmen passeret målevolumen, fotoelektriske detektor-
10 organer til detektering af de af en bevæget partikel i fluidumstrømmen frembragte spredningsstråler i forskellige rumlige positioner uden for målevolumenet og frembringelse af elektriske signaler i afhængighed heraf, og signalbehandlingsmidler til bestemmelse af partikel-
15 størrelsen ud fra nævnte elektriske signaler.

Ved optiske målemetoder til bestemmelse af størrelsen af bevægede partikler i en fluidumstrøm, f.eks. under udnyttelse af laserstråling, kan målingen foregå uden fysisk indgreb i målemediet i et lille område af rummet,
20 målevolumenet, som passerer af fluidumstrømmen eller en del af denne, og som er afgrænset dels ved krydsning mellem to indfaldende laserstråler, dels ved beliggenhed inden for synsfeltet af en optisk detektor. Målingen kan desuden foretages i sand tid med høj dataopsamlings-
25 hastighed, ligesom der er mulighed for gennem én måling at få samtidig information om størrelse og hastighed af bevægede smådele i fluidumstrømmen.

Sådanne smådele kan have form af faste partikler, dråber i luftarter eller gasbobler i væsker, og alle
30 tre former anses i det følgende for omfattet af betegnelsen "partikler".

De hidtil anvendte metoder til optisk bestemmelse af partikelstørrelse har overvejende været baseret på måling af intensiteten af spredningsstrålingen fra en
35 gennem målevolumenet passerende partikel. Sprednings-

funktionen for spredningsstrålingen fra små partikler er imidlertid en kompliceret funktion af retningen af spredningsstrålingen i forhold til retningen af den indfaldende stråling, strålingens polarisationsretning og partiklens størrelse, form og materiale.

For at reducere denne kompleksitet har det bl.a. været foreslået at måle spredningsstrålingens intensitet samtidigt i to eller flere retninger eller at måle den samlede intensitet indenfor en rumvinkel i retning vinkelret på det indfaldende lys.

Til optisk partikelstørrelsesmåling kendes endvidere målemetoder, der er baseret på detektering af forskellige egenskaber ved såkaldte laser-Doppler-signaler. Til måling af hastigheden af partikler i et strømmende medium er det således velkendt at måle dopplerskiftet af frekvensen af laserstråling, som spredes fra den bevægede partikel. Dette princip for måling af strømningshastighed er generelt baseret på måling af differensen mellem doppler-forskydningerne af spredningsstråling fra to forskellige laserstråler, som krydser hinanden under en given vinkel i målevolumenet, idet de to spredningsstrålebundter bringes til samtidigt og overlappende at falde på overfladen af en fotodetektor. Herved dannes differensfrekvensen mellem de to dopplerforskydte strålingsfrekvenser, og denne differensfrekvens er direkte proportional med partiklens hastighedskomponent vinkelret på vinkelhalveringslinien mellem de to indfaldende stråler i de indfaldende strålers plan.

Udover den til frekvensen knyttede information om hastigheden af en bevæget partikel indeholder et dopplersignal også information om andre egenskaber ved partiklen, f.eks. dennes størrelse, og der har derfor også været foreslået forskellige metoder til uddragning af information om bevægede partiklers størrelse fra dopplersignaler. En forholdsvis enkel kendt metode er således baseret på måling af amplituden af et lavpasfiltreret dopplersignal.

Fra en artikel af W.M. Farmer "Measurement of Particle Size, Number Density and Velocity Using a Laser Interferometer" i Applied Optics, vol. 11, november 1972, side 2603-2612, kendes den såkaldte visibilitetsmetode, som
5 beror på udnyttelse af den kendsgerning, at modulationsdybden af det målte dopplersignal vil være afhængig af den bevægede partikels størrelse i forhold til afstanden mellem de parallelle interferensplaner i krydsningsområdet mellem de indfaldende stråler. Ved denne metode be-
10 stemmes den såkaldte visibilitetsfaktor som forholdet mellem en højpasfiltreret og en lavpasfiltreret del af dopplersignalet. I sin oprindelige udformning som beskrevet i ovennævnte artikel var denne målemetode imidlertid begrænset til stråling spredt overvejende ved
15 diffraktion i vinkelhalveringsplanet mellem de to indfaldende stråler.

En senere udvidelse af dette teoretiske grundlag har ført til et fra US-patentskrift nr. 4.329.054 kendt apparat til måling af spredningsstrålingen fra sfæriske
20 dråber i luft i retninger, som danner en vinkel med vinkelhalveringsplanet, hvor spredningsstrålingen overvejende skyldes refraktion i en dråbe eller refleksion fra dennes overflade.

Ved en viderebearbejdning af dette teoretiske grundlag er der i et publiceret foredrag af F. Durst og M. Zaré
25 "Laser Doppler Measurements in Two-Phase Flows", Proceedings of the LDA-Symposium, Copenhagen 1975, side 403-429, gjort rede for, at dopplersignalet fra en dråbe i en luftstrøm vil indeholde et faseled, som afhænger af dråbens radius samt af retningen til detektoren og dennes
30 apertur.

I et senere teoretisk og eksperimentelt arbejde af Franz Durst "Review - Combined Measurements of Particle Velocities, Size Distributions, and Concentrations" i
35 Transactions of the ASME, vol. 104, september 1982, side 284-296, er beskrevet egenskaberne af laserstråling, som spredes fra store bobler i vand eller store reflek-

terende legemer i luft. Det er her påvist, at der ved bestråling af et sådant legeme med de to laserstråler, som indgår i et sædvanligt laser-Doppler-anemometer, i området omkring legemet dannes interferensstriber, som
5 skyldes faseforskelle mellem spredningsstrålingerne fra de to indfaldende stråler mod et fælles observationspunkt. Det er herved demonstreret, at faseforskellen mellem strålinger, som spredes i fremad- eller bagudretningen i forhold til vinkelhalveringslinien mellem
10 de to indfaldende stråler, vil indeholde information om det spredende sfæriske legemes radius. De her fundne resultater gælder imidlertid kun for forholdsvis store legemer og kun for spredningsstråling i fremad- og bagudretningen. Endvidere indeholder faseinformationen en
15 flertydighed, som reducerer eller helt umuliggør udnyttelse af de fundne resultater i måleinstrumenter til brug i praksis.

Medens de ovennævnte, hidtil foreslåede metoder overvejende har været baseret på teoretiske overvejelser
20 og videnskabelige eksperimentelle verifikationer heraf og tillige enten har været baseret på måling af strålingsintensitet i interferensmønstre eller for den sidstnævnte egentlige laser-Doppler-metode har været begrænset til måling af forholdsvis store partikler og
25 behæftet med en flertydighed i størrelsesinformationen, tilsigtes der ved opfindelsen en for praktiske måleinstrumenter egnet udformning af et laser-Doppler-apparat, med hvilket der for partikeldimensioner helt ned til en størrelsesorden svarende til bølgelængden for
30 laserstrålingen kan opnås éntydig information om størrelsen af bevægede partikler i en fluidumstrøm indenfor et regulerbart variationsområde af partikelstørrelser.

Ifølge opfindelsen er et laser-Doppler-apparat af den indledningsvis angivne art ejendommeligt ved, at detek-
35 tororganerne omfatter to måledetektorer og midler til indstilling af detektorerne i rumlige positioner, hvor de i et detekteringsplan liggende stråleretninger fra

nævnte krydsningspunkt til måledetektorerne udviser en til en foreskreven maksimal partikelstørrelse svarende vinkelafstand, til modtagelse af spredningsstråler fra den bevægede partikel i form af dopplersignaler med forskellige fase for de to måledetektorer, at signalbehandlingsmidlerne omfatter organer til kombination af signalerne fra de to måledetektorer til frembringelse af et resulterende faseforskelsignal, og at der findes midler til fraseparering af resulterende faseforskels-signaler hidrørende fra en faseforskel mellem doppler-signalerne for de to måledetektorer, som overstiger 2π .

Opfindelsen forklares i det følgende nærmere under henvisning til den skematiske tegning, hvor

fig. 1 viser et principdiagram for et sædvanligt laser-Doppler-apparat af den art, som finder anvendelse ved måling af strømningshastighed for en fluidumstrømning,

fig. 2 viser et rumligt koordinatsystem med vektorer for de i målevolumenet i apparatopstillingen i fig. 1 indfaldende, fokuserede laserstråler og spredningsstrålingen i måleretningen mod et detektororgan,

fig. 3 viser et fasediagram for spredningsstrålingen,

fig. 4 viser et principdiagram svarende til fig. 2 til illustration af en mulig placering af detektororganer og udformning af signalbehandlingsskredse i et laser-Doppler-apparat ifølge opfindelsen, og

fig. 5 viser en mulig praktisk udførelsesform for opstillingen af laseroptik og detektororganer ved et laser-Doppler-apparat ifølge opfindelsen,

Fig. 1 viser de optiske komponenter i en laser-Doppler-opstilling af den art, som finder anvendelse i et sædvanligt laser-Doppler-anemometer til måling af strømningshastigheden for et fluidum. Et fra en laser udsendt strålebundt 2 separeres i en bundtdeler 3 i

to parallelle strålebundter 4 og 5, der kan have samme bølgelængde, dvs. frekvens, eller være frekvensforskudt på i og for sig kendt måde, f.eks. ved hjælp af en Bragg-celle i banen for den ene stråle,

5 Ved passage gennem en fokuseringsoptik 6, der i figuren er vist som en enkelt linse, afbøjes strålebundterne 4 og 5 til to konvergerende strålebundter 7 og 8, som fokuseres, dvs. krydser hinanden, i et begrænset rumligt område 9, der udgør apparatets målevolumen.

10 Ved den praktiske anvendelse af apparatet indrettes og placeres opstillingen således, at målevolumenet 9 befinder sig i en fluidumstrøm med bevægede partikler, hvoraf en enkelt er vist ved 10, således at en del af denne strøm bringes til at passere målevolumenet 9.

15 De i målevolumenet 9 indfaldende, hinanden krydsende laserstrålebundter 7 og 8 giver anledning til spredningsstråling fra en gennem målevolumenet 9 passerende partikel, og i en sædvanlig anemometeropstilling detekteres spredningsstrålingen i en given reflektionsretning 11: ved hjælp af en fotodetektor 12 med tilhørende apertur 13 og detektoroptik med en linse 14 og et synsfeltbegrænsende element 14a, f.eks. et "pin-hole". Fotodetektoren 12 er forbundet til apparatets elektriske signalbehandlingsorganer.

25 Måleprincippet med et apparat som vist i fig. 1 beror på måling af differensen mellem Doppler-frekvensforskydningerne i de spredningsstråler fra den bevægede partikel, som forårsages af de to indfaldende laserstrålebundter 7 og 8. Ved at bringe disse to spredningsstrålebundter til samtidigt at falde ind på en fotodetektor, dannes differensfrekvensen mellem de to dopplerforskudte frekvenser for spredningsstrålebundterne, og denne differensfrekvens er direkte proportional med den bevægede partikels hastighedskomponent vinkelret på vinkelhalveringslinien mellem de to indfaldende strålebundter 7 og 8 og beliggende i disse strålebundters plan, dvs. papirets plan i fig. 1.

Som det nærmere vil fremgå af det følgende, beror den foreliggende opfindelse på, at det således detekterede dopplersignal foruden den ved signalets frekvens givne information om hastigheden af en bevæget partikel
 5 også indeholder information om partiklens størrelse.

Idet en fotodetektor i en opstilling som vist i fig. 1 kan udgøres af en fotomultiplikator med kvadratisk karakteristisk, kan den resulterende fotostrøm, som udgør detektorens udgangssignal, udtrykkes ved

$$10 \quad i(t) = \int_A |E_1(t) + E_2(t)|^2 dA \quad (1)$$

hvor $E_1(t)$ og $E_2(t)$ er de optiske felter for de spredningsstrålebundter fra en bevæget partikel hidrørende fra det ene og det andet af de to indfaldende laserstrålebundter 7 og 8 i fig. 1. Denne fotostrøm vil inde-
 15 holde et d.c.-led og et a.c.-led, hvoraf a.c.-leddet indeholder differensfrekvensen mellem de på detektoren indfaldende strålingsfelters frekvenser f_1 og f_2 , dvs.

$$i(t) \approx |E_1|^2 + |E_2|^2 + 2|E_1||E_2|\cos(2\pi(f_2-f_1)t) \quad (2)$$

I et vektordiagram som vist i fig. 2, hvor $\underline{k}_1$ og $\underline{k}_2$
 20 angiver bølgevektorerne for de to indfaldende laserstrålebundter 7 og 8, og θ er vinklen mellem disse strålebundter, kan dopplerfrekvensen f_D udtrykkes ved

$$\begin{aligned} f_D &= f_2 - f_1 = n \underline{u} \cdot (\underline{k}_2 - \underline{k}_1) \\ 25 \quad &= (2n \cdot u_x / \lambda) \cdot \sin(\theta/2) \end{aligned} \quad (3)$$

hvor $\underline{u}$ er hastighedsvektoren for den bevægede partikel, λ laserstrålingens bølgelængde og u_x er hastighedsvektoren u 's komponent vinkelret på vinkelhalveringslinjen mellem laserstrålebundterne 7 og 8, dvs. i x-retningen
 30 i det rumlige koordinatsystem i fig. 2.

Forenklet udtrykt kan dopplerfrekvensen f_D opfattes som et resultat af den bevægede partikels passage gennem et sæt parallelle interferensplaner beliggende i det af kredsningsområdet mellem laserstrålebundterne 7 og 8
 35 definerede målevolumen og bestående af områder med afvekslende lys og mørke.

Denne beskrivelse er dog kun gyldig for en partikel, der er så lille, at den kan opfattes som et punkt i forhold til afstanden mellem interferensplanerne. Nærmer partiklens størrelse sig afstanden mellem interferensplanerne, optræder der ved sammensætningen af spredningsstråler fra forskellige områder af partiklen interferenseffekter, som forårsager en faseforskydning af dopplersignalet.*

Som eksempel herpå beskrives i det følgende et vigtigt specialtilfælde, hvor spredningsstrålingen fra en bevæget sfærisk partikel betragtes som udgående fra to punkter på partiklens overflade. Eksemplet er beskrevet for de fysiske forhold ved måling på sfæriske partikler i form af dråber i luft eller bobler i væsker, men kan på enkel måde udvides til mere komplicerede partikelformer, blot spredningsforholdene kendes.

I koordinatsystemet i fig. 2 betegner L_1 og L_2 de i X-Z-planet liggende akser for de indfaldende laserstrålebundter, som svarer til bundterne 7 og 8 i fig. 1 og kan beskrives ved bølgevektorer $\underline{k}_1$ og $\underline{k}_2$, der danner vinklerne $+\theta/2$ og $-\theta/2$ med Z-aksen. Spredningsstrålingen mod en detektor er angivet ved bølgevektoren $\underline{k}_s$, hvis retning er defineret ved vinklen φ i Y-Z-planet og vinklen ψ fra Y-Z-planet til vektoren $\underline{k}_s$. I ovennævnte specialtilfælde ved måling på bobler i væske kan vinklen φ med fordel vælges til ca. 98° , idet refleksionen fra en bobleoverflade i disse retninger dominerer i forhold til spredningsstråler, der har passeret gennem boblen.

Hver af strålerne L_1 og L_2 giver nu ved refleksion på overfladen af en sfærisk partikel, der antages at have centrum i nulpunktet for det i fig. 2 viste koordinatsystem, anledning til en spredningsstråle i retningen for vektoren $\underline{k}_s$.

For de indfaldende stråler med retninger svarende til vektorerne $\underline{k}_1$ og $\underline{k}_2$ kan indfaldsvinklerne i_1 og i_2 ved de ikke i fig. 2 viste refleksionspunkter, som giver anledning til spredningsstråler med en retning svarende til vektoren $\underline{k}_s$, dvs. vinklen mellem den pågældende ind-

faldende stråle og radiusvektoren i det sfæriske koordinatsystem til refleksionspunktet, udtrykkes ved

$$\cos i_1 = \frac{\underline{k}_s \cdot (\underline{k}_s - \underline{k}_1)}{|\underline{k}_s| |\underline{k}_s - \underline{k}_1|} \quad (4)$$

5

$$\cos i_2 = \frac{\underline{k}_s \cdot (\underline{k}_s - \underline{k}_2)}{|\underline{k}_s| |\underline{k}_s - \underline{k}_2|} \quad (5)$$

hvor vektorerne $\underline{k}_1$, $\underline{k}_2$ og $\underline{k}_s$ i det viste koordinatsystem har koordinaterne

10

$$\underline{k}_1 = k \left(-\sin \frac{\theta}{2}, 0, \cos \frac{\theta}{2} \right)$$

$$\underline{k}_2 = k \left(\sin \frac{\theta}{2}, 0, \cos \frac{\theta}{2} \right)$$

$$\underline{k}_s = k \left(\sin \psi, \cos \psi \sin \phi, -\cos \psi \cos \phi \right)$$

hvorved man for vinklerne i_1 og i_2 får

15

$$\cos i_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \psi + \cos \frac{\theta}{2} \cos \psi \cos \phi} \quad (6)$$

$$\cos i_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \psi + \cos \frac{\theta}{2} \cos \psi \cos \phi} \quad (7)$$

20

For spredningsstrålerne med retning svarende til vektoren $\underline{k}_s$ hidrørende fra hver af de indfaldende stråler med retninger svarende til vektorerne henholdsvis $\underline{k}_1$ og $\underline{k}_2$ fås herved faserne

$$\phi_1 = n \cdot \underline{u} \cdot t \cdot (\underline{k}_s - \underline{k}_1) + 2k R n \cdot \cos i_1 + \phi_0 \quad (8)$$

25

$$\phi_2 = n \cdot \underline{u} \cdot t \cdot (\underline{k}_s - \underline{k}_2) + 2k R n \cdot \cos i_2 + \phi \quad (9)$$

hvor ϕ_0 er fasen for en spredningsstråle hidrørende fra en indfaldende stråle i et plan gennem den bevægede partikels centrum, dvs. X-Z-planet i fig. 2.

30

Ved detektering med en detektor anbragt i fjernfeltet i retningen for vektoren $\underline{k}_s$ opnås dopplerfrekvensen som differensfrekvensen mellem de to spredningsstråler hidrørende fra indfaldende stråler med retninger svarende til vektorerne $\underline{k}_1$ og $\underline{k}_2$. Dette dopplersignal vil

35 have fasen

$$\phi = \phi_2 - \phi_1 = n \underline{u} \cdot t (\underline{k}_1 - \underline{k}_2) + 2n \cdot k R (\cos i_2 - \cos i_1) \quad (10)$$

For det ovennævnte specialtilfælde er i fig. 3 vist et fasediagram for fasen ϕ som funktion af indstillingsvinklerne φ og ψ for en detektor. Kurverne i diagrammet danner ækvifaselinier til bestemmelse af værdierne for φ og ψ i rumlige positioner i hvilke dopplersignalerne vil have samme fase.

Hvis måledetektorerne 17 og 18 og referencedetektoren 19 som vist i fig. 4 er placerede således, at stråleretningerne til disse detektorer ligger i et detekteringsplan indeholdende den på vinkelhalveringslinien mellem de indfaldende laserstråler 15 og 16 vinkelrette linie gennem strålernes krydsningspunkt, dvs. X-aksen i koordinatsystemet i fig. 2, ses det ud fra fasediagrammet i fig. 3, at betingelsen for et éntydigt resulterende faseforskelsignal fra måledetektorerne 17 og 18 svarende til en éntydig bestemmelse af en partikelstørrelse under den foreskrevne maksimale partikelstørrelse svarende til måledetektorernes placering vil være, at fasereferencesignalet ϕ_R er mindre end eller lig med $2\pi/n$, hvor n er forholdet mellem vinkelafstanden α mellem stråleretningerne til måledetektorerne 17 og 18 og vinkelafstanden α/n mellem stråleretningerne til referencedetektoren 19 og den med denne samvirkende måledetektor.

Til realisering af den ovennævnte éntydhed, dvs. frasepareringen af faseforskels signaler fra måledetektorerne 17 og 18, som er udtryk for en faseforskul over 2π , kan signalbehandlingsmidlerne ifølge opfindelsen som vist i fig. 4 omfatte et første fasemåleorgan 20, som er forbundet til de to måledetektorer 17 og 18 til bestemmelse af faseforskellen mellem de af disse detektorer modtagne dopplersignaler og et andet fasemåleorgan 21 forbundet til referencedetektoren 19 og den ene måledetektor 17 til bestemmelse af faseforskellen mellem de af disse detektorer modtagne dopplersignaler. Til det andet fasemåleorgan 21's udgang kan være forbundet en valideringskreds 22 til bestemmelse af, om fasereferencesignalet ϕ_R opfylder den ovennævnte betin-

gelse. Til valideringskredsen 22 og til det første fasemåleorgan 20 er forbundet en logisk kreds 23, som kun ved tilførsel af et aktiveringssignal fra valideringskredsen 22, når den ovennævnte betingelse er opfyldt, overfører det resulterende faseforskelsignal ϕ_M fra det første fasemåleorgan 20 til en partikelstørrelsesanalysator 24, der kan være indrettet til for en undersøgt fluidumstrøm at beregne og registrere såvel fordelingen af partikelstørrelser under den foreskrevne maksimumstørrelse svarende til den givne indstilling af måledetektorerne som den absolutte koncentration, f.eks. mængde pr. tidsenhed, af partikler under denne maksimumstørrelse.

Med fasemåleorganerne 20 og 21 og den hermed forbundne valideringskreds 22 og logiske kreds 23 i diagrammet i fig. 4 vil ethvert resulterende faseforskelsignal ϕ_M , om hvilket det ved hjælp af fasereferencesignalet ϕ_R i valideringskredsen 22 konstateres, at det hidrører fra en faseforskel på mere end 2π mellem dopplersignalerne for måledetektorerne 17 og 18, blive frasepareret uanset årsagen hertil. Som allerede nævnt kan årsagen til detektering af en faseforskel på mere end 2π først og fremmest være spredningsstråling fra en partikel, der overstiger den foreskrevne maksimale partikelstørrelse svarende til den foreliggende indstilling af vinkelafstanden α mellem måledetektorerne 17 og 18. En faseforskel på mere end 2π kan imidlertid også skyldes spredningsstråling fra en partikel med en form, der afviger væsentligt fra den sfæriske. Dette tilfælde vil i praksis optræde, hvis der i en gas- eller væskestrøm, som undersøges for sfæriske partikler i form af henholdsvis dråber og bobler, tillige forekommer faste partikler med varierende former.

Til diskriminering mellem de to nævnte årsager til en faseforskel på mere end 2π mellem dopplersignalerne til måledetektorerne 17 og 18 med henblik på at opnå information om forekomsten af faste partikler i den undersøgte fluidumstrøm kan der ifølge et særligt træk

ved opfindelsen benyttes en yderligere referencedetektor 25, som indstilles i en sådan rumlig position, at den for en sfærisk partikel vil modtage et dopplersignal med samme fase som den ene af måledetektorerne, f.eks. detektoren 17. I fasediagrammet i fig. 3 svarer dette til, at dopplersignalet for detektoren 25 skal være beliggende på samme ækvifaselinie som dopplersignalet for detektoren 17.

Signalet fra detektoren 25 føres nu sammen med signalet fra måledetektoren 17 til et tredje fasemåleorgan 27 til frembringelse af et fasesammenligningssignal ϕ_C . Dette fasesammenligningssignal føres til en valideringskreds 28, som fraseparerer fasesammenligningssignaler ϕ_C med den resulterende fase 0, dvs. hidrørende fra detektering af sfæriske partikler. Valideringskredsen 28's udgangssignaler, der således opfylder betingelsen $\phi_C \neq 0$, svarende til detektering af en partikel med ikke-sfærisk form, føres til partikelstørrelsesanalysatoren 24 til oplysning om indholdet af sådanne faste partikler i den undersøgte fluidumstrøm.

Til udførelse af en kvantitativ partikelanalyse i analysatoren 24 kræves foruden opsamlingen af data om partikelstørrelser og -størrelsesfordelinger oplysning om hastigheden af den undersøgte fluidumstrøm. En sådan hastighedsinformation kan opnås på kendt måde ved, at der til én af detektorerne, f.eks. måledetektoren 18, er forbundet en dopplerfrekvensanalysator 29, fra hvilken hastighedsinformationen føres til partikelstørrelsesanalysatoren 24.

I fig. 5 er vist en mulig praktisk udførelse af de optiske bestanddele af et laserdopplerapparat ifølge opfindelsen.

På en stabil optisk bæk 30 er monteret en laser 31, en bundtdeler 32 og en fokuseringsenhed 33 med en fokuserende frontlinse 35, med hvilken laserstråler 36 og 37 bringes til at krydse hinanden i et målevolumen 38 i en rørledning 39, som gennemstrømmes af den

fluidumstrøm, der ønskes undersøgt, og de af denne bårne, bevægede partikler 40. Med henblik på regulering af krydsningsvinklen θ mellem de fokuserede laserstråler 36 og 37 og dermed indstilling af målevolumenet og det
5 aktuelle variationsområde for partikelstørrelser er de.. til bundtdeleren 32 på i og for sig kendt måde knyttet indstillingsselementer til regulering af afstanden mellem de parallelle delstråler, der forlader bundtdeleren.

En holder for to måledetektorer 41 og 42 og en
10 referencedetektor 43 omfatter to forskydelige opstandere 44 og 45 på den optiske bæk 30 og monteringsplader 46, 47 og 48 for detektorerne henholdsvis 41, 42 og 43, hvilke monteringsplader er forbundet med opstanderne 44 og 45, således at de hver for sig kan forskydes i ret-
15 ningen vinkelret på den optiske bæk 30, dvs. parallelt med vinkelhalveringslinien for laserstrålerne 36 og 37.

I hver af monteringspladerne 46, 47 og 48 er den pågældende detektor tillige monteret, så den kan forskydes i tværretningen vinkelret på opstanderne 44 og 45,
20 dvs. vinkelret på vinkelhalveringslinien mellem strålerne 36 og 37.

Den i fig. 5 viste udgangsstilling for detektorerne 41-43 svarer i diagrammet i fig. 4 til en placering af detektorerne i et plan vinkelret på fokuseringsplanet
25 indeholdende strålerne 36 og 37 og skærende dette plan i vinkelhalveringslinien mellem strålerne, dvs. svarende til Y-Z-planet i fig. 2. Indstillingen kan nu for eksempel foretages på den måde, at med fastholdelse af referencedetektoren 43 i udgangsstillingen på monterings-
30 pladen 48 forskydes måledetektoren 41 til den ene side i forhold til udgangsstillingen, og måledetektoren 42 til den anden side i forhold til udgangsstillingen.

I diagrammet i fig. 4 vil denne indstilling svare til en drejning af detekteringsplanet fra den ovennævnte
35 udgangsstilling, Y-Z-planet i fig. 2, til en skrå stilling, i hvilken detekteringsplanet i forhold til udgangsstillingen er drejet en vinkel omkring stråleretningen

til referencedetektoren 43. Med den viste udførelse kan denne drejningsvinkel f.eks. være op til 45° , men selv om detekteringsplanet herved ikke når den i fig. 4 viste stilling, der er benyttet som grundlag for forklaringen af signalbehandlingen, ændrer dette ikke ved detekteringsprincippet, idet de tre detektorer 41-43 stadig indstilles til rumlige positioner, hvor de modtager dopplersignaler indenfor ét og samme fasebånd i fasediagrammet i fig. 3 for en foreskreven maksimal partikelstørrelse.

Indstillingen til et ønsket partikelstørrelsesvariationsområde kan foretages ved en kombination af længdeforskydning af detektorholderen med opstanderne 44 og 45 på den optiske bæk 30, indbyrdes forskydning af detektormonteringspladerne 46-48 i opstanderne 44 og 45 og den ovenfor beskrevne forskydning af måledetektorerne 41 og 42 på monteringspladerne 46 og 47 til drejning af detekteringsplanet.

Som det vil fremgå af det foregående, indstilles til en mindre maksimal partikelstørrelse ved at foretage indstillingen således, at vinkelafstanden mellem detekteringsstråleretningerne til måledetektorerne 41 og 42 forøges, dvs. ved at nærme opstanderne 44 og 45 til fokuseringsenheden 33, forøge den indbyrdes afstand mellem monteringspladerne 46-48 og forøge forskydningerne af detektorerne 41 og 42 på monteringspladerne 46 og 47 i forhold til den viste udgangsstilling.

Modsvarende foregår indstilling til en større maksimal partikelstørrelse således, at vinkelafstanden mellem detekteringsstråleretningerne til måledetektorerne 41 og 42 formindskes, dvs. ved at fjerne detektorholderen med opstanderne 44 og 45 fra fokuseringsenheden 33, formindske den indbyrdes afstand mellem monteringspladerne 46-48 og/eller mindske forskydningen af detektorerne 41 og 42 på monteringspladerne 46 og 47.

Det er på denne måde muligt at foretage indstilling af apparatet til et meget stort variationsområde for

partikelstørrelser, f.eks. til detektering af partikler helt ned til en størrelsesorden svarende til laserstrålingens bølgelængde og op til en flere tusinde gange større partikeldiameter.

- 5 Den i fig. 5 viste apparatudførelse kan - svarende til diagrammet i fig. 4 - suppleres med en yderligere referencedetektor til brug ved detektering af faste partikler og apparatets ikke viste signalbehandlingskredsløb, hvortil detektorerne er forbundet over et
- 10 kabel 49, kan være udformet som forklaret under henvisning til fig. 4.

P A T E N T K R A V

1. Laser-Doppler-apparat til bestemmelse af størrelsen af bevægede sfæriske partikler i en fluidumstrøm, omfattende en laserstrålegenerator (1, 3, 31, 32) til frembringelse af to rumligt adskilte laserstråler (4, 5),
5 fokuseringsmidler (6) til fokusering af laserstrålerne således, at de fokuserede stråler (7, 8; 15, 16, 36, 37) i et fokuseringsplan (X, Z, fig. 2) krydser hinanden under en given vinkel (θ) i et krydsningspunkt i et af en del af fluidumstrømmen passeret målevolumen (9, 10 38), fotoelektriske detektororganer til detektering af de af en bevæget partikel (10) i fluidumstrømmen frembragte spredningsstråler i forskellige rumlige positioner uden for målevolumenet (9, 38) og frembringelse af elektriske signaler i afhængighed heraf, og signalbehandlingsmidler til bestemmelse af partikelstørrelsen ud fra
15 nævnte elektriske signaler, k e n d e t e g n e t ved, at detektororganerne omfatter to måledetektorer (17, 18; 41, 42) og midler til indstilling af detektorerne i rumlige positioner, hvor de i et detekteringsplan liggende stråle-
20 retninger fra nævnte krydsningspunkt til måledetektorerne (17, 18; 41, 42) udviser en til en foreskreven maksimal partikelstørrelse svarende vinkelafstand, til modtagelse af spredningsstråler fra den bevægede partikel (10) i form af dopplersignaler med forskellig fase for de to
25 måledetektorer (17, 18; 41, 42), at signalbehandlingsmidlerne omfatter organer til kombination af signaler fra de to måledetektorer (17, 18; 41, 42) til frembringelse af et resulterende faseforskelsignal (ϕ_M), og at der findes midler til fraseparering af resulterende faseforskels-
30 signaler hidrørende fra en faseforskel mellem dopplersignalerne for de to måledetektorer (17, 18; 41, 42) som overstiger 2π .

2. Laser-Doppler-apparat ifølge krav 1, k e n d e t e g n e t ved, at nævnte frasepareringsmidler omfatter en referencedetektor (19, 43), for hvilken stråle-
35 retningen fra nævnte krydsningspunkt ligger i detekte-

ringsplanet mellem stråleretningerne til de to måledetektorer (17, 18; 41, 42), og at signalbehandlingsmidlerne omfatter organer til kombination af signalet fra referencedetektoren (19) og signalet fra den ene måledetektor

5 (17) til frembringelse af et fasereferencesignal (ϕ_R) til indikering af, om et resulterende faseforskelsignal (ϕ_M) hidrører fra en faseforskel mellem dopplersignalerne for de to måledetektorer (17, 18), som overstiger 2π .

3. Laser-Doppler-apparat ifølge krav 2, k e n -

10 d e t e g n e t ved, at kombinationsorganerne i signalbehandlingsmidlerne omfatter et første fasemåleorgan (20) forbundet til de to måledetektorer (17, 18), et andet fasemåleorgan (21) forbundet til referencedetektoren (19) og den ene måledetektor (17), en til det andet fasemåle-

15 organ (21) forbundet valideringskreds (22) og en logisk kreds (23) forbundet til valideringskredsen (22) og det første fasemåleorgan (20) til overføring af et resulterende faseforskelsignal (ϕ_M) fra det første fasemåleorgan til en partikelstørrelsesanalysator (24) som svar

20 på et aktiveringssignal fra valideringskredsen (22), og at valideringskredsen (22) er indrettet til frembringelse af nævnte aktiveringssignal, kun når fasereferencesignalet (ϕ_R) fra det andet fasemåleorgan (21) er mindre end eller lig med $2\pi/n$, hvor n er forholdet mellem

25 vinkelafstanden (α) mellem stråleretningerne i detekteringsplanet til måledetektorerne (17, 18) og vinkelafstanden (α/n) mellem stråleretningerne i detekteringsplanet til henholdsvis referencedetektoren (19) og nævnte ene måledetektor (17).

30 4. Laser-Doppler-apparat ifølge krav 2 eller 3, k e n d e t e g n e t ved, at detektororganerne omfatter en yderligere referencedetektor (25) og midler til indstilling af denne detektor til en rumlig position, hvor stråleretningen til den fra nævnte krydsningspunkt

35 ligger uden for detekteringsplanet for stråleretningerne til de øvrige detektorer (17, 18, 19) og i en sådan stilling i forhold til stråleretningen til én af de

øvrige detektorer (17), at den ved spredningsstråling fra en sfærisk partikel vil modtage et dopplersignal med samme fase som nævnte ene detektor (17), og at signalbehandlingsmidlerne omfatter organer til kombination af
5 signaler fra den yderligere referencedetektor (25) og nævnte ene måledetektor (17) til frembringelse af et fasesammenligningssignal (ϕ_C) og afgivelse af et udgangssignal, når fasesammenligningssignalet (ϕ_C) svarende til detektering af en ikke-sfærisk partikel udviser en fra 0
10 afvigende værdi.

5. Laser-Doppler-apparat ifølge krav 4, k e n d e t e g n e t ved, at nævnte kombinationsorganer omfatter et yderligere fasemåleorgan (27) forbundet til den yderligere referencedetektor (25) og nævnte ene
15 måledetektor (17) og en med dette fasemåleorgan (27) forbundet valideringskreds (28) til overføring af nævnte udgangssignal til partikelstørrelsesanalysatoren (24) ved nævnte fra 0 afvigende værdi af fasesammenligningssignalet (ϕ_C).

20 6. Laser-Doppler-apparat ifølge et af de foregående krav, k e n d e t e g n e t ved, at der til én af detektorerne (17, 18, 19, 25) er forbundet en doppler-frekvensanalysator (29) til frembringelse af et hastighedsinformationssignal.

25 7. Laser-Doppler-apparat ifølge et af de foregående krav, k e n d e t e g n e t ved, at indstillingsmidler (44-48) for detektorerne (41-43) er indrettede til indstilling af disse til rumlige positioner indenfor et variationsområde ned til en partikelstørrelse af
30 samme størrelsesorden som laserstrålingens bølgelængde, og at der til laserstrålegeneratoren (31, 32) er knyttet midler til indstilling af krydsningsvinklen (θ) mellem de i målevolumenet fokuserede laserstråler (36, 37).

INTERNATIONAL PATENT BUREAU

Alfred Rappin

