

Ultrasnelle fotografie of 'tijdmicroscopie'

E. Kaptein,

Metaalinstituut TNO, Postbus 541, 7300 AM Apeldoorn

Ultrasnelle fotografie of 'tijdmicroscopie' is een belangrijke fysische meetmethode voor het kwantitatief en kwalitatief analyseren van snel verlopende verschijnselen en handelingen. Men neemt hierbij een serie opvolgende beelden op met een hogere beeldfrequentie dan normaal. Bij afdraaien op normale projectiesnelheid doet zich dan een vertraging van het verschijnsel voor, waardoor details aan het licht komen die met het blote oog niet waarneembaar zijn. Deze details kunnen het antwoord betekenen op allerlei vragen, zowel in onderzoek- als in productiesituaties.

De algemeen geldende weergavefrequentie voor 16 mm film is 25 beelden per seconde. 'Tijdverlenging' van de opname ontstaat als de opnamefrequentie (O.F.) groter is dan de weergavefrequentie (W.F.).

Ofwel:

O.F./W.F. < 1 versnelde weergave

O.F./W.F. = 1 zelfde snelheid

O.F./W.F. > 1 vertraagde weergave

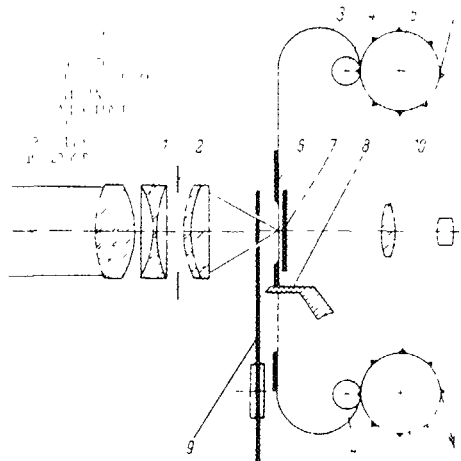
Men spreekt van ultrasnelle fotografie als belichtingstijden worden toegepast die korter zijn dan 1/1000 s en van hoofrequentiecinematografie als de opnamefrequentie hoger is dan 200 beelden per seconde. De bij deze vorm van fotografie toegepaste camera's laten zich als volgt indelen:

- camera met grijperwerk (tot 500 b/s),
- camera met continu doorlopende film (tot 15.000 b/s),
- trommelcamera (tot 50.000 b/s),
- draaispiegelcamera (tot 8.000.000 b/s),
- meervoudige camera (tot 100.000.000 b/s),
- videocamera (tot 12.000 b/s)

De videocamera lijkt een vreemde eend in de bijt, maar is hier toch bewust meegenomen. De verschillende cameratypen worden hierachter nader besproken

Camera met grijperwerk

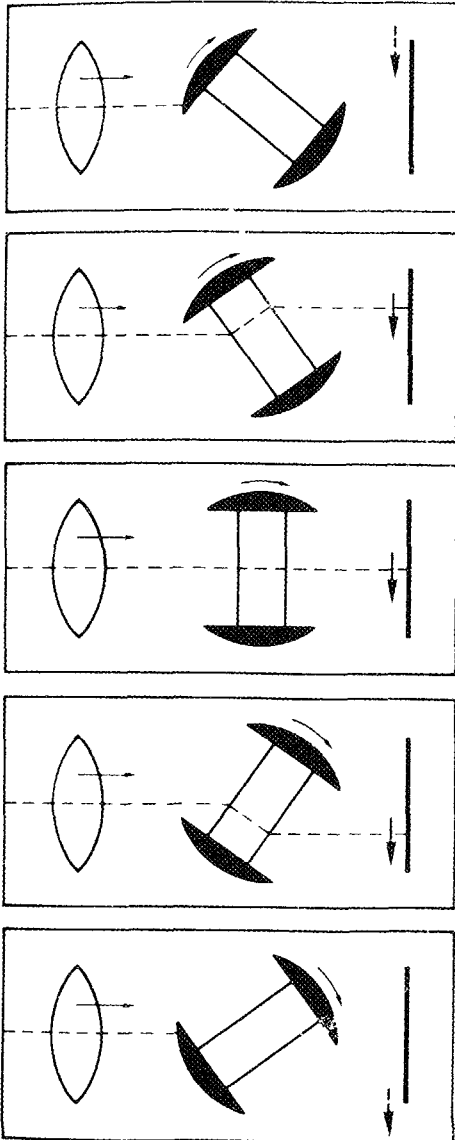
Bij camera's met grijperwerk (fig. 1) wordt de film schoksgewijs voorbij het beeldvenster gevoerd. De belichting vindt steeds plaats tijdens de stilstandfase van de film. Door de optredende krachten bij het filmtransport, ontstaan door de versnelling en de massa van de film is de opnamefrequentie beperkt tot 500 beelden per seconde. Verwisselbare vlieders met verschillende openingen maken belichtingstijden mogelijk van ca. 1/1000 tot 1/20 000 seconde per beeldje.



Figuur 1
Camera met grijperwerk

Camera met continu filmtransport

Bij de camera met continu filmtransport wordt optische compensatie toegepast. De werkwijze zal duidelijk zijn na bestudering van figuur 2. Het prisma draait synchroon



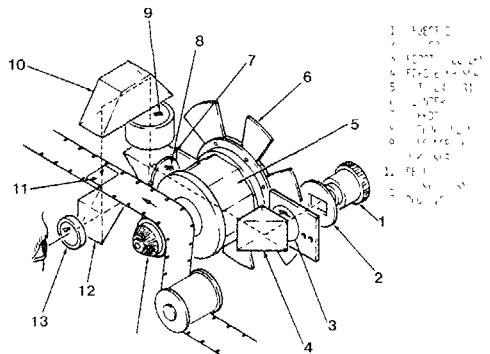
Figuur 2
Principe van de optische compensatie

met de film. Hierbij wordt een lichtstraal die via het objectief in de camera komt, evenwijdig verplaatst met de snelheid waarmee de film wordt getransporteerd.

Elk beeld staat dus ten opzichte van de film een kort moment stil. De belichtingstijd per beeld is niet alleen te beïnvloeden door de beeldfrequentie te veranderen, maar ook door de vlinder te verwisselen. Het aantal beelden per seconde kan dan bijvoorbeeld 5 000 blijven, terwijl de belichtingstijd per beeld kan worden gevarieerd door het kiezen van een andere vlinder (fig. 3). Hierdoor verandert de verhouding donkertijd/belichtingstijd, iets waar we later nog op terugkomen.

In verband met de treksterkte van het filmmateriaal is 15.000 beelden per seconde op het ogenblik de maximale opnamefrequentie voor camera's die werken met optische compensatie. De filmsnelheid is in dat geval meer dan 150 m/s of 540 km/uur. Door gebruik te maken van andere prisma's, die het normale beeldformaat terugbrengen tot een formaat dat de helft of een kwart van de breedte heeft, is een dubbele of viervoudige frequentie mogelijk. Een bezwaar is wel dat de film niet meer via de filmprojector kan worden geprojecteerd.

Omdat de film bij toenemende opnamesnelheden steeds sneller door de camera



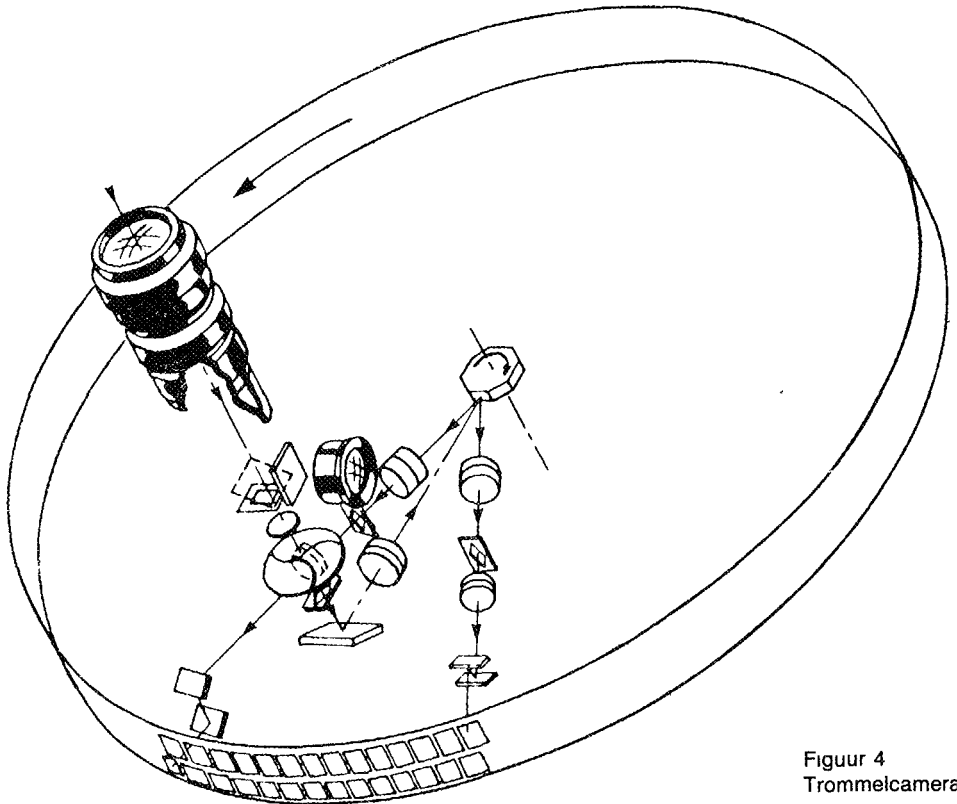
Figuur 3
Camera met continu filmtransport

loopt, is een goede tijdindicatie noodzakelijk. Aan één zijde van de perforatie wordt daartoe de tijd gemarkeerd met behulp van een tweetal neonbuisjes, die naar keuze lichtpulsjes uitzenden van 10, 100 of 1000 Hertz. Zonder deze nauwkeurige tijdmarkering is een goede bewegingsanalyse niet mogelijk.

Trommelcamera

Bij een hogere opnamefrequentie dan 15.000 beelden per seconde is continu filmtransport niet meer mogelijk. De stap die dan gemaakt kan worden is die naar een trommelcamera. Dit is een camera waarbij een filmstrook vast op een draaiende trommel wordt gemonteerd. De strook, die even lang is als de omtrek van de cilinder. Het beeld wordt op de film geprojecteerd via een ingenieus systeem van lenzen, prisma's en diafragma's. De wijze

waarop de beelden op de film terechtkomen is verschillend. Bij de Dynafax-camera (fig. 4) komen ze om en om op de 35 mm film, dus beeld 1 aan de rechterzijde van de film, beeld 3 aan de linkerzijde, maar er bestaan ook andere systemen. De maximale opnamesnelheid is 50.000 beelden per seconde en de belichtingstijd per beeldje kan door middel van zogenoemde diamantstops 0,0075 s bedragen. Voor de belichting kan gebruik worden gemaakt van een zgn. blokflits. De flitsduur mag niet langer zijn dan één omwenteling van de trommel. 'Zelfflitsende' objecten (bijvoorbeeld het overspringen van een vonk) kunnen worden opgenomen met een open sluitser. Uit het voorgaande zal duidelijk zijn dat de filmstrook uit de trommelcamera niet in een projector kan worden afgedraaid, maar beeld voor beeld dient te worden bekeken.



Figuur 4
Trommelcamera

Draaispiegelcamera

Bij de draaispiegelcamera wordt uitgegaan van een filmstrook die over een cirkelsegment wordt gespannen (fig. 5). Het op te nemen object wordt via een optisch systeem op een draaiende spiegel afgebeeld en door afzonderlijke lenzen direct op de film geprojecteerd. Het aantal lenzen bepaalt dus het aantal beelden. Door de geringe massa van de spiegel en door 'turbine-aandrijving' kunnen beeldfrequenties tot 8 miljoen beelden per seconde bereikt worden. De 'triggering' is bij deze camera erg belangrijk, daar de flits moet afgaan als de spiegel onder de goede hoek staat, terwijl zich op dat moment ook het vast te leggen verschijnsel moet voordoen.

Meervoudige camera

De meervoudige camera (fig. 6) is gebaseerd op overlapping door meerdere naast elkaar opgestelde camera's langs de objectbaan met gesynchroniseerde speciale sluitersystemen.

Videocamera

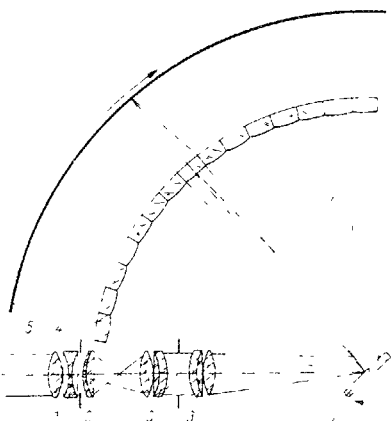
Op dit moment zijn er High Speed Video camera's op de markt die op standaard VHS, 200 of 400 beelden per seconde kunnen opnemen in kleur. Met behulp van

een ingebouwde shutter kan de belichtingstijd per beeldje teruggebracht worden tot 1/2500, 1/5000 of 1/10000 seconde. Aan te bevelen is bij lage objectsnelheden de camera te koppelen met een stroboscoop die flitst met lichtpulsjes van 1/50.000 seconde.

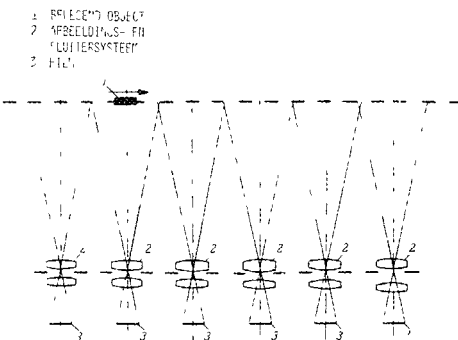
Nog snellere videocamera's kunnen 1000 of 2000 volledige beelden per seconde opnemen in zwart/wit. Als men genoeg neemt met een kleiner frame, kunnen zelfs 12000 beelden per seconde worden opgenomen. Ook hier kan eventueel gebruik worden gemaakt van een stroboscoop om de belichtingstijd per beeld zo kort mogelijk te houden. Op dit moment is er zelfs al een High Intensity Imager beschikbaar die het beeld zodanig versterkt dat met 1000 beelden per seconde onder normale lichtomstandigheden kan worden opgenomen. De verwachting is dat ook bij hogere opnamesnelheden de kwaliteit van het beeld nog zal verbeteren, en dat in de toekomst ook in kleur kan worden opgenomen.

Kwaliteitscriteria

Ook ultrasnelle fotografie kent kwaliteitscriteria, al wijken die hier en daar af van de criteria die in andere delen van het vak gelden. Uitgaande van een high speed film



Figuur 5
Draaispiegelcamera



Figuur 6
Meervoudige camera

die is opgebouwd uit enkele beelden in een bekende volgorde in tijd, bepalen drie criteria de waarde van de film

- de kwaliteit van het enkele beeld,
- de beeldfrequentie,
- het aantal beelden.

Op deze aspecten wordt hieronder nader ingegaan.

Bewegingsonscherpte

Voor een high speed opname wordt de camera op een statief gefixeerd terwijl het object beweegt. De objectbeweging kan voor een uitsmeren van het beeld zorgen tijdens de belichtingstijd — de zogenaamde bewegingsonscherpte. Dit is de afstand waarover het beeld van het object tijdens de belichtingstijd op de film beweegt. De beeldbeweging mag een bepaalde waarde niet overschrijden, daar de afbeelding anders onscherp wordt.

Vooraf door de vaak gecompliceerde optische systemen in de camera's, moeten we in de ultrasnelle fotografie genoeg nemen met een veel geringer oplossend vermogen dan in de gewone fotografie. Een algemeen geaccepteerde waarde is 25 lijnen per millimeter. Dit betekent dat 50 licht/donker-informaties per millimeter film-breedte kunnen worden weergegeven. Het 10 mm brede beeld van een 16 mm film kan dus zo'n 500 lijnen bevatten en de bewegingsonscherpte (Z) mag dus 1/50 mm niet overtreffen.

Om voor een bekende objectsnelheid de nog toelaatbare belichtingstijd te berekenen of, omgekeerd, bij een gegeven belichtingstijd (t) de maximale objectsnelheid (v), worden de volgende formules gehanteerd:

$$t = \frac{20 \cdot Z \cdot v}{\text{objectgrootte}}$$

respectievelijk:

$$v = \frac{\text{objectgrootte} \cdot t}{20 \cdot Z}$$

De formules gaan er vanuit dat het object formaatvullend wordt afgebeeld.

Het is in de praktijk vaak moeilijk de juiste beeldfrequentie te kiezen. Aan de ene kant bestaat de wens naar een hoge frequentie, die de beweging in zoveel mogelijk fasen laat zien. Aan de andere kant dwingen economische overwegingen ertoe de frequentie laag te houden, omdat hogere beeldfrequenties al gauw gepaard gaan met een groter filmgebruik en soms ook duurdere apparatuur.

De beeldfrequentie wordt in de ultrasnelle fotografie niet zozeer bepaald door de objectsnelheid, maar vooral door de snelheid van het *geprojecteerde beeld* van het onderwerp op de film. Hoe hoger deze is, hoe korter — bij gebruik van dezelfde vlinder — de tijdsintervallen tussen de opnamen moeten zijn, en hoe hoger dus de beeldfrequentie.

Anders dan in de gewone fotografie wordt in de high speed fotografie geprobeerd zo lang mogelijk te belichten en toch een scherp beeld te verkrijgen. Dit om te voorkomen dat in de 'zwartperiode' als het ware informatie verloren gaat. Van geval tot geval kan dus sprake zijn van een wisselende verhouding tussen belichten en niet-belichten. Deze verhouding (S) is te beïnvloeden door de keuze van de vlinder.

Voor het verband tussen beeldfrequentie (BF), verhouding licht/donker (S) en belichtingstijd (t) geldt de volgende formule:

$$BF = \frac{1}{t \cdot S} \text{ of } t = \frac{1}{BF \cdot S}$$

In de praktijk wordt bij de berekening van de beeldfrequentie meestal de toelaatbare bewegingsonscherpte als grenswaarde aangehouden.

De beeldfrequentie wordt als volgt berekend:

$$BF = \frac{20 \cdot Z \cdot v}{\text{objectgrootte} \cdot S}$$

Voor het bepalen van de maximale snelheid van het onderwerp dient de formule:

$$v = \frac{\text{objectgrootte} \cdot \text{BF} \cdot S}{20 \cdot Z}$$

Voorbeeld 1: Een 4 meter lange auto beweegt zich voort met een snelheid van 50 km/h (13,98 mtr. sec.) Hoe hoog moet de beeldfrequentie zijn als het oplossend vermogen 25 lijnen/mm is en de verhouding donkertijd/belichtingstijd = 5?

$$\text{BF} = \frac{20 \cdot 25 \cdot 13,9}{4 \cdot 5} = \frac{6950}{20} = 348 \text{ b/s}$$

Voorbeeld 2: Een bal wordt geslagen en de afgelegde weg is 0,2 meter. Snelheid van de bal is 50 km/h (13,8 m/s). Welke beeldfrequentie hebben we nu nodig als het oplossend vermogen 25 l/mm is en de verhouding donkertijd/belichtingstijd = 5?

$$\text{BF} = \frac{20 \cdot 25 \cdot 13,9}{0,2 \cdot 5} = \frac{6950}{1} = 6950 \text{ b/s}$$

Deze voorbeelden laten zien dat onder overigens gelijke omstandigheden de afmetingen van het object grote invloed hebben op de te kiezen beeldfrequentie. De frequentie is dus afhankelijk van de snelheid van het op te nemen object, de grootte van het object (de afbeeldingsmaatstaf!) en de opnamehoek.

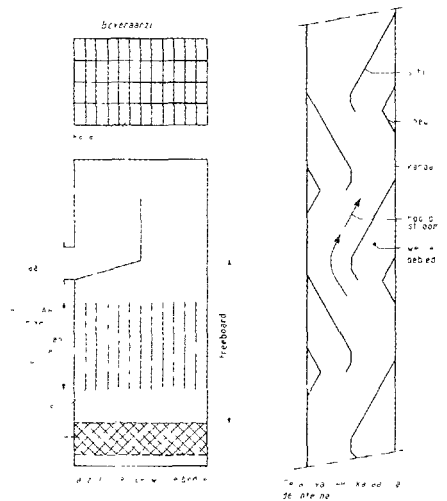
In het volgende worden nog enkele voorbeelden uit de TNO-praktijk besproken

Twee-fasen stromingsonderzoek

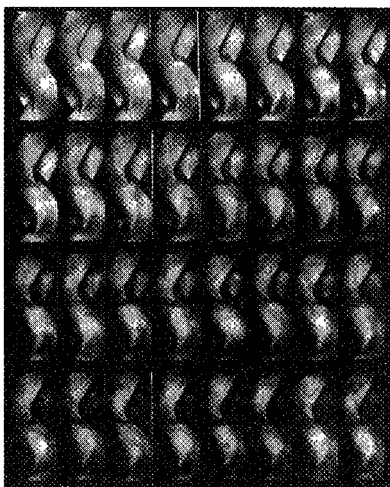
Bij de afdeling stromingstechniek van de Hoofdgroep Maatschappelijke Technologie TNO is onderzoek uitgevoerd aan een zogenaamde 'freeboard internal' voor een kolengestookte wervelbedketel (fig. 7). Het doel van deze 'internal' is het verhogen van het verbrandingsrendement van de ketel. Dit wordt bereikt door de verblijftijd van de nog niet volledig verbrande vliegaseeëntjes in het 'freeboard' van de ketel te verlengen. Dit wordt bereikt door de rookgassen met daarin de vliegaseeëntjes door de 'freeboard internal' te voeren. De internal bestaat uit een groot aantal parallelle rechthoekige kanalen met daarin op regel-

matige afstanden schotten en 'neuzen'. Door deze schotten en neuzen wordt de hoofdstroom een aantal keren afgebogen. Bij elke afbuiging worden vliegaseeëntjes uit de hoofdstroom geslingerd. Deze deeltjes komen in de wervelgebieden onder de schuine schotten terecht. Hier verblijven ze enige tijd alvorens terug te keren in de hoofdstroom. Voordat een deeltje aan de bovenzijde de internal verlaat is het een aantal keren gevangen geweest door de schotten.

Teneinde vast te stellen of de deeltjes worden uitgeslingerd en om de werking van de internal te demonstreren, is een high speed film gemaakt van de stroming van de vliegaseeëntjes in een model van één kanaal van de 'freeboard internal' (fig. 8). De beelden uit de geven slechts een deel van de hoogte van het model weer. Tijdens de proef was er een verticale opgaande luchtstroom door het model. Aan de instroomzijde van het model is op een zeker tijdstip een hoeveelheid vliegaseeëntjes aan de luchtstroom toegevoegd.



Figuur 7
Zijaanzicht van een experimentele wervelbedketel (links) en een detail van het 'freeboard internal' (rechts)



Figuur 8

Van links boven naar rechts onder. beeldreeks uit high speed film (4000 b/s), opgenomen met behulp van een model van het 'freeboard internal' voor de wervelbedketel

Het eerste beeld (links boven) is gemaakt op het moment dat de eerste vliegascdeeltjes zichtbaar werden. Duidelijk is een zwarte streep te zien, die vanaf de punt van de 'neus' onder een hoek van circa 60° omhoog gaat. Dit betekent dat de deeltjes inderdaad worden uitgeslingerd en langs de onderzijde van de neus omhoog gaan en daarna in het wervelgebied onder het schot boven deze neus terecht komen. Op dit beeld is ook te zien dat op dat moment nog geen deeltjes aanwezig zijn bij de neus en het schot op het bovenste deel van de foto.

Enige beelden later (fig 8 rechts boven) is er eveneens een stroming te zien van deeltjes vanuit het wervelgebied onder het onderste schot naar de hoofdstroom. Dit blijkt uit de zwarte veeg, die begint bij de onderrand van het onderste schot en vandaar onder een hoek van 45° schuin omhoog gaat. Op dat moment is er ook een flinke stroming van deeltjes vanuit de hoofdstroom naar het wervelgebied onder het bovenste schot.

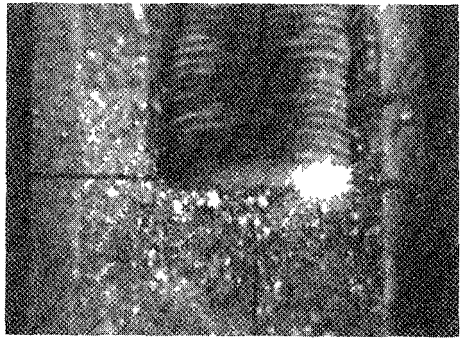
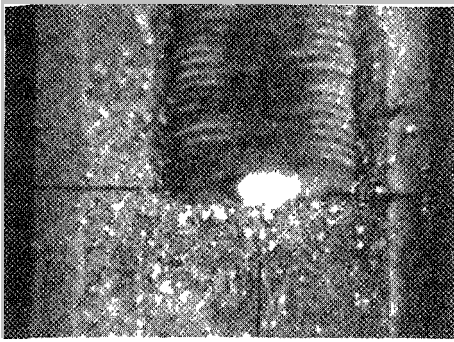
De volgende beelden laten zien dat de hoeveelheid vliegascdeeltjes in de beide wer-

velgebieden geleidelijk toeneemt. Tevens is daarop te zien dat de deeltjesconcentratie in deze gebieden veel hoger is dan in de hoofdstroom (laatste beeld), de wervelgebieden zijn veel donkerder dan de hoofdstroom. Daar de snelheden in de wervelgebieden relatief laag zijn, zijn de verblijftijden van de deeltjes er relatief lang.

Materiaalbewerking met de laser

Het Centrum voor Materiaalbewerking met Lasers van TNO in Apeldoorn (CML-TNO) gebruikt ultrasnelle fotografie om de interactie van de laserbundel met een werkstuk te bestuderen. Laserbundels zijn zeer geschikt om materiaal op fijnzinnige wijze te bewerken. Deze vormen van materiaalbewerking wordt toegepast voor o.a. snijden, lassen, boren, graveren, textureren, harden en cladden. Het grote voordeel van de techniek is de toepassing op materialen die met andere methoden moeilijk te bewerken zijn, zoals bijvoorbeeld keramiek. Verder is de laserbewerking flexibel door de grote hanteerbaarheid van de lichtbundel en 'schoon' doordat geen chemikaliën gebruikt worden.

Het voorbeeld betreft het laser 'cladden'. Dit wordt toegepast als op een werkstuk plaatselijk een laag moet worden aangebracht, bijvoorbeeld om de slijtage-eigenschappen te verbeteren. In dit geval gaat het om een laag van het materiaal Metco 15F, voornamelijk bestaande uit nikkel en chroom, op een stalen werkstuk (fig. 9). De laag wordt in de vorm van een pasta op het werkstuk aangebracht en met de laserbundel ingesmolten door deze zig-zag over het oppervlak te bewegen. De spotgrootte van de bundel op het werkstuk is daarbij 2 mm en de breedte van de zig/zag 8 mm. De voortgangssnelheid van de bundel is zo laag, dat de banen van de zig/zag elkaar voor driekwart overlappen. Op de plaats waar de bundel het werkstuk treft, licht het materiaal sterk op. Dit is de plasmaplum die ontstaat tengevolge van de interactie van het laserlicht met gesmolten en ver-



Figuur 9

Het zig-zag insmelten met de laserbundel van een poedervormige metaallaag op een staaloppervlak. Het smeltbad is tijdens de beweging van de laserbundel nauwelijks groter dan de 'spot' van de bundel. Bij het keerpunt (rechts) is de bundel even groot als het smeltbad.

dampst materiaal. Het smeltbad is nauwelijks groter dan de spotgrootte van de bundel. Bij de omkeerpunten van de zig/zag is het smeltbad zelfs in geheel niet groter dan de spot.

Op de eigenlijke film van het proces is goed te zien, dat het insmelten van het pasta gepaard gaat met sterke reacties en grote turbulentie in het smeltbad. Regelmatig schieten gloeiende deeltjes weg. De lasrupjes van de cladlaag zien er schoon uit; er is nauwelijks sprake van slakvorming. De techniek van het lasercladden lijkt dan ook zeer geschikt voor industriële toepassing.

De auteur dankt ing. J.W. Pohlmann (MT-TNO) en ir. H.B. Zeedijk (MI-TNO) voor hun tekstbijdragen 'Twee-fasen stromingsonderzoek' en 'Materiaalbewerking met de laser'.