

# Infrarood gaswolkscanner voor het meten en afbeelden van de ruimtelijke verdeling van gassen

W.M. ter Kuile, TNO - Instituut voor Milieuwetenschappen  
Postbus 6011, 2600 JA Delft

## Samenvatting

De infrarood gaswolkscanner (IGC-scanner) werd ontwikkeld met het doel om de verspreiding van specifieke gascomponenten in de werkomgeving snel in beeld te kunnen brengen, zodat bij controlemetingen voor de gezondheid van de werkomgeving zonnodig ook de informatie voor het verbeteren van de situatie beschikbaar is. De IGC-scanner vormt een compleet elektro-optisch systeem, van infrarood stralingsbron via scan- en detectie-optiek tot elektronische beeldvorming en beeldbewerking, resulterend in een afbeelding van de ruimtelijke verdeling van de hoeveelheid gas die zich tussen de scanner en het reflectiescherm bevindt. De goede werking en het eenvoudige gebruik van de IGC-scanner berusten ondermeer op het bekende meetprincipe van differentiele infrarood absorptie spectrometrie (DIAS)

Nadat het meetprincipe is aangegeven worden het optische systeem en de signaalverwerking besproken. De retro-reflectie schermen blijken voor het gebruik in praktijk situaties opmerkelijk gunstige eigenschappen te bezitten, zoals flexibele inzetbaarheid en bruikbaarheid over een breed spectraalgebied. Met de gebruikte configuratie is het mogelijk gebleken om gassen te detecteren met concentraties onder 10 ppm, over een weglengte van 10 m.

Omdat de output van de scanner uit beelden bestaat wordt aangegeven hoe deze geïnterpreteerd moeten worden. Tot besluit wordt iets over de huidige stand van zaken aangegeven en mogelijke technische verbeteringen.

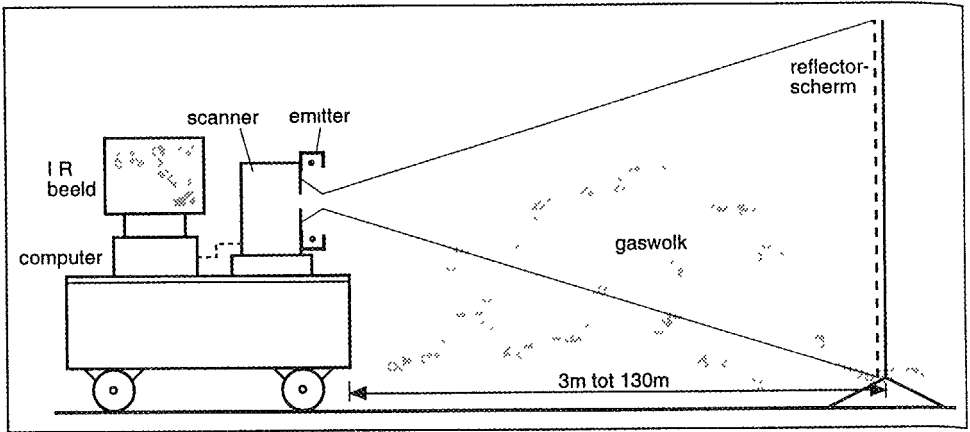
## Inleiding

De 'Infrarood gaswolkscanner', of IGC-scanner (figuur 1), werd in 1985 bij TNO ontwikkeld met het doel om specifieke gascomponenten in de werkomgeving snel kwantitatief te kunnen meten en de verspreiding ervan in beeld te brengen, zodat bij controlemetingen voor de gezondheid van de werkomgeving zonnodig ook informatie voor het verbeteren van de situatie beschikbaar is.

In [1] en [2] worden toepassingen van de scanner in de praktijk beschreven, terwijl hier het meetprincipe en enkele technische aspecten besproken worden. Als optisch systeem is interessant dat de goede werking ervan berust op enkele minder bekende optische eigenschappen van schermen van retro-reflectoren. Als resultaat worden de kwantitatieve meetgegevens van de hoeveelheid gas tussen de scanner en een reflectie scherm in de vorm van beelden gepresenteerd. De interpretatie van deze beelden behoeft enige toelichting.

Uit de praktijk van de arbeidshygiëne zijn aan gasconcentratie metingen in bedrijven een aantal eisen gesteld, waaraan het ontwerp van de IGC-scanner moet voldoen. Deze eisen zijn:

- De detectie limiet moet voor een aantal veel voorkomende gassen lager zijn dan de MAC-waarde (ca. 10 ppm).
- De meetduur voor het maken van een afbeelding van de gasverdeling moet korter zijn dan ca. 1 seconde.
- Het gezichtsveld van de scanner moet



Figuur 1

Mobiele opstelling van de IGC-scanner

De parabolische infrarood stralers bevinden zich vlak onder en boven de ingangsopening van de scanner. Tegenover de scanner, achterin de ruimte waarin het gas gemeten wordt, is een retro-reflectorscherm opgesteld. Een deel van de gereflecteerde straling valt tussen de twee emitters in de scanner, die de straling op een ingestelde golflengte detecteert en hiervan een videosignaal maakt. Dit signaal wordt naar de computer gestuurd, die het absorptie-beeld van het gas berekend en op de monitor zichtbaar maakt.

groot genoeg zijn om in de afbeelding ook herkenbare objecten op de werkplek te tonen. Daarvoor is een scanhoek van 10°vert. en 20°horiz. redelijk.

- De werkafstand moet groot genoeg zijn om de scanner buiten de gevaarzone van brandbare of explosieve gassen op een werkplek te kunnen gebruiken.
- De mobiliteit van de scanner moet zo goed zijn, dat het gebruik ervan in de meeste werksituaties in bedrijven mogelijk is.

In principe kan de IGC scanner gebruikt worden voor alle gassen met voldoende sterke absorptie in het infraroodgebied van 3 - 14 μm. De werking van de IGC-scanner wordt hier globaal beschreven. Een meer gedetailleerde beschrijving wordt elders gegeven [3,4].

**Meetprincipe**

Met de IGC scanner kan de ruimtelijke verdeling van een gas kwantitatief gemeten

worden. De werking ervan berust op 'differentiële infrarood absorptie spectrometrie' (DIAS) [5]. Dit levert in elk beeldpunt een waarde voor de gemiddelde concentratie over de afstand (tussen 3 m en 130 m) van de scanner tot het retro-reflectorscherm. Zo wordt een beeld gevormd van de verdeling van de gasconcentratie loodrecht op de kijkrichting.

De DIAS methode die hier voor 'open pad' gasmetingen gebruikt wordt, is te vergelijken met gewone infrarood absorptie spectrometrie bij een vaste golflengte. Beide methoden berusten op de wet van Lambert-Beer [6], waarbij de verhouding wordt bepaald tussen een intensiteitsmeting met het absorberende gas en een referentiemeting voor het optische systeem. Bij gewone IR-absorptie spectrometrie wordt de referentiemeting eenmalig uitgevoerd door de meetcel waarin het optische systeem zich bevindt te evacueren. Bij de DIAS methode voor 'open pad' metingen is er dus geen gascel die geëvacueerd kan worden.

voor referentie metingen. Daarom moeten er voor het bepalen van de absorptie door een gas steeds twee metingen uitgevoerd worden bij verschillende golflengten. Namelijk een meting op de karakteristieke absorptie golflengte van het gas en een referentiemeting op een golflengte waar het gas niet absorbeert. Opdat bij gebruik van twee verschillende golflengten toch aan de wet van Lambert-Beer voldaan wordt, moeten vervolgens alle golflengte afhankelijke eigenschappen van het optische systeem (zoals bijvoorbeeld de intensiteit van de IR-straler, reflectie van spiegels, refractie en absorptie van lenzen en gevoeligheid van de detector) gecompenseerd worden. Dat is mogelijk door de gemeten absorptie te vermenigvuldigen met een golflengte correctiefactor die door ijking in het laboratorium bepaald kan worden.

### Zwarting van beeldelementen, hoeveelheid gas en meetvolume.

Een beeld van de IGC-scanner is opgebouwd uit  $36 \times 108$  beeldelementen (pixels). De zwarting (grijswaarde) van elk pixel is een maat voor de hoeveelheid gas in een ruimtehoek van  $0,3^\circ \times 0,3^\circ$  tussen scanner en retro-reflectie scherm, in een richting die door de positie van het pixel in het beeld bepaald is. Gedurende de korte meettijd ( $40 \mu\text{s}$ ) kan het in een pixel afgebeelde meetvolume worden opgevat als een gascel met een constante hoeveelheid gas. De gemeten hoeveelheid gas wordt uitgedrukt in eenheden van [ppm m] zijnde het product van de gemiddelde concentratie en de afstand tussen scanner en reflector.

### Werking van onderdelen van de scanner

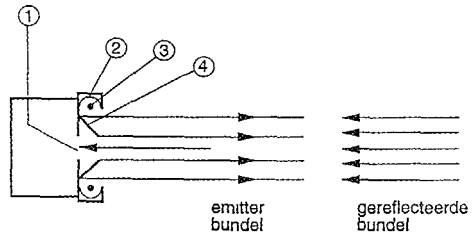
Het prototype van de IGC-scanner is met de computer op een wagentje (zie figuur 1) geplaatst om de vereiste mobiliteit te verkrijgen. De afmetingen zijn ongeveer  $60 \times 75 \times 60$  cm en hij weegt ca. 20 kg.

Het hele meetsysteem bestaat, in volgorde waarin ze doorlopen worden, uit de volgende delen:

- twee infrarood stralers
  - retro-reflectie scherm
  - scanner optiek
  - monochromator
  - infrarood detector (gekoeld met  $\text{liq. N}_2$ )
  - voorversterker
  - video synchronisatie
  - analoog-digitaal conversie
  - computer voor beeldverwerking en besturing
- } optisch systeem  
} eelec-  
} tronisch systeem

### \* Infrarood stralers

Twee thermische IR stralers (electr. verm.  $\cdot 350$  W; temp. :  $1000$  K) waarvan de keramische staven zich in parabolisch cilindrische reflectoren aan weerskanten van de intree opening van de scanner bevinden (figuur 2)



Figuur 2.

Opstelling van de infrarood stralers onder en boven de ingang van de scanner. Deze zijn beschermd voor temperatuurfluctuaties door convectiestromingen van de omgevingslucht langs de stralings elementen

1. Ingang van de scanner
2. Paraboolspiegel
3. Infrarood stralings element
4. Vlakke spiegel

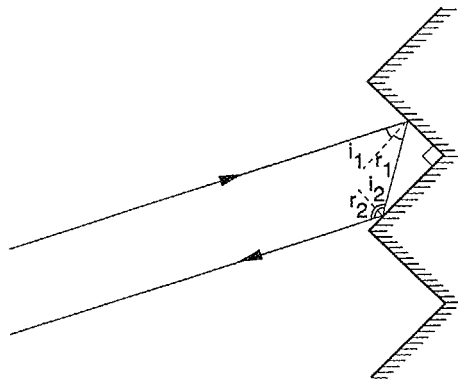
De staven produceren een IR-stralingspectrum dat goed overeenkomt met het theoretische spectrum van een zwarte straler (wet van Planck). De temperatuur van de stralingselementen is bijzonder gevoelig voor afkoeling door tocht of convectiestromingen in de omringende lucht. Daarom zijn ze zo aangebracht dat snelle fluctuaties in de uitgestraalde intensiteit als

gevolg van convectieve luchtstromingen langs de stralers worden voorkomen. Hierdoor is een bron van ruis uitgeschakeld, zodat een betere detectiegrens bereikt wordt.

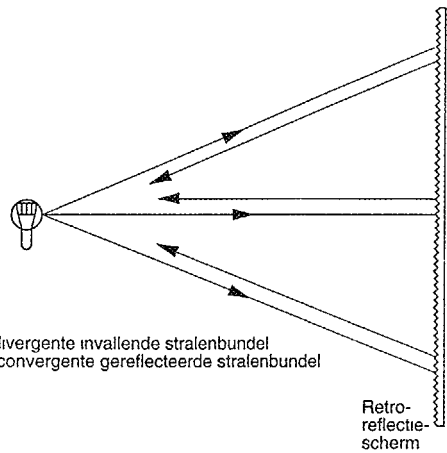
**\* Retro-reflectie schermen**

Het retro-reflectie scherm dat tegenover de straler wordt geplaatst, wordt ter plekke samengesteld uit vlakke rechthoekige panelen van  $0,5 \times 1,0 \text{ m}^2$ . Het aantal panelen en de afstand tussen de scanner en het retro-reflectie scherm, worden gekozen in overeenstemming met de omvang van de te onderzoeken werksituatie

Elk paneel bestaat uit een groot aantal retro-reflector elementen met een afmeting van ca 3 mm die, anders dan normale vlakke spiegels, de invallende straling terugkaatsen in de richting waar hij vandaan komt (Figuur 3). Daardoor wordt de divergerende stralenbundel van van een IR straler als een convergerende bundel in de richting van de straler teruggekaatsd (Figuur 4).



**Figuur 3**  
Tweedimensionaal model van retro reflector De invallende straal wordt terug gekeatsd in de richting waar hij vandaan komt. Want de hoek tussen de reflecterende vlakken is  $90^\circ$ , zodat  $i_1 + i_2 = 90^\circ$  Dan is de totale hoek tussen invallende en gereflecteerde straal precies  $180^\circ$

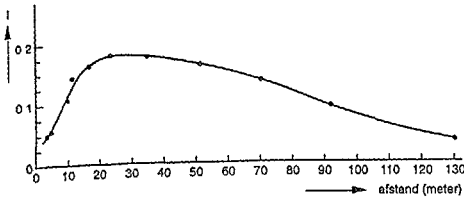


**Figuur 4.**  
Door een scherm van kleine retroreflectoren wordt de divergerende invallende lichtbundel als een convergerende bundel naar de bron gereflecteerd

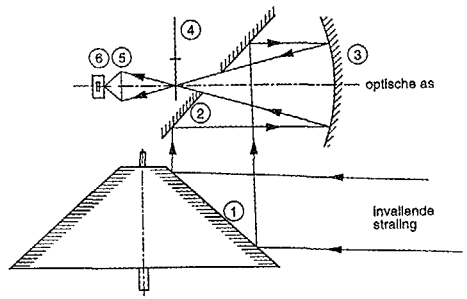
Deze focuserende eigenschap van een scherm, dat is opgebouwd uit een groot aantal kleine retro-reflectoren, maakt efficiënte benutting van de IR-straling mogelijk. Zodoende kan de IGC-scanner met gebruik van een thermische stralingbron hoeveelheden gas kan meten, waarvoor andere gelijksoortige scanners, die zonder retro-reflectiescherm werken, een laser als stralingsbron nodig hebben. De hiervoor in aanmerking komende 'tunable diode laser' (TDL) is zelf duurder dan de complete IGC-scanner en maakt deze bovendien minder flexibel door het kleine golflengtebereik van de TDL. De optische eigenschappen van retro-reflectie schermen hebben voor het gebruik van de IGC-scanner in praktijk-situaties nog andere, opmerkelijk gunstige eigenschappen, zoals bijvoorbeeld:

- a. De schermen hoeven niet, zoals normale spiegels, nauwkeurig met de scanner uitgelijnd te worden, omdat retro-reflectie weinig afhankelijk is van de oriëntatie van de schermen
- b. Door de genoemde focuserende eigenschap is de werking van de scan-

ner weinig afhankelijk van de afstand tot het scherm. Zodoende is met de IGC-scanner elke afstand tussen 3 en 130 m te gebruiken, met een optimum bij 25 m (Figuur 5).



Figuur 5  
Gedetecteerde infrarood intensiteit (I) als functie van de afstand (x) tussen scanner en retro-reflectie scherm. Hieruit blijkt dat de optimale afstand ligt tussen 25 m en 30 m.



Figuur 6  
Schema van de stralengang door het optische systeem van de scanner

- 1 Horizontale lijnscanspiegel, is roterende afgeknotte pyramide
- 2 Verticale beeldscanspiegel, draait heen en terug om de optische as
- 3 Parabolische spiegel
- 4 Gofflengte filterwiel
- 5 Germanium lens
- 6 Met  $N_2$  gekoelde HgCdTe detector

c. Een andere waardevolle eigenschap geldt bij transmissie door turbulente lucht boven warmtebronnen (bijv. ovens, lasbranders, sterke lichtbronnen, etc.) Normaal treedt hierbij vermindering van de signaalsterkte op vanwege de variabele diffractie aan dichtheidsverschillen in de lucht tussen emitter en detector. Bij gebruik van retro-reflectie schermen wordt de signaalsterkte niet door diffractie aan dichtheidsverschillen in de lucht beïnvloed, omdat de straling langs vrijwel dezelfde weg heen en terug gaat tussen scanner en reflectie scherm.

\* **Optisch systeem**

De stralengang door het optische systeem van de scanner is geschetst in figuur 6. De invallende straling is het deel van de door het retro-reflectie scherm in de richting van de stralers teruggekaatste straling die niet precies op de stralers terugkomt, maar tussen de stralers de scanningang binnentreedt (zie figuur 1 en 2). Deze straling wordt opgevangen door de scanspiegels

(1) een roterende vierzijdige pyramidespiegel voor de snelle horizontale lijnscan (80 lijnen/s) en een vlakke wiebelspiegel (2) voor de verticale beeldscan (1 beeld/s). De gescande straling wordt door een paraboolspiegel (3) gefocuseerd op een infrarood filterwiel (4), dat voor de golflengteselectie gebruikt wordt. De door het filterwiel doorgelaten golflengte wordt bepaald door de hoek waarover het filter gedraaid is, die met de computer ingesteld kan worden tussen 2,5 en 14,5  $\mu m$ . Een gebied van ca 1 mm<sup>2</sup> wordt door een germanium lens (5) afgebeeld op een met vloeibare stikstof gekoelde HCT-detector (6). Dit levert een spectrale resolutie ( $\Delta\lambda/\lambda$ ) beter dan 2% voor het optische systeem dat als geheel geoptimaliseerd is voor het golflengtebereik tussen 3 en 14  $\mu m$ .

Het signaal van de gedetecteerde straling wordt samen met een pixel synchronisatie signaal naar de computer gestuurd, die daaruit een beeld van de signaalverzwakking berekent. Door twee van deze beelden bij verschillende golflengte, namelijk op de absorptielijn van het gas en op een

niet-absorberende lijn, op elkaar te delen wordt een beeld van de gasverdeling verkregen. Gassen waarvoor de IGC-scanner is geijkt worden met een gecalibreerde grijswaarden schaal getoond

### \* **Signaalverwerking**

Het continue signaal van de versterker van de HCT-detector wordt samen met een het pixel synchronisatie signaal, naar een analoog/digitaal omzetter in de computer gestuurd. Het synchronisatie signaal wordt opgenomen van een triggerschijf die aan de roterende spiegel is bevestigd en waarin voor elk pixel een gaatje zit. Dat wil zeggen 108 gaatjes over een hoek van 30° bij elk van de vier spiegelvlakken. Midden tussen elk van de vier series pixel-trigger-gaatjes zijn drie triggergaatjes aangebracht waarbij de roterende spiegel is gericht op twee dikke, zwarte aluminium blokken die aan weerskanten van de intreeopening zijn aangebracht en een constant referentiesignaal leveren. Doordat het pixel synchronisatie signaal van de stand van de roterende lijnscan spiegel is afgeleid (per lijn 108 posities over 30 graden, ofwel 5 mrad/pixel), zullen overeenkomstige pixels in de twee beelden met verschillende golflengte, nauwkeurig met elkaar samen vallen. Dat is belangrijk omdat de hoeveelheid gas wordt berekend uit de verhouding tussen de overeenkomstige pixels in die beelden

### \* **Ruisonderdrukking**

De ondergrens voor de detectie van een IR absorberend gas wordt bepaald door de signaal/ruis verhouding (SNR). Daarom is het van belang de ruis te minimaliseren. Dit is op vier verschillende manieren aangepakt

- nauwkeurige overeenstemming van de pixelcoördinaten in de twee beelden bij absorptie en referentie golflengte
- stabilisatie van de oppervlakte temperatuur van de IR stralers
- vermindering van de laagfrequente ruis door aan het begin en eind van elke lijnscan een constant referentie signaal te

meten op een zwart aluminium blok en de hele lijnscan voor het verschil ertussen te corrigeren

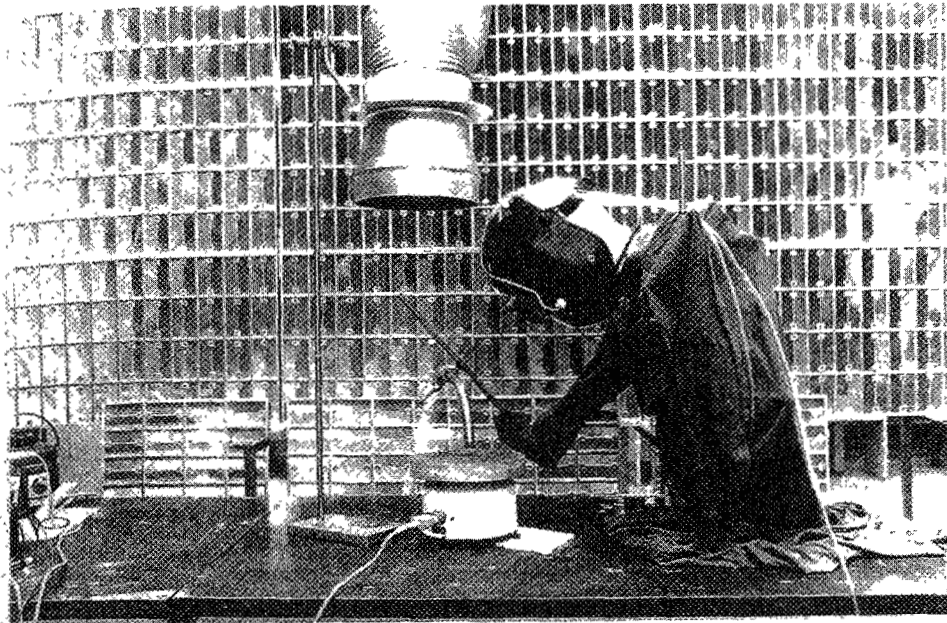
- vermindering van de hoogfrequente ruis door de pixelwaarden te middelen over minstens vier opeenvolgende beelden

### \* **Calibratie en gebruik van de scanner**

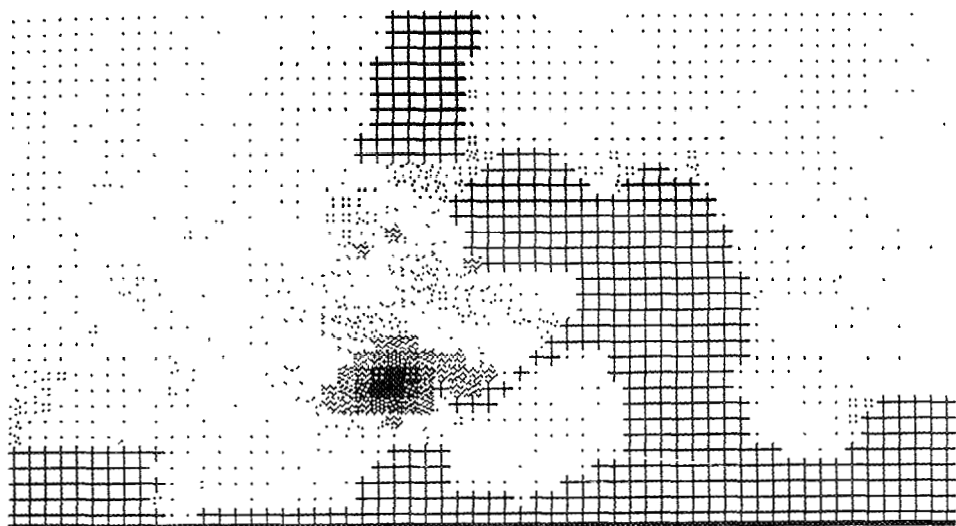
Voordat een IGC-meting van de gasverdeling op een werkplek in een bedrijf kan beginnen, moet de IGC-scanner voor dat gas geijkt worden. Daartoe wordt met de IGC-scanner een spectrum van het te meten gas opgenomen en de golflengten voor de absorptie en de referentie meting gekozen. Vervolgens wordt voor beide golflengten de transmissie van het gas over een bekende, constante weglengte gemeten als functie van de gasconcentratie. Het resultaat wordt in de computer opgeslagen en de metingen in de werkomgeving kunnen geheel automatisch uitgevoerd worden. Indien wenselijk kan dit ook semi-continu, of onder besturing van een aantal computer menu's. Met het oog op de overzichtelijkheid werd het computer menu in drie blokken opgesplitst: het initialisatie menu, het meet menu en het beeldbewerking menu. In verband met kwaliteits bewaking worden de gegevens van een werkplekmeting direct als header van het beeldfile samen met het beeld opgeslagen. Deze header bevat specifieke informatie over het beeld, zoals: datum, tijd, omschrijving van de werkplek en instelling van de IGC-scanner.

### **Beeld presentatie en interpretatie**

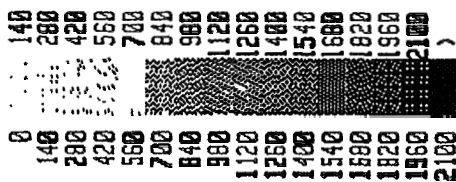
In figuur 7a wordt een testopstelling getoond voor het meten van de verspreiding van gassen die vrijkomen bij het lassen. Om de interpretatie van het grote aantal gegevens sneller en eenvoudiger te maken worden de meetresultaten in beeldvorm weergegeven (figuur 7b). De grijswaarden van de pixels in een beeld zijn dan niet representatief voor concentraties, maar voor de hoeveelheid gas (conc. x weglengte in ppm.m) die zich op het ogenblik van de meting tussen scanner en reflectorscherm



Figuur 7a Foto van de testopstelling voor ventilatie in de werkomgeving van lassers



Figuur 7b. Scannerbeeld van de lasopstelling. Onder de figuur is een grijswaardeverdeling afgebeeld die voor elke grijswaarde de hoeveelheid gas in (ppm m) geeft. Niet reflecterende objecten die voor het scherm staan worden als een patroon van kruisjes afgebeeld. Het scannerbeeld toont de verspreiding van  $N_2O$  gas.



bevindt In de pixels van objecten die zich tussen scanner en reflectorscherm bevinden worden kruisjes gezet. Op de absorptiegolflengte van het gas kan geen onderscheid gemaakt worden tussen niet reflecterende objecten en hoge gasconcentraties, omdat beide een laag signaal leveren. Daarom worden objecten van gassen onderscheiden door hun lage signaal op de referentie golflengte.

Voor het afbeelden van de ruimtelijke verdeling van een gas worden door de IGC-scanner beelden gebruikt met een lage resolutie 108 x 36 pixels met 16 grijswaarden. Daarvan wordt een gebied van 60 x 36 pixels op de monitor afgebeeld. Deze hoeveelheid data kan voor het onderzoek naar de werksituatie snel genoeg en voldoende gevoelig opgenomen worden, om ter plekke tot een beeld verwerkt te worden (met de technologie van 1985). Bovendien zou een hogere resolutie gemakkelijker tot een schijnbare nauwkeurigheid kunnen leiden. Voor toxische gassen met een lage IR absorptie kan de gevoeligheid van de IGC-scanner worden verbeterd ten koste van de meetduur.

#### Voorbeeld

De gasconcentratie in de ademzone van een persoon kan op verschillende manieren worden afgeleid uit de, in een of meer IGC beelden, aangegeven hoeveelheid gas tussen scanner en retro-scherm:

- a. In het geval van een uniforme gasverdeling op ademhoogte wordt de gasconcentratie op ademhoogte berekend door de gemeten hoeveelheid (in ppm m) te delen door de afstand (in m) tussen scanner en reflectorscherm en te integreren over het deel van de ruimte waaruit de lucht ingeademd wordt.
- b. Als in het IGC beeld een gaswolk uit een zichtbare puntbron komt, zonder achtergrond concentratie, zoals in de lasopstelling in figuur 7, dan kan de concentratie in de ademzone van de lasser berekend worden door de gemeten hoeveelheid gas te delen door de optische weglengte in de wolk. In een

stationaire situatie kan de optische weglengte geschat worden door een tweede opname met de IGC-scanner te maken vanuit een andere richting. Soms, als de richting en snelheid van de luchtbeweging bekend zijn, is het ook mogelijk om uit de tweedimensionale vorm de derde dimensie ruw te schatten, zodat een gemiddelde concentratie in de wolk over de geschatte afstand berekend kan worden.

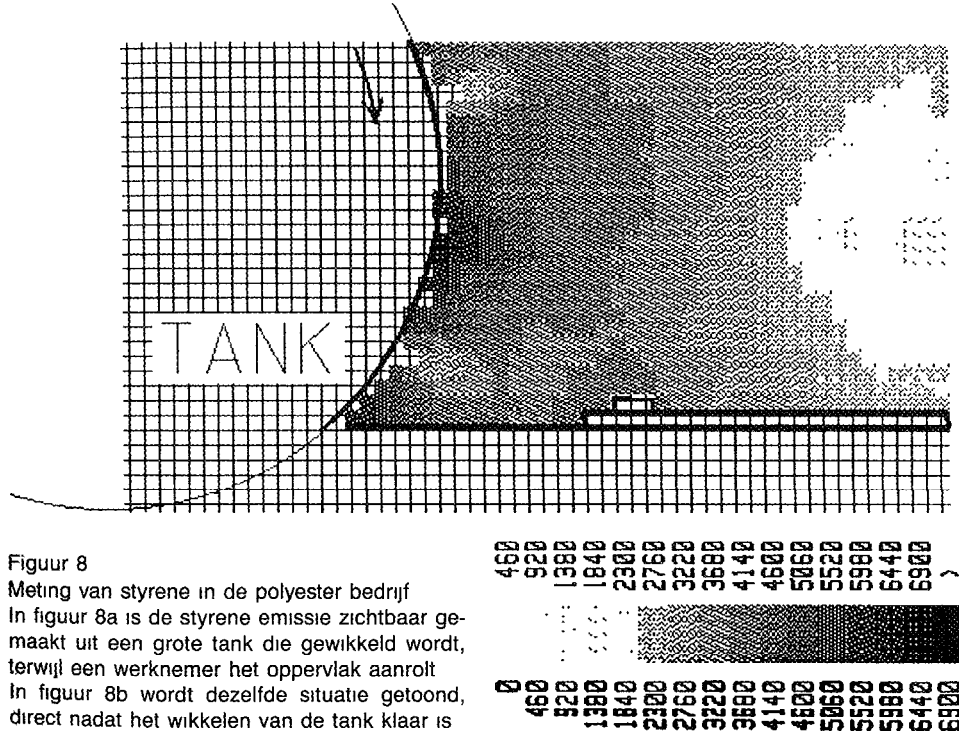
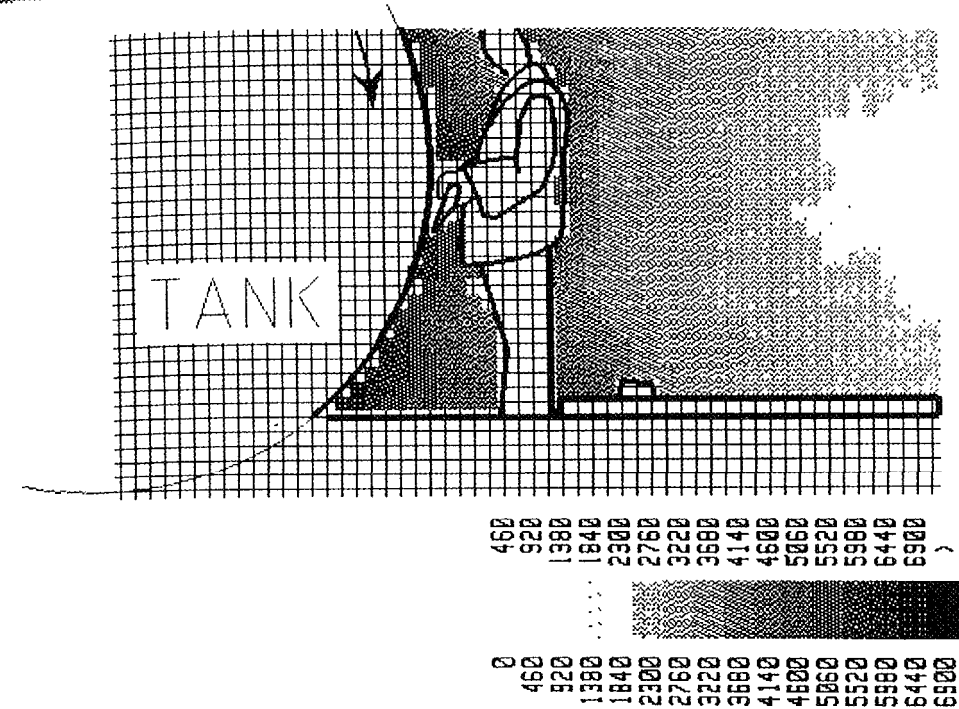
- c. Als het beeld van de scanner een gaswolk laat zien, die van een oppervlakte bron komt, met een hoge achtergrond concentratie (zoals in figuur 8 B, C) dan kan de optische weg tussen scanner en reflector in twee secties verdeeld worden met verschillende concentratie. Namelijk een sectie langs oppervlaktebron over de lengte ervan en de rest van de optische weg tussen scanner en reflectorscherm. In de eerste sectie bevindt zich de onbekende concentratie en in de tweede een achtergrond concentratie. Als de achtergrond ook te bepalen is buiten de invloedssfeer van de bron, dan kan de gemiddelde concentratie langs de lichtweg voor de bron berekend worden uit de gemeten hoeveelheid gas.

#### Stand van zaken

Vanwege het gunstige resultaat van de IGC-scanner bij metingen beschreven in [1] en [2] wordt nu bij TNO gewerkt aan een projectvoorstel om het prototype verder te ontwikkelen tot een in bredere kring hanteerbaar apparaat. Daarbij wordt gestreeft naar een kleiner en lichter apparaat, dat de beelden zo snel opneemt, dat de fixatie van mensen in de werksituatie minder dan 1 seconde hoeft te duren. Hierbij blijven dezelfde eisen gelden voor de detectielimiet.

Een paar mogelijke uitbreidingen van de scanner die voor het werkplek onderzoek gevraagd worden zijn in het voorgestelde onderzoek nog niet betrokken. Daarbij gaat het erom het apparaat ook geschikt te maken voor het meten van deeltjes concentraties en om de objecten in het beeld van de





Figuur 8  
Meting van styrene in de polyester bedrijf  
In figuur 8a is de styrene emissie zichtbaar gemaakt uit een grote tank die gewikkeld wordt, terwijl een werknemer het oppervlak aanrolt  
In figuur 8b wordt dezelfde situatie getoond, direct nadat het wikkelen van de tank klaar is

scanner met hoge resolutie in wit licht op te nemen. Beide uitbreidingen lijken ons goed realiseerbaar. Tot op heden is er echter nog geen producent voor het apparaat gevonden. TNO is vanzelfsprekend bereid om de commercialisatie van de scanner met geïnteresseerde ondernemers te bespreken.

### **Verantwoording**

De ontwikkeling van de gaswolks scanner werd geïnitieerd door Peter Meyer, mogelijk gemaakt door TNO Beleidsruimte en uitgevoerd door Loek Drenth en Peter Zandveldt, begeleid door A. de Jong en Willem M. ter Kuile. Aan de beproeving in de praktijk heeft Bas Knoll een waardevolle bijdrage geleverd.

### **Literatuur**

[1] Kuile, W.M. ter, B. Knoll and P.G.M Hesselink, Measurement and imaging of gases in industrial environments with the infrared gas cloud scanner, Appl. Occup. Environm. Hyg., 8, p. 46-54, jan 1993.

- [2] Kuile, W.M. ter, B. Knoll and P.G.M Hesselink, Meting en afbeelding van de ruimtelijke verdeling van gassen op werkplekken in bedrijven met behulp van de infrarood gaswolks scanner, te publiceren in Tijdschrift voor toegepaste Arbeidwetenschap, april 1994
- [3] Kuile, W.M. ter, Method and device for determining the spatial distribution of a gas European Patent Application Nr 86202126.8-2204
- [4] Kuile, W.M. ter, Gas cloud scanner, TNO publication P 87/70 IMW- TNO, Delft (NL), 1987
- [5] Beyer, R.L., Infrared differential absorption for atmospheric pollutant detection, ML Report No. 2357, Microwave lab, Stanford University, Stanford, California, 1974.
- [6] Dubrowski J.A., Coatings and Filters, in: Handbook of Optics, sec.8, pp. 8-12 to 8-13, Mc Graw Hill, New York 1978 . ISBN 0-07-0476710-8.