

# Schokgolf visualisatie met behulp van een dubbele referentiestraal fase gestapte holografische interferometer

S.M. Booij<sup>a,b</sup>, L.H.J. Absil<sup>a</sup>, J.J.M. Braat<sup>b</sup>, H. van Brug<sup>b</sup> en A.J.A. Bruinsma<sup>c</sup>

a) TNO-PML, Postbus 45, 2280 AA Rijswijk

b) vakgroep Optica, Technische Natuurkunde, TUDelft, Postbus 5046, 2600 AD Delft

c) TNO-TPD, Postbus 155, 2600 AD Delft

## Inleiding

Bij de research groep 'Explosie Preventie en Bescherming' van het Prins Maurits Laboratorium van TNO wordt onderzoek gedaan naar explosies; hoe ze voorkomen kunnen worden en hoe mensen en gebouwen er het beste tegen beschermd kunnen worden.

Iedere explosie wordt gekarakteriseerd door het plotseling vrijkomen van een grote hoeveelheid energie, waardoor een drukgolf wordt gevormd. Op grotere afstand van een explosie kan deze drukgolf nog veel schade aan gebouwen veroorzaken. Andere explosie effecten zoals rondvliegende fragmenten en brokstukken, hittestraling en een zich door de grond voortplantende schok, zullen op grotere afstand van minder groot belang zijn. Deze explosie effecten zijn in figuur 1 weergegeven.

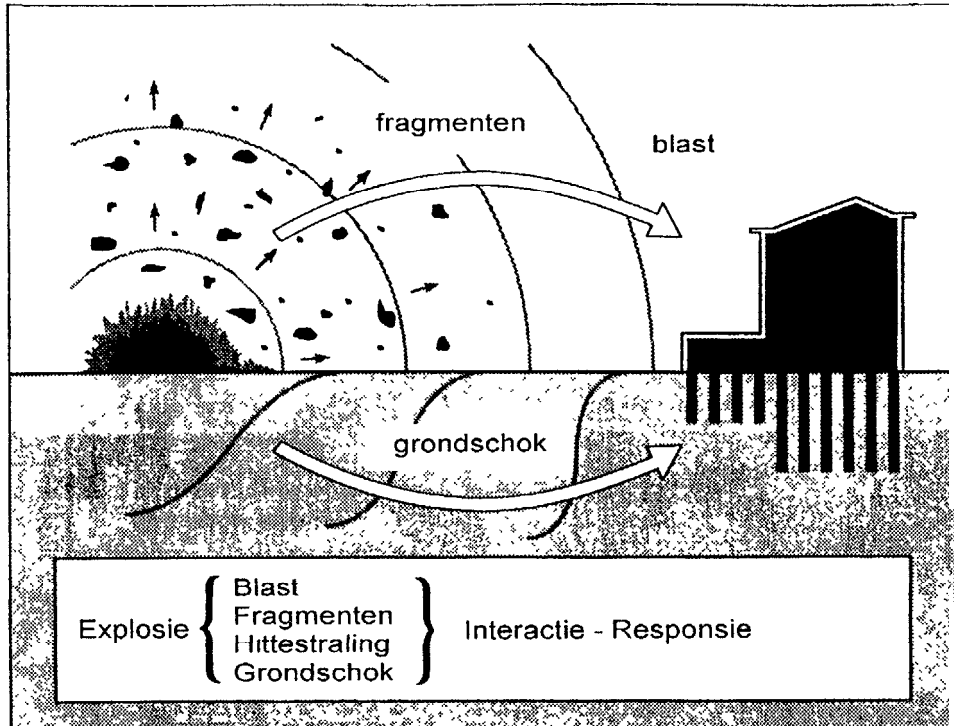
De schade aan gebouwen is afhankelijk van de grootte en de duur van de schokgolf. Om deze afhankelijkheid te onderzoeken kunnen experimenten op schaal uitgevoerd worden vanwege Hopkinsons schalingswet. Deze zegt namelijk dat de totale drukbelasting en de verdeling van de druk veroorzaakt door een drukgolf met een bepaalde overdruk en positieve fase duur op een volle schaal gebouw (afmeting H) hetzelfde zal zijn als het effect van een

druk-golf met dezelfde overdruk en een geschaalde positieve fase duur met de geometrische schaalfactor  $\lambda = h/H$  op een schaalmodel (afmeting h). De begrippen piek overdruk en positieve fase duur worden in figuur 2 verduidelijkt.

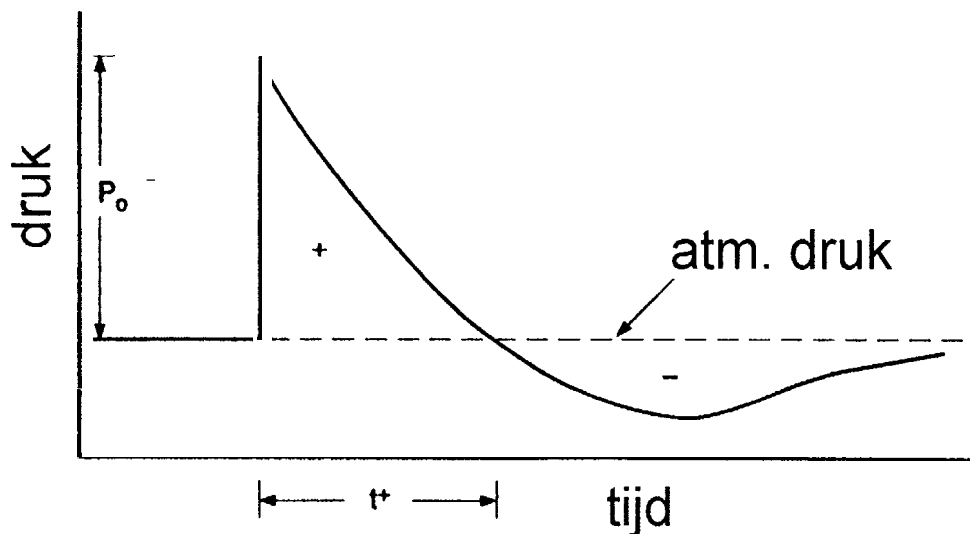
## De schokgolf simulator

Het PML beschikt over een 23 meter lange schokgolf simulator waarin een vlakke schokgolf opgewekt kan worden met variabele piek overdruk en duur, tot een overdruk van 1.1 bar in de optische test sectie. In deze testsectie kunnen schaalmodellen van gebouwen geplaatst worden. In figuur 3 is een schematisch overzicht van de simulator te zien. De simulator werkt in principe als volgt: lucht wordt gecomprimeerd in de driver sectie, als de gewenste druk bereikt is wordt het folie dat de driver sectie scheidt van de rest van de buis doorgebrand. Doordat de lucht nu de kans krijgt te expanderen wordt een schokgolf gevormd die zich in de richting van het optische venster gaat bewegen, waar de schaalmodellen zich bevinden.

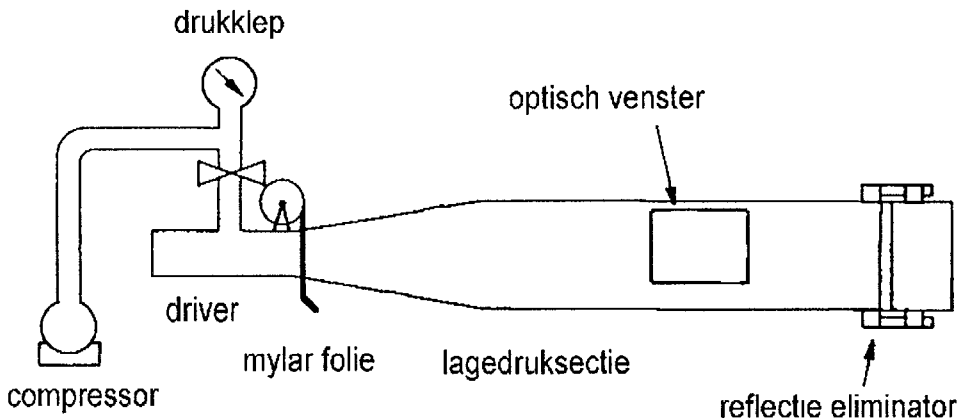
Het drukprofiel dat ontstaat door de interactie van de schokgolf met de objecten die in de buis zijn geplaatst, kan op verschillende manieren worden vastgelegd. De druk kan direct gemeten worden met behulp van drukopnemers, maar deze beïn-



**Figuur 1**  
De verschillende explosie effecten op gebouwen in de omgeving



**Figuur 2**  
Een typisch profiel van een schokgolf, met daarin aangegeven de piek overdruk  $p_0$  en de positieve fase-duur  $t^+$  van de golf.



**Figuur 3**  
Schematisch overzicht van de schokgolf simulator

vloeden de stroming en leveren bovendien alleen lokaal informatie over de druk. Visualisatie van de luchtstroming verstoort de stroming niet en levert bovendien informatie over een groot gebied, en kan inzicht geven in het interactie proces van schokgolven met objecten

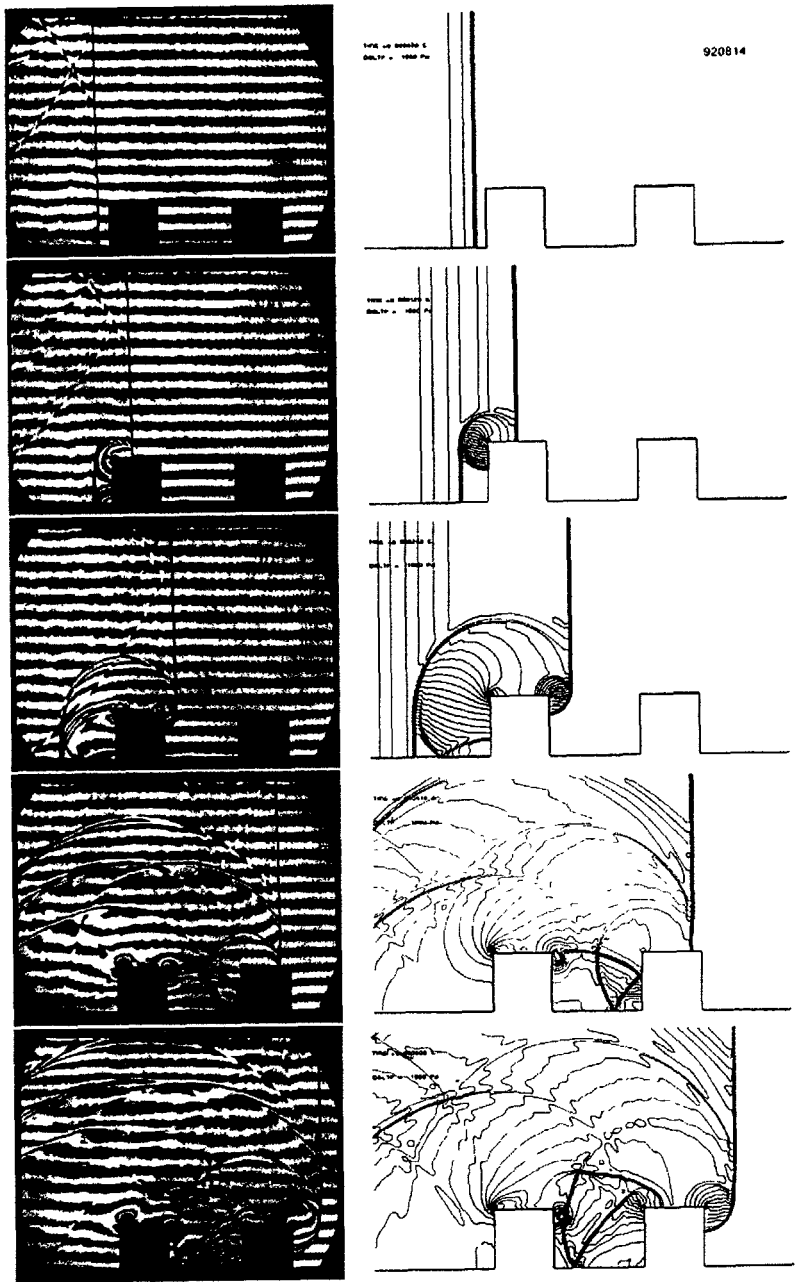
### Simulatie en shearing

In eerste instantie is gekeken naar de kwalitatieve overeenkomst tussen experimentele data en data verkregen uit numerieke simulaties, o.a. door Absil<sup>1</sup>. Er is gekeken naar een blast golf met een overdruk van 10 kPa en een positieve fase duur van 60 ms, die invalt op twee 10 meter hoge huizen op een onderlinge afstand van 15 m. De numerieke simulaties zijn uitgevoerd met behulp van BLAST, een door het PML ontwikkelde Computational Fluid Dynamics code die de Euler vergelijkingen oplost met behulp van het zogenaamde flux-gecorrigeerde transport schema. Het experiment is op een schaal van 1:200 uitgevoerd in de schokbuis en vastgelegd met behulp van een interferometer, werkend volgens de shearing techniek. Links in figuur 4 zijn de shearing opnames weergegeven, waarin de fringes lijnen van constante drukgradient zijn, en rechts zijn

een aantal isobaren uit de numerieke simulatie weergegeven

In deze figuur wordt een goed beeld gegeven van het verloop van het interactie proces in de tijd.

De schokgolf valt van de linkerkant in op de gebouwen. De grote discontinuïteit in de brekingsindex over het schokfront zorgt voor afbuiging van het licht, waardoor een donkere lijn ontstaat. Nadat het schokfront de voorkant van het eerste gebouw heeft geraakt zal een deel hiervan teruggeëflecteerd worden. Dit gaat gepaard met een drukverhoging. Een cirkelvormige golf zal zich vanaf de hoek van het gebouw gaan uitbreiden, om het drukverschil tussen het gebied achter de invallende en de gereflecteerde golf te overbruggen. Bij de hoek ontstaat ook een wervel. Vervolgens komt de golf aan bij de achterkant van het gebouw, waarvandaan een compressiegolf langs de achterkant van het gebouw naar beneden zal bewegen, tot deze aan de grond reflecteert. Tussen de twee gebouwen ontstaat een ingewikkeld interactieproces van de schokgolven, opgebouwd uit invallende golven, gereflecteerde golven en de cirkelvormige uitbreidingen vanuit alle hoekpunten van het gebouw. Uit deze kwalitatieve vergelijking blijkt dat



**Figuur 4**

Experimenteel verkregen shearing opnames (links) en het drukveld, zoals deze volgt uit numerieke simulaties (rechts), voor een drukgolf met een overdruk van 10 kPa en een positieve faseduur van 60 ms.

experiment en simulatie bijzonder goed overeenkomen. Zelfs het ingewikkelde golfpatroon dat tussen de twee gebouwen optreedt, reproduceert goed. In de derde figuur is duidelijk te zien dat het tweede gebouw geraakt zal worden door een verzwakte schokgolf, die ontstaat aan de achterkant van het eerste gebouw, dit laat het principe van afscherming goed zien. Vervolgens zal de golf die invalt op het tweede gebouw daaraan reflecteren en teruggekaatst worden naar de achterkant van het eerste gebouw. Dit verklaart waarom de achterkant van een gebouw dat omringt is door andere gebouwen vaak ook veel schade vertoont na een explosie.

De shearing techniek is bijzonder goed geschikt voor visualisatie van schokgolven, maar voor kwantificatie van de druk is deze techniek niet goed geschikt. Ten eerste is het ruimtelijk oplossend vermogen erg beperkt en ten tweede levert een figuur die met de shearing techniek is verkregen informatie over de drukgradient in plaats van over de druk zelf, wat integratie vereist. Voor kwantificatie is een andere optische opstelling gebruikt.

### **De huidige interferometrische opstelling**

Voor de visualisatie en kwantificatie van de schokgolven is gebruik gemaakt van een dubbele referentiestraal fase gestapte holografische interferometer, zoals weergegeven in figuur 5. Het voordeel van een holografische opstelling ten opzichte van simpelere technieken zoals schaduwgrafie is dat de intensiteitsvariaties die met behulp van deze opstelling verkregen worden direct gerelateerd zijn aan de brekingsindex variaties in de object ruimte. Dit maakt het mogelijk om kwalitatieve gegevens over de brekingsindex en dus over de druk uit de verkregen beelden te halen, zonder integratieslagen die onnauwkeurigheid introduceren. De gebruikte interferometer werkt als volgt, waarbij de nummers tussen haakjes verwijzen naar de nummers die zijn weergegeven in figuur 5. Laserlicht wordt verkregen uit een gepulste Robijnlaser (694.3 nm, 30 ns, 30mJ). De

laserbundel die de laser verlaat gaat via een diafragma (1) naar een 50/50 deelspiegel (2) die de bundel splitst in een object- en een referentiebundel.

### *Objectbundel*

De objectbundel gaat rechtdoor en wordt door de negatieve lenzen (3 en 4) gedivergeerd. De bundel gaat vervolgens door een correctielens (6), die corrigeert voor de sferische aberratie die veroorzaakt wordt door lens 9. Dan vult de bundel de planoconvexe lens 8. Deze lens collimeert de bundel zodanig dat er een parallelle bundel door de testsectie gaat. Voorbij de testsectie wordt de bundel weer geconvergeerd door de planoconvexe lens 9, die de objectbundel op het hologram (10) projecteert.

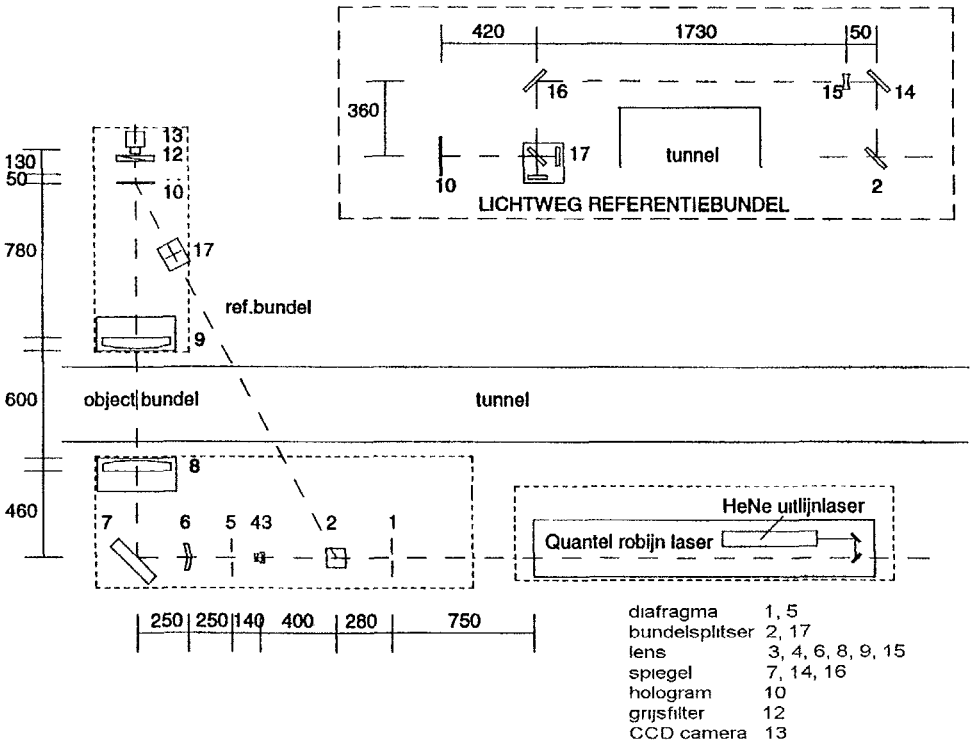
### *Referentiebundel*

Dat deel van het laser licht dat het referentiebundel traject zal volgen wordt door deelspiegel 2 omhoog gereflecteerd. Zoals in het zijaanzicht van de opstelling in figuur 5 te zien is, gaat de referentiebundel over de schokgolf simulator heen, via twee spiegels (14 en 16) en een divergerende lens (15).

Aan de andere kant van de schokbuis komt de referentiebundel in de bundelsplitser (17) terecht, waar de ene referentiebundel wordt gesplitst in twee bundels, die een kleine onderlinge hoek met elkaar maken. Deze beide bundels komen tenslotte op het hologram (10) terecht.

### *Twee referentiebundels*

In deze holografische opstelling wordt met twee referentiebundels gewerkt. De eerste referentiebundel interfereert met de onverstoorde objectbundel, op tijdstip  $t_1$ , terwijl de tweede referentiebundel wordt geblokkeerd. De andere referentiebundel interfereert met de verstoorde objectbundel op tijdstip  $t_2$ , dus als er een schokgolf in de testsectie aanwezig is. Deze twee interferentiepatronen vertrekken onder een kleine hoek ten opzichte van elkaar richting het hologram. Op de holografische plaat



**Figuur 5**

Schematisch overzicht van de dubbele referentiestraal fase-gestapte holografische interferometer

worden dus twee interferentiepatronen vastgelegd

### Reconstructie

Beide referentiebundels vallen tijdens de reconstructie op het hologram en reconstrueren dan de verstoorde en de onverstoorte toestand tegelijkertijd. Om de camera te beschermen tegen overbelichting wordt een grijsfilter (12) tussen de CCD camera en het hologram geplaatst. Doordat een van de spiegels uit de deelspiegel unit (17) op piezo elementen is geplaatst kan deze verplaatsen. Op deze manier kunnen er een aantal opnames gemaakt worden uit een hologram met een variabel fase verschil tussen de twee referentiebundels.

### Voordelen

Het bijzondere van deze opstelling is dat deze bijzonder ongevoelig is voor mechanische trillingen, die onvermijdelijk zijn bij het gebruik van een schokbus en dat het uitlijnen bijzonder eenvoudig is, omdat het alleen van belang is dat de opstelling tijdens opname en reconstructie gelijk uitgelijnd is

### Carré en de fasestep

Met behulp van Carré's zelf calibrerende algoritme, zoals beschreven door Lanen<sup>2</sup>, kan de lokale fase berekend worden, als de intensiteit bekend is in vier fase gestapte beelden. De lokale druk kan berekend worden als de fase bekend is.

## Beeldbewerking

Met behulp van de beschreven opstelling kan een hologram van een bepaalde situatie worden gemaakt en hieruit kunnen vier fase gestapte reconstructies gehaald worden. Deze vier figuren worden met behulp van een CCD camera in de computer opgeslagen. De verwerking van deze figuren tot een isobaren patroon is volledig geautomatiseerd en verloopt als volgt.

Eerst wordt uit de vier figuren bepaald welk deel van het beeld tot de voorgrond en welk deel tot de achtergrond behoort, door naar het contrast te kijken. De obstakels in de stroming zullen ondanks de fase stap weinig veranderen, en behoren dus per definitie tot de achtergrond, de rest van het beeld is dan voorgrond. Vanwege het feit dat de anti-reflectie coating op de deelspiegel in de laatste bundelsplitser (17 in figuur 5) niet optimaal is, is er een storend fringe patroon gesuperponeerd op het beeld van de schokgolf interactie. Deze fringes kun-

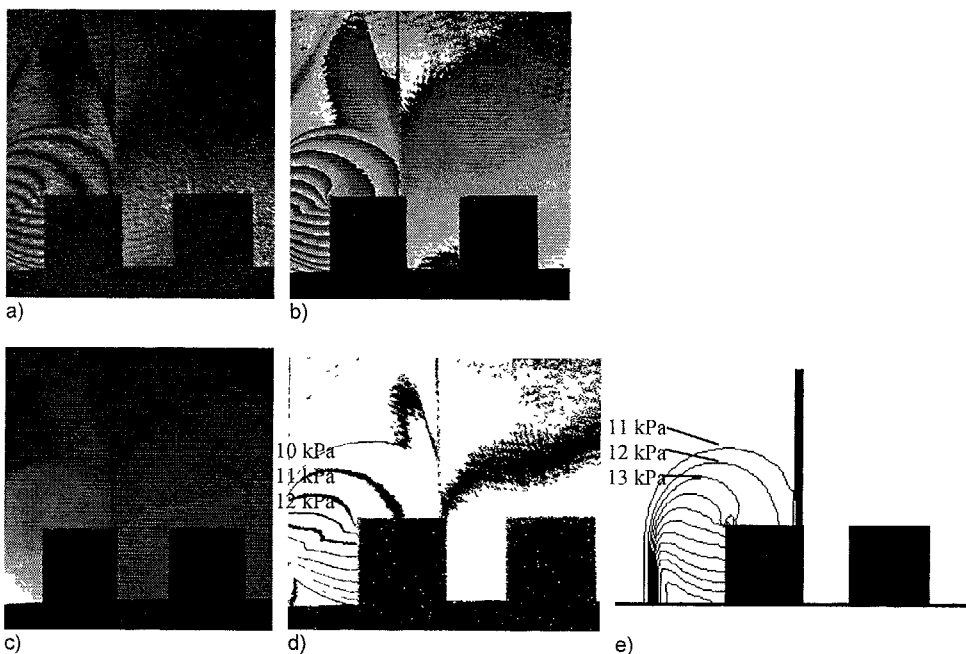
nen met beeldbewerking verwijderd worden door de Fast Fourier getransformeerde te bepalen van de vier beelden, hieruit die frequenties af te schermen die voor de storende periode zorgen en het resulterende beeld weer terug te transformeren. Uit deze gefilterde beelden wordt vervolgens de fase berekend met behulp van Carré's algoritme. Dit algoritme levert een fase die tussen 0 en  $2\pi$  ligt.

Vervolgens worden de  $2\pi$  stappen uit het fase plaatje gehaald, het zogenaamde unwrappen van de fase. In de nu verkregen figuur stellen de lijnen van gelijke grijs-waarde isobaren voor

Een voorbeeld van een aantal belangrijke stappen uit het beeldbewerkings proces zijn in figuur 6 weergegeven

## Resultaten

In de schokgolf simulator zijn de modellen van twee huizen ( $5 \times 5$  cm) geplaatst, op een onderlinge afstand van 3.2 cm. Van de



**Figuur 6**

De interactie tussen een schokgolf en twee huizen

linkerkant komt een schokgolf aan, met een overdruk van 10 kPa. Deze golf zal aan de voorkant van het eerste huis reflecteren en zich naar links gaan bewegen. Een deel van de golf zal verder lopen, over het eerste huis heen, waarbij er zich een wervel zal vormen net rechtsboven de punt van het huis. De golf zal zich verder voortplanten over het eerste huis heen.

In figuur 6 zijn de resulterende figuren weergegeven. In figuur a) is een van de vier onbewerkte fase gestapte beelden te zien. In figuur b) is de fase weergegeven, geschaald tussen 0 en  $2\pi$ , berekend met behulp van Carré's algoritme. In figuur c) is de ge-unwrapte fase te zien, in figuur d) zijn de isobaren tussen 10 kPa en 20 kPa weergegeven. Ter vergelijking is in figuur e) het resultaat weergegeven van een numerieke simulatie, uitgevoerd m.b.v. het programma BLAST.

### **Nauwkeurigheid**

De experimentele resultaten kunnen vergeleken worden met de resultaten die uit een numerieke simulatie volgen. De beide isobaren patronen lijken op het eerst gezicht veel op elkaar. In beide gevallen is het schokfront te zien, de aan de voorkant gereflecteerde golf en de cirkelvormige golf die zich vanaf de linker bovenhoek van het eerste gebouw uitbreidt. Met behulp van beeldbewerkings routines kan de lokale druk in het schokgolf interactie proces met een nauwkeurigheid van ongeveer 10% bepaald worden.

### **Referenties**

1. L.H.J. Absil, "Shock Wave Interaction with Multiple Obstacles", TNO-report, PML 1995-C106
2. T.A.W.M. Lanen, "Digital Holographic Interferometry in Compressible Flow Research", Ph.D. thesis Delft, October 1992.