

Niet-destructief onderzoek

Niet-destructief onderzoek

W.J.P. Vink

© 1995-2007 VSSD

Uitgegeven door de VSSD

Leeghwaterstraat 42, 2628 CA Delft, The Netherlands

tel. +31 15 27 82124, telefax +31 15 27 87585, e-mail: hlf@vssd.nl

internet: <http://www.vssd.nl/hlf>

webpagina over dit boek: <http://www.vssd.nl/hlf/m003.htm>

Voor docenten die dit boek in cursusverband gebruiken zijn de illustraties in het boek digitaal beschikbaar. Men kan de collectie aanvragen bij email hlf@vssd.nl

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of op enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise, without the prior written permission of the publisher.

Gedrukte versie:

ISBN 978-90-407-1147-3

Elektronische versie

ISBN 978-90-6562-104-7

NUR 950

Trefw.: niet-destructief onderzoek

Voorwoord

Deze uitgave over niet-destructief onderzoek (n.d.o.) geeft een overzicht van de in de industrie veelvuldig toegepaste onderzoekstechnieken getoetst aan de huidige stand van de techniek. Het boek is opgezet als een leerboek voor studenten aan de Technische Universiteit te Delft. Ook in het hoger beroepsonderwijs is de bruikbaarheid bewezen. Wel zal in het algemeen de docent een keuze bij de behandeling moeten maken omdat delen van het boek een duidelijke naslagfunctie hebben.

Anders dan bij vorige drukken het geval was, is deze herdruk tot stand gekomen zonder de medewerking van ing. N.H.R. Versluis die op veel te vroege leeftijd in 1989 is overleden.

In deze uitgave is de reeds bestaande structuur ten behoeve van de gebruikers gehandhaafd en zijn de relevante recente ontwikkelingen zoals real-time radiografie, beeldbewerking, geavanceerd ultrasoon onderzoek met de time of flight-techniek aan de bestaande hoofdstukken toegevoegd. Opnieuw is veel aandacht aan de principes van de diverse technieken geschonken omdat uit de vakliteratuur blijkt dat veel nieuwe toepassingen terug te voeren zijn tot de realisatie van de algemene principes in bijzondere gevallen en het in gebruik nemen van een nieuw ontwerp met technische verbeteringen op het gebied van de miniaturisatie van componenten, de gewichtsbesparingen in draagbare apparatuur, de toename in de meetgevoeligheid en de sterke vermindering in de benodigde energie tijdens gebruik of dat het apparaat is aangepast aan de huidige eisen van de wetgeving op het gebied van de arbeidsomstandigheden, de veiligheid en het milieu.

Terugkijkend op het afgelopen decennium valt op dat naast de reeds genoemde zaken de grote vooruitgang mede het gevolg is van de computerisering van bestaande onderzoeksmethoden die gepaard ging met de ontwikkeling van de benodigde software. Mede dank zij de toegenomen rekenkracht van de moderne computers kunnen nu grote hoeveelheden data snel worden verwerkt. Reeds nu is duidelijk dat een en ander zijn weerslag zal hebben op de inhoud van de opleiding en het karakter van het n.d.o. als de n.d.o.-er naast een nauwgezette onderzoeker ook een informaticaspecialist moet zijn. In dit boek wordt in dit verband ondermeer uitvoerig ingegaan op de moderne wijze van digitale beeldverwerking en beeldbewerking. De toegenomen rekenkracht heeft ook nog andere gevolgen voor het n.d.o. Zo worden verschillende n.d.o.-technieken steeds meer ingezet als besturingstechnieken bij de fabricage en tijdens gebruik van een constructie waar de ontwikkeling van geschikte sensoren aan meewerkt. Meer dan vroeger het geval is wordt in dit boek aandacht geschonken aan de plaats van het n.d.o. in de levensduur van een constructie vanaf de ontwerpfase tot en met de uiteindelijke sloop.

Het veld overziend kan geconcludeerd worden dat het n.d.o. is gegroeid. Niet alleen is het aantal beoefenaren toegenomen, ook de kwaliteit is verbeterd mede een gevolg van de aanscherping van de normen en de hogere eisen van het bedrijfsleven en van de overheid. In dit verband kan gewezen worden op de invloed van certificatie van bedrijven en personeel. Ook moet de invloed worden genoemd van verenigingen op het gebied van n.d.o. als KINT en NIL, die zich ondermeer hebben ingezet voor het georganiseerde

n.d.o.-onderzoek, veelal met medewerking van de overheid, TNO, universiteiten en de Nederlandse industrie. Aan een aantal projecten wordt in dit boek uitvoerig aandacht besteed.

Dit boek had niet in de voor u liggende vorm geschreven kunnen worden zonder de belangeloze hulp van zeer velen, zowel op persoonlijke titel als met instemming van hun organisatie.

Met name wil vermelden:

ir. H.J. Schoorlemmer, ANRU-NDT B.V. te Delft,
ing. P. van Rooijen, AIB-Vinçotte te Breda,
ing. T. Blok, MTS Matcon B.V. te Spijkenisse,
ing. J. Verkooyen, AEA Sonomatic B.V. te Oosterhout,

die op hun specialismen de bestaande tekst hebben aangepast aan de huidige stand van zaken,

mevr.dr.ir. M.T.C. de Loos-Vollebregt, TU-Delft,
mevr.drs. J.M. Voskuil, TU-Delft,
prof.dr. G. den Ouden, TU-Delft,
prof.dr.ir. A. Bakker, TU-Delft,
C. van der Wiel, AIB-Vinçotte te Breda,
ing. L. Aardewerk, RTD te Rotterdam,
M. van Eyk, RTD te Rotterdam,
ing. E. Zeelenberg, Stoomwezen te Rotterdam,
ir. T. Luijendijk, TU-Delft,
ir. J.P.H. Wuister, Stoomwezen te Rotterdam

voor hun kritisch commentaar en hun suggesties met name ten aanzien van de actualisering van de diverse technieken,

J. Verschoor, SGS te Spijkenisse,
ing. R.F.M. Apon, Agfa -Gevaert,
ing. H. Bodt, NIL te Voorschoten,
ir. L. van Nassau, Lincoln Electric te Nijmegen,
ir. A.S. Woytas, AST-Stress Tech,
B. Möllenkramer, Bruël & Kjaer te Nieuwegein,

en de firma's Inframetics te Alphen en Landré-Intechmij B.V. te Diemen voor het beantwoorden van mijn vragen en voor het aanleveren van materiaal met name op illustratief gebied waar ik dankbaar gebruik van heb gemaakt.

Ook de suggesties tot verbetering van een aantal kleine fouten van technische aard in de vorige druk ondermeer van dr. G.P. van der Meij van de Hogeschool te Amsterdam zijn onder dank in deze uitgave verwerkt.

Naast de hulp van de genoemde personen en bedrijven heb ik gebruik gemaakt van de publicaties van deskundigen zoals in de literatuuroverzichten is aangegeven. Hiervan wil ik met name noemen de beschouwingen met een perspectief op de toekomst van het n.d.o. van enige internationale experts, waarbij ik bij de keuze mij zoveel mogelijk heb beperkt tot publicaties in de tijdschriften International Advances in NDT, Materials Evaluation en NDT & E International, die alle in de bibliotheek van het Laboratorium voor Materiaalkunde in Delft te vinden zijn.

Tenslotte wil ik de hoop uitspreken dat ook deze uitgave zijn weg zal vinden bij het onderwijs in het n.d.o. en zie ik opmerkingen betreffende de inhoud gaarne tegemoet.

november 1995

drs. W.J.P. Vink

N.B. Een aantal in kleur afgedrukte illustraties is opgenomen in het 'kleurenkatern' dat achterin het boek is geplaatst.

Inhoud

1	NIET-DESTRUCTIEF ONDERZOEK	13
	1.1. Inleiding	13
	1.2. Niet-destructieve onderzoeksmethoden	14
	1.3. Niet-destructief onderzoek als onderdeel van de kwaliteitscontrole	15
	1.4. Toepassing van de n.d.o.-methoden	16
	1.5. Keuze van de n.d.o.-methode	17
	1.6. Enkele veel voorkomende fouten, die niet-destructief kunnen worden vastgesteld	18
	1.7. Enkele bij n.d.o. belanghebbende partijen	20
	1.8. Overzicht van niet-destructieve onderzoeksmethoden	21
	1.9. n.d.o. in de nabije toekomst	23
	Literatuur overzicht hoofdstuk 1	27
2	VISUELE INSPECTIE	28
	2.1. Inleiding	28
	2.2. Belichting	29
	2.3. Vergrotingsapparatuur	30
	2.4. Hulpmiddelen voor de inspectie van moeilijk toegankelijke plaatsen	32
	2.5. Toepassingen	40
	2.6. Beeldbewerking en beeldversterking	41
	2.7. Nog enige toepassingen	52
	Literatuur hoofdstuk 2	55
3	MAGNETISCH ONDERZOEK	56
	3.1. Inleiding	56
	3.2. Magnetisme	58
	3.3. Het magnetiseren van het werkstuk	61
	3.4. De grootte van de stroom	67
	3.5. Testmiddelen	68
	3.6. Inspectie	70
	3.7. Het vastleggen van de indicaties	73
	3.8. Demagnetisatie	74
	3.9. Foutdetectie met meetsonden	75
	Literatuur hoofdstuk 3	77
4	PENETRANT ONDERZOEK	78
	4.1. Inleiding	78
	4.2. Werkwijze	78
	4.3. Voorbewerkingen	82
	4.4. De keuze van een penetrant	83
	4.5. Nog enige gegevens, nodig bij het onderzoek	85
	4.6. Veiligheid, hygiëne en milieu	87
	4.7. Penetrant onderzoek als onderdeel van visuele inspectie	88
	4.8. Het penetrant onderzoek nu en straks	88
	Literatuur hoofdstuk 4	89

5	WERVELSTROOMONDERZOEK	91
	5.1. Inleiding	91
	5.2. Principe	92
	5.3. Signaalanalyse	95
	5.4. Onderzoek met doorloopspoel	96
	5.5. Meetmethoden	98
	5.6. Onderzoek met oppervlaktespoelen	101
	5.7. Het wervelstroomonderzoek nu en in de toekomst	109
	Literatuur hoofdstuk 5	110
6	ULTRASOON ONDERZOEK	112
	6.1. Inleiding	112
	6.2. Golfvormen	113
	6.3. Reflectie, transmissie	117
	6.4. Tasters	121
	6.5. Gebruikte inspectiemethoden	129
	6.6. Geluidsverzwakking	134
	6.7. Invloed foutgrootte en -vorm op de echo	136
	6.8. Enige methoden om de foutgrootte te bepalen	137
	6.9. Elektronische verwerking en presentatie van de indicaties	143
	6.11. Enige toepassingen van ultrasoon onderzoek	154
	6.12. Apparatuur voor bijzondere toepassingen	158
	6.13. Ervaring in Nederland	158
	6.14. Nieuw te ontwikkelen methoden	162
	6.15. Een visie op ultrasoon onderzoek, nu en straks	162
	Literatuur hoofdstuk 6	165
7	RADIOGRAFIE EN RADIOSCOPIE	167
	7.1. Inleiding	167
	7.2. Stralingsbronnen	168
	7.3. De interactie tussen straling en materie	173
	7.4. De radiografische film	176
	7.5. Uitvoering van het radiografisch onderzoek	181
	7.6. Real-time afbeelding	195
	7.7. De automatische herkenning van fouten in 'real-time' radioscopie	204
	7.8. Onderzoek met verstrooide röntgenstraling	206
	7.9. Andere opnametechnieken	211
	7.10. Plaatsbepaling	213
	7.11. Inspectie	217
	7.12. Toepassingen	223
	7.13. Stralingsgevaar	225
	7.13. Radiografie nu en straks	226
	Literatuur hoofdstuk 7	227
8	NEUTROGRAFIE	229
	8.1. Inleiding	229
	8.2. Neutronenbronnen	230
	8.3. Moderatie	233
	8.4. Absorptie	233
	8.5. De collimator	234
	8.6. Enige opmerkingen over opnametechnieken	236
	8.7. Minimale te detecteren dikteverschillen	239
	8.8. Toepassingen	240

	Literatuur hoofdstuk 8	243
9	PERSPROEF	244
	9.1. Inleiding	244
	9.2. Doel van de persproef	245
	9.3. Voorbereiding	246
	9.4. Grootte van de persdruk	248
	9.5. Nadere beschouwing van de persproef	252
	9.6. N.d.o. methoden bij de persproef	254
	9.7. De uitvoering van de wetgeving in Nederland voor toestellen onder druk	255
	Literatuur hoofdstuk 9	256
10	LEKDETECTIEMETHODEN	257
	10.1. Inleiding	257
	10.2. De leksnelheid	258
	10.3. Methoden voor lekonderzoek met gas als medium	258
	10.4. Beschrijving van de methoden	259
	Literatuur hoofdstuk 10	265
11	AKOESTISCHE EMISSIE	266
	11.1. Inleiding	266
	11.2. Typen akoestische emissie	267
	11.3. Golfuitbreiding	269
	11.4. Het Kaiser-effect	271
	11.5. Aan te brengen belasting	271
	11.6. Signaalverwerking	272
	11.7. Signaalanalyse	275
	11.8. Lokalisatie	276
	11.9. Discriminatiemethoden	278
	11.10. Opnemers en golfgeleiders	278
	11.11. Basisonderzoek met A.E.	279
	11.12. Scheurinitiatie, scheurgroei en breukverschijnselen	281
	11.13. De akoestische emissie techniek als n.d.o.-methode	282
	11.14. Akoestische emissie nu en straks	286
	Literatuur hoofdstuk 11	289
12	THERMISCHE INSPECTIEMETHODEN	290
	12.1. Inleiding	290
	12.2. Enige wetten en begrippen uit de stralingstheorie	292
	12.3. De emissiefactor	294
	12.4. Het stralingsspectrum in het infrarood	296
	12.5. De detector of sensor voor contactloze methoden	297
	12.6. Optische componenten	299
	12.7. Meetprincipes	299
	12.8. Pyrometers	299
	12.9. Infraroodafbeeldingssystemen	300
	12.10. Thermografische inspectie met contactmethoden	304
	12.11. Infrarood thermografie nu en straks.	306
	Literatuur hoofdstuk 12	307
13	HOLOGRAFISCHE INTERFEROMETRIE; DE MOIRÉMETHODE	308
	13.1. Inleiding	308
	13.2. De opname van een hologram	309
	13.3. De reconstructie van het beeld uit het hologram	310

13.4.	De holografische interferometrie	312
13.5.	Kwantitatieve interferometrie	314
13.6.	De Shearografie	316
13.7.	De spikkelcorrelatiemethode	317
13.8.	Toepassingen	320
13.9.	Akoestische holografie	321
13.10.	De methode met rekstrookjes en de moirémethode	322
	Literatuur hoofdstuk 13	325
14	SCHEURDIEPTEMETINGEN (POTENTIALVALMETHODE)	326
14.1.	De gelijkstroommethode	327
14.2.	De wisselstroommethode	327
14.3.	Invloedsfactoren	328
14.4.	De ACFM-methode	329
	Literatuur hoofdstuk 14	330
15	LAAGDIKTEMETINGEN	331
15.1.	Inleiding	331
15.2.	De magnetische methode	331
15.3.	De β -reflectiemethode	332
15.4.	De diëlektrische vonktest	332
15.5.	De meting van de elektrische weerstand	334
16	VIBRATIE-ANALYSE	335
16.1.	Inleiding	335
16.2.	Lokaal vibratie-onderzoek, akoestische impedantiemeting, Fokker-Bond- tester	335
16.3.	Vibratie-onderzoek van de gehele constructie	338
16.4.	De laser-doppler methode	346
	Literatuur hoofdstuk 16	346
17	METHODEN VOOR MATERIAALIDENTIFICATIE	347
17.1.	Inleiding	347
17.2.	Bepaling van de samenstelling	347
17.3.	Identificatie van ferritisch en austenitisch staal; de ferrietmeting	352
	Literatuur hoofdstuk 17	354
18	MICROGOLFSTRALING	355
	Literatuur hoofdstuk 18	360
19	DIVERSE METHODEN; METHODEN VOOR HET METEN VAN RESIDUELE SPANNINGEN	361
19.1.	Replica	361
19.2.	Kraaklak	362
19.3.	De Fokker-contaminatiemeter	363
19.4.	Ferrografie	364
19.5.	Methoden voor het meten van residuele spanningen	364
	Literatuur hoofdstuk 19	367
20	DE ORGANISATIE VAN HET NIET-DESTRUCTIEF ONDERZOEK	368
20.1.	Inleiding	368
20.2.	De acceptatiespecificatie	368
20.3.	Onderzoekspecificatie	371
20.4.	Kwalificatie en certificatie van de onderzoeker	373

20.5.	Kwaliteitsbeheersing (borging) en kwaliteitsbewaking	375
20.6.	Nederlandse organisaties op het gebied van n.d.o.	378
	Literatuur hoofdstuk 20	379
	Bijlage hoofdstuk 20	380
21	VEILIGHEID	383
21.1.	Inleiding	383
21.2.	Dosimetrie van gamma- en röntgenstraling	383
21.3.	Meetmethoden voor ioniserende straling	391
21.4.	Stralingseffecten bij de mens	393
21.5.	Arbeidshygiënisch beleid, maximaal toelaatbare dosisequivalenten	395
21.6.	Wettelijke regelingen betreffende stralingsbescherming	399
21.7.	Andere vormen van elektromagnetische straling	403
21.8.	Het geluid	405
21.9.	Andere gevarenbronnen	407
	Literatuur hoofdstuk 21	408
22	BEOORDELING VAN HET ONDERZOEKSRESULTAAT	409
22.1.	Inleiding	409
22.2.	Inspectieresultaat in relatie tot kritische foutgrootte	413
22.3.	Oorzaken van variaties in het resultaat van het niet-destructief onderzoek	414
22.4.	Vermijden van ten onrechte goedgekeurde produkten	415
22.5.	Schadeorzaken	416
22.6.	Reparatie	417
22.7.	Acceptatiecriteria	418
22.8.	Het Nederlandse onderzoeksproject 'Fitness for Purpose'	423
22.9.	De opzet van het praktijkmodel	428
22.10.	Het kostenaspect bij n.d.o.	428
	Literatuur hoofdstuk 22	432
	Bijlage 1 hoofdstuk 22. Detectability and limits for imperfections in butt welds	434
	Bijlage 2 hoofdstuk 22	436
	TREFWOORDEN	444
	KLEURENKATERN	ACHTERIN

1 Niet-destructief onderzoek

1.1. Inleiding

Onder *niet-destructief onderzoek* (n.d.o.) wordt verstaan een werkwijze waarmee een indruk kan worden verkregen van de kwaliteit van een te onderzoeken object zonder dat dit behoeft te worden beschadigd.

Het n.d.o. kan in tegenstelling tot het *destructieve onderzoek*, waarbij wel beschadiging van het te onderzoeken materiaal plaatsvindt, op het gehele object worden toegepast. De ligging, de afmetingen en de aard van zowel macroscopische als microscopische onvolkomenheden kan er mee worden vastgesteld.

Daarnaast is het met de te behandelen methoden mogelijk verschillende mechanische eigenschappen, de microstructuur, de samenstelling en de afmetingen van het werkstuk te bepalen.

Het n.d.o. vangt in de regel aan met een visuele inspectie en veelal kan hiermede worden volstaan. In andere gevallen geeft een dergelijke inspectie belangrijke aanwijzingen voor mogelijke defecten en voor de keuze van een geschikte onderzoekstechniek.

Behalve door bekijken kan door bekloppen van het werkstuk, dus door beoordeling van het geluid, op eenvoudige wijze worden nagegaan of afwijkingen in de kwaliteit zich voordoen. Al van oudsher worden deze methoden toegepast. Het gebruik van ultrasone geluidsgolven is van jongere datum en werd in 1929 door de Rus Sokolov geïntroduceerd (doorstraalmethode) en in 1942 door Firestone verder ontwikkeld (impuls-echomethode) tot een nog heden ten dage uitgebreid toegepaste werkwijze.

Aan het eind van de vorige eeuw werd de methode, die nu bekend staat als penetrant onderzoek, in een primitieve vorm al door machinisten toegepast voor het onderzoek van krukassen van stoommachines. Op verdachte plaatsen werd hete olie gebracht, die eventueel aanwezige scheuren kon dringen. De scheuren werden vervolgens zichtbaar gemaakt door het opbrengen van krijtpoeder. Het eerste experiment met röntgenstraling bij lasonderzoek vond in 1896 plaats in de Verenigde Staten. In Nederland voerde het Stoomwezen het röntgenonderzoek als goedgekeurde n.d.o.-methode rond 1937 in.

Het n.d.o. heeft vooral na de tweede wereldoorlog een grote vlucht genomen, waarbij niet te ontkennen valt, dat de huidige stand van de techniek voor een zeer groot gedeelte het gevolg is van ontwikkelingen op lasgebied.

Ook de behoeften op andere terreinen, waarbij bijvoorbeeld gedacht kan worden aan de medische wetenschap, de breukmechanica, het corrosieonderzoek, de praktische toepassing van nieuwe materialen en de miniaturisatie hebben aanleiding gegeven tot de ontwikkeling van het n.d.o.

Voorts is en wordt een belangrijke bijdrage geleverd door de inzet van kennis en ervaring

uit disciplines als de fysica en de elektronica. Dit heeft onder meer geleid tot technieken als de akoestische emissie-analyse, het onderzoek met microgolfstraling en de holografische interferometrie.

De belangrijkste bijdrage aan de ontwikkeling van het n.d.o. van de laatste 10 jaar is toe te schrijven aan het toenemend gebruik van *dataverwerkende apparatuur*. De verwachting is, dat deze ontwikkeling bij de toenemende verwerkingssnelheid van deze apparatuur aanleiding zal blijven voor de ontwikkeling en de praktische toepassing van geavanceerde technieken. In § 1.9 zal hier nader op worden ingegaan.

1.2. Niet-destructieve onderzoeksmethoden

In de loop der jaren zijn vele n.d.o.-methoden ontwikkeld, waarvan de meeste berusten op het inbrengen van een bepaalde vorm van energie in het werkstuk, bijvoorbeeld mechanische of elektromagnetische. Via interacties met discontinuïteiten en onvolkomenheden (in dit boek zal conform het spraakgebruik over *defecten* of over *fouten* worden gesproken) kan hiervan een beeld worden verkregen. Op grond van de opgedane ervaring, die bijvoorbeeld is vastgelegd in voorschriften en Codes, kan worden bepaald of de gevonden fout *ongevaarlijk* is en in het werkstuk kan blijven zitten, dan wel dat tot *reparatie* of tot *afkeuring* moet worden overgegaan.

Iedere methode heeft zijn specifieke mogelijkheden en beperkingen. Men moet daarom bij de keuze van de methode terdege rekening houden met factoren zoals materiaal, aard van de mogelijke fouten en toegankelijkheid van het object.

In ieder materiaal, bij elk fabricageproces en tijdens de levensduur van een constructie zullen specifieke fouten verwacht kunnen worden, die soms slechts met één van de beschikbare n.d.o.-methoden gevonden kunnen worden. Het verdient aanbeveling, als dat economisch mogelijk is, meerdere geschikte n.d.o.-methoden te gebruiken, daar de gezamenlijke resultaten veelal pas een goed beeld van de aanwezige fouten geven.

In tabel 1.1 zijn de voornaamste n.d.o.-methoden voor de industriële praktijk vermeld.

Van deze methoden kunnen het ultrasoon (U.S.) en het radiografisch onderzoek als de meest toegepaste worden beschouwd.

Een gedetailleerd overzicht van n.d.o.-methoden is gegeven in tabel 1.3.

Tabel 1.1. Belangrijkste n.d.o.-methoden voor de industriële praktijk.

n.d.o.-methoden	fouten		wand- en laagdiktemetingen, structuurbeoordeling en materiaaleigenschappen
	aan of bij het oppervlak	inwendig	
1. visueel onderzoek	×		
2. penetrant onderzoek	×		
3. magnetisch onderzoek	×		
4. wervelstroomonderzoek	×		×
5. ultrasoon onderzoek		×	×
6. radiografisch onderzoek		×	

1.3. Niet-destructief onderzoek als onderdeel van de kwaliteitscontrole

Reeds vanaf de tijd dat er bij industriële producten op grond van de functie die ze moesten vervullen eisen worden gesteld aan de kwaliteit, bestaat er al een of andere vorm van kwaliteitscontrole. Soms was bijvoorbeeld de bepaling van de chemische samenstelling en de hardheid reeds voldoende. Een dergelijk beperkt onderzoekprogramma is als productiecontrole nog gebruikelijk voor vele laagbelaste objecten. Worden hogere eisen aan de kwaliteit gesteld, dan wordt bovendien niet-destructief onderzoek uitgevoerd.

Naarmate het product belangrijker is (hogere kostprijs, ernstiger consequenties bij eventueel bezwijken) zullen de belanghebbenden een groter eisenpakket formuleren, zodat reeds in de ontwerpfase én in de diverse fabricagestadia zekerheid bestaat omtrent de kwaliteit.

Een dergelijk *systeem* van kwaliteitsbeheersing kan het volgende omvatten:

- ingangscntrole grondstoffen en halffabrikaten
- voorschriften voor fabricage (bijvoorbeeld gieten, smeden, walsen, lassen, lijmen)
- voorschriften voor warmtebehandeling
- mechanisch en niet-destructief onderzoek
- bepaling chemische samenstelling en structuuronderzoek
- maatcontrole
- sterktebeproeving eindproduct
- eindcontrole (waaronder n.d.o.)

Hieruit blijkt dat n.d.o. bij productie deel uitmaakt van een groter geheel.

Na de eindcontrole kan het product afgenomen worden en doorloopt het tijdens gebruik zijn levensduur, die wordt beëindigd bij de sloop. Tijdens de levensduur zijn er verschillende momenten, waarop het product beoordeeld moet worden. Aangeraden wordt (lit. 1.1) te beginnen met een afnametest na installatie bij de afnemer, omdat dan de invloed van de omgeving wordt meegenomen, waardoor een referentie wordt verkregen voor alle latere metingen.

Bij objecten, die in bedrijf zijn, moet voortdurend de *bedrijfszekerheid* gecontroleerd worden. Vaak is men op n.d.o. als enige kwaliteitscontrolemethode aangewezen.

Lit. 1.1 beveelt ook onderzoek tijdens de slooffase aan (schadeanalyse en materiaal-kundig onderzoek) met terugkoppeling naar de ontwerpers, zeker als het product in de tussentijd niet of nauwelijks is gemodificeerd.

Als kanttekening kan hier nog aan worden toegevoegd, dat ook in Nederland de ontwerpers, de uitvoerders bij de fabricage en het n.d.o.-personeel teveel nog in een eigen wereld opereren en te weinig oog hebben voor de mogelijkheden en de beperkingen van de vakgebieden buiten hun eigen werkterrein. Een gevolg hiervan is vaak een conservatieve opstelling ten opzichte van de andere gebieden met een negatieve weerslag op de kwaliteit. Lit. 1.2 geeft voorbeelden: een ontwerper, die het lassen niet als een volwaardige verbindingstechniek zag en voor de 'zekerheid' lassen voorschreef, die te zwaar moesten worden uitgevoerd; en het voorschrijven van een lasverbinding, uit te voeren als een meer-lagenlas, met een (niet-realistische) te geringe maattolerantie.

Tijdens de Biënnale 1995 van de Nederlandse n.d.o.-vereniging KINT en de Belgische zusterorganisatie BANT wees dr.ir. P. Scholten in dit verband op het percentage in de kosten van het *herontwerp* bij een industrieel product in Europa en de U.S.A., dat 50% bedraagt tegen 10% in Japan.

Gewezen moet nog worden op de steeds strengere eisen, die worden gesteld aan het bedrijfsleven ten aanzien van de kwaliteit en aan het veilig en milieuvriendelijk functioneren. Daarnaast heeft men te maken met de uitvoering van de Arbo-wet, de richtlijnen van de EEG en de wettelijke regeling op de productaansprakelijkheid.

Grote bedrijven en, vanaf 1 januari 1997, ook de Nederlandse Overheid gunnen alleen opdrachten en bestellingen aan instanties, die *gecertificeerd* zijn op kwaliteit (ISO 9000), op milieu (BS 7750), op veiligheid (VCA) en op arbeidsomstandigheden (Arbo, P 190). Ook de uitvoerders van n.d.o. in de praktijk moeten gecertificeerd zijn.

In Hoofdstuk 20 wordt nog verder ingegaan op de kwaliteitsbeheersing.

1.4. Toepassing van de n.d.o.-methoden

Het niet-destructieve onderzoek wordt onder meer toegepast op de volgende in willekeurige volgorde gegeven gebieden, geïllustreerd met enkele relevante voorbeelden:

- offshore (booreilanden)
- energievoorziening (kernreactoren, turbines, stoomketels)
- chemie, petrochemie (reactoren, opslagtanks)
- pijpleidingenbouw (aardgastransportleiding)
- scheepsbouw (gelaste secties)
- lucht- en ruimtevaart (motoren, landingsgestellen)
- automobielindustrie (krukassen)
- civiele technieken (bruggen)
- gieterijtechniek (hoge druk pomphuizen)
- staalfabricage (gewalst staal)
- galvanotechniek (gegalvaniseerd staal)
- elektronica (I.C.'s)
- medische wetenschap (röntgendiagnostiek bij bijvoorbeeld gebitscontrole, echografie bij zwangerschapscontrole)

Hierbij wordt er nog de aandacht op gevestigd dat vooral drukhoudende apparatuur (speciaal die voor gevaarlijke stoffen en processen) en dynamisch belaste constructies (vermoeingsbelasting) vrij intensief worden geïnspecteerd.

Het n.d.o. kan op vrijwel alle (constructie-) materialen worden toegepast: metalen, kunststoffen, beton, keramische materialen. Het niet-destructief onderzoek kan zowel in het fabricagestadium als onder bedrijfsomstandigheden worden ingezet.

Het n.d.o. tijdens *fabricage* is momenteel een van de belangrijkste toepassingsgebieden, daar vroegtijdig gevonden fouten in materialen en halffabrikaten een besparing in de productiekosten geven door het voorkomen van afkeuren na de bewerking. In dit verband moet gewezen worden op methoden, die continue inspectie, bijvoorbeeld tijdens het

lassen, het walsen van plaat en fabricage van pijpen mogelijk maken.

De principes van de n.d.o.-technieken kunnen hierbij ook ingezet worden voor *procesbewaking*. Steeds meer wordt de bijstelling van het proces na de analyse van de metingen van de procesparameters met geschikte sensoren praktisch toegepast. De voortgaande ontwikkeling op het gebied van de computers maakt een snellere terugkoppeling en ook de toepassing van betere beoordelingssystemen mogelijk.

Ook wordt onder bedrijfsomstandigheden n.d.o. toegepast. Dit is te verdelen in:

- a. inspectie tijdens bedrijf (in-service),
- b. inspectie bij onderhoud, ook wel shut-down of bedrijfsstopinspectie genaamd.

Het zal duidelijk zijn dat er naar gestreefd wordt bij een bedrijfsstopinspectie een constructie zo kort mogelijk uit bedrijf te nemen en om dit te realiseren kan n.d.o. een belangrijk hulpmiddel zijn. Er zijn echter diverse methoden – zowel klassieke als geavanceerde – waarvoor het niet noodzakelijk is de constructie uit bedrijf te nemen. Soms is dit in het geheel niet mogelijk (booreiland). Voor deze situaties zijn controlemethoden ontwikkeld, die continu een proces of constructie kunnen bewaken en waarbij zo nodig de inzet van klassieke methoden als ultrasoon onderzoek en röntgenonderzoek het inzicht in eventuele onvolkomenheden verder aanvullen. Voorbeelden van technieken die continue bewaking mogelijk maken zijn naast visuele inspectietechnieken bijvoorbeeld met een gesloten TV-systeem, vibratie-analyse, akoestische emissie en thermografie. Lit. 1.1 wijst op het belang van het meten van torsie- en buigtrillingen bij de bewaking van machines. Met name de torsietrilling kan oorzaak van breuk van een as zijn.

Moeilijk bereikbare constructies, bijvoorbeeld onder water, of bij aanwezigheid van voor de onderzoeker schadelijke milieus (bijvoorbeeld een hoog stralingsniveau) maken het noodzakelijk soms onderzoek op afstand uit te voeren. Technieken als gemechaniseerd ultrasoon onderzoek of radiografisch onderzoek naast genoemde continue bewakingsmethoden bieden hier uitkomst.

Opgemerkt moet worden dat sommige constructies moeilijk onder bedrijfsomstandigheden kunnen worden onderzocht. In deze gevallen moet de nadruk worden gelegd op intensieve inspectie tijdens het fabricageproces en bij een bedrijfsstop.

1.5. Keuze van de n.d.o.-methode

Om tot een juiste keuze van de onderzoeksmethode(n) te komen is het nodig om over een aantal gegevens te beschikken van zowel het te onderzoeken *object* als de te gebruiken *onderzoeksmethode*. Wat het object betreft dient men informatie te hebben over:

- materiaaldikte
- materiaalsamenstelling, mechanisch-, fysisch- en chemisch gedrag
- fabricagemethode (zoals lassen, lijmen, gieten, smeden, walsen, warmtebehandeling)
- structuur
- oppervlaktegesteldheid
- vormgeving, toegankelijkheid
- verwachte en detecteerbare fouten

Vooraf gegevens die een inzicht geven in het verloop van de fabricage van het te onderzoeken object zijn van belang, omdat zij een aanwijzing kunnen zijn voor de te verwachten afwijkingen.

Specifiek op de methode betrekking hebbende factoren zijn:

- nauwkeurigheid van de onderzoeksmethode
- wijze van vastleggen van onderzoekresultaten
- kosten en voor onderzoek beschikbare tijd.

Daarnaast zijn factoren als kosten/baten-verhouding, beschikbaarheid van getraind personeel, service-mogelijkheden van apparatuur, snelheid van verkrijgen van onderzoek-informatie, gewicht, volume van apparatuur en object ook van uitzonderlijk belang.

Tenslotte worden nog enkele belangrijke keuzecriteria genoemd, geldig voor een willekeurige n.d.o.-methode, die in de vorm van een aantal te beantwoorden vragen zijn gegeven.

- Is het de goedkoopste methode voor de te verkrijgen informatie?
- Is het de enige methode om die informatie te verkrijgen?
- Weegt de te verkrijgen informatie op tegen de kosten?
- Wordt besparing verkregen door het voorkomen van mogelijke defecten aan het object?

De criteria gelden niet voor:

1. Onvervangbare objecten zoals archeologische voorwerpen en kunstwerken.
2. Vitale onderdelen, waarvan falen grote schade kan veroorzaken.
3. Onderzoek naar de oorzaak van ongevallen, dat meestal samengaat met destructief onderzoek (bijvoorbeeld (elektronen)microscopisch onderzoek aan preparaten).

1.6. Enkele veel voorkomende fouten, die niet-destructief kunnen worden vastgesteld

Door middel van de niet-destructieve onderzoekstechnieken kan men vooral *macroscopische* defecten, echter soms ook *microscopisch* kleine fouten detecteren, afhankelijk van de gevoeligheid van de methode. In dit verband moet op een probleem worden gewezen, waarmee onderzoekers van constructies met een aanzienlijke ouderdom worden geconfronteerd. Met de toegenomen gevoeligheid in de moderne methoden worden veel kleinere fouten gedetecteerd dan vroeger het geval was. Het probleem bij de evaluatie is: zijn deze foutjes al bij de fabricage ontstaan in de toen goedgekeurde constructie en derhalve ongevaarlijk, of vormen zij het begin van recent ontstane schade?

Verder wordt de keuze van de n.d.o.-methode mede bepaald door de plaats van het te onderscheiden defect (aan het *oppervlak* of in het *inwendige*) en door de vorm (*vlak* of *niet-vlak*).

Naast het onderzoek naar concrete defecten zijn de n.d.o.-methoden ook inzetbaar voor het beantwoorden van vragen van algemene aard als: hoe staat het met de grootte van de absorptie van ultrasone golven in een materiaal? Bekend is, dat bij Al-legeringen porositeit hier een invloed op heeft. Dit type onderzoek maakt uitspraken bijvoorbeeld

over de algemene kwaliteit en over de mate van degradatie mogelijk.

In tabel 1.2 zijn enige karakteristieke fouten van een aantal processen en verschijnselen met de voor het onderzoek zeer gebruikelijke n.d.o.-methoden vermeld. Bijzonder geschikte werkwijzen zijn cursief gedrukt.

Tabel 1.2. Aanbevolen n.d.o.-methoden voor het opsporen van bij bepaalde processen en verschijnselen mogelijke fouten.

proces	fout		n.d.o.-methode
	volumetrisch	vlak	
walsen, smeden		dubbelingen inluitsels	U.S. (ultrasoon) U.S.
lassen	randinkarteling		U.S., radiografie, visueel
	slakinsluitsels		radiografie , U.S.
	porositeit		radiografie , U.S.
		oppervlaktescheuren	magnetisch, penetrant, U.S., potentiaal
		bindingsfouten	U.S. , radiografie
		inwendige scheuren (zoals scheuren evenwijdig aan het oppervlak)	U.S.
		onvolkomen doorlassing	radiografie, U.S.
		waterstofscheuren	akoestische emissie, U.S.
solderen	onregelmatige laagdikte, soms ook afwijkende samen- stelling	<i>onvoldoende hechting</i>	neutrografie <i>U.S.</i>
lijmen		hechtingsfouten	Fokker 'bondtester'
gieten	slinkholten		U.S., radiografie
	koudloop		U.S.
	afwijkende wanddikte		U.S., radiografie
	afwijkende structuur (bijv. bij gietijzer noduul of lamelvorm)	<i>vormwandfouten</i>	U.S. <i>penetrant, magnetisch</i>
oppervlaktebehandelingsmethode:			
verzinken van staal	blisters		visueel, U.S.
		afwijkende laagdikte	magnetisch
verkoperen van staal		afwijkende laagdikte	magnetisch
plastificeren van staal		afwijkende laagdikte	wervelstroom , doorslagproef
warmtebehandeling:			
carboneren		afwijkende indringdiepte	wervelstroom , U.S.
harden		scheuren, lokaal (onvoldoende harding)	magnetisch, penetrant, U.S. (Barkhausen)
spanningsarmgloeien		scheuren (reheat cracking)	magnetisch, penetrant, U.S.

Tabel 1.2. Vervolg. proces	fout		n.d.o.-methode
	volumetrisch	vlak	
verschijnsel:			
vermoeiing		scheuren	magnetisch, penetrant, U.S.
breuk (bros, taai)		scheuren	idem
(overmatige) plastische deformatie			rekstrookjes, kraaklak, holografie, moiré, X-diffractie
corrosie	wanddikte-afname		U.S., radiografie wervelstroom, magnetisch
		scheuren	magnetisch, penetrant, U.S., wervelstroom
trillingen	te hoge amplitude, te hoog geluidsniveau, afwijkend frequentiespectrum		vibratie-analyse, rekstrookjes
hot spots	verdwenen isolatie		thermografie
uitstromend gas of vloeistof	lekkage		lekdetectiemethoden
keramische deklagen op metalen objecten	hechtingsfouten		akoestische emissie wervelstroom, microgolfstraling, akoestische microscopie

Voor het ontstaan van de in de tabel aangegeven fouten zijn meerdere oorzaken aan te geven. Er zijn daarbij omstandigheden die de kans op dergelijke afwijkingen vergroten:

- wijziging bedrijfsomstandigheden (belastingsniveau, temperatuur)
- reparaties (kunnen harde plaatsen geven naast lassen)
- wijzigingen in constructies, die niet zijn doorgegeven naar een kwaliteitsdienst, die verantwoordelijk is voor het n.d.o.

1.7. Enkele bij n.d.o. belanghebbende partijen

Op n.d.o.-gebied worden eisen gesteld door degenen, die verantwoordelijk zijn voor de producten, tijdens fabricage of tijdens gebruik, zoals:

- fabrikanten. Zij stellen eisen in verband met productiecontrole en het behouden van een goede reputatie.
- afnemers(gebruikers/eigenaars). Deze willen zekerheid hebben over de gevraagde kwaliteit en de handhaving hiervan tijdens bedrijf.
- overheid of toezichthoudende organen. Zij zijn bij de wet verantwoordelijk gesteld voor de veiligheid (bijvoorbeeld het Stoomwezen).
- verzekeringsmaatschappijen, classificatiebureaus zoals Lloyd's Register of Shipping. Deze wensen inzicht te hebben in door hen te lopen risico's.

1.8. Overzicht van niet-destructieve onderzoeksmethoden

Tabel 1.3.

A oppervlakte-inspectie			
object	bijzonderheden object	methode	bijzonderheden materiaal
fouten aan het oppervlak		visueel	
	bij voorkeur niet-volumetrische fouten	magnetisch	magnetiseerbaar
	fouten in open verbinding met oppervlak	penetrant ultrasoon	niet poreus goed geluids- doorlaatbaar
foutdiepte, vooral scheuren		elektrische weerstand	metalen
		wervelstroom	metalen
		ultrasoon	goed geluids- doorlaatbaar
deklagen	porositeit	elektrische weerstand	elektrisch isolerende lagen op metalen basis
		elektrische doorslag (vonktest) ¹	elektrisch isolerende lagen op metalen basis
B inwendige inspectie			
plaat staf pijp lassen	vooral volumetrische fouten	radiografie	zware metalen (Pb, Cd) moeilijk
		neurografie	vooral kunststoffen en soldeerverbindingen
gietstukken gesinterde werkstukken	vooral vlakke fouten	ultrasoon	goed geluids- doorlaatbaar
		wervelstroom	metalen
hechting		ultrasoon	goed geluids- doorlaatbaar
		elektrische weerstand	metalen
		thermografie	slecht warmte- doorlaatbaar
		vibratie analyse ultrasoon	lijmverbindingen, composieten
C bepaling afmetingen			
wanddikte	aantasting door corrosie, erosie, wrijving	ultrasoon	goed geluids- doorlaatbaar
		mechanisch	
		wervelstroom	metalen
		magnetisch	magnetiseerbaar
laagdikte		radiografie	
		wervelstroom	niet-geleidende laag op non-ferro basis, niet-magnetiseerbare laag op magnetiseerbare basis

¹ Een minder belangrijke methode.

Tabel 1.3. Vervolg.			
		magnetisch	niet-magnetiseerbare laag op magnetiseerbare basis
		elektrische weerstand	elektrisch isolerende lagen op metalen basis
		elektrische doorslag (vonktest)	elektrisch isolerende lagen op metalen basis
		β -reflectie	edele metalen
D overige doelen			
materiaalherkenning		druppelproef	metalen
		spectroscopie	metalen
		magnetisch sorteren	magnetiseerbaar
		Ferrietmeter	austenitisch-ferritisch roestvast staal
		vonkproef, elektrische weerstand, wervelstroom	metalen
	röntgen-fluorescentie	laaggeleegd en roestvast staal, Ni-legeringen	
vibratie-analyse		kloppen, impedantiemetingen (Fokker Bondtester), frequentie-analyse	constructiematerialen (vooral metalen) en hun lijmverbindingen
lekdetectie	grote lekken	druk, vacuüm	
	middelgrote lekken	akoestisch, ook akoestische emissie	
	kleine lekken	halogeen detector	
	zeer kleine lekken	He-massaspectrometer, tracer	
structuuronderzoek	aan oppervlak	replica	metalen
	inwendig	ultrasoon	metalen zoals nodulair gietijzer
onderzoek mechanische eigenschappen		impedantiemeting (Fokker Bondtester)	vooral lichtmetalen en hun lijmverbindingen
		ultrasoon	metalen als nodulair gietijzer
scheurvorming, plastische deformatie	plastische deformatie, <i>statisch</i> (aan oppervlak)	kraaklak	metalen
		optische holografie	veelal metalen
		moiré	metalen
	plastische deformatie	rekstrookjes	metalen
		akoestische emissie	vrijwel alle materialen
		replica	metalen
scheurvorming, <i>dynamisch</i>	rekstrookjes	metalen	
	akoestische emissie	vrijwel alle materialen	
residuele spanningen	aan oppervlak	X-diffractie, U.S. Barkhausen	magnetische metalen
temperatuurafwijking door bijv. isolatieverschillen		thermografie vloeibare kristallen, temperatuurkrijt, omslagverf	goed warmte doorlaatbaar

1.9. *n.d.o. in de nabije toekomst*

Een beschrijving van het n.d.o. voor de industriële praktijk op dit moment is het hoofdthema van dit boek. Daarnaast zal ook aandacht worden geschonken aan toekomstige ontwikkelingen, die al dan niet in een fase verkeren die reeds zicht geeft op praktische toepassingen. Dit gebeurt aan de hand van een aantal publicaties van toonaangevende deskundigen.

De eerste publicatie, die aan bod komt is van F.A. Wedgwood, een n.d.o.-expert, verbonden aan het Engelse National NDT Centre, (lit. 1.3).

De leidraad in dit artikel is de stelling, dat de vooruitgang in de *digitale signaalverwerking* heeft geleid en zal leiden tot verbeterde n.d.o.-apparatuur en ook tot de opkomst van nieuwe methoden op het terrein van de inspectie tijdens fabricage en op het gebied van de inspectie tijdens bedrijf. Wedgwood stelt, dat de achterliggende filosofie voor beide gebieden duidelijk niet gelijk is.

De inspectie tijdens bedrijf

De inspectie tijdens bedrijf wordt in hoofdzaak bepaald door de markt, door eisen van veiligheid en door eisen ten aanzien van de kwaliteit van het product. Ontwikkelingen op n.d.o.-gebied, die een betere inspectiemethodiek toelaten zijn goed inpasbaar. Het n.d.o. is hier zeer divers, waarbij nog opgemerkt moet worden, dat nogal wat beproevingsmethoden wel toepasbaar zijn tijdens fabricage, maar niet tijdens bedrijf.

Op dit terrein worden de meeste traditionele ideeën gevonden. De meeste constructies, die in de toekomst operationeel zullen zijn, bestaan nu al of zijn reeds ontworpen, hetgeen het voorspellen van de toekomst wat gemakkelijker maakt. Wedgwood stelt, dat aangezien de fysische principes van het n.d.o. niet erg zullen veranderen en waar de filosofie van de inspectie op dit moment redelijk uitgewerkt is, de toekomstige veranderingen alleen zullen plaats vinden op het gebied van de *apparatuur*. Deze veranderingen zullen, gelet op de huidige stand van zaken en de ontwikkelingen in de digitale elektronica, *zeer ingrijpend* zijn.

Een andere verandering in de uitvoering is een toenemend inzicht naast kennis in de waarde voor n.d.o. van de *breukmechanica* bij n.d.o.-specialisten, waardoor ook zij een belangrijke rol kunnen gaan spelen bij de evaluatie van de ernst van defecten.

Wedgwood schat in eerste instantie de huidige status van de n.d.o.-technologie af aan de hand van het programma van *opleidingsinstellingen*, dat nog steeds in hoofdzaak is gericht op de training in de *manuele* toepassing van de ‘grote vijf’: radiografie, ultrasoon, wervelstroom, magnetische technieken en penetrant, waarbij hij nog opmerkt dat meestal de belangrijkste n.d.o.-methode – de *visuele* inspectie – geen deel uitmaakt van het programma!

De inspanning van researchinstututen en universiteiten op het gebied van onderzoek en ontwikkeling geeft een geheel ander beeld. Deze programma’s vermelden als aandachtsgebieden:

- geautomatiseerde ultrasone technieken
- wervelstroomtechnieken met meerdere frequenties
- akoestische emissie

- röntgentomografie en röntgenfluoroscopie
- sensoren voor ultrasoon onderzoek (EMAT en met lasers)
- bepaling van de scheurgrootte met de potentiaalvalmethode
- idem, maar nu met de ultrasone time of flight methode
- radiografie met behulp van de comptonverstrooiing
- spanningsanalyse met behulp van ultrasone technieken
- analyse van de microstructuur (ultrasoon)
- thermografie en fothermische methoden
- magnetische methoden.

De stelling is, dat alleen die methoden zullen doorbreken, waar men in staat is de *geautomatiseerde verwerking* van de meetgegevens in de systemen te integreren. Wedgwood verwacht dat de ontwikkeling hierbij ‘dramatisch’ zal zijn. Als illustratie kan al geweest worden naar de geweldige invloed van de ontwikkelingen uit de digitale elektronica op de jongste generatie van ultrasone-, radioscopische- en wervelstroomsystemen voor manuele inspectie, naar de vooruitgang bij het bepalen van (residuele) spanningen, het waarnemen van de microstructuur en het afschatten van de grootte en de vorm van defecten.

Ook de voortdurende daling van de prijs van computers, de steeds compactere uitvoering, naast de toename van de verwerkingssnelheid en van de opslagcapaciteit zullen als dit zo doorgaat op den duur een enorm effect hebben op de ontwikkelingen van apparatuur.

Voorts is de verwachting, dat de invoering van de toepassingsgerichte chips de snelle digitale signaalverwerking en wellicht ook snelle beeldbewerking mogelijk zal worden in *draagbare* instrumenten.

De ontwikkeling van nieuwe systemen behoeft het oude niet overbodig te maken. Er zijn talloze situaties denkbaar, waarbij de inzet van een geavanceerd systeem niet zinvol is of zelfs op grote praktische bezwaren stuit en waar juist het manuele systeem goed voldoet. De ontwikkeling van apparatuur waarin beide systemen zijn ingebracht, ligt voor de hand en is bijvoorbeeld in moderne ultrasoonsystemen al gerealiseerd. Het spreekt voor zich, dat de ontwikkeling van dit soort systemen door zal gaan.

Wedgwood sluit de beschouwingen over de inspectie tijdens bedrijf af met de verwachting, dat in de toekomst op dit terrein vooral de inspectie van de *materiaalstructuur (de conditie)* zeer belangrijk zal worden en noemt vervolgens een van de voor hem grootste *teleurstellingen* op n.d.o.-gebied van de laatste 20 jaar: het niet doorbreken van de akoestische emissie als n.d.o.-techniek *tijdens bedrijf van een constructie*. De reden, die Wedgwood hiervoor geeft, is een opmerkelijke: de toepassing van deze techniek, die bedoeld was om een constructie zelf zijn defecten te laten aantonen, was niet goed doorgedacht, omdat een complexe constructie alleen adequaat bewaakt kan worden met een complex waarnemingssysteem. Hij acht het idee om met een paar goed geplaatste sensoren nietige defecten op grote afstand te kunnen detecteren een mythe. Hieraan kan nog de ervaring worden toegevoegd, dat een zeer verfijnde onderzoekmethode alleen in de praktijk toepasbaar is op optimaal vervaardigde constructies.

Inspectie tijdens fabricage

Voor de inspectie tijdens fabricage zijn er veel meer mogelijkheden voor veranderingen. Wedgwood verwacht:

- verschuivingen in de materiaalkeuze van gebruiksgoederen, mede door de ontwikkeling van nieuwe materialen, naast een toenemende *toepassing van niet-metalen*.
- verschuivingen op het gebied van de verbindingstechnieken, met ondermeer in veel gevallen het vervangen van het lassen aan producten door *lijmen*.
- een veranderende filosofie voor de inspectie, naast een veranderende n.d.o. met het accent op *preventie* en niet meer op *detectie*.
- een verandering in de status van het n.d.o.-personeel en hun plaats in de organisatie door een opschuiving in de richting van beleidsbepalende taken tijdens de fabricage en het ontwerpstadium.

Het streven van fabrikanten is duidelijk: zo min mogelijk n.d.o., omdat dit onderzoek duur is. Een toeneming van een eis naar verbetering van de kwaliteit, die meestal samengaat met de eis van een betere procesbeheersing, betekent ook duurder n.d.o. door de noodzakelijke geavanceerdere apparatuur. Wedgwood noemt twee aspecten, waarop fabrikanten gaan letten:

- een onderzoekmethode is des te beter naarmate een defect eerder tijdens fabricage wordt gevonden (dus in een zo vroeg mogelijk stadium)
- *groei van het n.d.o. is nauw verbonden met nieuwere materialen en met nieuwere methoden voor vervaardigen en verbinden.*

Ten aanzien van het tweede punt kan nog opgemerkt worden, dat in het verleden deze stelling ondermeer gold voor het lassen en de inspectie van de lasverbindingen en dat in de loop van de tijd naast een grote inspanning om te komen tot beter n.d.o. tegelijkertijd een nog grotere inspanning geleid heeft tot een veel betere procesbeheersing, waardoor tal van defecten niet meer voorkomen. Dit houdt in, dat veel traditioneel n.d.o. niet meer behoeft te worden uitgevoerd.

In de literatuur vindt men relatief gezien weinig recente publicaties over n.d.o. bij het lassen van traditionele materialen, maar des te meer over geavanceerd n.d.o. bij nieuwe materialen, met name tijdens vormgeving en bij het verbinden. De ervaring hierbij is nog onvoldoende, zodat traditioneel n.d.o. toegepast dient te worden als middel voor kwaliteitsbewaking en als hulpmiddel bij het onderzoek naar een betere procesbeheersing. Dank zij de verbeterde apparatuur kunnen bij dit onderzoek zinvol worden ingezet: geautomatiseerde visuele inspectie, ultrasoon onderzoek met contactloze sensoren, thermografie, real-time röntgenfluoroscopie, akoestische emissie en wervelstroomtechnieken.

Wel zal de introductie van deze technieken niet zo snel zijn als voor de inspectie tijdens bedrijf, omdat er zich nogal wat problemen zullen voordoen met name van mechanische aard (bij de ontwikkeling van sensoren), zeker als de inspectie bij hoge temperaturen moet worden uitgevoerd, vandaar dat parallel hieraan de ontwikkeling van adequate (*simulatie*)modellen gaande is.

Het tweede artikel, waaruit enige punten worden besproken, is van de Amerikaan H. Berger (lit. 1.4).

De auteur geeft hierin commentaar op veranderingen op de markt voor apparatuur voor de dienstverlening. Traditioneel werd deze markt beheerst door kleine firma's, die beschikten over specifieke expertise, meestal op een beperkt terrein. Natuurlijk zijn er daarnaast altijd ook grotere firma's geweest, die een groter pakket van n.d.o.-producten en

-diensten aanboden. In de laatste jaren, zo geeft Berger aan, zijn er een aantal significante veranderingen:

1. er hebben nog al wat fusies van kleinere gespecialiseerde n.d.o.-firma's plaatsgevonden tot grotere bedrijven met een breder pakket (niet alleen in de Verenigde Staten!);
2. grote bedrijven uit de luchtvaart als bijvoorbeeld McDonnell Douglas hebben het n.d.o. in hun activiteitenpakket opgenomen. De beweegreden hiervoor is de wens de zeer grote investeringen, die deze firma's hebben gedaan voor de ontwikkeling van allerlei n.d.o.-'producten' voor het eigen bedrijf, middels de verkoop ervan aan anderen terug te verdienen;
3. grote firma's op het gebied de productie van röntgenfilms als DuPont en Kodak hebben hun verkooppakket uitgebreid met elektronische n.d.o.-producten, waarbij met name genoemd kunnen worden de systemen voor real-time radioscopie;
4. n.d.o.-firma's gaan zich steeds meer bezig houden met vervaardigen van apparatuur voor procesbewaking. Dit betekent een lagere prioriteit voor apparatuur voor de traditionele inspectie van het eindproduct. Berger's verklaring hiervoor is gelijk aan die van Wedgwood.

Berger wijst nog op de vestiging van een technologie centrum door General Electric Co voor de verdere ontwikkeling van geavanceerde n.d.o.-technieken op gebieden als radiografie, ultrasoon, wervelstroom, thermografie en de optica, die reeds gebruikt worden voor toepassingen voor de ruimtevaart en veronderstelt, dat General Electric een dergelijke operatie niet zou starten als men geen potentiële markt voor nieuwe toepassingen ziet. Zo schat hij in dat potentiële gebruikers, gelet op de hoge kosten bij aanschaf van de zeer complexe systemen, zeker voor procescontrole tijdens de fabricage, zich zullen wenden tot grote firma's die de mensen en de middelen hebben om deze systemen te maken.

Nog opgemerkt moet worden, dat ook in Nederland – zij het op veel kleinere schaal – zich vergelijkbare ontwikkelingen voordoen waarbij het niet ondenkbaar is dat de hoge kosten, die het certificeren met zich mee brengt hieraan mede debet zijn.

Tenslotte ziet Berger – zelf eigenaar van een kleine n.d.o.-firma – de toekomst optimistisch tegemoet, ook voor kleine bedrijven.

Het derde artikel, waaraan aandacht zal worden besteed, is van B. Bridge, lit. 1.5.

Nieuw is hierin de aandacht die gevraagd wordt voor de *opleiding van het personeel*, dat de gecomputeriseerde apparatuur moet gaan bedienen en op een mogelijke *certificering* van het personeel op dit terrein in de toekomst. Bridge onderkent op dit moment een kloof tussen de kennis van de gemiddelde (gecertificeerde) onderzoeker en de vereiste bekwaamheden bij het gebruik van commercieel verkrijgbare geavanceerde inspectie-systemen.

Voorts signaleert hij de toenemende aandacht die tegenwoordig mate uitgaat naar het 'micro'-n.d.o., waarmee men defecten met afmetingen tot $1\ \mu\text{m}$ wil bepalen in zeer kleine objecten: als lassen in dunwandig materiaal in componenten voor de micro-elektronica en voor toepassingen in de microchirurgie. Ook deze tak van n.d.o. heeft veel te danken aan de ontwikkelingen in de lasertechnologie.

Op dit moment worden een drietal in aanschaf zeer dure technieken voor micro-n.d.o. gebruikt en wel een geavanceerde vorm van de *microfocus radiografie*, de *akoestische*

microscopie en de *thermische microscopie*. De detectiegrens van deze technieken ligt op dit moment op 10 µm.

Bij de microfocusradiografie komt de afbeelding tot stand bij het doorstralen van het object met röntgenstraling, die afkomstig is uit een bron met een afmeting van enige µm.

Bij de akoestische microscopie geschiedt de beeldvorming met geluidsgolven van zeer hoge frequenties (1-3 GHz). Deze hoge frequenties zijn vereist als men een hoog oplossend vermogen wil bereiken (omgekeerd evenredig met de frequentie). Gelet op de zeer hoge absorptie van deze ultrasone golven is het begrijpelijk, dat de wanddikte van het te onderzoeken object beperkt is.

Bij de thermische microscopie werkt men met door een laser opgewekte warmtegolven die een warmtebeeld produceren. De genoemde technieken tonen ondermeer *holten* en *delaminaties* aan.

Vermeldenswaard is de visie op n.d.o., zoals weergegeven in een door Frost en Sullivan uitgegeven boek (lit.1.6). Hierin zijn ondermeer opgenomen gedetailleerde analyses en voorspellingen voor een tiental productcategorieën als de akoestische emissie, de directe afbeelding met röntgenstraling, penetrant onderzoek, magnetische technieken, ultrasoon onderzoek, thermografie, de potentiaalval methode, akoestische microscopie, de radiografische film en radiografie met hoge energie.

Het boek bevat voorts marktoverzichten voor Frankrijk, Duitsland, Italië, Engeland en de 'overige landen van de EEG', geeft overzichten van de markt voor eindgebruikers voor apparatuur en sectoren van eindgebruikers voor de periode 1989-1993. Voorts is opgenomen een overzicht van technologische ontwikkelingen, hoe verwacht wordt dat deze de markt zullen beïnvloeden in de EEG, analyses van marktstrategieën voor n.d.o., potentiële markten en gedetailleerde 'profielen' van leveranciers van producten en diensten.

Verder worden de organisaties op het gebied van het n.d.o. in de EEG vermeld.

Lit. 1.7 tenslotte, een publicatie van de Nederlandse n.d.o.-vereniging KINT, geeft een overzicht van de bedrijven, die zich hebben gespecialiseerd in de uitvoering, het onderzoek en de ontwikkeling van n.d.o. in Nederland.

Literatuuroverzicht hoofdstuk 1

- 1.1. Ir. H. van Tienhoven, 5e KINT/BANT- Biënnale 1995, Breda, symposiumboek.
- 1.2. R.L. Holdren, *What are the Causes of and Solutions to Weld Quality Conflicts?*, Welding Journal, 1993.
- 1.3. Wedgwood, *NDT 20 years on – a personal opinion*, NDT International 20.
- 1.4. H. Berger, *The NDT industry comes of age – a personal view*, NDT International 21.
- 1.5. Bridge, *Non-destructive weld inspection*, Welding Review, nov. 1988.
- 1.6. Frost en Sullivan, *The Nondestructive Testing Equipment and Consumables Market in the EEC*, Inc, New York, 410 bladzijden.
- 1.7. *Inspection in the Netherlands*, uitgave van het KINT te Heemstede.

2 *Visuele inspectie*

2.1. *Inleiding*

Het gewone bekijken van een werkstuk is te beschouwen als de oudste vorm van niet-destructief onderzoek. Ook vandaag de dag zijn ondanks alle ontwikkelingen op het gebied van mechanisering en automatisering in de inspectiemethodieken voldoende voorbeelden aan te geven waar het visueel inspecteren toegepast wordt en in vele gevallen reeds voldoende is.

In eerste instantie toont een visuele inspectie fouten in het oppervlak aan. Het is duidelijk, dat grove fouten als scheuren en breuk visueel gemakkelijk waarneembaar zijn en dat bij het gebruik van een eenvoudig hulpmiddel als een loep ook kleine fouten te vinden zijn.

Een ervaren onderzoeker is evenwel tot meer in staat. Uit de bestudering van het uiterlijk van een lasverbinding bijvoorbeeld, kan hij reeds conclusies trekken over het al dan niet goed functioneren van het toegepaste lasproces en over de kwaliteit van de verbinding.

Zo heeft een Zweedse scheepswerf, die onder andere tankers bouwt voor het transport van vloeibaar gas, een team onderzoekers in dienst, dat gewapend met een vergrootglas voorzien van verlichting elke mm lasverbinding in het gastransport- en gasopslagsysteem inspecteert. Pas na hun fiat komen de andere detectiesystemen aan bod, zoals lekdetectie. De controle van reparatielassen tenslotte wordt uitgevoerd met het penetrant onderzoek.

Een ander voorbeeld: de inspectie van de klinknagelverbindingen in helikopters geschiedt visueel. Kleurveranderingen aan het oppervlak duiden vaak op het corrosieproces dat hiervoor verantwoordelijk is.

Bij het visueel onderzoek worden verschillende hulpmiddelen gebruikt met als specifieke functies, al dan niet gecombineerd: de belichting van het te inspecteren gebied (lampen, glasvezeloptiek) en het vergroot afbeelden (vergrootglazen, microscopen). Speciale vermelding verdienen apparaten geschikt voor de inspectie van moeilijk toegankelijke gebieden; optische instrumenten als endoscopen, borescopen, fiberscopen en periscopen, eventueel gekoppeld aan een camera- of T.V.-systeem. De geweldige technische ontwikkelingen in de videocamera's (uitvoering met een CCD) ten aanzien van de *lichtgevoeligheid*, de *miniaturisatie* en het *oplossend vermogen* hebben ook in het n.d.o. hun uitwerking gehad. Ter vergelijking: in 1985 woog een videocamera 5 kg, tien jaar later 500 gram; in 1985 was de benodigde lichtsterkte 150 lumen, nu is het mogelijk een opname te maken bij het licht van een brandende kaars (1 lumen). De inbouw van een miniatuur videocamera in een borescoop maakt onderzoek in nauwe pijpen tot op vele tientallen meters mogelijk.

De registratie van het videosignaal maakt de beelden toegankelijk voor beeldbewerking en beeldverwerking, zoals in § 2.6 wordt toegelicht. Vermeldenswaard is de praktische toepassing, waarbij het beeld via een modem en een telefoonleiding wordt verzonden, bijvoorbeeld naar een laboratorium voor nader onderzoek of naar een deskundige voor

nader overleg, dat telefonisch gevoerd kan worden. Allerlei snuffjes zijn mogelijk, zo kunnen meerdere opnamen, bijvoorbeeld in een 5×5 presentatie, telefonisch gepresenteerd worden met de vraag naar een keuze, die daarna met de volledige beeldinformatie kan worden overgemaakt. De Nederlandse marine gebruikt dit systeem aan boord van haar schepen met nadere evaluatie aan de wal.

Voor het contact tussen autogarages en verzekeringsmaatschappijen over de taxaties van schade wordt een vergelijkbaar systeem toegepast, waarbij polaroidfoto's ter beoordeling worden overgemaakt.

In tal van toepassingen worden lasers met de bijbehorende optische hulpmiddelen gebruikt. Laserstraling is verre van ongevaarlijk. Vaak is het dragen van een beschermende bril en het plaatsen van waarschuwingsborden voorgeschreven.

Het spreekt voor zich, dat bij de kwalificatie van onderzoekers eisen gesteld moeten worden aan de ogen. Het gezichtsvermogen, zo nodig aangepast met een bril, moet goed zijn. Oogafwijkingen, bijvoorbeeld kleurenblindheid, astigmatisme, mogen niet voorkomen. Het is wenselijk, dat bij een regelmatige controle ook aan de algehele gezondheidstoestand aandacht wordt geschonken, omdat bijvoorbeeld de bloeddruk en het gebruik van medicamenten invloed hebben op het gezichtsvermogen. Bij visuele inspectie is het nog van belang een bepaalde aanpassingstijd voor de ogen in acht te nemen, bijvoorbeeld bij het gebruik van optische instrumenten en bij het werken in een verduisterde ruimte.

Bovendien dient er op gelet te worden dat de onderzoeker voldoende rustperiodes tijdens de werkzaamheden inlast, daar door vermoeidheid vooral kleine fouten niet opgemerkt kunnen worden. Geïnteresseerden worden voor nadere informatie verwezen naar het overzichtsartikel 'The Human Eye, an instrument for nondestructive testing' van F. Michalski e.a. (lit. 2.1) en naar de NPR 2519.

2.2. Belichting

In de handel zijn tal van hulpmiddelen verkrijgbaar, waarin verschillende typen gloeilampen of flitslampen worden toegepast, die gebruikt kunnen worden om de te inspecteren plaats te belichten. Moet een groot oppervlak goed verlicht worden, dan kunnen kwikdamp- of halogeenlampen in aangepaste uitvoeringen van 20 tot 400 W gebruikt worden. Koudlichtbronnen met zogenaamde friswitte en koelwitte licht 'kleuren' in het kleurtemperatuurbereik (zie ook hoofdstuk 12) van 4000 tot 5000 K verzekeren een goede kleurweergave en een zeer hoog verlichtingsniveau. Bovendien bestaat er bij het gebruik van deze bronnen, omdat de warmtestraling te verwaarlozen is, weinig of geen kans op de explosie van ontbrandbare gassen.

Daarnaast wordt de belichtingswijze met behulp van deze koudlichtbronnen en het transport van het licht naar de te inspecteren plaats door middel van bundels glasfibers in de (*flexibele*) *boreoscopen*, ook wel *fiberscopen* genoemd, toegepast. Deze bundels glasfibers bestaan uit vele tienduizenden dunne glasdraadjes (vanaf 9 μm dik). Elk draadje bevat een kern (brekingsindex $n = 1,62$) en een mantel ($n = 1,55$). Lichtstralen kunnen door de kernen van deze draden worden getransporteerd, dankzij het verschijnsel van de totale terugkaatsing tegen de mantel. Met deze methode zijn in het te inspecteren gebied

zeer hoge lichtsterkten te behalen en dankzij de grote elasticiteit van de draden is een flexibele uitvoering in kabels mogelijk, zodat moeilijk toegankelijke plaatsen gemakkelijk bereikt kunnen worden.

Voor de belichting in specifieke toepassingen, maar ook in de holografie en de interferometrie (zie hoofdstuk 10), worden lasers toegepast als de Yag- en de CO₂-laser.

2.3. Vergrotingsapparatuur

Deze apparatuur bestrijkt bij het gebruik van zichtbaar licht een gebied van lineaire vergrotingen N_{lin} van 1,5 tot 2000 maal. Met toenemende vergroting neemt de grootte van het gezichtsveld af van ongeveer 9 cm tot 0,01 cm en neemt het oplossend vermogen toe van ongeveer 50 μm tot 0,2 μm .

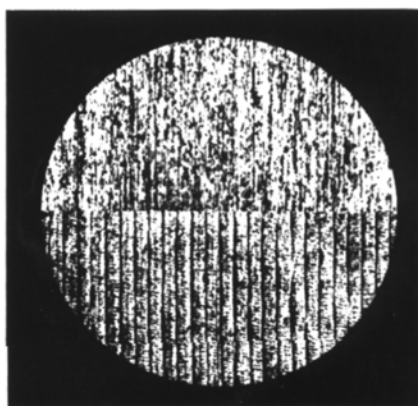
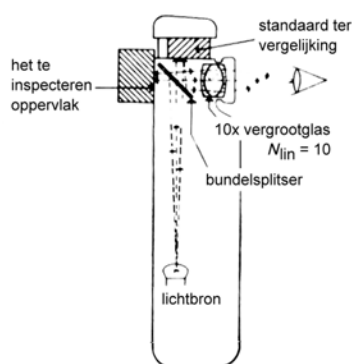
De eenvoudigste uitvoering is het *vergrootglas*. Zie tabel 2.1 voor enige voorbeelden.

Tabel 2.1. Vergrootglazen

	N_{lin}	gezichtsveld cm	oplossend vermogen μm	werkafstand cm
leeslens	1,5	9	50	10
loep	2	7	40	9
„	10	2	8	2

De in deze tabel voorkomende getallen geven slechts een indicatie. De werkelijke waarde is afhankelijk van de mate van accommodatie van het oog. Commercieel verkrijgbare vergrootglazen gaan tot een vergroting $N_{lin} = 20$, met, zoals tabel 2.1 aangeeft, een afnemende grootte van het gezichtsveld en de werkafstand. Verschillende typen bevatten een ingebouwde verlichting.

Figuur 2.1 geeft een voorbeeld van een bijzondere uitvoering. Met deze oppervlakte comparator is de *vergelijking* van het oppervlak met een standaard mogelijk.

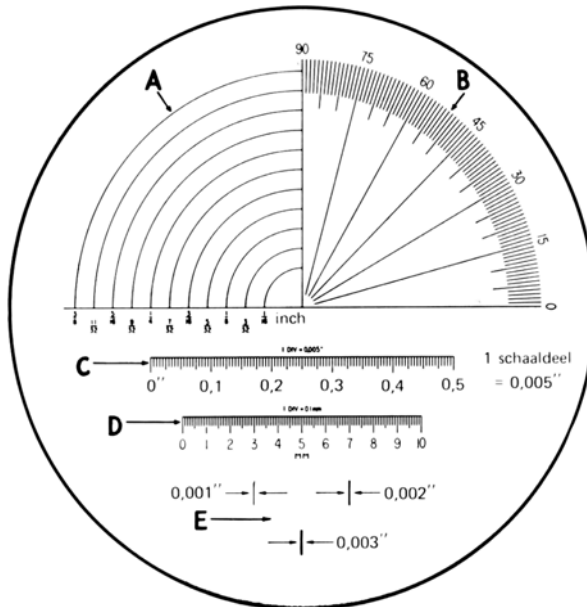


a.

b.

Figuur 2.1. a. Schema oppervlakte comparator. b. Het te inspecteren oppervlak en de standaard ter vergelijking. (Afgestaan door Bausch en Lomb b.v.)

Figuur 2.2 toont een aantal op een vergrootglas aan te brengen schaalverdelingen ($N_{lin} = 7$), waarmee de dikte- en lengtemeting van een fout en ook hoekmetingen mogelijk zijn. Bij vergrotingen groter dan 10 kan bij gebruik van een loep de geringe werkafstand een bezwaar vormen. In dat geval moet bij het onderzoek een microscoop gebruikt worden; veelal is het gebruik van een stereomicroscoop aan te bevelen. Microscopen in verschillende uitvoeringen met vergrotingen tussen 20 en 100 maal en een oplossend vermogen tot ongeveer $8 \mu\text{m}$ worden op tal van plaatsen voor inspectiedoeleinden gebruikt, bijvoorbeeld voor de inspectie van geplatteerde, geverfde en gepolijste oppervlakken.



Figuur 2.2. Toegepaste schaalverdelingen bij een vergrootglas. $N_{lin} = 7$.

Voor de beschrijving van de uitvoering wordt verwezen naar andere bronnen (lit. 2.2). Hier zal slechts een enkel voorbeeld worden gegeven.

Figuur 2.3 toont een projectiemicroscoop. Deze wordt gebruikt bijvoorbeeld voor de inspectie van plaatjes met bedrukte bedrading.

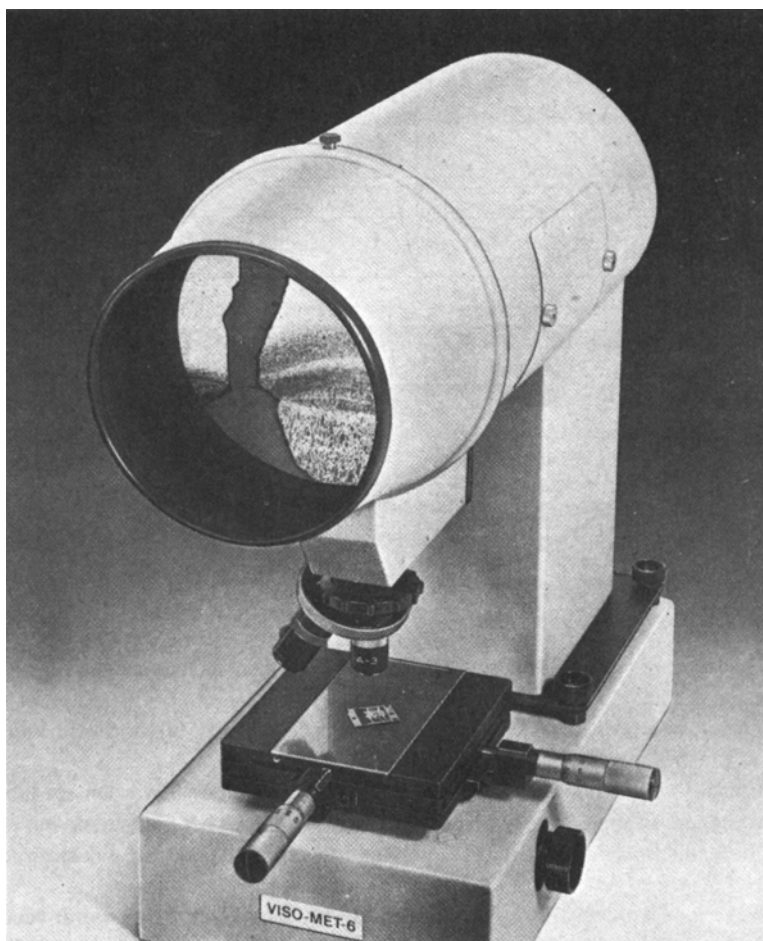
Microscopen met vergroting van 100 tot 2000 moeten beschouwd worden als laboratoriummicroscopen. In speciale toepassingen, bijvoorbeeld voor het onderzoek van replica's (zie hoofdstuk 19) op kruipschade, worden zij gebruikt voor het niet-destructief onderzoek.

In de rubriek 'product showcase' van het tijdschrift *Materials Evaluation* wordt veelvuldig aandacht besteed aan praktische uitvoeringen van apparatuur voor visuele inspecties. Gemeld wordt een microscopsysteem met opnamemogelijkheid op video, waarna bij het bekijken van het monitorbeeld allerlei snuffjes toegepast kunnen worden als bijvoorbeeld het uitvergroten van details en het invoeren van tekst. Bekend zijn ook systemen, waarbij beeldbewerking (zie § 2.6), wordt toegepast (ruisonderdrukking, contourversterking).

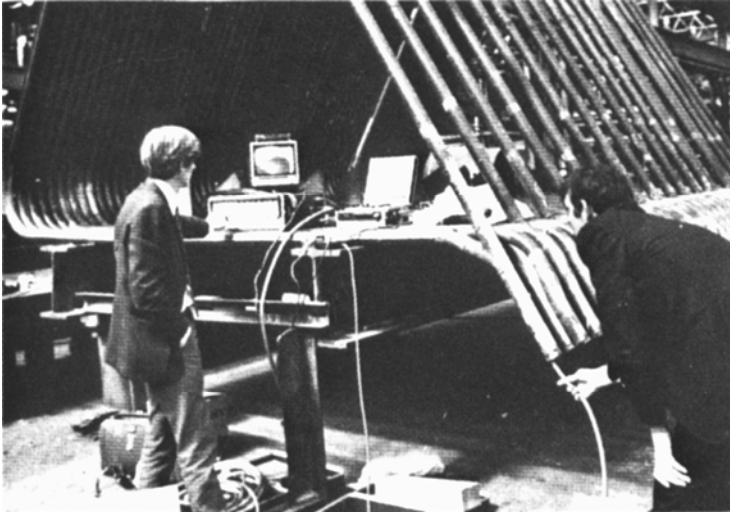
2.4. Hulpmiddelen voor de inspectie van moeilijk toegankelijke plaatsen

Televisiesystemen

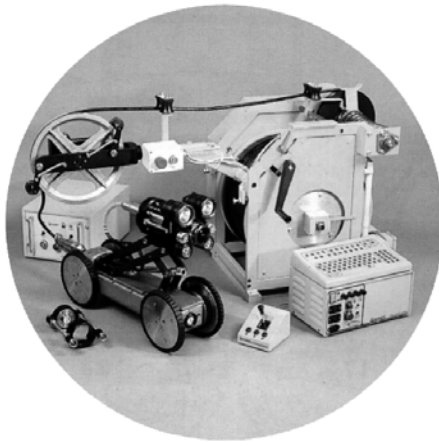
Op tal van plaatsen fungeert een gesloten T.V.-systeem als een hulpmiddel bij de visuele inspectie, bijvoorbeeld voor bewakingsdoeleinden vanuit een centrale observatiepost, voor de inspectie van moeilijk toegankelijke plaatsen, plaatsen onder water en voor gebieden met een hoog stralingsniveau. Figuur 2.4 geeft een voorbeeld van inwendige inspectie van lasnaden en van het oppervlak in pijpen. Bij dit onderzoek werd een camera (uitwendige diameter 44 mm) gebruikt, waarvan het gezichtsveld zowel een hoek van 0° als 90° met de lengte-as kon maken. Over de evaluatie van de opnamen is in § 2.1 reeds een opmerking gemaakt.



Figuur 2.3. Projectiemicroscop. (Ter beschikking gesteld door Aims N.D.T. B.V.)



Figuur 2.4. Inwendige inspectie van lasnaden in pijpen met een T.V.-systeem. (Ter beschikking gesteld door Magnaflux Corporation).

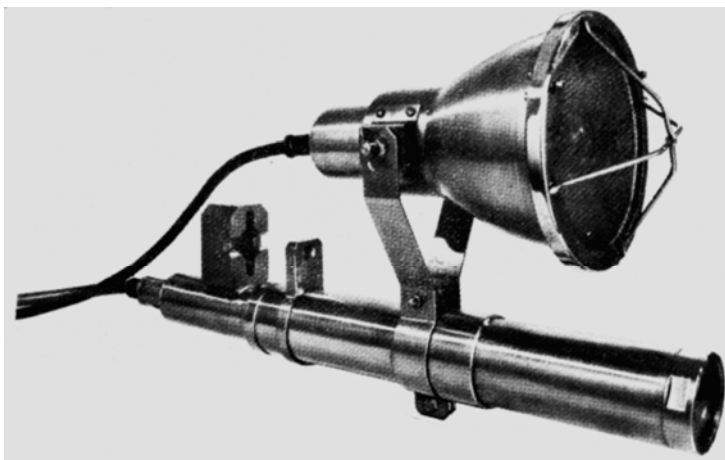


Figuur 2.5. Een 'crawler' met een T.V.-camera. (Fabrikaat Pearpoint Flexiscan)

Figuur 2.5 geeft een voorbeeld van een zogenaamde 'crawler' met een T.V.-camera, geschikt voor de inspectie van pijpen met een inwendige diameter van minimaal 20 cm.

Figuur 2.6 toont nog een uitvoering van een waterdichte camera (uitwendige diameter 64 mm), waarboven een 500 W-lamp gemonteerd is. Deze camera kan worden bevestigd bijvoorbeeld op de helm van een duiker, zodat visuele inspectie onder water op afstand mogelijk is (schepen, booreilanden).

In lit. 2.4 wordt opgemerkt, dat met name de visuele inspectie op afstand met video-camera's steeds meer ingang vindt, maar ook dat nieuwe toepassingen vaak de ontwikkeling van speciale apparatuur vereisen.



Figuur 2.6. Televisiecamera met lichtbron. (Ter beschikking gesteld door Aims N.D.T. B.V.)

Het onderzoek van pijpen is zo'n gebied. De ontwikkelde systemen met ingebouwde videocamera kunnen een afstand van tenminste 15 m bestrijken. Inspectie van boringen tot 13 mm diameter is hiermee mogelijk.

De camera's voor dit onderzoek worden verdeeld in twee typen. Het eerste type bestaat uit één 'stuk', heeft als in figuur 2.5 alleen een aansluiting op een elektrische voeding en levert een standaard videosignaal, zwart-wit (RS-170) of kleur (NTSC). Deze camera's kunnen verbonden worden door speciale kabels met een monitorsysteem en worden verschoven via een haspel. Men kent een uitvoeringstype (5-8 cm diameter) met een camera die vooruit kijkt, met een lengte van 31-50 cm, naast het type waarin de camera opzij kijkt en waarbij de camera kan roteren, waardoor het mogelijk is de gehele omtrek te inspecteren. Het spreekt voor zich, dat in deze camera's een belichtingssysteem is ingebouwd.

Het tweede hoofdtype is uitgevoerd in twee delen: naast een opnamegedeelte, dat klein van omvang is, hoort een moduul dat de elektronica bevat en dat op afstand kan worden bevestigd. De camera's zijn meestal van het CCD-type, met ook hier uitvoeringen met een videosignaal in zwart-wit of kleur. 'Zwart-wit' systemen vertonen een veel grotere gevoeligheid, kunnen bij een zwakkere verlichting werken en zijn ook lichter geconstrueerd dan 'kleur'systemen. De eerst genoemde systemen maken een dankbaar gebruik van het vermogen van het oog om in zwart-wit – dit geldt overigens voor alle monochrome beelden – meer details te onderscheiden dan in kleur. Daarbij komt nog het feit dat de elektronische beeldversterking van zwart-wit beelden veel gemakkelijker is dan van beelden in kleur. Lit. 2.4 stelt op grond van ervaring dat de 'zwart-wit' systemen superieur zijn, vooral als geïnspecteerd kan worden in dezelfde kleur als het te onderzoeken object. Men vindt het gebruik van kleur, hoewel er toepassingen zijn waar op kleur moet worden gedetecteerd (penetrant onderzoek, zie ook § 2.6), in apparatuur voor visuele inspectie een verkoopaspect.

Fabrikanten blijven zich inspannen om verbeteringen, zowel in een lichtere uitvoering als met een verhoogde gevoeligheid (super VHS), te realiseren.

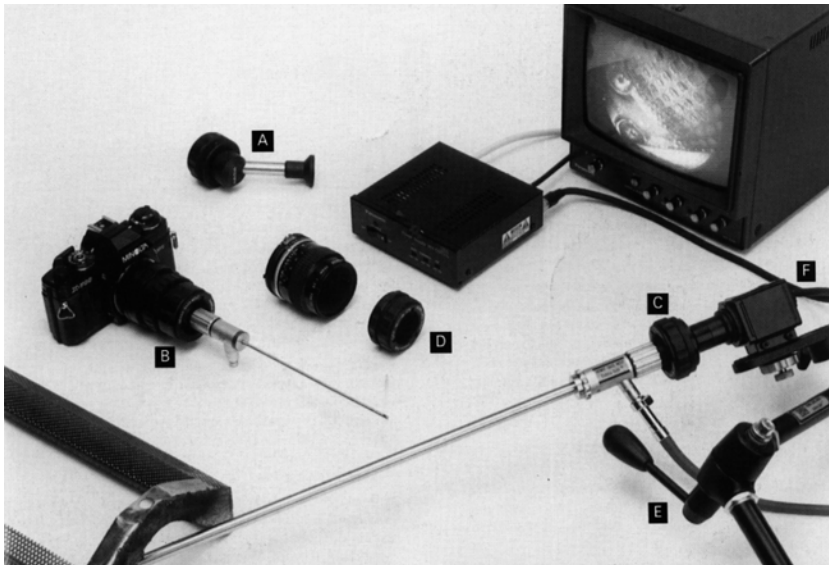
Voor verdere technische informatie ten aanzien van kabels en technische hulpmiddelen

bij de uitvoering van een inspectie wordt verwezen naar lit. 2.4.

De voortgangssnelheid bij deze vorm van inspectie bedraagt een 10 tot 20 cm/s.

Endoscopen, borescopen, periscopen

Alle apparaten met optische systemen, waarmee van buitenaf de visuele inspectie van moeilijk toegankelijke ruimten uitgevoerd kan worden, heten *endoscopen*. Het eerste type werd rond 1875 ontwikkeld voor medische toepassingen. Endoscopen bestemd voor technische toepassingen noemt men *borescopen* (figuren 2.7 en 2.12). Al deze apparaten bevatten een ingebouwd belichtingssysteem. De starre uitvoering, die eerst wordt behandeld, werkt met een optisch systeem, gelijk aan dat van een telescoop, waarmee het door een objectief gevormde beeld door een oculair bekeken kan worden; N_{in} is 3 tot 4. Ook registratie via een camera of een T.V.-systeem is mogelijk. De afstand objectief–oculair, de werklengte, kan vergroot worden door gebruik te maken van hulpstukken, die voorzien zijn van veldlenzen.



Figuur 2.7. Borescoop, met hulpstukken en toebehoren. (Foto van Matcom B.V. en Henke-Sass, Wolf)

In tabel 2.2 zijn enige gegevens van enkele zeer smalle en kleine apparaten opgenomen. Tabel 2.3 bevat gegevens van borescopen, waarmee zeer grote afstanden overbrugbaar zijn.

Tabel 2.2. Borescopen.

buisdiameter mm	werklengte mm
1,9	115 tot 180
2,7	100 tot 475

Tabel 2.3. Borescopen

buisdiameter cm	werklengte cm	beeldhoeken
4,0	17,8-30,0	55-100°
5,0	25,5-65,5	50-80°
6,0	25,5-45,5	50-80°
8,0	28,0-69,0	55-90°
10,0	28,0-129,0	35-60°

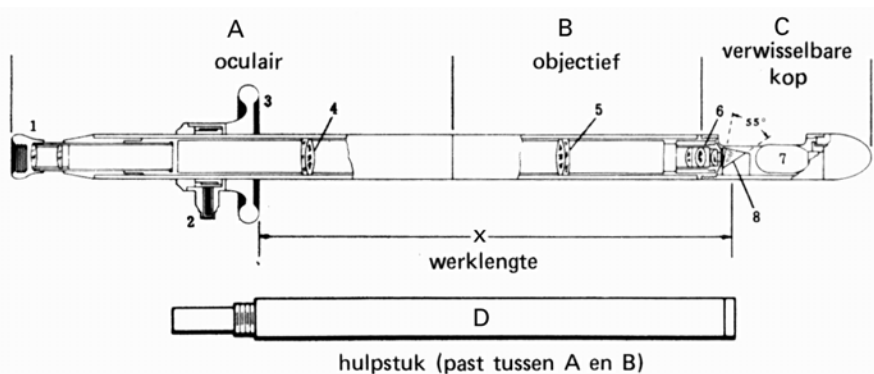
Met behulp van verlengstukken kan de werklengte in stappen (80 cm is gebruikelijk) vergroot worden en kan bijvoorbeeld voor een buisdiameter van 15 mm een lengte van 10 m worden bereikt.

Figuur 2.8 geeft het schema van een borescoop. Het oculair bevat een verwisselbare lens, waarmee scherpstelling mogelijk is (1), een vrij roterende elektrische aansluiting (2), een handwiel, waarmee het apparaat gericht kan worden (3) en de veldlens (4). Het objectief bestaat uit een veldlens (5) en de objectieflens (6). De hier beschreven uitvoering bevat nog een verwisselbare kop en een elektrisch verlichtingssysteem met een gloeilamp (7) benevens een spiegel en/of prismasysteem (8) voor het gewenste type gezichtsveld. Hiervoor bestaan nog verschillende mogelijkheden: naar voren gericht, panoramisch en zijwaarts, zoals schematisch is aangegeven in figuur 2.9.

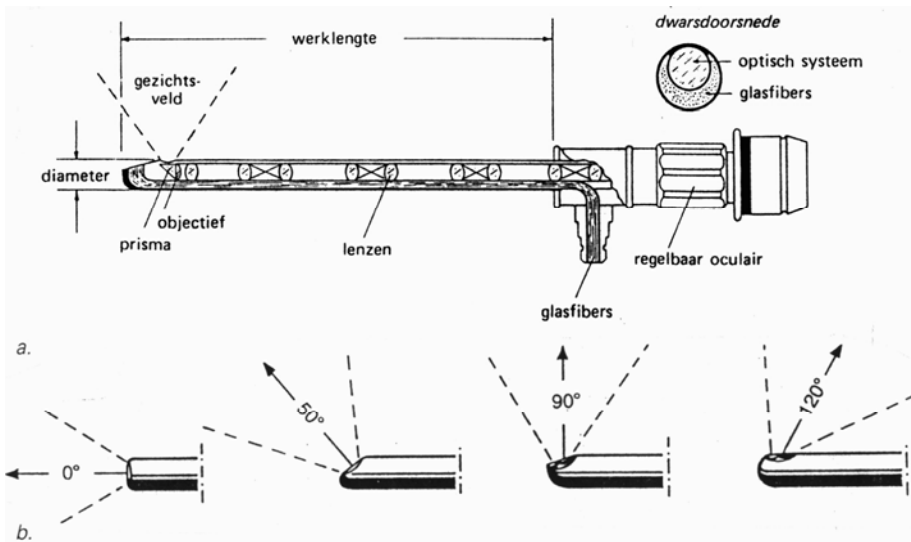
Vanaf een diameter van 5 mm is de buis om de lengteas draaibaar tot 300°.

Van één van de mogelijkheden voor het gezichtsveld toont figuur 2.10 een uitvoering. Tevens is in deze figuur een hulpstuk (behorend bij een ander type borescoop) met een beweegbaar prisma afgebeeld. Figuur 2.11 laat het apparaat zien in een praktische toepassing. Ook borescopen zijn verkrijgbaar, waarin men gebruik maakt van de reeds besproken lichtoverbrenging via een bundel glasfibers.

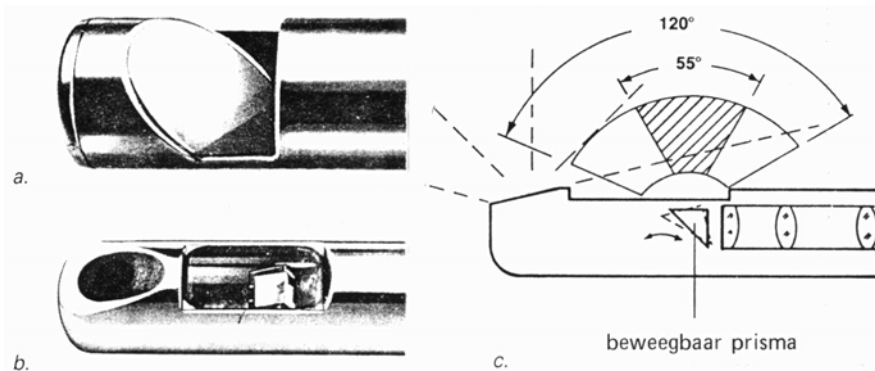
De hiervoor besproken typen zijn star, de buizen zijn van roestvast staal of van een aluminiumlegering. Speciale uitvoeringen voor de inspectie van bijvoorbeeld ovens bevatten een koelsysteem en/of zijn ter voorkoming van explosies met stikstofgas gevuld.



Figuur 2.8. Schema borescoop.

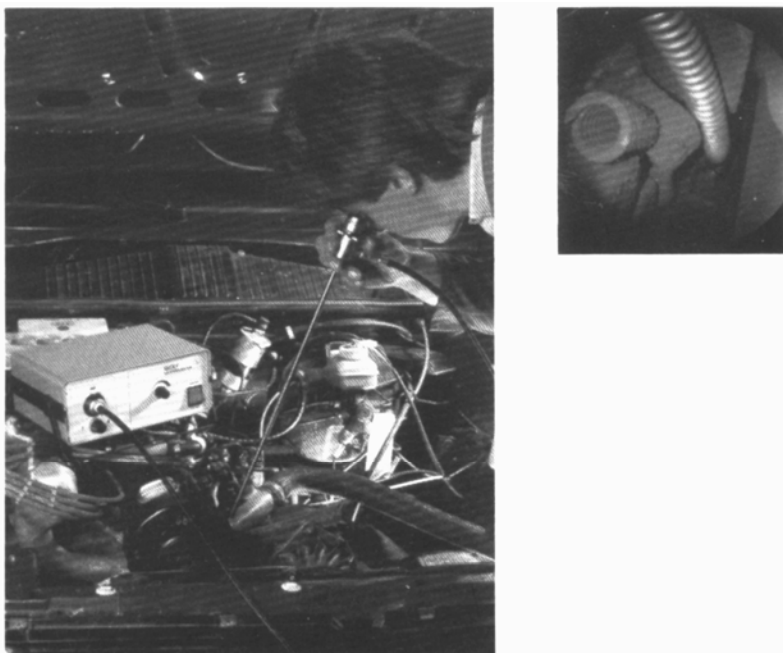


Figuur 2.9. a. Schema borescoop, met lichtgeleiding door glasfibers. b. Enige voorbeelden van mogelijke gezichtsvelden. (Afgestaan door N.V. Endoskopie R. Wolf Belgium S.A.)

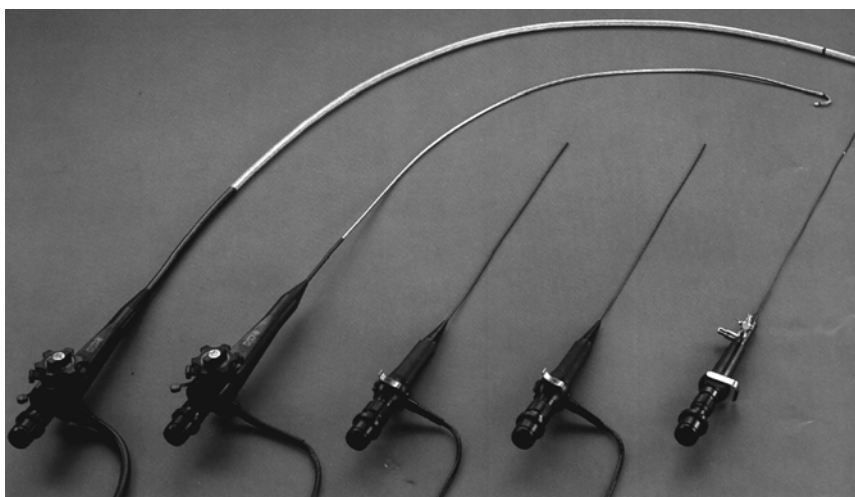


Figuur 2.10. Enige hulpstukken voor een borescoop (fabrikaat Wolf). a. Gezichtsveld onder 90°. b. Gezichtsveld variabel met behulp van een beweegbaar prisma. c. Schematische weergave van b.

Ook een flexibele uitvoering (figuur 2.12) is mogelijk; hierin wordt het licht overgebracht via een bundel glasfibers of een met vloeistof gevulde buis. Een (tweede) streng van glasfibers (totaal aantal circa 120000, dikte van een fiber $9\ \mu\text{m}$) verzorgt de beeldoverbrenging. Aan de ordening van de draden in deze kabels worden hoge eisen gesteld, zodat bij het oculair een niet-vertormd rechtopstaand en kleurecht beeld verschijnt. Het met deze kabel haalbare oplossend vermogen is vergelijkbaar met dat van een normaal T.V.-toestel.



Figuur 2.11. Bore-scoop hij de inspectie van een motorblok. (Ter beschikking gesteld door N.V. Endoskopie R. Wolf Belgium S.A.)



Figuur 2.12. Bore-scopen met glasvezeloptiek. (Foto van N.V. Endoskopie R. Wolf Belgium S.A.)

In een aantal uitvoeringen is de focus op afstand instelbaar vanaf 7 mm (N_{lin} tussen 5 en 12,5) tot oneindig en kan het uiteinde van de kabel met het objectief op afstand over maximaal 120° naar boven en naar beneden gedraaid worden, zodat in verschillende richtingen geïnspecteerd kan worden. In tabel 2.4 zijn enige gegevens van commercieel verkrijgbare flexibele borescopen opgenomen.

Tabel 2.4. Flexibele borescopen.

doorsnede mm	werklengthe cm
1,6	45-70
5,0	104-128
11,3	132-282

De toe te passen kabellengte kan overigens beduidend groter zijn. Zo wordt een kabel toegepast van 1 mm diameter en een lengte van 10 m, waarbij met een frequentie van 5-500 Hz laserlicht met een pulsduur van 0,5-20 ms een gemiddeld vermogen van 1000 W wordt getransporteerd.

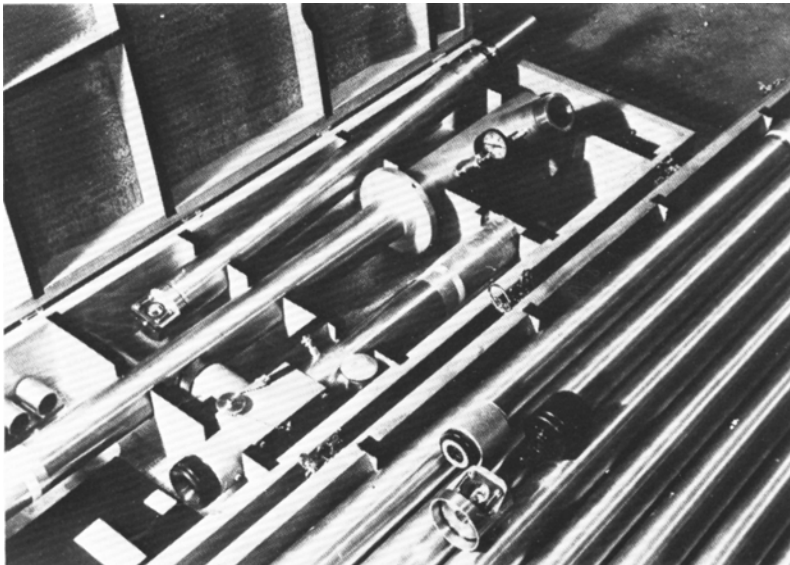
Een beperking is ook nog een maximale temperatuur van 80 °C.

Deze borescopen worden ook als hulpmiddel gebruikt bij bijvoorbeeld het penetrant- en het magnetisch onderzoek. Hiervoor zijn ondermeer uitvoeringen ontwikkeld waarmee u.v.-licht overgebracht kan worden.

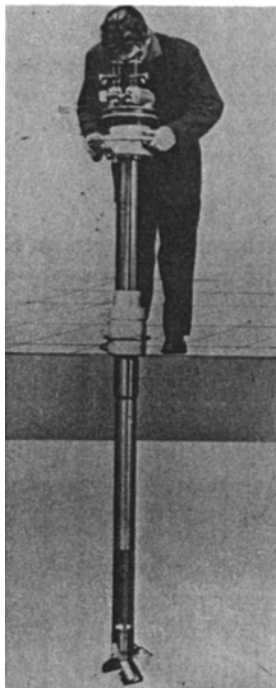
Periscopen

Ook de periscoop heeft een telescopisch systeem en is in principe een borescoop. Meestal bevat een periscoop een mechanisme waarmee de kop draaibaar is, waardoor zicht over 360° mogelijk is. Vaak maakt de as van het oculair een hoek met de as van het instrument.

Figuur 2.13 is een voorbeeld van een uit secties op te bouwen waterdichte met stikstof gevulde periscoop (maximale lengte 30 m), toegepast voor inspecties in de nucleaire industrie. Een ander voorbeeld geeft figuur 2.14. Deze periscoop dient voor verticale inspectie.



Figuur 2.13. Periscoop, met hulpstukken. (Ter beschikking gesteld door Aims N.D.T. B.V.)



Figuur 2.14. Periscoop voor verticale inspectie. (Ter beschikking gesteld door A.ims N.D.T. B.V.)

2.5. Toepassingen

Hieronder volgt nog een aantal voorbeelden van toepassingsgebieden, die het belang van de besproken techniek illustreren.

- automobielandustrie: inspectie van pompen, radiatoren, versnellingsbakken.
- vliegtuigindustrie: inspectie van straalmotoren, in het bijzonder de schoepen en verbrandingskamers, hogedrukpompen, de aandrijvingen.
- scheepsbouw: inspectie van dieselmotoren, gasturbines.
- metaalindustrie: inspectie van gietstukken vóór de verdere bewerking, lassen in drukvaten, de oppervlaktegesteldheid van boringen.
- chemische industrie: inspectie van gascilinders, leidingen en tanks op scheuren en defecten t.g.v. corrosie.
- nucleaire industrie: inspectie van koelkanalen en koelribben in warmtewisselaars, van gereedschap en apparatuur voor de behandeling van radioactief materiaal.

Opgemerkt moet worden, dat bij het gebruik van hulpmiddelen als borescopen en T.V.-systemen moeilijk toegankelijke plaatsen in complexe constructies bekeken kunnen worden, zonder dat *demontage* behoeft plaats te vinden.

Aparte vermelding verdienen nog de opto-elektronische camerasystemen, die worden toegepast als naadvolgers bij automatisch (robot) gestuurde lasprocessen. Het midden van de lasnaad kan uit het verloop van de reflectie van het licht bij beweging dwars over de

naad berekend worden. In dit verband kan ook het systeem worden genoemd, waarmee uit het opgenomen *warmtebeeld* het midden van de naad wordt berekend, worden genoemd.

2.6. Beeldbewerking en beeldversterking

Leidraad voor dit gedeelte is lit. 2.5, met een zeer uitvoerige beschrijving van de techniek van de beeldbewerking en beeldversterking, van de apparatuur en van toepassingen bekeken vanuit een n.d.o.-standpunt.

Gesteld kan worden dat *beeldbewerking en beeldverbetering* (image processing en image enhancement) kernmethodes geworden zijn voor het analyseren van gedigitaliseerde meetgegevens op een groot aantal vakgebieden. Visuele inspectie (fotografie, microscopie), radiografie, tomografie, thermografie en ultrasoon onderzoek, waarbij tal van acquisitiesystemen reeds een optie bezitten voor beeldverwerking, zijn hiervan voorbeelden

Als voordelen worden aangegeven: de interpretatie van de meetgegevens wordt vergemakkelijkt, er is een kleinere kans op fouten en het uitvoeren van kwantitatieve metingen wordt eenvoudiger. Naast voordelen zijn er ook nadelen: het menselijk oog ziet allerlei details veel sneller dan de (huidige) beeldverwerkende systemen – het zal blijken dat allerlei handelingen veel tijd kosten – en bij aanschaf moet de gebruiker beschikken over de nodige kennis en vaardigheden op het gebied van deze gecomputeriseerde systemen.

Een afweging van de mogelijkheden en beperkingen van zowel de traditionele als de gecomputeriseerde wijze van inspectie dient nog altijd plaats te vinden, omdat enerzijds de mogelijke toepassingen van de digitale beeldverwerking bijna onbeperkt zijn, anderzijds deskundigen als bijvoorbeeld E. Backer en R.P.W. Duin enige terughoudendheid op zijn plaats achten. Zij zijn van mening dat het enthousiasme waarmee onderzoek op het gebied van beeldverwerking plaatsvindt aanmerkelijk groter is dan het aantal praktische situaties waarvoor een adequate oplossing is gevonden en dat voor het moment we nog aangewezen zijn op zogenaamd interactieve systemen, waarbij niet de totale complexe taak van de mens wordt overgenomen maar slechts *de relatief eenvoudige routinematige aspecten*. Voor de komende decade zien zij een spectaculaire groei van het gebruik van beeldverwerkende systemen, met name in de industriële fabricage, kwaliteitscontrole en de industriële research.

2.6.1. Het digitale beeldverbeteringssysteem voor n.d.o.

Een werkstation voor beeldverwerking bevat tal van basiselementen. Op een aantal hiervan zal nader worden ingegaan. Voor allerlei functies is hardware en software te verkrijgen. De moeilijkheid is echter dat ze niet altijd 'compatible' zijn. Niet iedere gebruiker heeft een universeel systeem nodig, meestal zal een afgeleid systeem al voldoende zijn.

Het hart van het systeem is natuurlijk de computer, waarbij met name gelet moet worden op de gewenste rekensnelheid. De uitvoering van veel functies vraagt een aanzienlijke rekentijd. Een voorbeeld: de uitvoering van een (FFT) frequentieanalyse van een beeld van 1024×1024 8-bits beeldpunten duurde in 1994 11 352 seconden met een Microvax en 25 seconden met een HP9000. De rekentijd kan aanzienlijk verkort worden door het

gebruik van een array processor en ligt voor het voorbeeld al onder de 10 seconden. Ook de toepassing van specifieke hardware, die een bepaalde functie snel uitvoert, vormt een mogelijkheid.

De verwachting is overigens dat in de (nabije) toekomst als gevolg van de ontwikkeling van steeds snellere computers voor steeds lagere prijzen tal van nu nog veel tijd vragende, gecompliceerde bewerkingsfuncties routinematig uitgevoerd kunnen worden.

2.6.2. De acquisitie

Beeldverwerking met een computer is alleen maar mogelijk als de beeldinformatie in getallen, anders gezegd in digitale vorm, wordt aangeleverd. Ook voor het n.d.o. geldt, dat de waarneming een *analoog meetsignaal* oplevert. Bij het digitaal opnemen hoort dan een tweede fase met de verdeling van de meetwaarden over een verzameling meetintervallen. Aan elk interval wordt een getalwaarde toegekend. Levert de waarneming als signaalvorm een trilling op, dan vindt een bemonstering van het analoge signaal plaats door het bepalen van een groot aantal meetpunten, waarbij erop gelet moet worden dat de bemonsteringsfrequentie groter is dan de frequentie van het meetsignaal om effecten als aliasing bij de verwerking te voorkomen.

De beeldinformatie wordt nu verkregen door als bij een schaakbord het beeldvlak te verdelen in een groot aantal genummerde vakken. Van elk vak of pixel wordt een meetwaarde uitgelezen die een maat is voor de beeldinformatie. Het totale aantal pixels waarmee het beeld wordt beschreven is afhankelijk van de uitleesapparatuur en bij 'real-time' opnamen van de toegestane uitleestijd.

De ingelezen beeldinformatie kan worden weergegeven op een monitor. Hierbij wordt de gedigitaliseerde meetwaarde vertaald in een grijs tint of in een kleur. Bij een aantal systemen is het gebruikelijk om de beeldinformatie op te nemen in 12 bits of meer, maar voor de weergave slechts 8 bits te gebruiken. De achterliggende gedachte is dat het dynamisch bereik voor het oog een gegeven waarde niet overschrijdt.

Uitgebreide informatie is beschikbaar over uitleesapparatuur, die onderverdeeld wordt in:

- *puntscanners* als de microdensitometers en de laserscanners, waarmee pixels met een zeer klein oppervlak uitgelezen kunnen worden. Hiermee kan een uitstekende beeldkwaliteit verkregen worden, waarvoor men dan wel een lange acquisitietijd moet accepteren. Voor de densitometer kan deze tijd meer dan een uur bedragen als de zwartingswaarde van de uit te lezen foto boven de twee uitkomt. Voor de laserscanner is deze tijd beduidend lager, omdat de lichtbron veel intenser is en omdat de aftasting van het beeld niet geheel een mechanische is.
- *lijnscanners* als een 'array' van fotodetectoren of van een lineaire CCD. De verkregen beeldkwaliteit wordt goed genoemd en waar het uitlezen van een beeldvlak van 1024 rijen binnen enkele seconden kan gebeuren, blijken deze detectoren zeer geschikt voor het digitaal lezen van filmmateriaal. De pixelgrootte is met lenzen instelbaar.
- *vaste stof camera's* en *camera's van het vidicontype*. De beeldkwaliteit is redelijk bij opnametijden per beeldvlak (vaak een 'frame' genoemd) van 33 ms. Nadere details zijn niet relevant omdat de ontwikkelingen bij deze camera's zeer indrukwekkend zijn, hetgeen heeft geleid tot het in toenemende mate inzetten van met name de CCD camera's bij allerlei 'real time' n.d.o.

2.6.3. Beeldbewerking

Voor dat overgegaan wordt naar de beeldbewerking kan het noodzakelijk zijn één of andere vorm van voorbereiding op het gegevensbestand uit te voeren. Hierbij kan bij de invoer gedacht worden aan één of andere vorm van convertering van de bestanden, het bepalen van een gemiddelde uit meerdere ‘frames’, het uitvoeren van een filtering en het sturen van de ‘scan’parameters van de ‘digitiser’, met als doel de ruis zo klein mogelijk te laten zijn.

Vervolgens kunnen gecompliceerde bewerkingen als in een tomografische reconstructie (zie § 6.9), het aanbrengen van een synthetische apertuur (zie § 6.9) en in een FFT (fast fourier transformation) zeer sterk de contouren van objectafbeeldingen verbeteren en valse indicaties laten verdwijnen. (Onder FFT wordt verstaan het wiskundig mechanisme waarmee een op tijdbasis geregistreerd signaal wordt geanalyseerd op karakteristieke frequenties).

Een acceptabele presentatie van een tomografische reconstructie vergt wel de verwerking van 1000 beelden en een filtering (met een Wiener-filter om voor de punt-spreidingsfunctie te corrigeren) vóór overgegaan kan worden tot terugprojecteren.

Drie hoofdgebieden voor wetenschappelijke toepassingen bij beeldbewerking kunnen onderscheiden worden:

- *beeldverbetering*, waardoor het bekijken van het beeld wordt vergemakkelijkt;
- *manipulatie en restauratie* van een beeld;
- *extractie van informatie* uit het opmeten en het afscheiden van karakteristieke beeldgrootheden.

De drie aangegeven categorieën zijn nog onderverdeeld.

In de categorie *beeldverbetering* vallen de volgende aspecten:

- het uitrekken van het contrast (contrast stretching);
- de gelijkmaking in het histogram (histogram equalization);
- de beïnvloeding van contouren (contouring);
- het aanbrengen van drempels (thresholding);
- de vorming van een samengesteld beeld (composite image building);
- de selectie van een kleurmodel, de presentatie in ware kleuren en de beïnvloeding van het kleurpalet.

Tot de categorie *beeldmanipulatie* worden gerekend:

- opschaling (scaling), translaties, rotaties en vervorming (warping);
- de registratie, het samenvoegen;
- filteren, het verdikken en verdunnen;
- het verwijderen van ruis en van ‘trends’.

Onder *extractie van informatie* vallen:

- statistische bewerkingen en parameterbepalingen;
- transformaties als 1- en 2-dimensionale FFT;
- bepalingen van correlaties;
- detectie van kanten; ‘deblurring’;
- restauratie van beweging;
- patroonherkenning.

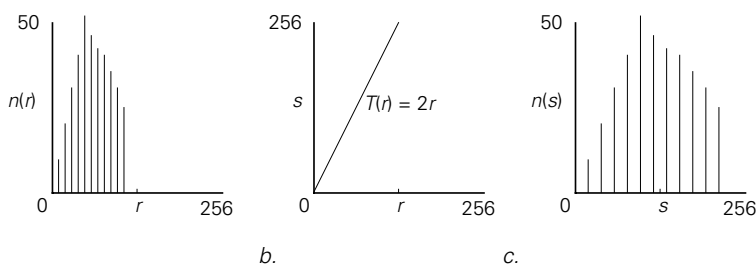
Veel van deze functies hebben een meervoudig doel en worden veelal gecombineerd om nieuwe functies te vormen.

2.6.4. Beeldverbetering

1. Het uitrekken van het contrast

In de handleidingen van operationele systemen blijkt het uitrekken van het contrast een belangrijke functie te zijn, die te vergelijken is met de mogelijkheid het schaalbereik te vergroten bij een instrument. Bij deze functie van het beeldverbeteringssysteem wordt een *transformatie* uitgevoerd op – om de gedachten te bepalen – de grijsint van iedere pixel in het beeld. Bij deze transformatie geldt, dat de achterliggende wiskundige formule geen rekening houdt met de onderlinge samenhang van naburige pixels.

Ten behoeve van de uitvoering van de transformatie kan een *histogram* aangemaakt worden met een verdeling over de grijsintwaarden. Een voorbeeld geeft figuur 2.15.a, waarin de getalwaarden van de grijsint liggen tussen 0 en 120. Kan voor een grijsint de maximale getalwaarde 256 zijn, dan is via het rekenprogramma behorend bij de transformatie (figuur 2.15.b) een vermenigvuldiging van elke waarde met bijvoorbeeld 2 – en dus een uitrekking van de schaal – zonder problemen mogelijk (figuur 2.15.c).



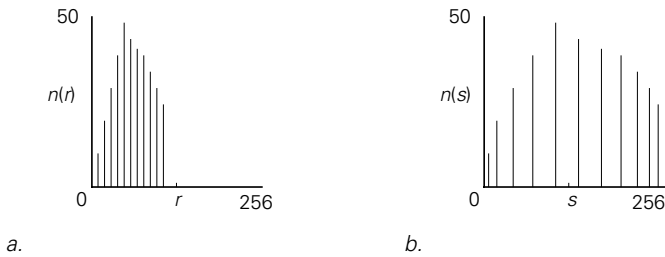
Figuur 2.15. a. Histogram, b. transformatie c. schaalvergroting.

Meestal wordt bij de transformatie een lineaire uitrekking van de vorm $y = ax + b$ toegepast. In bepaalde situaties, zoals bij het verwerken van de informatie van een ingelezen beeld van een originele opname op fotografisch materiaal, worden ook niet-lineaire transformaties als bijvoorbeeld de logaritmische toegepast. Met deze beeldbewerkingsfunctie is het met name mogelijk kleine lokale contrastverschillen te vergroten, waardoor de zichtbaarheid van details – bij n.d.o. zwakke indicaties van defecten ten opzichte van de omgeving – sterk wordt verbeterd.

2. De gelijkmaking in het histogram

Ook de gelijkmaking in het histogram is een functie, waarmee een transformatie van de grijs- of kleurtintwaarden kan worden uitgevoerd. De bedoeling van deze functie is het uitvoeren van een herverdeling van de pixelwaarden en wel zodanig, dat het aantal pixels met grijs- of kleurtintwaarden per gekozen waardeinterval steeds hetzelfde is. Bij deze transformatie, die voornamelijk bij automatische verwerking wordt toegepast, kan het totale bereik gelijk blijven, maar ook uitgerekt worden.

Ter illustratie een voorbeeld: in figuur 2.16.a is een histogram weergegeven met $n(k)$, het aantal pixels met grijsintwaarde k uitgezet tegen k , waarvoor slechts de tentalwaarden – om het rekenwerk te vereenvoudigen – zijn toegelaten.



Figuur 2.16. a. Histogram met $n(r)$ tegen r , b. herverdeeld histogram.

Het totaal aantal pixels n is in dit voorbeeld 376. Uit figuur 2.16.a volgt de relatieve frequentie $p(k) = n(k)/n$.

Voor de transformatie is de lineaire relatie $s(k) = s(\max)[p(10) + p(20) + \dots + p(k)]$ gekozen, waarin $s(k)$ de nieuwe grijsintwaarde wordt voor het aantal pixels $n(k)$ en $s(\max)$ de gewenste uitrekking van het contrast aangeeft. Figuur 2.16.b geeft het nieuwe histogram. Uit de figuur volgt, dat in dit voorbeeld de grootte van het interval wordt aangepast aan het aantal pixels met een gegeven waarde. De essentie van de methode is een herverdeling naar een gelijk aantal pixelwaarden bij een ongelijke grootte van het interval. In de praktijk blijkt bij toepassing van deze methode de detailherkenbaarheid in het beeld verbeterd te zijn.

Ook andere typen transformaties worden bij gelegenheid toegepast. Zo is het effect van een kubische functie een grotere nadruk op de lagere waarden van de grijsintinten, waardoor het zwart-wit beeld donkerder wordt, waar een exponentiële transformatie juist de heldere waarden in het beeld meer accent geeft.

Benadrukt moet nog worden, dat het kijken naar geïsoleerd voorkomende defecten het best gebeurt met het manueel uitrekken van het contrast en dat de tweede behandelde methode te prefereren valt bij het onderzoek aan getextureerd materiaal.

In het artikel is nog als voorbeeld opgenomen een afbeelding van een explosielas van roestvast staal aan een Al-plaat.

3. Het aangeven van contouren in een beeld

Het benadrukken van belangrijke contouren in een afbeelding wordt vaak uitgevoerd met een wiskundige bewerking van de pixelwaarden, waardoor aan de pixels in het contour bijvoorbeeld een sterk afwijkende waarde wordt toegekend. Veelal wordt een en ander gecombineerd met manipulaties in het kleurenpalet. Bij het doorlopen van een lijn in het beeld die een contour passeert, treedt een gradiënt in het contrast op die veel beter in een kleurpresentatie kan worden benadrukt dan in zwart-wit. Opgemerkt moet hierbij worden dat het oog zeker voor 10.000 verschillende kleuren gevoelig is.

4. Het toepassen van drempels

Drempels worden gebruikt om bijvoorbeeld een defect te accentueren of om een achtergrond te verwijderen. Zo kan men hiermee een zogenaamd binair beeld maken door alle grijsintwaarden onder een bepaalde drempelwaarde op 0 te stellen en die daarboven op 1, waarna bijvoorbeeld bij een ingelezen röntgenfoto aan het herkenbaar gemaakte defect kan worden gemeten. Ook bij het toepassen van deze functie is de veelal combinatie met het manipuleren van het kleurenpalet aan te bevelen.

5. *Het vormen van samengestelde niet gelijksoortige beelden*

Het zal duidelijk zijn, dat voor de beeldbewerking het er niet toe doet met welk type n.d.o.-onderzoek de beeldinformatie is verkregen. Dit heeft als gevolg dat de getalsinformatie van meerdere niet gelijksoortige beelden samengesteld kan worden tot die van een nieuw beeld. In een onderzoek van TNO (lit 2.6) is de samenstelling van een visueel beeld met een infrarood opname van een gecamoufleerd opgestelde tank reeds met succes bestudeerd. Lit. 2.5 toont als voorbeeld een combinatie van twee andere opnamen: één gemaakt met röntgenstralen, de andere met neutronen. Deze combinatie is interessant omdat met name *gasholten* in een composietmateriaal op deze manier beter zichtbaar blijken te zijn dan op de afzonderlijke opnamen. In het gegeven voorbeeld is de absorptie van neutronen beter in de epoxy en die van de röntgenstraling in het aluminium.

De auteurs geven hierbij wel aan, dat voor een voldoende oplossend vermogen het aantal beeldpunten tenminste 1024×1024 dient te zijn, omdat de op dit moment gebruikelijke weergave met minder beeldpunten onvoldoende oplossend vermogen heeft voor deze toepassing.

6. *Het besturen van het kleurpalet*

De weergave in kleur van een object is mogelijk in de echte kleuren, maar ook in zogenaamde pseudokleuren. Ten behoeve van de weergave wordt gebruik gemaakt van een opzoektabel – ‘Look Up Table’ of LUT – waarbij de LUT gestuurd wordt door het palet, dat bepaalt welke combinatie van de primaire kleuren *rood*, *groen* en *blauw* of van de parameters *kleurtint*, *verzadiging* en *intensiteit* wordt toegewezen aan een pixelwaarde uit het domein van 0 tot 256.

7 & 8. *Kleurmodellen en het gebruik van kleur*

Van belang is op te merken dat elke presentatie van een beeld (zwart-wit of kleur) dezelfde informatie bevat. De waarnemer bepaalt aan welke presentatie de voorkeur gegeven moet worden, omdat voor het menselijk oog bepaalde karakteristieke kenmerken in de ene presentatie beter uitkomen dan in de andere. Zo wordt in een zwart-wit beeld een hoge ruimtelijke frequentie door de waarnemer adequaat geïnterpreteerd als een textuur. Een lage ruimtelijke frequentie en ook geïsoleerd voorkomende objecten worden beter onderkend in een afbeelding in kleur, zeker na het toepassen van de versterking van het contrast.

2.6.5. *Beeldmanipulatie*

1. *Het opschalen*

Het opschalen van een beeld is een belangrijke functie, omdat het de gebruiker in staat stelt een beeld te vergroten of te verkleinen, waarvan gebruik gemaakt kan worden bij het vergroot bekijken van een detail of bij het samenvoegen van meerdere beelden. De rekenkundige procedure – het vermenigvuldigen van de x - en y -coördinaten met een getal – behoeft nog nadere toelichting, omdat er een voorschrift moet bestaan hoe bijvoorbeeld bij vergroting de tussenliggende ruimte opgevuld moet worden. Hierbij kan onder andere gekozen worden voor interpolatie of voor duplicering. De auteurs merken op dat de interpolatie in het beeld en ook de opschaling met een niet-geheel getal vermeden moet worden, tenzij het beeld in de daarop volgende handeling wordt gefilterd of afgedrukt.

2. Translatie en rotatie

Deze functies spreken voor zich, zij zijn met name van belang bij het samenvoegen van meerdere beelden.

3. Vervormen

Voor deze functie bevat de procedure wiskundige relaties, waarmee uit de coördinaten van een pixel de nieuwe kunnen worden berekend. Een voorbeeld:

$$X' = a + bX + cY + d_{XY} + eX_2 + fY_2$$

en met een vergelijkbare betrekking met andere coëfficiënten voor Y' . Het nut van deze transformatie is: het doorvoeren van een beeldcorrectie ten opzichte van de waarnemingsrichting, waardoor een inspectie van een detail beter verricht kan worden.

4. Het registreren en het combineren van beelden

Voorafgaande aan het uitvoeren van een combinatie van meerdere beelden wordt veelal een 'registratie' van beelden uitgevoerd, waarbij met behulp van een correlatiefunctie of door het verschil van (twee) beelden te bepalen wordt nagegaan hoe goed de passing is. Meestal moet volgens de auteurs de aanpassing uitgevoerd worden volgens een 'trial and error'-methode, waarbij dan gebruikt gemaakt wordt van de translatie-, de rotatie- en de vervormingsfunctie.

Voor de combinatie van de beelden zijn een groot aantal functies beschikbaar, zoals de AND-, de NAND-, de OR-, de NOR- en de XOR-functie, waarmee men beelden kan optellen, aftrekken, vermenigvuldigen, delen en middelen. Het spreekt voor zich dat een beeld niet alleen aan een tweede beeld, maar ook aan een operant als een constante of een mal gekoppeld kan worden. In het laatste geval is dan het aangeven van kenmerken in het beeld mogelijk.

5. Filteren

Voor het uitvoeren van filteroperaties op de beeldinformatie is een zeer groot aantal typen beschikbaar waarvan, om een inzicht in de werking ervan te bieden, een aantal geïllustreerd met getallenvoorbeelden zal worden besproken.

In lit. 2.5 worden twee klassen onderscheiden: *convolutiefilters* en *overige filters*. De convolutiefilters hebben als kenmerk dat met een twee-dimensionale sommatiefunctie de nieuwe pixelwaarden worden uitgerekend. Bij de uitvoering schuift de zogenaamde kern ('kernel') als het filterelement over het gedigitaliseerde beeld. De kern is een kleine $m \times n$ matrix, meestal 3×3 . De filterwerking houdt een matrixvermenigvuldiging in van de kern met de door de kern bedekte matrix in het beeld. De uitkomst wordt de nieuwe pixelwaarde van het centrum van de beeldmatrix. De kern mag niet te groot genomen worden, omdat de convolutiemethode dan qua rekentijd niet meer kan concurreren met andere methoden als bijvoorbeeld de FFT. Het is gebruikelijk bij de filteroperatie de randen niet mee te nemen. Tot deze klasse behoren:

- het hoog- en het laagfrequent doorlaatfilter;
- het horizontale- en het verticale randfilter;
- de Laplace- en de kompasoperator.

De belangrijkste effecten zijn: het verwijderen van achtergronden en van ruis over het gehele beeld of in incidentele punten, het benadrukken van kenmerken of het doen

vervagen ervan.

Enige voorbeelden

De matrixvermenigvuldiging van de kern met de beeldmatrix vereist de sommatie van de productwaarden van de gelijkgeplaatste matrixelementen. De eindwaarde kan nog gedeeld worden door een gewichtsfactor.

Als beeld wordt genomen:

0	0	0	3	3	3	3	3
0	0	0	3	3	3	3	3
0	0	0	3	3	3	3	3
0	0	0	3	3	3	3	3

1. Het laagfrequent doorlaatfilter

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

De vermenigvuldiging geeft als resultaat:

0	0	0	3	3	3	3	3
0	0	1	2	3	3	3	3
0	0	1	2	3	3	3	3

Met als effect een vervaging van de rand.

2. Het hoogfrequent doorlaatfilter

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 9 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

De vermenigvuldiging geeft als resultaat:

0	0	0	3	3	3	3	3
0	0	-9	12	3	3	3	3
0	0	-9	12	3	3	3	3

Met als effect een accentuering van de rand. In de praktijk worden verschillende van dit soort filters toegepast, waarbij de mate van accentuering verschilt.

3. Het verticale randfilter

$$\begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

De vermenigvuldiging geeft als resultaat:

0	0	0	3	3	3	3	3
0	0	0	9	0	0	0	0
0	0	0	9	0	0	0	0

Met als effect: alleen de rand blijft over.

Het blijkt dat de naam van het filter terecht gekozen is.

4. *Het horizontale randfilter*

Dit filter wordt verkregen door in de presentatie van het verticale randfilter de rijen en de kolommen te verwisselen. Gemakkelijk is na te gaan dat dit filter geen positief effect heeft op het beeld uit het voorbeeld: het maakt alle elementen 0.

5. *Het Laplacefilter*

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

De vermenigvuldiging geeft als resultaat:

0	0	0	3	3	3	3	3
0	0	-9	9	0	0	0	0
0	0	-9	9	0	0	0	0

De werking is vergelijkbaar met die van het randfilter.

6. *Het ruisfilter*

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

De vermenigvuldiging geeft als resultaat:

0	0	0	3	3	3	3	3
0	0	2	3	3	3	3	3
0	0	2	3	3	3	3*	3
0	0	2	3	3	3	3*	3

Met als effect: een vervaging van de grens. De onderdrukking van de ruis komt hier niet tot zijn recht, omdat het gekozen voorbeeld geen ruis bevat.

Ruis kan geïntroduceerd worden door bijvoorbeeld de met een * gemarkeerde waarde te vervangen door de waarde 0. De filtering geeft nu als resultaat:

0	0	0	3	3	3	3	3
0	0	2	3	3	2,7	2,7	2,7
0	0	2	3	3	2,7	2,7	2,7
0	0	2	3	3	2,7	2,7	2,7
0	0	2	3	3	2,7	2,7	2,7

Het effect is duidelijk: de ruis is voor het grootste gedeelte verdwenen. Merk op, dat één en ander ten koste gaat van de getalwaarden van de naburige pixels.

7. Het kompasfilter

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

De vermenigvuldiging geeft als resultaat:

$$\begin{array}{cccccccc} 0 & 0 & 0 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 \\ 0 & 0 & 9 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 9 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array}$$

Dit type filter werkt vergelijkbaar met het laplacefilter.

Andere typen filters

1. Het mediaanfilter

Dit filter bepaalt de mediaanwaarde in de beeldmatrix en gebruikt deze als vervanging van de waarde van de centrale pixel. Een voorbeeld: de matrix bevat de volgende waarden: 1e kolom 3, 6, 6; 2e kolom 5, 1, 9 en in de 3e kolom 10, 10, 11. In deze reeks waarden is kennelijk de waarde 1 de ruis. In een histogram van alle waarden is 6 als vijfde in de rij de keuze voor de mediaan.

Dit filter blijkt zeer effectief te zijn in de verwijdering van geïsoleerde pixelruis zonder de contouren van het beeld te vervagen, zoals bij het laagfrequent doorlaatfilter het geval is. De gebruiker kan zonodig de keuze wijzigen (men spreekt dan in het algemeen van een *percentilefilter*). Wordt de laagste waarde gekozen, dan noemt men het filter een *erosiefilter* en in het geval van een keuze van de hoogste waarde noemt men het een *dilatatiefilter*. Deze filters worden vaak toegepast om de contouren van een object te verdikken dan wel te verdunnen. Meestal worden deze filters nog gevolgd door de toepassing van een ‘unsharp mask’ filter, dat het contrast – met name aan de randen – aanscherpt.

2. Het Robertsfilter

Het Robertsfilter is bedoeld als randdetector. Het wordt toegepast op een 2×2 beeldmatrix en versterkt vooral de hoge frequenties. In de algoritme wordt de volgende formule toegepast:

$$g(x,y) = \sqrt{(f(x,y) - f(x+1,y+1))^2 + (f(x,y+1) - f(x+1,y))^2}$$

3. Het Sobelfilter

Het Sobelfilter is te vergelijken met het Robertsfilter. Het werkt met een 3×3 kern en berekent op een vergelijkbare wijze een nieuwe getalswaarde voor de centrale pixel uit de informatie van de naburige pixels. Ook dit filter geeft goede, hoewel dikke, contourlijnen.

4. Het Wienerfilter

Het Wienerfilter behoort tot een klasse filters, die de kwaliteit van het beeld kan herstellen, uitgaande van *voorkennis* over de aard van de ruis of van het mechanisme dat het beeld heeft ‘beschadigd’. Meestal wordt bij toepassing een modelmatige procedure

gevolgd die een of meerdere reeds besproken filters bevat. Met name wordt de FFT genoemd voor het verwijderen van *periodieke* ruis.

5. Het verwijderen van 'trends'

Onder het verwijderen van 'trends', ook wel het vlakmaken van een veld genoemd, wordt de filterfunctie verstaan die tot doel heeft variaties in het contrast te nivelleren in gebieden, die verder homogeen zijn. Dit type filtering moet nagenoeg altijd toegepast worden alvorens gedigitaliseerde röntgenfoto's door het beeldverwerkingsstelsel nader worden bekeken. Een gevolg van de toepassing kan zijn, dat delen van het beeld 'verzadigd' raken, waardoor de informatie van defecten kan worden versluierd. Er bestaan verschillende technieken, waarmee dit effect weer opgeheven kan worden. Deze technieken zijn niet helemaal bevredigend omdat ze kunstmatige defecten genereren.

2.6.6. De extractie van informatie

1. Beeldstatistiek en metingen aan beelden

Reeds eerder is de weergave van de informatie in een *histogram* aan de orde geweest als een nuttig hulpmiddel bij een verdere evaluatie, omdat hieruit het dynamisch bereik is af te lezen. Andere hulpmiddelen zijn:

- het *lijnprofiel*, waarmee ten behoeve van een kwantitatieve analyse de meting van de kwaliteit van het afbeeldende systeem of de variatie van de pixelwaarde over een defect, bijvoorbeeld een holte, of de bepaling van een 'trend' kan worden uitgevoerd;
- de *frequentieanalyse* over een lijn of over een klein gebied.

Daarnaast zijn er allerlei rechtstreekse metingen aan beelden mogelijk zoals de meting van een pixelwaarde en een conversie ervan naar bijvoorbeeld een zwartingswaarde, de meting van een afstand, een hoek en een oppervlak.

2. De 'Fast Fourier Transform', de FFT

Bij zeer veel operaties als filteren en beeldextractie wordt met name gebruik gemaakt van de FFT als standaardfunctie, zowel op 1- als op 2-dimensionale presentaties van de informatie. Lit. 2.5 toont een instructieve toepassing op een ingelezen radiografie van een drukvat vervaardigd van vezelversterkt materiaal. De FFT fungeert eerst als filter van een periodieke ruis (60 Hz) en in tweede instantie van de vezelstructuur.

3. Correlatie

Voor de bepaling van specifieke objecten of van karakteristieke kenmerken in een afbeelding kunnen correlatiefuncties gebruikt worden. Bij de uitvoering worden in de rekenprocedure bijvoorbeeld twee beelden over elkaar geschoven tot een correlatiecoëfficiënt een extreme waarde bereikt. Jones en Claytor merken op, dat deze methode het meest succesvol is bij beelden met goed te onderscheiden contouren en met textuur.

4. Detectie van randen

Een aantal filters voor de detectie van randen en contouren zijn in het voorafgaande al aan de orde geweest.

In het geval van gedigitaliseerde radiografieën (zie § 7.1) kunnen deze standaardfilters niet altijd optimaal worden toegepast, omdat de contouren en randen in de beelden vaak nogal wat ruis bevatten en geringe contrastgradiënten vertonen. Voor deze gevallen dient dan een 'rand'volger, een Hough-transformatie of een andere 'ad hoc' algoritme

toegepast te worden, die gebruik maken van informatie vooraf over de curve van het contrast of door het toepassen van mallen, zoals elders ook reeds is aangeduid. Deze typen filters maken in het algemeen geen deel uit van het standaardpakket.

5. *Geavanceerde functies*

De auteurs denken hierbij aan functies voor:

- herstel van beweging;
- ‘deblurring’;
- maximale entropie;
- patroonherkenning.

De auteurs achten ze van belang bij toepassingen van flitsradiografie, bij video-opnamen met hoge snelheden en voor de correctie van de puntspreidingsfunctie bij tomografie en ultrasoononderzoek en voor andere toepassingen met een geringe signaal-ruisverhouding.

2.6.7. *De weergave van het beeld*

Het laatste hoofdstuk van lit. 2.5 behandelt de mogelijkheden van opslag en weergave van de gegevens. Op een aantal belangrijke punten zal nader worden ingegaan.

De monitor. Aandacht voor ontwikkelingen op het terrein van de beeldbuis, waardoor de te stellen eisen aan de belichting versoepeld kunnen worden zonder verlies aan dynamisch bereik is aanbevelenswaardig. Opvallend is wel, dat het oplossend vermogen en de bandbreedte van een zwart-wit monitor veel beter is dan van een kleurenmonitor (maximaal 4096×3300 en 800 MHz tegen 1280×1024 en 250 MHz).

De printer. De vergelijking van de kwaliteiten van een uitgebreid assortiment aan printers wordt buiten beschouwing gelaten. De algemene kennis die men tegenwoordig heeft op dit gebied moet voldoende zijn voor een goede beoordeling.

Videobanden en -schijven. Voor dit onderwerp geldt hetzelfde als voor de printers.

Pseudo 3-D. Gebruikelijk is een presentatie van de gegevens in een twee-dimensionale vorm. Voor een aantal toepassingen kan een weergave in een driedimensionale vorm effectiever zijn. De mogelijkheden hiertoe nemen toe. Op een aantal plaatsen zijn hiervan al voorbeelden gegeven. Jones en Claytor geven een aantal voorbeelden van reconstructies uit 2-D opnamen. Zij merken op, dat er grafische versnellers beschikbaar zijn die de beelden kunnen doen roteren, dat er lichtbronnen geplaatst kunnen worden die voor een realistische belichting kunnen zorgen en dat er bijvoorbeeld een textuur aan het object kan worden aangebracht. Zij stellen dat de mogelijkheden van 3-D presentaties voor het n.d.o. nog in de kinderschoenen staan.

2.7. *Nog enige toepassingen*

Aparte vermelding verdient apparatuur, waarin de laser wordt gebruikt. Een voorbeeld is de shearograaf, die gebruikt maakt van een ‘real-time’ werkende interferometer, waarmee beelden van spanningsconcentraties aan het oppervlak kunnen worden verkregen. Dit apparaat zal in hoofdstuk 13 nader worden besproken.

In een ander apparaat wordt een laserstraal uitgezonden die na weerkaatsing op het

oppervlak (van een pijp) in een optische sensor wordt opgevangen. Deze sensor roteert met een snelheid van maximaal 1800 toeren per minuut en neemt 360 opnamen per omloop, waarna de opbouw van een topografische afbeelding mogelijk is.

Defecten als bijvoorbeeld putvormige corrosie kunnen opgemeten worden met een nauwkeurigheid van 0.005 cm. Het onderzoek van het inwendige van pijpen kan plaats hebben tot een diameter van minimaal 2.54 cm.

De visuele inspectie tijdens het lassen

In lit. 2.7 wordt ingegaan op de mogelijkheden van een commercieel verkrijgbaar video systeem bij de inspectie en de besturing van processen, die gepaard gaan met een intense uitstraling van licht. Hierbij kan bijvoorbeeld gedacht worden aan alle booglasprocessen, aan thermisch spuiten en aan fabricageprocessen van metalen.

Het is bekend, dat de inspectie van energiebronnen als de elektrische boog, de vlam en een heet gasvormig plasma, die een zeer intense lichtstraling kunnen produceren, met het blote oog niet mogelijk, dan wel zeer moeilijk is en meestal het gebruik van specifieke hulpmiddelen als 'beroete'- of gekleurde kijkglazen als in laskappen, noodzakelijk maakt. De inzet van een gewoon videosysteem of van een camera is af te raden omdat de kwaliteit van de afbeelding slecht is als gevolg van de extreme variaties in helderheid over het beeldvlak. Alleen de afbeelding van een klein gedeelte met vergelijkbare helderheidswaarden is haalbaar. In het geval van een las is in een totaalopname de detailherkenbaarheid aan de rand van het lasbad, van de groef en van de lasnaad slecht door de overstraling van de boog.

Recente ontwikkelingen in elektro-optische middelen hebben geleid tot nieuwe methoden voor de inspectie van deze energiebronnen met videosystemen, die zeer heldere beelden van allerlei procesdetails kunnen opleveren, al dan niet na verwerking in een gecomputeriseerd beeldbewerkingssysteem.

De apparatuur die in lit. 2.6 wordt besproken, past een methode toe waar niet de opname tot stand komt met het *uitgestraalde* licht van het object, maar met het *weerkaatste* licht van het object, dat uitgezonden wordt door een bij de apparatuur horende lichtbron. De lichtbron is een laser, die een zeer intense lichtflits met een duur van 5 ns kan produceren, waarmee bijvoorbeeld de *lasboog* overstraald wordt.

Dank zij dit stroboscopisch werkende systeem is ook een inspectie mogelijk van dynamisch verlopende processen en is het systeem inzetbaar middels een terugkoppelingsprocedure bij de besturing van een proces. Ook het gebruik van bijvoorbeeld twee lasers voor een zogenaamde 'double exposure' opname is mogelijk.

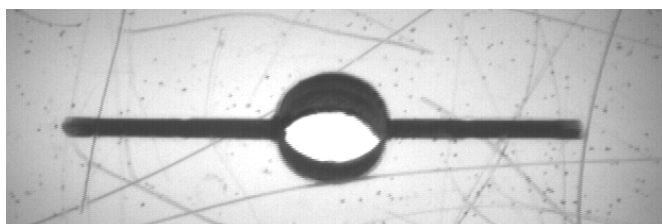
Het belangrijkste gedeelte van het apparaat naast de verlichtingseenheid en de camera is de besturingseenheid, die een geschikt trigger signaal afgeeft naar de laser en tegelijk naar de sluiting van de camera. De commando's hiervoor bevinden zich in een primair afgegeven 'master timing' puls, die gesynchroniseerd loopt met het videosignaal en die gevolgd wordt door de introductie van een elektronische vertraging in de 'triggering' van de laser en van de sluiting van de camera, waardoor gecompenseerd wordt voor de inherent aan het systeem aanwezig zijnde optische- en elektronische vertragingen.

In lit. 2.7 worden enige voorbeelden van opnamen van een aantal lasprocessen getoond. Als eerste een opname van een TIG-las in een Al-legering, waarbij de opname is gemaakt

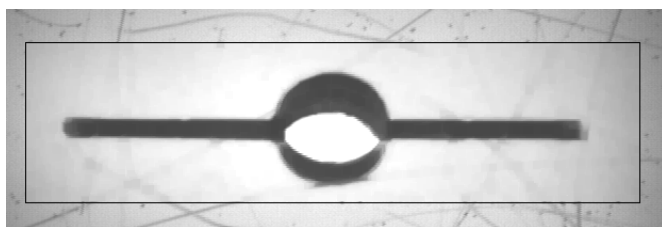
uit een positie waarin de voorgrond de lasnaad goed zichtbaar is. Ook het lasbad, de gascup en de elektrode zijn zichtbaar. Opvallend is het totaal ontbreken van de lasboog op de foto én de aanwezigheid van de schaduw van de elektrode.

Een andere opname die het vermelden waard is toont een MIG-las in een Al-legering met aandacht voor het spatverschijnsel en het reinigen van het oppervlak van de lasnaad van oxyden. Een speciale schaduwtechniek is toegepast voor de observatie van het profiel van de naad.

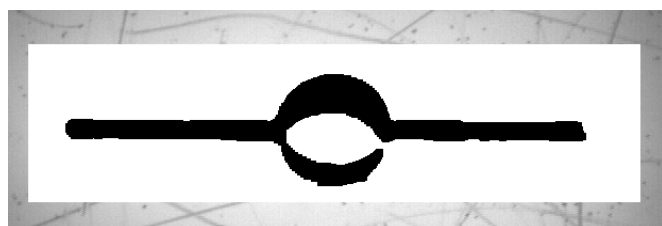
Ook enige voorbeelden van het thermisch spuiten worden gegeven. De auteur geeft aan dat de methode deeltjesgrootten vanaf 20 μm in een plasma of in een vlam met supersone snelheden kan detecteren.



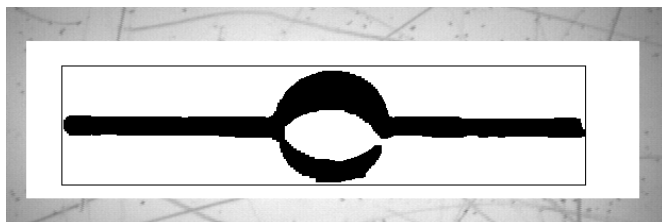
a.



b.



c.



d.

Figuur 2.17. a. De aanvankelijke video-opname, b. krassen verwijderd, c. scheur zwart gemaakt, omgeving wit gemaakt, d. bepaling van de afmeting van de scheur.

Figuur 2.17 en lit. 2.8 geven enige voorbeelden uit een praktisch onderzoek van de mogelijkheden van beeldbewerking. Figuur 2.17.a geeft de aanvankelijke video-opname, figuur 2.17.b is de eerste bewerking waarbij binnen een om de scheur aangebracht kader met een filterbewerking de krassen zijn weggehaald, in figuur 2.17.c is binnen het venster de omgeving wit/zwart gemaakt en in figuur 2.17.d is om de scheur een 'doos' aangebracht waarmee de afmetingen van de scheur worden bepaald.

Literatuur hoofdstuk 2

- 2.1. F. Michalski e.a., *The Human Eye, an instrument for nondestructive testing*. 8th World Conference on N.D.T., Cannes 1976, doc. 3A3.
- 2.2. R.C. McMaster, *Nondestructive Testing Handbook*, The Ronald Press Company, New York.
- 2.3. R.C. Anderson, *Inspection of Metals*, Vol. 1, Visual Examination, 1983.
- 2.4. R.M. Olmsted en T.C. Cabe, *Remote Internal Video Inspection of Pipes and Vessels*, Materials Evaluation, juli 1991.
- 2.5. M.H. Jones en T.N. Claytor, *Digital Image Enhancement*, International Advances in Nondestructive Testing, vol. 15.
- 2.6. TNO Magazine Toegepaste Wetenschap, Intermedia bv, Alphen a/d Rijn, 1992.
- 2.7. T. Hoffman, 'Real-Time Imaging for Process Control', *Advanced Materials & Processes*, 9, 1991.
- 2.8. A.C. Riemslag, *Fatigue Testing of High-Density Polyethylene and Polycarbonate with Crack Length Measurement Using Image Processing Techniques*, ASTM 1994.