

Arie van 't Riet¹, Hans Holterbosch² (november 2012)

Abstract

In 1968 introduceerde Van Asperen de Boer IRR. Er werd gewerkt met een camera op basis van een Vidicon elektronenbuis. De afgelopen 40 jaar is de solid state electronica ontwikkeld. In camera's wordt de CCD sensor toegepast. Deze sensor is gevoelig voor infrarood. Camera's met CCD zijn goedkoop (consumentenelectronica) en kunnen met een geringe aanpassing geschikt gemaakt worden voor IRR. De goedkoopste uitvoering is een webcam waarin het infrarood blokkeringsfilter vervangen is door een 1 cm² Kodak Wratten 87C filter. Voor aanpassing van een Sony digitale camera kon volstaan worden met plaatsen van een Wratten 87C filter. Als infrarood lichtbron is bijvoorbeeld daglicht, een conventionele gloeilamp, een halogeen lamp, een Philips Infraphil geschikt.

INLEIDING.

Ervaringen met infrarood onderzoek aan schilderijen worden in 1936 al beschreven door Müller-Skjold. In 1968 werd door van Asperen de Boer infraroodreflectografie (IRR) geïntroduceerd. IRR heeft zich ontwikkeld tot een algemeen geaccepteerde methode om schilderijen te onderzoeken. Met name is IRR geschikt om eventuele ondertekening zichtbaar te maken. In de zestiger en zeventiger jaren zorgden elektronenbuizen voor de beeldvorming. Vooral de Vidicon werd veel toegepast. Als fotogeleidend materiaal werd selenium gebruikt. Soms werd aan het selenium sporen van arseen, zink, cadmium of tellurium toegevoegd. De Vidicon was behalve voor zichtbaar licht ook gevoelig voor infrarood licht. Van Asperen de Boer stelde vast dat de verflaag van een schilderij infrarood licht doorlaat. Dit doorgelaten infrarood licht reflecteert op de witte ondergrond en wordt geabsorbeerd door de zwarte ondertekening. Het gereflecteerde infrarood licht kon met de vidicon waargenomen worden en gaf informatie over de ondertekening. De Hamamatsu met Vidicon was, en is een veelgebruikte camera voor IRR.

In de consumentenelectronica werd vanaf de 80-er jaren de plaats van de elektronenbuis overgenomen door de CCD (charge coupled device). Een vaste stof sensor op basis van silicium. Ook de CCD is behalve voor zichtbaar licht gevoelig voor infrarood licht. De CCD is een goedkoop element en wordt tegenwoordig algemeen toegepast in digitale camera's, webcams etc. Door Mairinger (2003) en Gargano et.al. (2007) werd de bruikbaarheid van deze systemen voor IRR aangetoond.

In deze notitie rapporteren wij over onze IRR ervaringen met twee CCD systemen. Een webcam van het fabrikaat Hercules en een digitale camera van Sony. Beiden voldoen aan onze systeemeisen: goedkoop, ruim beschikbaar en gemakkelijk aan te passen voor infrarood.

¹ dr.ir.A.van 't Riet, fysicus, Bathmen

²ing. JLM Holterbosch, werktuigbouwkundige, Bunnik

METHODEN EN MATERIALEN.

Elektromagnetisch spectrum.

In tabel 1 is het deel van het spectrum van de elektromagnetische straling dat gebruikt wordt bij onderzoek aan schilderijen weergegeven. De golflengte is gebruikt om de verschillende gebieden te definiëren

Tabel 1. De gebieden uit het elektromagnetisch spectrum die gebruikt worden bij onderzoek aan schilderijen.

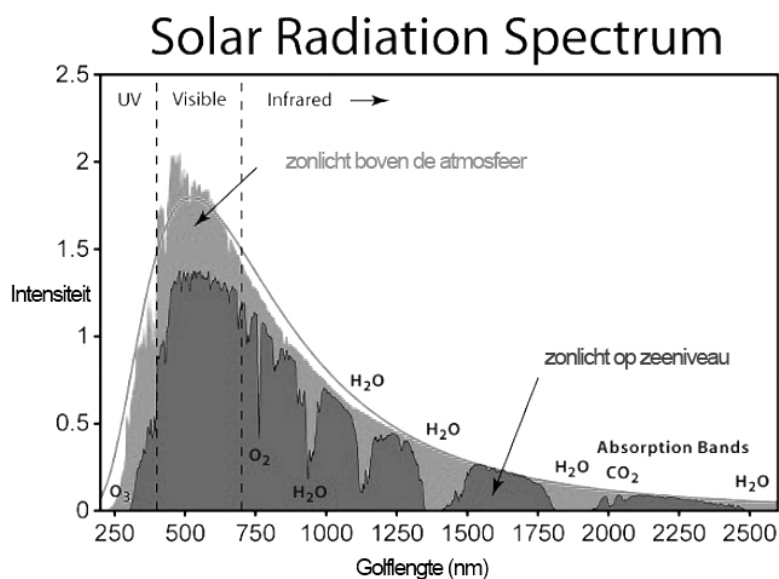
BENAMING	GOLFLENGTE
Nabij infrarood	770 - 1.400 nm
Zichtbaar licht	380 - 780 nm
Ultraviolet UV-A	315 - 400 nm
Röntgen	< 0.1 nm

In deze notitie beperken we ons tot onderzoek aan schilderijen met nabij infrarood straling.

Lichtbronnen infrarood

Zonlicht

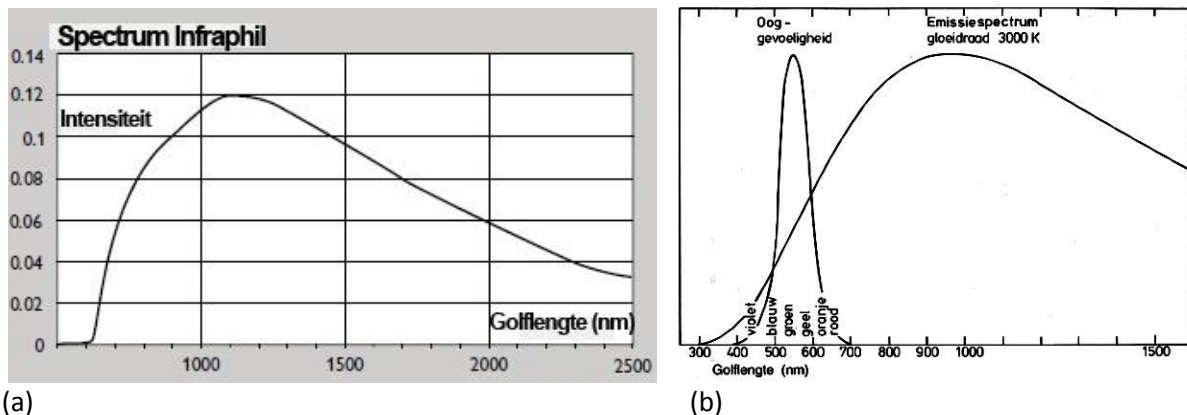
In figuur 1 is het spectrum van het zonlicht weergegeven. In lichtgrijs is het spectrum boven de aardse atmosfeer weergegeven. In donkergrijs het spectrum aan het oppervlak van de aarde. Het in de atmosfeer aanwezige zuurstof, water en kooldioxide absorbeert bepaalde golflengten uit het infrarood spectrum. In het nabije infrarood gebied bereikt het merendeel van de straling het aardoppervlak. Daglicht is daarmee geschikt als infrarood lichtbron voor schilderij onderzoek.



Figuur 1. Spectrum van het zonlicht. In lichtgrijs is het spectrum boven de dampkring aangegeven, in donkergrijs het spectrum aan het aardoppervlak.

Kunstlicht

In het algemeen zendt kunstlicht behalve zichtbaar licht ook infrarood met korte golflengte uit. Halogeen zendt ook infrarood met langere golflengte uit. Dit geldt eveneens voor de Infraphil lamp van Philips en de conventionele gloeilamp. Bij IRR wordt veelal voor halogeen gekozen. Het spectrum van de Infraphil lamp en de gloeilamp is weergegeven in figuur 2.

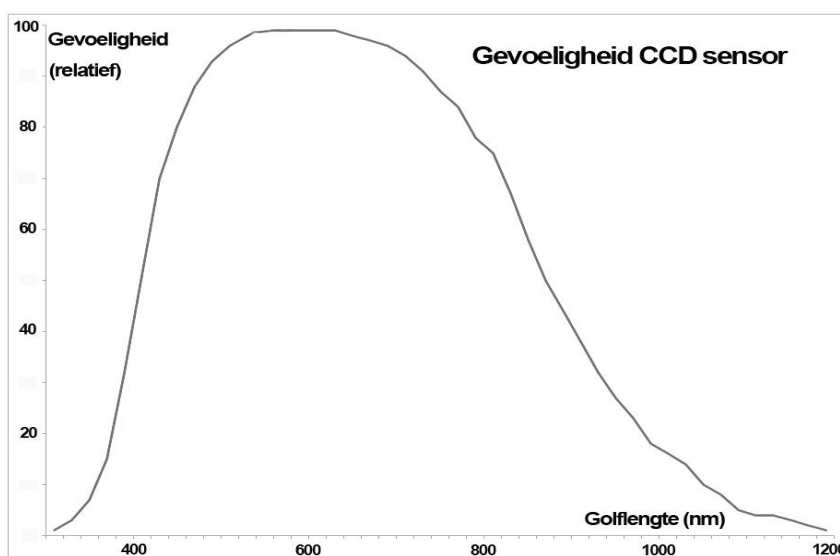


(a) (b)
Figuur 2. Enkele voorbeelden van het spectrum van kunstlicht. (a) De Philips Infraphil lamp. (b) De conventionele gloeilamp.

In ons onderzoek hebben we gekozen voor daglicht of de Infraphil lamp als infrarood bron. Opgemerkt kan hierbij worden dat de Infraphil lamp op grote afstand van het schilderij geplaatst wordt (> 3m) en niet in de richting van het schilderij schijnt. Hiermee worden thermische effecten op het schilderij voorkomen.

CCD

De silicium CCD is verreweg de meest toegepaste beeldsensor in de consumenten elektronica. De gevoeligheid van de CCD als functie van de golflengte is gegeven in figuur 3.

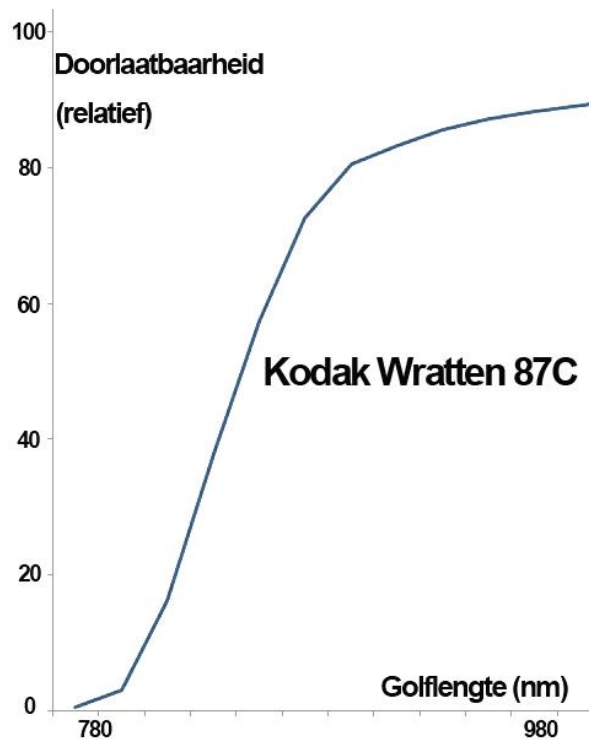


Figuur 3. Gevoeligheid van de CCD sensor.

De CCD is gevoelig voor ultraviolet (vanaf ca. 350 nm), zichtbaar licht en infrarood (tot ca. 1100 nm). Bij infrarood onderzoek aan schilderijen is de bijdrage van zichtbaar licht en ultraviolet ongewenst. De CCD moet daarom afgedekt worden met een filter dat alleen infrarood doorlaat.

Filter

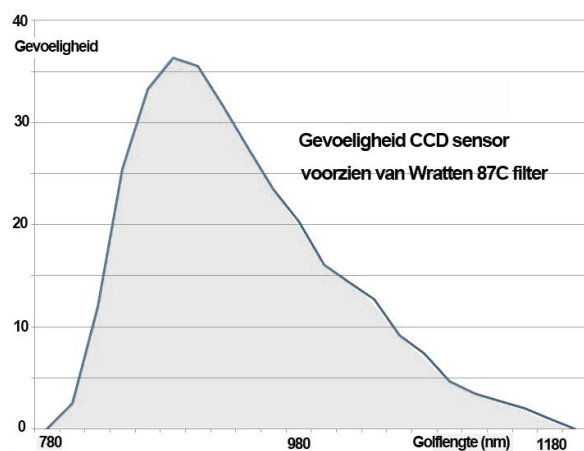
Om het zichtbare licht weg te filteren is een Kodak Wratten 87C filter voor de CCD sensor geplaatst. De doorlaatbaarheid van dit filter is weergegeven in figuur 4.



Figuur 4. Doorlaatbaarheid van het Kodak Wratten 87C filter

CCD met filter

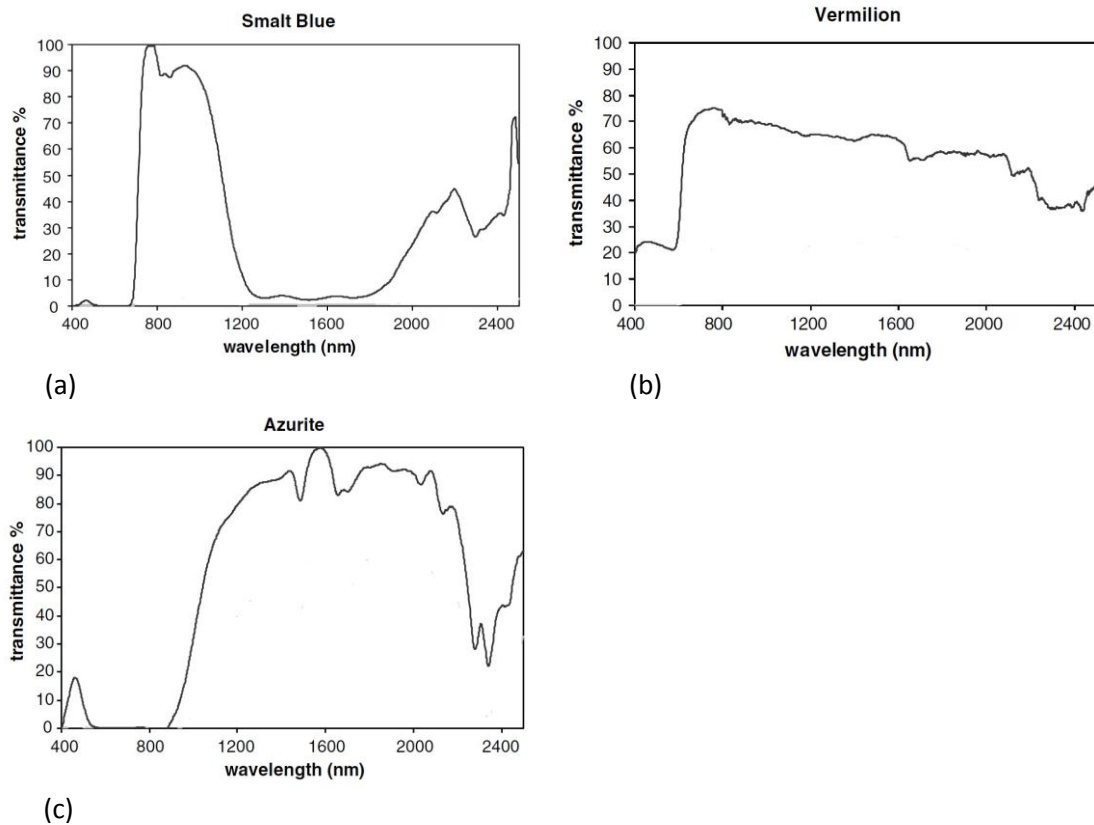
Combinatie van de gevoeligheid van de CCD sensor (figuur 3) met de doorlaatbaarheid van het Kodak Wratten 87C filter (figuur 4) geeft het uiteindelijke infrarood golflengtegebied dat de CCD bereikt (figuur 5). De breedte op halve hoogte (FWHM) is 850 - 1050 nm.



Figuur 5. Gevoeligheid van de CCD sensor waaraan een Kodak Wratten 87C filter is toegevoegd.

Verfsoorten

Voor wat betreft de doorlaatbaarheid voor infrarood straling kunnen de verfsoorten in drie typen onderscheiden worden. Verfsoorten die alleen de korte golflengten doorlaten, verfsoorten die alle golflengten doorlaten en verfsoorten die alleen de lange golflengten doorlaten. Van alle drie typen is een voorbeeld gegeven in figuur 6.



Figuur 6. Voorbeelden van drie typen verfsoorten. Op de verticale as is de doorlaatbaarheid uitgezet, op de horizontale as de golflengte. (a) Smalt blue (laagdikte 220 μm) is alleen transparant voor de korte golflengten. (b) Vermillion (laagdikte 70 μm) is transparant voor het gehele infrarood gebied. (c) Azurite (laagdikte 90 μm) is alleen transparant voor de lange golflengten.

Ondertekening

Er wordt uitgegaan van een ondertekening in zwart op een witte ondergrond. In een dergelijk geval zal het zwart de infrarood straling voor 98 % absorberen en nauwelijks reflecteren terwijl de witte ondergrond het infrarood vrijwel volledig reflecteert. Omdat de bovenliggende verflaag transparant is voor infrarood ziet de CCD sensor een afbeelding van de ondertekening.

Camera's

Omdat het daglicht behalve zichtbaar licht ook infrarood licht bevat (figuur 1) wordt in CCD systemen die voor opnamen bij zichtbaar licht ontworpen zijn door de fabrikant standaard een

infrarood blokkeringsfilter geplaatst. Hiermee wordt voorkomen dat het zichtbaar-licht-beeld beïnvloed wordt door infrarood licht dat de CCD bereikt. De CCD is immers behalve voor zichtbaar licht ook gevoelig voor infrarood licht. In dit onderzoek is gekozen voor goedkope consumenten systemen waarbij in eigen beheer de functie van het infrarood blokkeringsfilter eenvoudig uitgeschakeld kan worden. Gebruik werd gemaakt van de Hercules webcam, typen Classic Silver, Optical Glass en Link. Bij deze webcam kan het lensstelsel afgeschroefd worden waarna het infrarood blokkeringsfilter verwijderd kan worden en vervangen door een Kodak Wratten 87C filter. De webcam is uitgerust met een CMOS sensor. Voor onze toepassing verschilt dit niet wezenlijk van CCD. Daarnaast werd gekozen voor de Sony DSC V3 digitale camera. Deze camera heeft de functionaliteit "night shot" waarbij het infrarood blokkeringsfilter voor de CCD sensor wordt weggeklapt. Voor de lens van de camera wordt een Kodak Wratten 87C filter geplaatst.

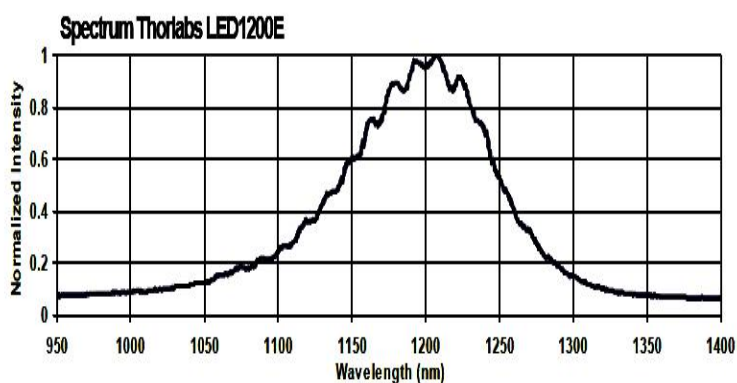
RESULTATEN

Met de Hercules webcam kunnen opnamen gemaakt worden van 1.5Mp (1280x1024). In verband met deze beperkte resolutie bestrijkt een opname een oppervlak van circa 15cm x 15cm. Een schilderij wordt in delen gefotografeerd. De delen worden later zonedig digitaal samengevoegd. Met de Sony DSC-V3 camera kunnen 7.2 Mp opnamen gemaakt worden. De camera biedt daarmee de mogelijkheid om grote oppervlakken met een goede resolutie in één opname vast te leggen.

De webcam is in staat om bij geringe intensiteit van het infrarood een opname te maken. De camera heeft een hogere intensiteit nodig voor een ruisarme opname. Wanneer bij daglicht gewerkt wordt is in het algemeen ruim voldoende infrarood aanwezig voor een goede opname.

De opbrengst van de Infraphil lamp is zo hoog dat de intensiteit van het infrarood, ook bij de grote afstand van de lamp tot het schilderij en de lamp van het schilderij af gericht, voldoende is. De camera is voorzien van een ingebouwde LED die infrarood met golflengte 880 nm uitzendt. Dit geeft een spotverlichting die overbodig en hinderlijk is bij het werken met de infraphil lamp of bij daglicht. In verband hiermee werd de ingebouwde LED afgeplakt.

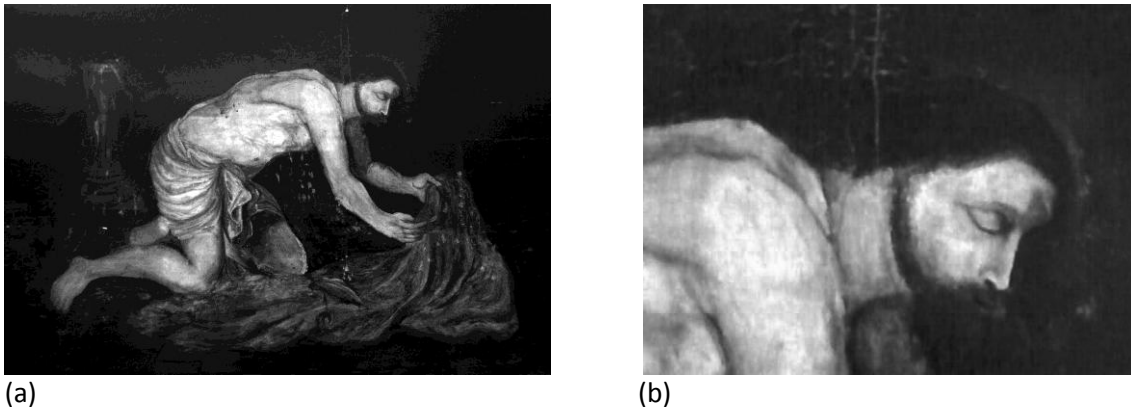
Bij de webcam en de camera werd gecontroleerd of het systeem na verwijdering van het infraroodblokkeringsfilter en plaatsing van het Kodak Wratten filter inderdaad gevoelig was voor de langere golflengten. Hierbij werd gebruik gemaakt van een LED1200E van Thorlabs. Het spectrum van het door de LED1200E uitgezonden infrarood is gegeven in figuur 7. Zowel webcam als camera namen de LED waar. Geconcludeerd kan worden dat de systemen op z'n minst tot 1100 nm infrarood gevoelig zijn.



Figuur 7. Spectrum van de Thorlabs LED1200E

Na de aanpassing die bestaat uit het uitschakelen van het infrarood blokkerings filter en toevoegen van het Wratten 87C filter werken zowel de Hercules webcam als de Sony camera in het infrarood gebied van 850 - 1050 nm. Dit is een geschikt bereik. De meeste verfsoorten zijn in dit gebied transparant (figuur 6a en 6b). De lange golflengte verfsoorten zijn beperkt transparant bij 1050 nm (figuur 6c).

Een voorbeeld van een opname met de Hercules webcam en de Sony camera is gegeven in figuur 8.



Figuur 8. IRR opnamen van schilderij olieverf op paneel. (a) Opname van het gehele schilderij(27.5cmx42.5cm) met de Sony V3 camera (7.2 Mp). (b) Opname van een deel van het schilderij met de Hercules Link webcam (1.5 Mp).

DISCUSSIE

Goedkope op CCD gebaseerde consumentenelektronica kon eenvoudig in eigen beheer aangepast worden voor infrarood fotografie. Dat dergelijke systemen ook geschikt zijn voor infrarood reflectografie aan schilderijen werd aangetoond door Gargano et.al. Zij vergeleken een systeem met consumenten CCD na filteraanpassing met commerciële Hamamatsu systemen met Vidicon opnamebuis en met systemen die uitgerust waren met een InGaAs vaste stof detector. Bij het vergelijk werd de navolgende test uitgevoerd. Op een witte ondergrond werd een zwart lijnenpatroon getekend. Met de infrarood systemen werd een opname gemaakt van dit patroon. De gemiddelde pixelwaarde op de zwarte lijn (B_0) en in het witte tussendeel (W_0) werd bepaald. Daarna werd de ondergrond afgedekt met een plastic sheet waarop een verflaag was aangebracht. Vervolgens werd van dit geheel een infrarood opname gemaakt. Vanwege transparantie van de verflaag bij infrarood is ook in deze opname het lijnenpatroon van de ondergrond zichtbaar. Ook in deze opname werd de gemiddelde pixelwaarde op de zwarte lijn (B_v) en in het witte tussendeel (W_v) bepaald. Het relatief contrast C_s werd per systeem vervolgens gedefinieerd als de verhouding van het verschil in pixelwaarde met verfsheet ($W_v - B_v$) ten opzichte van het verschil in pixelwaarde zonder verfsheet ($W_0 - B_0$).

$$C_s = (W_v - B_v) / (W_0 - B_0)$$

De resultaten zijn in tabel 2 weergegeven.

Analysed pigments	Thickness (μm)	CCD (Si)	InGaAs	Vidicon
Indigo*	61.6	0.15	0.25	0.23
Azurite	62.1	0.08	0.26	0.24
Smalt blue	154.1	0.79	0.17	0.17
Natural ultramarine*	177.0	0.18	0.20	0.20
Green earth	53.7	0.44	0.42	0.47
Malachite	56.5	0.05	0.12	0.12
Verdigris	279.7	0	0.54	0.57
Veronese green	42.7	0.48	0.54	0.58
Lead yellow	50.5	0.19	0.21	0.18
Lead yellow red	49.6	0.26	0.15	0.22
Yellow ochre	54.3	0.28	0.44	0.44
Red lake	42.8	0.44	0.41	0.46
Vermilion	65.9	0.23	0.23	0.25
Haematite	35.5	0.03	0.11	0.12
Red ochre	44.9	0.12	0.33	0.33
Red earth	44.2	0	0.01	0.03
Light natural Siena*	35.0	0.12	0.19	0.21

Tabel 2. Relatief contrast volgens de methode van Gargano et.al. (2006). Met * gemarkeerden betreft tempera, overigen olie.

Voor 11 van de 17 onderzochte verfsoorten blijkt de transparantie voor de CCD nauwelijks te verschillen van die van de InGaAs en Vidicon systemen. Drie verfsoorten (azurite, malachite, haematite) zijn beduidend minder transparant voor de CCD dan voor de InGaAs en Vidicon. Eén verfsoort (verdigris) is niet transparant voor de CCD, wel voor de InGaAs en Vidicon. Red earth is voor geen van de systemen transparant.

Voor smalt blue vertoont de CCD een veel betere transparantie dan de InGaAs en de Vidicon. Dit kan verklaard worden uit het gegeven dat in de test de InGaAs en Vidicon werkten met golflengten langer dan 1300 nm. Het werken met lange golflengten kan ook nadelig zijn voor de zichtbaarheid van de ondergrond omdat ondertekeningen in ijzergallus, red crayons en greyish inks transparant worden boven 1200 nm.

In ons onderzoek kozen wij voor de Hercules webcam omdat deze algemeen beschikbaar is, goedkoop (circa 15 euro) en het infraroodblokkeringsfilter eenvoudig te vervangen is door het Wrattenfilter. We kozen voor de Sony DSC-V3 digitale camera omdat die over een voorziening beschikt waarmee het infrarood blokkeringsfilter weggeklapt kan worden. Het wrattenfilter werd eenvoudig extern tegen de lens geplaatst. De DSC- V3 is in 2004 geïntroduceerd en werd in 2012 via marktplaats aangekocht (circa 100 euro). Mairinger (2003) beschrijft de iets oudere typen Sony DSC-F707 (2001) en Sony DSC-717 (2002).

In vergelijking met de Sony digitale camera is de resolutie van de webcam lager, de scherpstelling lastig en de kwaliteit van het lensstelsel matig.

Bij 1050 nm nadert het CCD systeem de grens van zijn gevoeligheid (figuur 5). Voor enkele verfsoorten betekent dit dat de transparantie beperkt is (figuur 6c). Een camera met een InGaAs sensor heeft dit probleem niet. De InGaAs detector is gevoelig in het gebied tot 1700 á 2000 nm. In de consumentenelektronica heeft de InGaAs camera echter nog geen plaats van betekenis. Goedkope InGaAs systemen met redelijke resolutie worden door de grote winkelketens (nog) niet aangeboden.

CONCLUSIE

Op basis van onderling apparaatvergelijk en theoretisch fysisch onderbouwd kan geconcludeerd worden dat consumentenelektronica met CCD sensor, in combinatie met een goede infrarood lichtbron, bruikbaar is voor IRR met golflengten tot maximaal 1100 nm. De goedkoopste uitvoering is met een webcam. De Hercules webcam van het type Classis Silver, Optical Glass of Link is zeer geschikt omdat ombouw eenvoudig is. Een uitvoering die iets meer kost is met een digitale camera. De Sony DSC- V3 is ideaal omdat geen ombouw nodig is.

REFERENTIES

F. Müller-Skjold, H. Schmitt, Zur Anwendung der Infrarotphotographie in der Maltechnik. Angewandte Chemie 49 (1936) 637-648.

J.R.J. van Asperen de Boer, Reflectography of paintings using an infra-red vidicon television system, Studies in Conservation, vol. 14, London, 1969, pp. 96–118.

M. Gargano, N. Ludwig, G. Poldi, A new methodology for comparing IR reflectographic systems Infrared Physics & Technology 49 (2007) 249–253.

F. Mairinger, in: Strahlenuntersuchung an Kunstwerken, E.A. Seemann Verlag, Leipzig, 2003, pp. 112-115.

NASCHRIFT

Stand van zaken commercieel beschikbare systemen (zonder de intentie volledig te zijn).

Hamamatsu: de plaats van de Vidicon is overgenomen door de InGaAs sensor. Werkgebied 900 nm - 1700 nm. De resolutie voor de C10633 en-23 sensoren is 320x256 pixels.

Xenics: De **Xenics XS** infrarood camera is uitgerust met een InGaAs sensor. Werkgebied 900 nm - 1700 nm. Resolutie 320x256 pixels. Xenics wordt in Nederland vertegenwoordigd door EMAD uit Wanneperveen.

Opus Instruments: De **Osiris** werkt met een InGaAs sensor. Werkgebied 900 nm- 1700 nm. Er wordt scannend gewerkt in een array van maximaal 8x8 elementen. Per element is de resolutie 512x512 pixels. Voor het gehele oppervlak is daarmee een resolutie van 4096x4096 pixels haalbaar. Een full image opnamescan duurt 10 minuten.

Art Innovation: De **Artist** van Art Innovation (Oldenzaal) is uitgerust met een silicium CCD. De gevoeligheid van het systeem strekt zich uit van 300 nm tot 1100 nm. Er kan gekozen worden voor een ultraviolet, zichtbaar licht of infrarood opname. De resolutie is 2448x2048 pixels (5Mp). Ook de **Diva** van Art Innovation gebruikt CCD. De resolutie is 1296x964 pixels (1.3 Mp).