

RIJKS MUSEUM



Lesbrief *Nachtwacht*

Schutters van wijk II onder leiding van kapitein Frans Banninck Cocq (bekend als 'De Nachtwacht')

Rembrandt van Rijn, 1642

Trefwoorden: polymerisatie, vetten en oliën, dubbele bindingen, micro/macro, radicalen, oxidatie

Inleiding

Nachtwacht, of Dagwacht?

De Nachtwacht is misschien wel het beroemdste schilderij van Nederland (Figuur 1). Verrassend genoeg heeft het schilderij deze bijnaam pas aan het einde van de 18de eeuw gekregen, en is zowel 'nacht' als 'wacht' enigszins misleidend. De groep 'wachters' die op het doek is afgebeeld had in de tijd van Rembrandt niet langer de taak om de stad Amsterdam te beschermen. De bijeenkomsten van de schutters waren vooral een sociale aangelegenheid.

De associatie met de nacht heeft een meer chemische oorzaak. Toen *De Nachtwacht* zijn bijnaam kreeg, waren de lagen vernis op het doek zo vergeeld en donker geworden, en hadden ze zo veel vuil en stof verzameld, dat men dacht dat Rembrandt een nachtelijk tafereel had geschilderd. Pas toen het schilderij na de Tweede Wereldoorlog gerestaureerd werd, kreeg men een veel beter beeld hoe contrastrijk Rembrandt het werk ruim 300 jaar geleden geschilderd had.



Figuur 1: *Schutters van wijk II onder leiding van kapitein Frans Banninck Cocq*, bekend als *De Nachtwacht*, 1642, Rembrandt van Rijn (objectnummer SK-C-5).



Figuur 2: (links) Detailfoto van de mouw van de man in het het *Joodse bruidje* (objectnummer SK-C-216), genomen onder strijklicht. Hier is goed te zien hoe Rembrandt de olieverf gebruikte om driedimensionale structuur te geven aan het schilderij. (rechts) Detailfoto van de mouw van Maria Magdalena, ca. 1530, Jan van Scorel (objectnummer SK-A-372) . Hier is goed te zien hoe Jan van Scorel transparatie gebruikt heeft om een driedimensionaal effect te creëren.

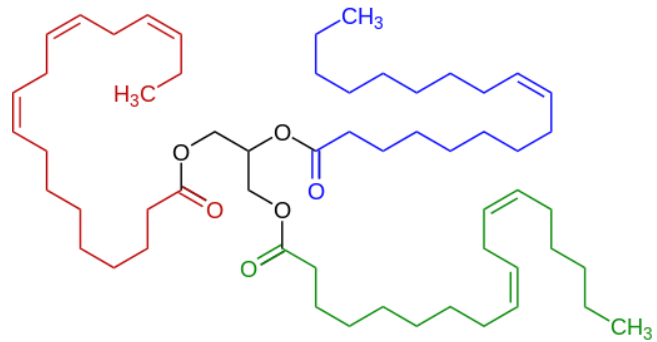
Olie als bindmiddel van de verf

In de vroege middeleeuwen werd voornamelijk met eitempera (eigeel) geschilderd. Bij een schildertechniek op basis van eitempera (eigeel) moesten schilders snel werken, de eitempera droogt namelijk zeer snel (zie ook de lesbrief: *Twee evangelisten*). Om met eitempera goed te kunnen schilderen moest de schilder zijn voorstelling met dunne verflaagjes en fijne kwaststreekjes opbouwen. In de late 15de eeuw werd olie als bindmiddel geïntroduceerd en dit gaf schilders veel meer mogelijkheden. Olie droogt heel langzaam en hierdoor kunnen schilders langer aan een onderdeel van een schilderij werken. De fysische eigenschappen van de olie geven de mogelijkheid om een meer pasteuse verf te maken waarmee een prachtige driedimensionale oppervlakte structuur, het zogenaamde impasto, verkregen kan worden (Figuur 2, links). Rembrandt speelde met de structuur van de verf, zoals dit detail van de mouw van het *Joodse bruidje* laat zien.

Olieverf heeft ook interessante optische eigenschappen. De olie heeft een vergelijkbare brekingsindex met een aantal pigmenten (verdigris, malachite, ultramarijn, rode en gele lakken). Hierdoor kunnen schilders transparante lagen maken en zo meer diepte in de kleuren brengen, zoals in het werk van Jan van Scorel gezien kan worden. Van Scorel maakte gebruik van opake en transparante verven om driedimensionale effecten te verkrijgen, zoals goed te zien is in de parels op de mouw van *Maria Magdalena* (Figuur 2, rechts).

Drogende olie leidt tot vlammen!

Net als de meeste olieverfschilderijen in het Rijksmuseum is *De Nachtwacht* geschilderd met verf gebaseerd op lijnzaadolie. In tegenstelling tot bijvoorbeeld waterverf drogen verven gebaseerd op olie niet door het verdampen van een vloeistof, maar door polymerisatie. De vele dubbele bindingen die aanwezig zijn in de oliemoleculen reageren met zuurstof uit de lucht, en vormen dan bijvoorbeeld ether of peroxide dwarsverbindingen. Deze oxidatiereacties zijn allemaal behoorlijk exotherm. Er kan zelfs zo veel energie vrijkomen bij het drogen van olie, dat stukken stof gedoopt in lijnzaadolie spontaan vlam kunnen vatten als deze niet goed worden opgeborgen in een zuurstofarme omgeving, zoals in een gesloten pot. Volgens een docent aan een kunstacademie moeten er met enige regelmaat brandjes geblust worden als mensen met lijnzaadolie gewerkt hebben. Ook op het internet circuleren er vele getuigenissen van mensen die verrast werden door smeulende stoflappen of die zelfs hun huis hebben zien afbranden nadat ze lijnzaadolie gebruikt hadden om hout mee in te wrijven. Het is dus raadzaam om goed na te denken hoe je resten lijnzaadolie het beste weg kunt gooien.



Figuur 3: (links) Drie verschillende drogende oliën, gewonnen uit (van links naar rechts) lijnzaad, papaverzaad en saffloer. (rechts) Structuurformule van een triacylglycerolmolecuul zoals die kan voorkomen in een drogende olie. Een typische natuurlijke olie bestaat uit een mengsel van triacylglycerolen met verschillende sets van drie vetzuurketens. In dit voorbeeld zijn weergegeven de ketens van oliezuur (blauw), linolzuur (groen) en linoleenzuur (rood).

Beschrijving van relevante chemische onderwerpen

Het bindmiddel in olieverf

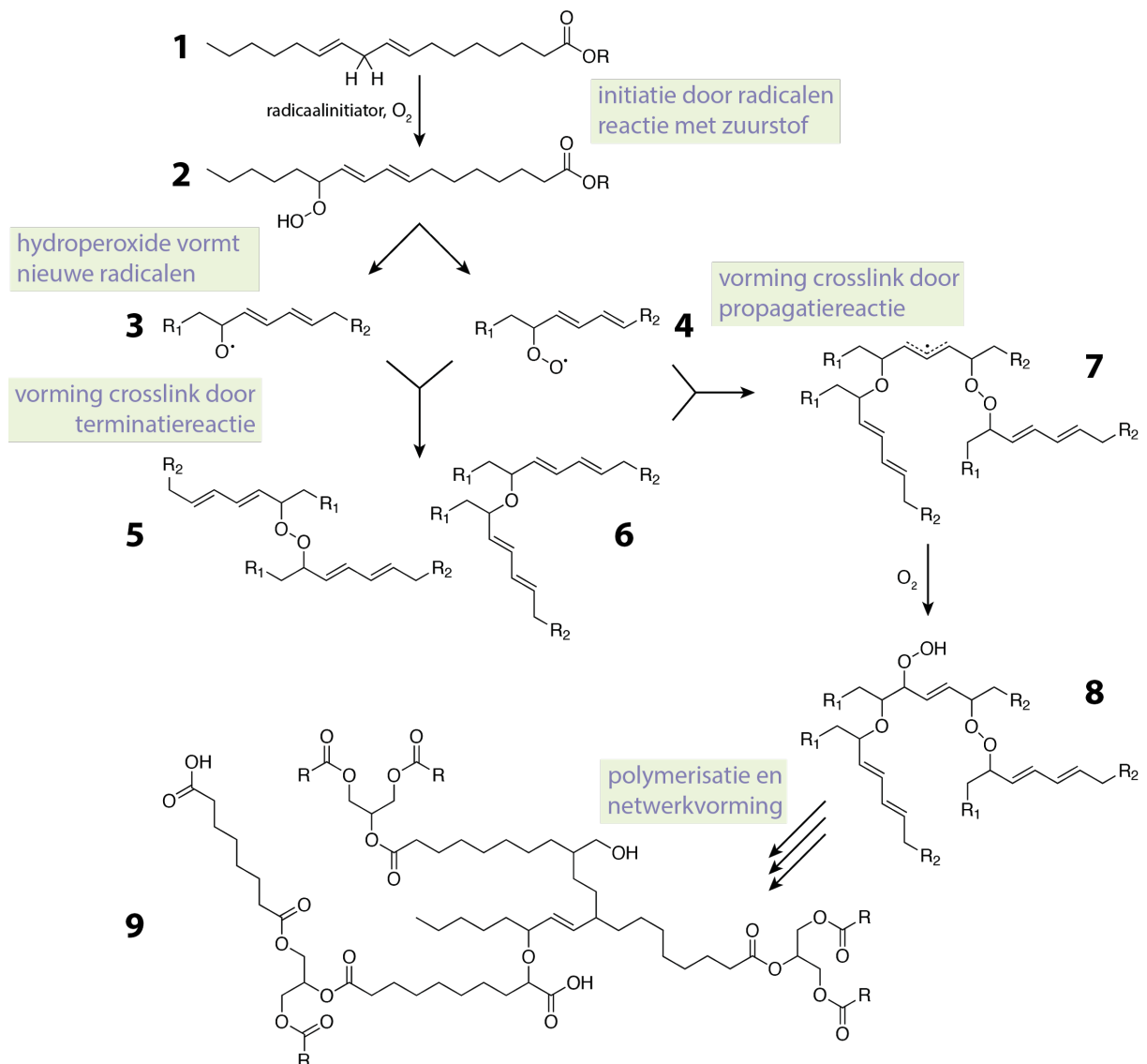
In zijn simpelste vorm bestaat olieverf uit gekleurde pigmenten en een zogenaamde ‘drogende olie’ als bindmiddel. De meest gebruikte oliën zijn lijnzaadolie, walnootolie, papaverolie en saffloerolie (Figuur 3, links). Net als de meeste plantaardige oliën bestaan de genoemde oliën uit triacylglycerol (TAG) moleculen (Figuur 3, rechts). Deze klasse van moleculen is opgebouwd uit een centraal molecuul glycerol met daaraan verbonden drie vetzuurmoleculen middels een esterbinding (Figuur 5). Veel voorkomende vetzuren in plantaardige olie zijn bijvoorbeeld stearinezuur (octadecaanzuur), oliezuur (9-octadecenzuur) en linolzuur (octadeca-9,12-diëenzuur).

De moleculen in een plantaardige olie zijn niet allemaal hetzelfde. Er kunnen verschillende combinaties van drie vetzuren verbonden zijn aan het centrale glycerolmolecuul. De eigenschappen van een olie worden voor een groot deel bepaald door de relatieve verhouding van vetzuren. Vetzuren met veel (cis) dubbele bindingen zoals linolzuur en linoleenzuur zijn minder gemakkelijk op elkaar te stapelen, en dus hebben oliën met een hoog gehalte van die vetzuren een lager smeltpunt. Zo kan olijfolie (~70% oliezuur en ~15% linolzuur) gedeeltelijk vast worden wanneer het in een koude ruimte wordt bewaard, terwijl dit met walnootolie (~13% oliezuur en ~72% linolzuur) niet snel zal gebeuren.

Drogende oliën hebben met elkaar gemeen dat ze een hoog gehalte aan meervoudig onverzadigde vetzuren hebben, in de praktijk vaak veel linolzuur en linoleenzuur (octadeca-9,12,15-triëenzuur). De aanwezigheid van al die dubbele bindingen zorgt ervoor dat de olie erg reactief is, en de mogelijkheid heeft om te polymeriseren als de olie in contact komt met zuurstof.

Het ‘drogen’ van olie

Het polymeriseren van olie, schematisch weergegeven in Figuur 4, is een stuk complexer dan de polymerisatieprocessen die doorgaans gebruikt worden om de meeste plastics en kunststoffen te maken. Bij het synthetiseren van plastics zijn meestal om één of twee soorten monomeren betrokken, die aan elkaar gekoppeld worden via een enkele reactiestap. De polymerisatie van olie is erg ingewikkeld, enerzijds vanwege de variatie en grootte van TAG moleculen waaruit een olie bestaat, en anderzijds door het grote aantal verschillende reacties die optreden als olie aan zuurstof wordt blootgesteld.



Figuur 4: Schematisch overzicht van de vele reacties die plaatsvinden in een olie tijdens het drogen. In de aanwezigheid van zuurstof polymeriseert de olie via radicalreacties tot een polymeernetwerk met enorm variatie aan functionele groepen en netwerkstructuur.

De polymerisatie begint bij een CH₂-groep tussen twee dubbele bindingen (ook wel een bis-allyl CH₂-groep genoemd) in een keten van linolzuur of linoleenzuur (Figuur 4, 1). Initiatie kan plaatsvinden door afsplitsing van een waterstofradicaal van een C-H binding door een radicaalinitiator of onder invloed van UV-straling. Een andere mogelijkheid is dat zuurstof reageert met de CH₂-groep waardoor er (na enige reorganisatie van dubbele bindingen) een hydroperoxide gevormd wordt en een set geconjugeerde dubbele bindingen, zoals weergegeven in Figuur 4, 2. Een hydroperoxide is niet erg stabiel, en zal uit elkaar vallen door afsplitsing van een nieuw H[•] of HO[•] radicaal (3 en 4). Een radicaal molecuul zoals 4 kan reageren met een dubbele binding op een andere vetzuurketen. Door deze propagatiereactie wordt een crosslink gevormd en blijft er een reactief ongepaard elektron aanwezig op het groeiende molecuul (7). Een crosslink kan ook ontstaan in een terminatiereactie wanneer twee ketens die een radicaal bevatten met elkaar reageren. Afhankelijk van welke specifieke radicale moleculen met elkaar reageren, kunnen zo C-C, ether (6) en peroxide (7) crosslinks gevormd worden. Wanneer al deze radicalreacties en oxidatiereacties een tijd door blijven gaan, worden steeds meer dubbele bindingen geconsumeerd, en worden steeds grotere en complexere moleculen gevormd (8). Uiteindelijk zal

een polymeernetwerk ontstaan met zeer veel dwarsverbindingen (9), waarin vele zuurstofhoudende functionele groepen aanwezig zijn.

Sommige polymerisatie- en oxidatiereacties die plaatsvinden tijdens het drogen van olie kunnen ertoe leiden dat vetzuurketens in tweeën gebroken worden. In dat geval worden er kortere moleculen gevormd (6-8 koolstofatomen lang), met vaak een aldehydegroep aan het uiteinde. Die vluchtige aldehydes zijn deels verantwoordelijk voor de karakteristieke geur van (drogende) lijnzaadolie.

Het versnellen van droging

In de praktijk kan het enkele weken duren voor drogende pure olie polymeriseert tot een stevige film. Voor schilders is het niet erg praktisch als je zo lang moet wachten voor je een volgende verflaag op een schilderij kunt aanbrengen. Daarom wordt aan de olie behalve pigmenten ook nog een kleine hoeveelheid metaalzout als droger toegevoegd. Vroeger werden loodzouten veel gebruikt als droger. Tegenwoordig zijn drogers vaak zouten van kobalt, mangaan, ijzer of zirkoon. Als anionen worden vaak vetzuren of nafteenzuren gebruikt, omdat de droger daarmee beter mengt met de olie. Drogers versnellen de polymerisatie van een drogende olie omdat ze als katalysator optreden in een of meerdere reacties in het droogproces. Vooral het uit elkaar vallen van hydroperoxides (-OOH) wordt vaak door metaalzouten versneld. Moderne olieverf waaraan een mengsel van verschillende drogers is toegevoegd polymeriseert zo snel dat de verf vaak al binnen een dag overschilderbaar is.

Micro/macro: van moleculen naar tastbare eigenschappen

De moleculaire structuur van gepolymeriseerde drogende olie verklaart een aantal interessante eigenschappen van olieverf. Zo is de hardheid of brosheid van het oliepolymeer sterk afhankelijk van de vetzuursamenstelling van de olie die gebruikt wordt om verf van te maken. Oliën zoals lijnzaadolie met een relatief hoge fractie linoleenzuurketens hebben veel reactieve bis-allyl CH₂-groepen en veel dubbele bindingen die crosslinks kunnen vormen. Daarom zijn oliën met een relatief hoge gehalte aan dubbele bindingen een goed drogende olie en geven dus relatief snel een hard polymeer als een dun laagje aan de lucht wordt blootgesteld. Veel soorten olie die we in de keuken gebruiken, bijvoorbeeld olijfolie of zonnebloemolie, hebben een veel lagere fractie aan dubbele bindingen waardoor er minder crosslinks gevormd zullen worden. Het gevolg is dat deze oliën niet snel hard zullen worden als een dun laagje aan de lucht wordt blootgesteld. Ze worden om deze reden trouwens ook niet hard na verhitting bij het koken. Kortom olijf- en zonnebloemolie zijn dan ook niet geschikt om mee te schilderen.

Naast goede droging kunnen we nog een andere belangrijke eigenschap van olieverf afleiden uit de structuur van het oliepolymeer. Omdat elk triacylglycerolmolecuul in een drogende olie gemiddeld vijf à zes dubbele bindingen bevat, en zo met meerdere andere moleculen een crosslink kan vormen, is in een volledig gepolymeriseerde olie bijna elk molecuul covalent aan alle andere moleculen verbonden. In feite is het hele materiaal dus één groot molecuul geworden. Het gevolg van die netwerkstructuur is dat oliepolymeren niet oplosbaar zijn in vloeistoffen zonder eerst (deels) het netwerk af te breken. Daarom kunnen restauratoren van olieverfschilderijen redelijk veilig stof en ander vuil van schilderijen verwijderen met oplosmiddelen, zonder bang te hoeven zijn dat de verf oplost.

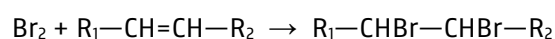
Suggesties voor experimenten

Experiment 1

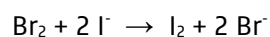
Bepaling van het joodgetal

Een olie kan polymeriseren als de vetzuurketens van de triacylglycerolmoleculen in de olie dubbele bindingen bevatten. In het algemeen geldt: hoe groter het aantal dubbele bindingen, des te sneller zal de olie polymeriseren en des te harder zal het polymeer worden. De meest gebruikte maat voor het aantal dubbele bindingen in olie is het joodgetal: de hoeveelheid I_2 (in gram) die kan reageren met 100 g olie.

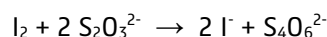
In de praktijk is het praktischer om Br_2 te gebruiken om de hoeveelheid dubbele bindingen in een monster te bepalen. Aan een bekende hoeveelheid olie wordt een overmaat broomwater van bekende concentratie toegevoegd. Br_2 zal dan een additiereactie ondergaan:



De overgebleven overmaat broom wordt vervolgens in een redoxreactie met een overmaat jodide-oplossing omgezet, waarbij jood gevormd wordt:



Het ontstane jood kan tenslotte worden getitreerd met een natriumthiosulfaatoplossing, met zetmeel als indicator:



Voor een experiment in de klas kunnen leerlingen bijvoorbeeld het joodgetal bepalen in verschillende soorten plantaardige olie (bijvoorbeeld lijnzaadolie, olijfolie, pindaolie en zonnebloemolie), en verklaren waarom sommige soorten olie geschikter zijn om mee te schilderen dan andere.

Uitvoering:

- Weeg nauwkeurig ongeveer 0.1 g olie af in de erlenmeyer.
- Verpak de erlenmeyer in aluminiumfolie. Voeg in porties van 5.00 mL verdund broomwater (0.04 M nauwkeurig) toe, roer goed, laat de lagen scheiden, en stop met toevoegen als het broomwater niet meer ontkleurt (dit kan even duren).
- Voeg 1 mL kaliumjodide-oplossing (0.1 M, dit is een overmaat) en enkele druppels 0.5% zetmeeloplossing toe. Als er I_2 aanwezig is, zal de oplossing donkerblauw kleuren.
- Titreer met een natriumthiosulfaatoplossing (0.01 M nauwkeurig). Het omslagpunt is bereikt wanneer de blauwe kleur van het I_2 -zetmeelcomplex net verdwenen is.

Aan de hand van de bekende concentraties van het broomwater en de natriumthiosulfaatoplossing en de gegevens van de titratie kan teruggerekend worden om het joodgetal te bepalen. Als alternatief voor dit experiment, kan de bepaling van het joodgetal met geschatte meetwaarden ook goed gebruikt worden als proefwerkopgave.

De stap met de additie van broom aan de olie is relatief tijdrovend. Om het experiment binnen een lesuur door leerlingen te laten uitvoeren, kan de stap van de additie van broom al zijn uitgevoerd door de toa. De gegevens over het aantal porties broomwater en de hoeveelheid olie worden dan aan de leerlingen gegeven.

Eventueel kan er ook gekozen worden voor een opzet van het practicum waarbij het gedeelte van de additie van broom aan olie compleet wordt overgeslagen. In dat geval krijgen de leerlingen broomwater van een voor de docent/toa bekende concentratie, waarbij het aantal gram olie en porties broomwater dat in de onderstaande tabel is gegeven aan de leerling wordt gegeven. Op deze manier is zonder al te veel tijdinvestering een vergelijking van verschillende soorten olie mogelijk.

type olie	joodgetal	aantal 5.0 mL porties broomwater 0.04 M per 0.1 g olie
arachide	84-105	2 of 3
kokos	7-12	1
lijnzaad	136-178	4
palm	44-51	1 of 2
olijf	80-88	2 of 3
zonnebloem	125-144	4

Experiment 2

Hoe snel droogt een olie?

Hoe snel een olie polymeriseert is afhankelijk van het aantal dubbele bindingen in de olie. Daarnaast hebben omgevingsfactoren als temperatuur en licht een grote invloed. Omdat de droogsnelheid van olie doorgaans te laag is om praktisch te zijn voor schilders, wordt er ook vaak een *droger* toegevoegd die (een deel van) de polymerisatiereacties katalyseren en versnellen.

Leerlingen kunnen experimenteren met het effect van verschillende samenstellingen en drogingscondities op de droogsnelheid van olie. Met een zandtest kan worden nagegaan of een olielaag al droog is.

Uitvoering:

- Maak een keuze voor te onderzoeken factoren. Neem bijvoorbeeld verschillende oliën (lijnzaadolie, olijfolie, zonnebloemolie, etc.), een droger(-concentratie), en/of verhitting/koeling. Bepaal hoeveel objectiefglasjes nodig zijn om alle factoren te vergelijken.
- Breng met een pipet een bekend volume olie op elk glaasje en spreid het uit als een dunne gelijkmatige film (ca. 2 x 2 cm). Doe hetzelfde voor elke olie, of met olie waaraan enkele druppels drogeroplossing toegevoegd zijn.
- Plaats de objectiefglasjes in de gewenste omgeving (warm, koud, donker, licht, etc.).

- Neem op elk meetmoment een glaasje, sprenkel een klein beetje fijn zilverzand op een deel van het olielaagje. Wacht een minuut, draai het glaasje om, en kijk of het zand blijft kleven. Zo niet, dan is de film droog.

Veiligheid: Lijnzaadolie en andere drogende oliën kunnen spontaan ontbranden, vooral als de olie in direct contact is met de lucht en brandbaar materiaal als stoflappen of droog papier. Gooi resten olie dus bij voorkeur weg in een afgesloten container.

Tip: Bij gespecialiseerde winkels voor kunstschildersmaterialen zijn verschillende drogers verkrijgbaar.

Voorbeeldvragen

Vraag 1

Niveau: klas 3

Onderwerp: ontbrandingstemperatuur / endotherm en exotherm / reactievergelijking

Vlammende verf

Rembrandt van Rijn, de schilder van de beroemde *Nachtwacht*, werkte met olieverf. De olie die hij gebruikte was lijnzaadolie. De lijnzaadolie kan door reacties (onder andere reacties met zuurstof) uitharden door een soort netwerk te vormen. Het uitharden hoort bij lijnzaadolie, het is de manier waarop verf op basis van lijnzaadolie “droogt”. Het drogen van lijnzaadolie verloopt niet altijd even rustig. In de onderstaande Engelstalige tekst wordt beschreven wat er kan gebeuren.

Linseed Oil - Spontaneous Combustion is a REAL danger for homeowners!

I had my doubts about spontaneous combustion... till my readers spoke out! Spontaneous combustion, more common in horror movies than in real life, refers to the phenomenon that occurs when an object suddenly bursts into flame without obvious cause. No match, no sparks, no lightning, no electrical short or smoking cigarette... nothing!

What causes it? With linseed oil and other oils used to finish wood [...] heat is generated during the drying process. This is because these oils do not dry like paint (through the evaporation of a solvent or water). Instead, they dry through the same process that generates fire... **oxidation**.

Bron: <https://www.naturalhandyman.com/iip/infpai/inflinspontaneouscombust.html>

1. Leg uit wat het energie-effect is van de reacties tijdens het drogen van lijnzaadolie.
2. Bij het drogen ontstaan kleinere moleculen die de typische geur van de verf veroorzaken. Een van deze stoffen is octanal $C_8H_{16}O$. Geef de kloppende reactievergelijking voor de verbranding van octanal.
3. Leg uit wat je kunt zeggen over de ontbrandingstemperatuur van de stoffen die tijdens het drogen van lijnzaadolie gevormd worden, in vergelijking met het energie-effect van het drogen.
4. Wat voor advies zou jij geven aan een schilder die met verf werkt die lijnzaadolie bevat?

Vraag 2

Niveau: klas 4/5
Onderwerp: koolstofchemie

De olievert van de Nachtwacht

1. Leg aan de hand van de tekst op pagina 3 en/of Figuur 3 en BINAS 67 G1 en 2 uit dat TAG molecuul niets anders is dan een triglyceride.
2. Leg op micro-niveau uit waarom TAG moleculen slecht oplosbaar in water zijn.
3. Zoek de namen van de drie vetzuren in het TAG molecuul in Figuur 3 op in BINAS tabel 67 G2.

Tijdens het drogen van olievert ontstaat er een netwerk van TAG moleculen, doordat de dubbele bindingen onder andere met zuurstof reageren. Bij dit drogen breken van sommige TAG moleculen stukken af en komen er onder andere aldehyden vrij die de typische verflucht geven.

4. Een van de aldehyden is heptanal. Geef de structuurformule van heptanal.
5. Aldehyden zorgen voor de typische verflucht, dit betekent dat de aldehyden gemakkelijk verdampen. Geef hiervoor een verklaring op micro-niveau.

Vraag 3

Niveau: klas 5/6
Onderwerp: polymerisatie

De uithardende olievert van de Nachtwacht

Rembrandt van Rijn werkte met olievert op basis van lijnzaadolie. In de literatuur worden triglyceriden ook wel *triacylglycerol* (TAG) moleculen genoemd. Deze moleculen ondergaan tijdens het droogproces een polymerisatiereactie, zoals hieronder beschreven.

Lees de tekst onder het kopje *Het 'drogen' van olie* beginnend op pagina 3.

1. Leg uit welke soort initiatiereactie het eenvoudigste te voorkomen is.
2. Verklaar waarom er zowel door propagatie als door terminatie crosslinks in de vert gevormd kunnen worden
3. Leg uit waarom de uitharding van olievert vrij lang duurt.

Lijnzaadolie heeft een duidelijk andere vetzuursamenstelling dan papaver- en walnootolie. In de onderstaande tabel is samenstelling gegeven.

type olie	vetzuren (%)				
	palmitinezuur	stearinezuur	oliezuur	linolzuur	linoleenzuur
walnoot	3-8	0.5-3	9-30	57-76	2-16
papaver	9-11	1-2	11-18	69-77	3-5
lijnzaad	4-10	2-8	10-24	12-19	48-60

Lijnzaadolie droogt veel beter dan papaver- en walnootolie, en er ontstaat een harder polymeer.

4. Geef een verklaring op micro-niveau voor het feit dat lijnzaadolie een harder polymeer geeft dan papaver- en walnootolie.

Er wordt een monster van de Nachtwacht genomen van 200 bij 200 bij 100 micrometer. Het bestaat uit loodwit en gepolymeriseerde lijnzaadolie. Het monster bevat 70 volume% loodwit met een dichtheid van 6.6 g/mL en de gebruikte lijnzaadolie heeft een dichtheid van 0.94 g/mL. Er blijken nauwelijks meer dubbele bindingen in het polymeer voor te komen, slechts 3.0% van het oorspronkelijke aantal dubbele bindingen heeft nog geen crosslink gevormd.

5. Bereken hoeveel gram lijnzaadolie er in het verfmonster aanwezig is.
6. Bereken hoeveel mol dubbele bindingen aanwezig zijn in 1 mol verse lijnzaadolie met een vetzuursamenstelling van gemiddeld 5% stearinezuur, 20% oliezuur, 15 % linolzuur en 60% linoleenzuur.
7. Uitgaande van een gemiddelde molaire massa van de lijnzaadolie van 835 g/mol, berekend hoeveel dubbele bindingen er in het verfmonster nog geen crosslink hebben gevormd.

Bronnen

- Artikel over oxidatie van het gepolymeriseerde olienetwerk (niet vrij toegankelijk):
<https://doi.org/10.1007/s11746-000-0042-4>
- Hoofdstuk uit een proefschrift over de droging van olieverf geanalyseerd met GC-MS:
https://pure.uva.nl/ws/files/3716386/20667_UBA002000601_05.pdf
- (Oud) overzichtsartikel over reacties in drogende oliën:
<http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/cr60232a001>
- Artikel over het polymerisatie en degradatie van drogende olie (niet vrij toegankelijk):
[https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(99\)00020-8](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(99)00020-8)
- Lijst met anekdotes over spontane ontbranding van lijnzaadolie:
<https://www.naturalhandyman.com/iip/infpai/inflinspontaneouscombust.html>
- Achtergrondinformatie over *De Nachtwacht*:
http://www.rembrandtpainting.net/rembrandt%27s_night_watch.htm

Disclaimer

Hoewel het onderwijsmateriaal met zorg is samengesteld, is het mogelijk dat deze onjuistheden en/of onvolledigheden bevatten. Het Rijksmuseum aanvaardt derhalve geen enkele aansprakelijkheid voor direct of indirecte schade, voortkomend uit het gebruik van dit materiaal.