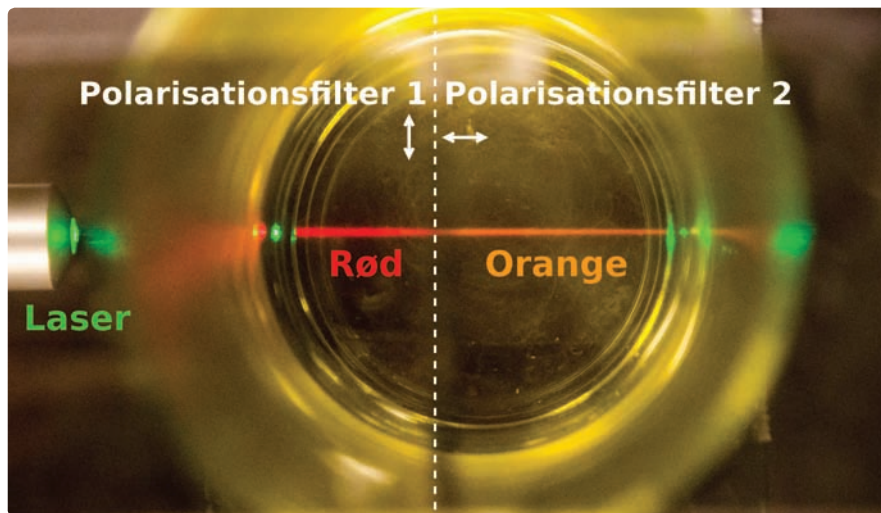


Kvantemekanik i køkkenet

BJARKE TAKASHI RØJLE CHRISTENSEN, ANDERS KOMÁR RAYN, MATHIAS MIKKELSEN, MAD S ANDERS JØRGENSEN, MARIE-LOUISE RIIS, JAN WESTENKÆR THOMSEN, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet, Blegdamsvej 17, 2100 København Ø

Introduktion

Både i gymnasiet og på universiteterne lærer de studerende, at kvantemekaniske fænomener først og fremmest dominerer mikroskopiske systemer på atomare størrelsesordener og ved lave temperaturer tæt på det absolutte nulpunkt. Der findes dog fænomener i vores makroskopiske hverdag ved stuetemperatur såsom permanente magneter, der tydeligt bevidner makroskopiske kvantemekaniske effekter. Et af de mere fascinerende kvantemekaniske fænomener forekommer, når man belyser jomfruolivenolie med en af de vidt udbredte kommercielle grønne laserpointere. Disse laserpointere udsender lys med en bølgelængde omkring 532 nm, og når dette lys sendes igennem jomfruolivenolien ses en tydelig orange fluorescens, se Figur 1. Dette forsøg har gennem tiden været brugt i undervisningssammenhæng til netop en kvalitativ demonstration af fænomenet fluorescens, men en dybere gennemgang af den bagvedliggende fysik følger sjældent i en undervisningssituation. Vi har udført en række forsøg for at undersøge, hvilke fysiske processer, der foregår under dette fænomen, og vi præsenterer her vores bedste forståelse af den bagvedliggende fysik. Vores for-



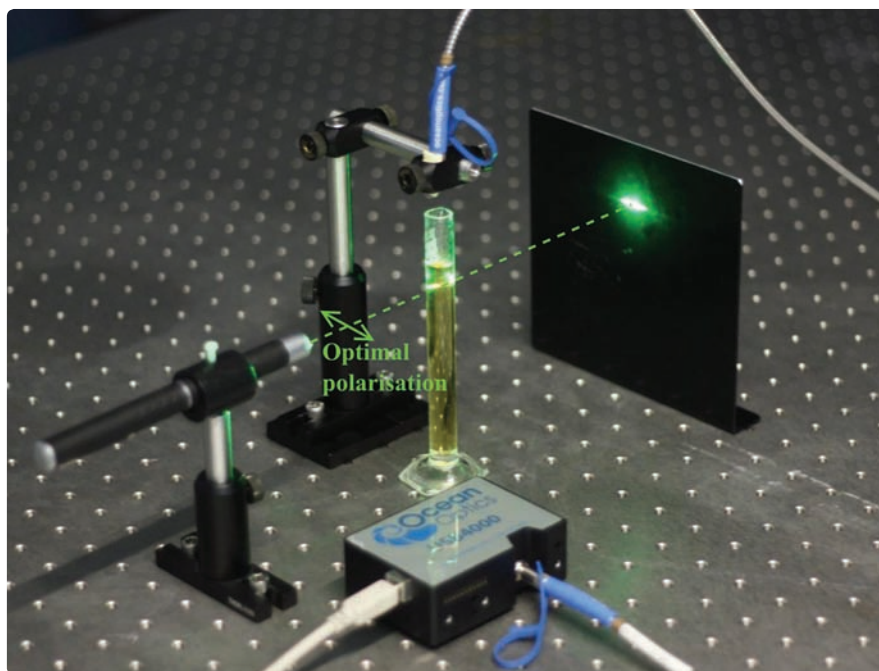
Figur 1

Billede af forsøget i en større beholder. Fluorescensen ses igennem to polarisationsfiltre med polarisationsakserne orienteret med en vinkel på 90° i forhold til hinanden. De hvide pile angiver hvilken polarisation, der stoppes af polarisationsfiltret. Igennem polarisationsfilter 1 ses kun den røde fluorescens, mens både det spredte grønne lys og den røde fluorescens ses igennem polarisationsfilter 2 og opfattes af vores øjne som farven orange.

søg kan reproducere med udstyr, som allerede benyttes til undervisningsbrug på gymnasiet niveau. Vi præsenterer derfor et forslag til en forsøgsopstilling, se Figur 2, og vi diskuterer elevernes faglige udbytte af forsøget, samt hvordan forsøget kan passe ind i kernestoffet for den gældende læreplan [1] for fysik på alle niveauer. Slutteligt diskuteres muligheden for at benytte forsøget i tværfaglige AT- eller NV-forløb i STX.

Forsøget og fysikken

En grøn laserpointer fikseres, så den belyser olie i en passende beholder. I vores forsøg blev en kuvette benyttet, men forsøget kan udføres med mange andre gennemsigtige beholdere såsom et reagensglas



Figur 2

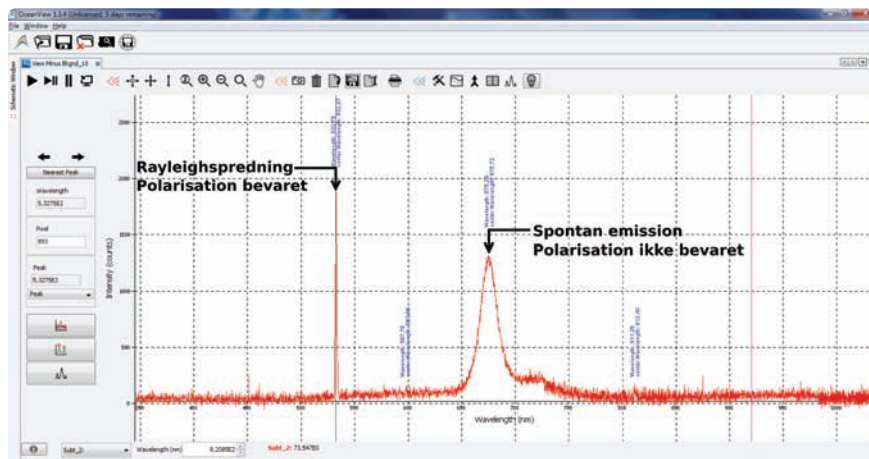
Billede af opstillingen. Den sorte cylinder, som holder laserpointeren er udformet således, at en plastiskrue presser på kontakten. For at opnå tydelige spektre anbefales det, at en laserpointer med høj effekt ($> 5\text{mW}$) anvendes, at spektrometers fiberspids placeres så tæt på fluorescensen som muligt, og at målingen foretages under dæmpet baggrundsbelysning. Rayleighspredningen af det grønne lys er tydeligst, når laserens polarisation er justeret som vist med de grønne pile.

Figur 3

Typisk måling af spektret af lyset fra olivenolie. En meget skarp komponent fra lys med veldefineret polarisation ses omkring 532 nm og et bredere spektrum fra upolariseret lys ses omkring 678 nm.

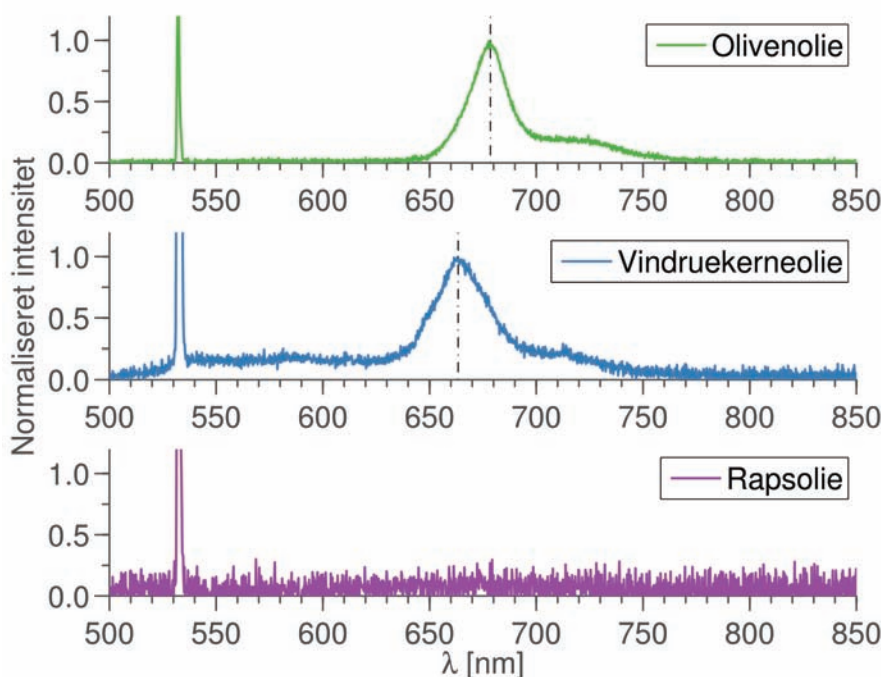
som vist i forsøgsopstillingen i Figur 2. Oven over beholderen placeres en fiberspids, som fører lyset fra fluorescensen over til en Ocean Optics USB4000 spektrometer eller [2] lignende spektrometre til undervisningsbrug. De målte spektre bliver tydeligst, hvis lokalet mørkelægges, og hvis man benytter laserpointere med over 5 mW optisk effekt. For højere optisk effekt bliver fluorescensen ligeledes klarere. Hvis softwaren tillader udregning af et middelspektrum over flere på hinanden følgende målinger, opnås også mindre støjfyldte spektre.

I Figur 3 ses et typisk spektrum fra en enkelt måling, og i Figur 4 ses spektre midlet over 100 målinger. Omkring 532 nm ses en tydelig top, som skyldes Rayleighspredning [3] af lyset fra laserpointeren i retning af fiberspiden. Rayleighspredning er et fænomen vi også kender fra himlens blå farve, som skyldes spredning af blått lys i atmosfæren. Rayleighspredning er en elastisk spredning, idet bølgelængden af det indkomne



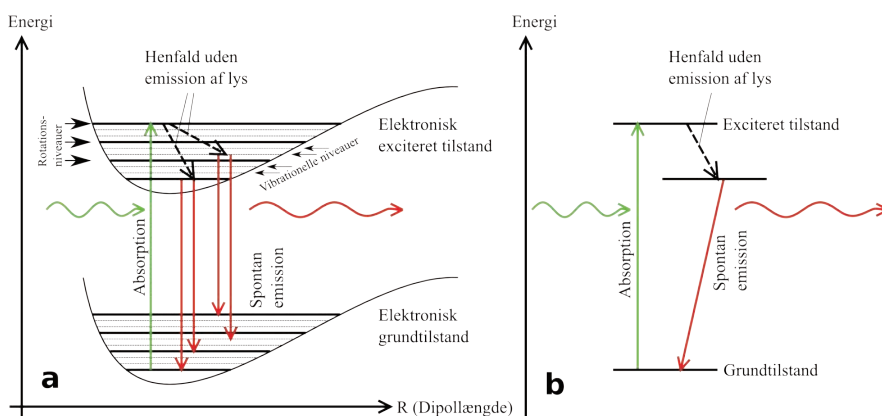
lys er den samme som det spredte lys. I olivenolien spredes lyset fortrinsvis af de organiske molekyler, som har en elektronfordeling med en dipol orienteret parallelt med laserlysets polarisation. Måles der vinkelret på det indkomne lys' retning, som anvist på Figur 2, vil det spredte lys være polariseret. Den målte signalstyrke kan optimeres ved at dreje laseren. I tilfælde af opstillingen vist på Figur 2 er polarisationen optimeret, når laserlysets (tilnærmelsesvis) lineære polarisation er horisontal med bordet. Omkring 678 ± 3 nm ses et bredere spektrum fra lys uden veldefineret polarisation. Dette skyldes en ikke-elastisk proces, som kan forstås ved at se på elektronstrukturen.

Elektron-energiniveauer for komplekse organiske molekyler kan i en meget simpel beskrivelse opdeles i to elektroniske tilstande. Hver elektronisk tilstand består yderligere af tætte vibrationelle og rotationelle niveauer, se Figur 5a. Lyset på 532 nm exciterer elektronen op i de øvre exciterede niveauer. Molekylernes høje densitet i væskeform resulterer i høje kollisionsrater i forhold til henfaldsraten af de elektroniske excitationer. Elektronerne vil derfor først relaxere grundet rotationer og kollisioner til et lavere niveau som ikke er grundtilstanden uden udsendelse af synligt lys, og herefter henfalder elektronen spontant ned til grundtilstanden ved emission af lys med bølgelængder i området omkring 678 nm. Udsendelse af lys fra overgange mellem vibrationelle og rotationelle tilstande er muligt, men den udsendte foton vil typisk have en energi svarende til infrarød- eller mikrobølgestråling og opfattes hverken af øjet eller spektrometeret. Denne form for fluorescens er et fingeraftryk for stærkt asymmetriske molekyler. Hvis et simpelt symmetrisk atom



Figur 4

Midlede målinger af spektre fra tre forskellige olier. Spektrene fra olivenolien og vindrukerneolien er normaliseret efter de respektive intensitetsmaksima af fluorescensen i det røde område, mens rapsoliens spektrum er normaliseret efter samme intensitetsmaksimum som for vindrukerneolien. Fluorescensen af vindrukerneolien er i praksis markant svagere end for olivenolien, selvom forskellen ikke fremstår tydeligt i de ovenstående normaliserede spektre.



Figur 5a

Illustration af de relevante overgange og processer. Elektronen kan exciteres fra en elektronisk grundtilstand til en exciteret tilstand. Begge elektroniske tilstande består af en samling vibrationelle og rotationelle tilstande. Her er dipolen i det komplekse organiske molekyle blevet beskrevet tilnærmelsesvis som et di-atomart molekyle.

Figur 5b

Simpel illustration af samme system, som vil være mere egnet til undervisningsbrug på gymnasieniveau.

som hydrogen eller strontium exciteres ved absorption af lys med en given bølgelængde kan kun den samme bølgelængde udsendes igen. Det udsendte synlige lys har et bredere kontinuert spektrum, som formentlig skyldes termisk forbreddning af overgangene, laserens linjebredde (frekvensspredning) samt spektrometers opløsning på 1,5 nm.

Molekylerne og derved dipolerne roterer på grund af den voldsomme pertubering fra omgivelserne, og kvantiseringssaksen bevares heller ikke under relaxeringen. Det emitterede lys har derfor ingen veldefineret polarisationsretning.

Den ovenstående beskrivelse af henfaldsprocessen er for omfattende for fysikundervisningen på gymnasieniveau, og kan med fordel blive formuleret i en simplificeret form illustreret i Figur 5b. Polarisation af lys indgår heller ikke i kernestoffet på noget niveau. Forklaringen af polarisationen kan derfor også med fordel udelades.

Dog kan polarisationen benyttes til at undersøge, hvordan vores øjne opfatter fluorescensen. Den veldefinerede polarisation af det spredte lys ved 532 nm gør det muligt, at frasortere denne komponent med et polarisationsfilter. Visuelt kommer dette til udtryk ved, at lyset fra olien ser rød eller orange ud alt efter orienteringen af polarisationsfiltret, se Figur 1. Den orange farve opfattes af vores syn, da øjet registrerer en blanding af grønt og rødt lys, hvilket, jævnfør additiv farveblanding, giver gul-orange nuancer. Orienteres polarisationsfiltret, så det grønne polariserede lys filtreres fra, ses kun det røde lys.

Det er oplagt at udføre samme forsøg for forskellige olietyper. I Figur 4 er spektret af jomfruolivenolie, vindruekerneolie og rapsolie vist. I alle tre spektre ses det spredte grønne lys tydeligt, mens den røde fluorescens er meget svagere og forskudt for vindruekerneolie og ikke forekommende for rapsolien. Det er altså muligt at skelne olietyper ud fra emissionspektret. Hvis det røde spektrum ikke forekommer, er det nemt at vurdere, om der er tale om jomfruolivenolie eller ej, mens forskellen ikke i samme omfang er tydelig for jomfruolivenolie og vindruekerneolie.

Spektre fra litteraturen peger på, at dette røde spektrum stammer fra klorofyl type A [4]. I Figur 6 ses det, at der er stor lighed mellem spektret fra klorofyl, olivenolie og vindruekerneolie, men det ses også tydeligt, at de er forskudt i forhold til hinanden. Formen og forskydningen af klorofyls emissionsspektrum afhænger af opløsningsmidlet [4]. Ud fra en undersøgelse af fem forskellige jomfruolivenolier vurderes det, at intensitetsmaksimummet af fluorescensspektret for jomfruolivenolie ligger ved 678 ± 3 nm. Er intensitetsmaksimummet uden for dette område, er der med stor sandsynlighed tale om en anden olietype. Alle undersøgte olier er anført i Tabel 1.

Til undervisning på C-, B- og A-niveau

Dette forsøg kan benyttes i fysikundervisningen på C- og B-niveau som en kvalitativ illustration af atomare og molekylære systemers absorption og emission af lys samt fænomenet fluorescens. Forsøget kan også give eleverne mulighed for at opnå rutine i at arbejde med

begreberne omkring det elektromagnetiske spektrum og dets egenskaber. Derved kan et meget bredt område af kernestoffet belyses under arbejdet med forsøget. Ud over opfyldelse af lærerplanens krav er forsøget som tidligere nævnt et tydeligt kvantemekanisk fænomen og giver eleverne mulighed for at opleve elektronniveauernes diskrete natur.

Forsøget kan også benyttes som et alternativt forsøg til den af læreplanen påkrævede eksperimentelle bestemmelse af en bølgelængde, da den grønne laserpointers bølgelængde skal bestemmes undervejs i forsøget. Eventuelt kan dette kombineres med en anden metode til bestemmelse af bølgelængde som et uafhængigt tjek på spektrometeret og kalibrering af måleinstrumenter kan diskuteres.

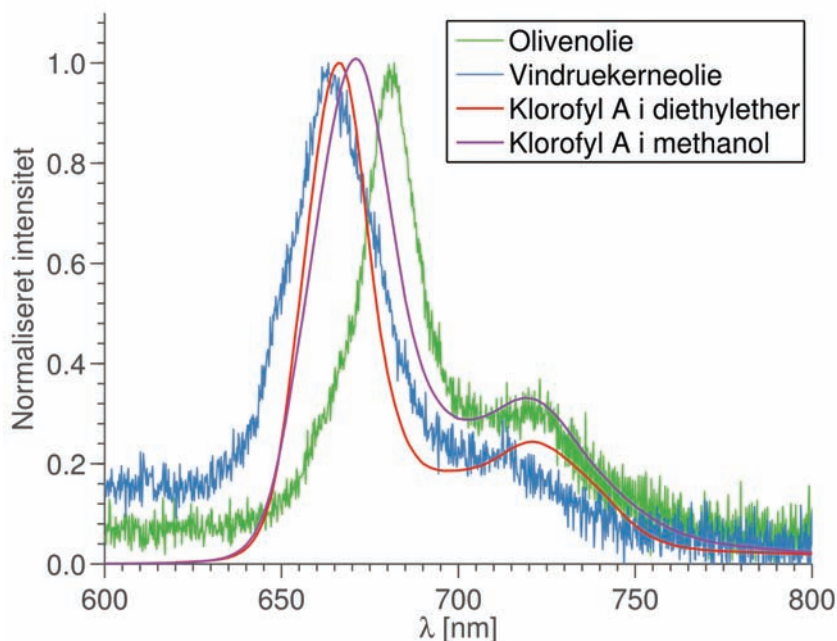
En kvantitativ databehandling og analyse af de forskellige spektre vil bringe abstraktionsniveauet op og anbefales derfor som udgangspunkt for undervisningen på B- eller A-niveau eller for klasser i naturvidenskabelige studieretninger. Det vil give mulighed for adskillelse af forskellige olietyper og en perspektivering til spektroskopi som et redskab til karakterisering og kvalitetstjek af produkter i industrien er oplagt.

Tværfaglighed

Detaljerede undersøgelser af komplekse organiske molekyler er ikke en typisk del af de eksperimentelle øvelser i fysikundervisningen, og dette åbner muligheden for tværfaglige forløb med andre nære fag som kemi, biotek og biologi. Karakteriseringen af komplekse organiske molekyler indgår i kemi på B-

Figur 6

Sammenligninger af emissionsspektret fra klorofyl A i forskellige opløsningsmidler samt oliven- og vindruekerneolie. Data for klorofyl fra [4].



og A-niveau, og forsøget kan udføres i samarbejde med både kemi og bioteknologi. Her kan kemi og bioteknologi behandle molekylets struktur, mens fysik kan behandle de fysiske processer i forsøget. Som reference kan emissionsspektret af Klorofyl A i forskellige opløsningsmidler måles.

Klorofyl spiller en vigtig rolle i planternes fotosyntese, og findes i alle grønne planter. Forsøget med olivenolien kan benyttes i samspil med biologi eller bioteknologi i et forløb om fotosyntesen. Her kan olieforsøget benyttes til at diskutere, hvordan planter optager lys, og til at illustrere hvor følsom klorofyl er overfor lys i det synlige bølglængdeområde. Det skal nævnes, at planternes grønne farve skyldes, at grønt lys som tidligere nævnt spredes af klorofyl, mens en meget kraftigere absorption kan ses for lys i det blå bølglængdeområde. Dette kan vises med en blå laserpointer ved 405 nm.

Et bredt anvendt AT-forløb i 1.g er et fysik-billedkunst-forløb, hvor de forskellige farveblandinger undersøges kvalitativt. Her kan farveblandingen af det spredte grønne lys og det røde fluorescens forsøg bruges som et supplerende eksempel på additiv farveblanding.

I større projektarbejde som SRP og AT i STX kan det tænkes at kombinere forsøget med biologi og bioteknologi, hvor absorptions- og emissionsspektre af fotopigmenter i knuste alger og blade un-

dersøges. En mulighed er også at isolere disse fotopigmenter i kemi ved at benytte tyndtlagschromatografi (TLC) og diskutere sammenhængen mellem de isolerede stoffer og olieforsøget og eventuelt måle emissionsspektrene af de udvundne fotopigmenter, hvis der kan udvindes store nok mængder af disse stoffer. En grundig sammenligning af forskellige olietypers emissionsspektre for at give en kvantitativ vurdering af olie kvalitet er også et projekt, som i omfang kunne svare til et SRP.

Konklusion

Vi har her præsenteret et forsøg, som vi vurderer har stor relevans for fysikundervisningen på gymnasieniveau. For at understøtte brugen af forsøget i undervisningssituationer, har vi udført en række undersøgelser for at opnå en større forståelse af systemet, og vi har præsenteret vores bedste bud på den bagvedliggende fysik. En stor del af denne fysik er uden for gymnasiepensummet, men det er vores vurdering, at denne viden er relevant for læreren, når et eventuelt un-

dervisningsforløb med dette forsøg skal planlægges. Som inspiration til videre undersøgelser kan det slutteligt nævnes, at en anden type standardlaserpointer, den blå laserpointer ved 405 nm, som nævnt tidligere også absorberes kraftigt og resulterer i en fluorescens. Denne bølglængde absorberes meget kraftigere end det grønne lys, og en eksponentiel dæmpning af fluorescensen igennem olivenolien vil kunne ses tydeligt. Samme blå laser resulterer desuden også i en klar fluorescens i tonic-vand. En detaljeret undersøgelse af disse fluorescenser efterlades til interesserede sjæle.

Referencer

- [1] Undervisningsministeriet, retsinformation.dk/Forms/R0710.aspx?id=152507
- [2] Ocean optics, oceanoptics.com/product/usb4000-custom
- [3] RP Photonics, rp-photonics.com/rayleigh_scattering.html
- [4] S. Prahl, omlc.org/spectra/PhotochemCAD/html/122.html & omlc.org/spectra/PhotochemCAD/html/123.html, 2012.

Tabel 1

Liste over de undersøgte olietyper samt deres pris.

Nr.	Navn	Beskrivelse	Pris pr. liter
1	Boromio	Økologisk olivenolie fra Spanien	kr. 75,9
2	Huilor	Rapsolie	kr. 11,6
3	Zeus	Økologisk olivenolie fra Grækenland	kr. 104,0
4	De Cecco	Olivenolie fra Italien	kr. 120,0
5	Irmas hverdag	Blandede olivenolier fra Italien	kr. 49,5
6	M olive oil	Blandede olivenolier	£ 4,0
7	Nordic Food Partners	Vindruekerneolie	kr. 32,0