

Een alfabet van demo's met kaarsen uit Faraday's kerstlezingen en Liem

Ed van den Berg en Freek Pols

Inleiding

In 1860 koos Faraday de kaars als onderwerp voor 6 kerstdemonstratie sessies voor een algemeen en jong publiek en in zijn boekje schreef hij: *"there is no better, there is no more open door by which you can enter into the study of science than by considering the physical phenomena of a candle"*.

Begrippen, o.a.: vast, vloeibaar, damp; druk, warmte, temperatuur; geleiding, stroming, straling; capillair transport; ontbrandingstemperatuur, verbranding van carbohydraten, chemische reacties; Bernoulli effect; vorm en kleuren van de vlam, zwarte straler, emissie/absorptie; ionisatie en statische ontlading; en de rol van experimenten en redeneren met bewijsmateriaal in zoeken naar en toetsen van verklaringen.

Faraday

Drie keer gaf Faraday een serie lezingen/demonstraties over de natuur- en scheikunde van een brandende kaars (1848, 1854, 1860). In 1860/61 werden de lezingen getranscribeerd: *"recorded verbatim by special permission"* met 700 deelnemers en speciale aandacht voor jongeren van 15 - 20. Bill Hammack en collega's (2016) van de engineerguy.com website herpubliceerden de zeer leesbare Faraday tekst met nuttige toevoegingen en lesmateriaal voor leerling practica, en met video's van de experimenten zoals Faraday die kan hebben uitgevoerd. In de video worden observaties aangekondigd voor een demo. Dat helpt de aandacht te richten op wat je moet zien, maar het verassingselement is weg. In de klas kun je dat natuurlijk anders doen en kun je demo's herhalen als leerlingen niet zien wat ze moeten zien. Dit artikel bevat een alfabet aan kaarsexperimenten die geschikt zijn als docent demo, maar ook als leerlingpracticum, of als synchrone experimenten op de tafels van docent en leerlingen tegelijk. De demo's zijn kort opgeschreven als recept met resultaten, u zorgt zelf voor de didactische aankleding. De meeste demo's vereisen slechts enkele minuten en alleen een kaars, aansteker, en iets uit de broekzak. Een alternatief is complete lessen te maken van Faraday's demo's en zijn zorgvuldige redeneringen te volgen. Hammack geeft prachtig voorbeelden van consistent redeneren, vooral in de scheikunde voorbeelden.

<https://engineerguy.com/faraday/pdf/faraday-chemical-history-complete.pdf>

<https://engineerguy.com/faraday/#video-series>

Een deel van de experimenten is ook te vinden in Liem (1987), daar inclusief aantrekkelijke didactiek.

Observatie oefening met een kaars (demo of leerlingexperiment)

Bij voorkeur een kaarsje (bv verjaardag kaarsjes) per twee leerlingen opdrachten a - c. Alternatief is een docentdemo met webcam projectie op een scherm.

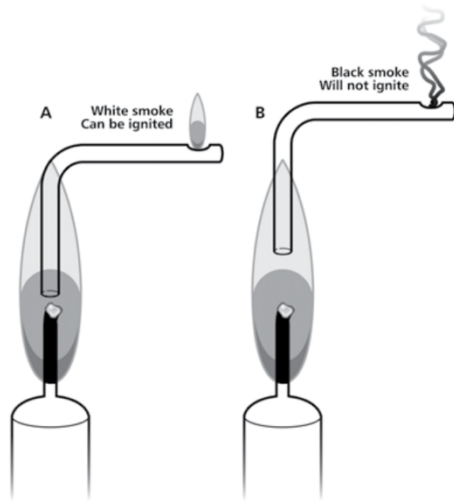
- De kaars is nog uit: Beschrijf de kaars zo volledig mogelijk (onderdelen van de kaars, functie). Schrijf drie of meer vragen op met een mogelijk antwoord.
- De kaars is aan: Beschrijf je waarnemingen zo volledig mogelijk (kleuren en vorm van de vlam, lont, het kaarsvet in vaste en vloeibare en misschien nog een andere vorm, wat is het dat brandt?). Schrijf 3 vragen op. Wat zijn je eerste en voorlopige antwoorden?
- De kaars is uitgeblazen, wat nemen we waar met onze zintuigen? Witte rook, zwarte rook, geur, lont. Wat gebeurt er met de vloeibare was?

Wat brandt er bij een kaars?

Vast kaarsvet? Vloeibaar kaarsvet? Of toch wat anders?

- Probeer eens vast kaarsvet aan te steken, ... het brandt niet. En waartoe dient de pit dan? Steek maar eens een kaars aan en kijk goed. Laat leerlingen dit eventueel op hun tafel doen in een synchrone demo op docent en leerlingentafels.

De docentkaars kan via een webcam geprojecteerd worden op het scherm. Eerst brandt alleen de pit, dan smelt wat kaarsvet dat een meertje vormt rond de pit. Ietsje later brandt de kaars, maar dan wel op enkele millimeters afstand boven de vloeibare was. Stijgt de vloeibare was omhoog in de pit en is het verdampte vloeistof die brandt?



Figuur 1 Kaars uitdoven en op afstand aansteken met methode Faraday. Zonder glazen buisje kan ook.

e) Kan de vloeistof ook branden? Keer de brandende kaars om, de vloeistof loopt langs de brandende pit en de vlam gaat uit! De temperatuur van de vlam blijft blijkbaar beneden de ontbrandingstemperatuur van het vloeibare kaarsvet!

f) Is het verdampte vloeistof? Doe de vlam uit en houd onmiddellijk daarna een brandende lucifer of kaars op enige afstand bij de witte walm van de kaars.

De kaars gaat weer aan, op afstand snel aangestoken. Oefen hiermee want het lukt niet elke keer.

Faraday demonstreerde dit ook. Witte rook (kaarsvet in dampvorm gemengd met witte gecondenseerde druppeltjes) kan aangestoken worden, de zwarte rook (carbon deeltjes) niet. Inventiviteit van Faraday: L vormige glaspipje. Houd dat laag over de vlam (figuur 1 links) en je kunt het uiteinde aansteken. Houd dat hoger boven de vlam (rechts), nu is er niets aan te steken want op die plek zijn er alleen verbrandingsproducten en niet de

brandbare kaarsvet damp.

In de originele beschrijving van Faraday: *If you blow a candle carefully, you will see the vapor rise from it. You have, I know, often smelled the vapor of a blown-out candle- and a very bad smell it is; but if you blow it out lightly, you will be able to see pretty well the vapor into which this solid matter is transformed. When I hold a lighted match two or three inches from the wick, you can observe a train of fire going through the air till it reaches the candle. I am obliged to be quick and ready, because, if I allow the vapor time to cool, it becomes condensed into a liquid or solid, or the stream of combustible matter gets disturbed.*

g) Een analoog proces van capillaire opstijging in de pit kun je zien door toiletpapier of een papieren zakdoekje of een handdoek met een kant in water te houden. De vloeistof stijgt op.

Wat zijn de verbrandingsproducten?

h) Koolstof/roet: Verken de vlam met een munt vastgehouden in een tang of knijper. Verken waar de munt zwart wordt en waar niet. In het gele deel van de vlam wordt de munt onmiddellijk zwart, buiten dat gele deel niet. Gloeien versus verbranden, als je materie in een vlam houdt of verhit, dan kan die gaan gloeien (filament van een lamp) maar ook verbranden. Dat zijn verschillende processen die beide plaatsvinden in een kaarsvlam. De damp van de kaars verbrandt volledig aan de buitenkant van de vlam (blauw) maar onvolledig in het donkere deel van de vlam. Daar worden carbon deeltjes geproduceerd die geel gloeien en hopelijk aan de buitenkant van de vlam volledig verbranden. Faraday: *The main point here is that the carbon that comes from the candle incandescens (glows) to form the brightest part of the flame and then reacts with oxygen to create the hottest part of the flame.* Faraday gebruikte een brander om het verschil te laten zien tussen onvolledige verbranding (gele en zelfs walmende vlam) en volledige verbranding (blauwe vlam) wanneer meer lucht wordt toegevoerd.

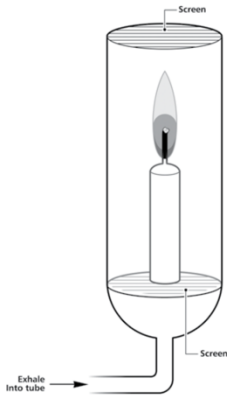
Faraday maakt uitstapjes naar andere proeven om details van de kaars nader te onderzoeken. Zo zijn er onderzoekjes naar eigenschappen van waterstof en water. Bijvoorbeeld bellenblazen met waterstof, de bellen gaan omhoog, of water bevroren in een dikke ijzeren pot die breekt, en chemisch onderzoek van verbrandingsproducten, alle te zien op Hammack's video's.

- i) Bij verbranding van carbohydraten moet er toch H₂O gevormd worden. Een glas op zijn kop over de vlam houden, het glas wordt minder doorzichtig. Gevormde waterdamp zal daar condenseren. Was er water in de kaars zelf? Nee! Dat is dus gevormd. Wat is er nog meer? Roet? Dat kun je zien! Wat is dat? Koolstof, een product van onvolledige verbranding.
- j) Steek de kaars aan. Waarom is de vlam langgerekt? Convectorie! Kunnen we aantonen dat lucht naar boven gaat? Probeer kleine papiersnippers, of met een puntlichtbron kun je een schaduw van de vlam projecteren op wit papier en kun je van dichtbij bewegende schaduwen van opstijgend spul zien. We probeerden met een kraag van papier rond het bovenste stukje kaars convectorie te belemmeren, maar de vorm van de vlam veranderde nauwelijks. Er wordt blijkbaar voldoende lucht van opzij aangezogen.
- k) Er zijn verschillende kleuren te onderscheiden, wat geeft dat aan? Verschillende temperaturen, volledige (blauwe) en onvolledige (gele) verbranding. Wat brandt er eigenlijk? Verdamppt kaarsvet. Verbrand de lont? Waarom wel/niet? Het binnenste van de vlam zal een temperatuur hebben lager dan de ontbrandingstemperatuur van de lont, anders zou die opbranden. De donkere plek midden in de vlam duidt daar ook op. De ontbrandingstemperatuur van een brandbaar materiaal is de temperatuur waarbij het materiaal spontaan in brand kan vliegen. Voor papier is dat bijvoorbeeld tussen de 200 en 300 graden Celsius afhankelijk van de papiersoort.
- l) Probeer nu de warmte weg te leiden van de vlam, bijvoorbeeld door een spiraal van koperdraad snel in de vlam te laten dalen. Wat zie je? De vlam dooft uit. Herhaal het experiment maar laat de koperdraad spiraal nu langzaam dalen. De vlam gaat niet uit. Hoe komt dat? Bij een snelle daling wordt een koude spiraal verwarmd door de vlam die snel afkoelt tot beneden de ontbrandingstemperatuur van het gasvormige kaarsvet. Dan gaat de vlam uit. Bij een langzame daling is er alle tijd om de spiraal op te warmen en is er geen snelle daling van de vlamtemperatuur. Deze kaarsen-dover werkt veel schoner dan uitblazen.
- m) Mooier wordt het met het metalen gaasje van een kraan. Je kunt de vlam naar beneden duwen. Door opname, verspreiding en straling van warmte door het gaasje, wordt het boven het gaasje niet warm genoeg voor ontbranding. Nog mooier, houd een lucifer boven het gaasje, gaat die branden of niet, is de vlamtemperatuur boven het gaasje onder de ontbrandingstemperatuur van de lucifer? Onze lucifer ontbrandde niet.
- n) Uitstapje naar een brander: je kunt met een gaasje ook de vlam optillen waarbij er alleen een vlam boven het gaasje is en niet eronder. Bij een kaars zit de pit dan in de weg, zie ShowdeFysica 1, p64.

Kaars, lucht, en druk

- o) Plaats een omgekeerd glas over een brandende kaars. Wat zie je? Een vlam die kleiner wordt en uitgaat. Nogal wiedes, geen zuurstof meer. Wat zie je nog meer? Aanslag op de binnenkant van het glas (waterdamp), rook/roet.
- p) Plaats een kaars in een schotel waarin ½ bekertje water is gegoten. Steek de kaars aan en plaats onmiddellijk een glas over de kaars. Dat de kaars nog even brandt en dan uitgaat, dat verwachten leerlingen. Maar dat vervolgens het water in het glas stijgt is interessanter. Ja, er werd zuurstof verbruikt in de verbranding, maar wat is er tegen de uitleg door zuurstof consumptie? Of de uitleg dat uitgezette lucht weer krimpt? Dat is een prachtige gelegenheid voor fysisch en chemisch redeneren. Uiteindelijk kom je op het condenseren van het verbrandingsproduct waterdamp. Denk aan het blikje kokend water dat je omkeert en snel dompelt in koud water, het blikje wordt samengedrukt.
- q) Met behulp van enkele leerlingen ga je nu 1, 2, en 3 kaarsen onder een glas tegelijk aansteken. Laat leerlingen voorspellen welke kaars(en) het eerst uitgaan en hoe hoog het water komt in elk van de opstellingen. Dan uitvoeren. Zie Liem (1987, p38 & 39 voor details, maar zijn uitleg klopt niet helemaal).

- r) Faraday plaatste een brandende kaars ook in een doorzichtig bakje met een gat onderin voor lucht aanvoer en bovenin voor afvoer. Blaas zachtjes door het onderste gat, zachtjes om de vlam niet uit te blazen. Na enige tijd gaat de vlam wel uit, blijkbaar bevat de ingeblazen lucht te weinig zuurstof. Daarmee leert dit experiment ons iets over respiratie! Faraday deed follow-up experimenten om deze analogie met ademhaling verder te verkennen. Bijvoorbeeld, onze uitadem is ook vochtig net als de lucht die van de kaars af komt (figuur 2).



Figuur 2 CO₂ aantonen in uitadem volgens Faraday.

- s) Plaats een theelichtje in een halfvol lang glas met heet water en steek het aan. Leg dan een poeder van een vitamine C bruistablet in het water. Wat gebeurt er, waarom? Dit lukte ons nog niet, misschien heet water (snellere reactie) of bakpoeder met azijn?
- t) Bernouilli: blaas met een rietje aan de zijkant van een vlam (Figuur 3). Leerlingen verwachten dat je de vlam wegblaast, maar de vlam neigt juist naar het rietje toe, de plek van de laagste druk!

Kaarsmechanica

- u) Neem twee kaarsen, plaats ze met de onderkanten tegen elkaar en wikkel er een strip aluminiumfolie strak omheen (figuur 4). Steek daar een naald doorheen als as, iets boven het zwaartepunt. Plaats de as op de randen tussen twee glazen. Indien nodig een kaars iets uit de huls trekken totdat de kaarsen gebalanceerd zijn. Dan beide kaarsen aansteken en we hebben een wip. Leerlingen bedenken een verklaring. De naar beneden wijzende kaars smelt het hardst, totdat deze kaars lichter wordt door het drippen van kaarsvet en naar boven wijpt. Dan gaat het proces door aan de andere kant. Kijk ook of de frequentie van de wip verandert. Onderzoekjes zijn mogelijk van basisschool tot universitair niveau. Tjossem, Case en Bass (2019) rapporteerden indrukwekkend onderzoek in de American Journal of Physics en uitvoerbaar met relatief simpele middelen (gevonden door Ruud Brouwer).

v)



Figuur 3 Bernouilli, blazen door rietje, vlam buigt onverwacht naar luchtstroom toe.



Figuur 4 Kaarsenwip

Kaarsoptica

- w) Zet een glasplaat, bijvoorbeeld uit een fotolijst gehaald, rechtop. Zet twee identieke kaarsen aan weerszijden op precies dezelfde afstand. Zet de leerlingen zo neer dat ze de achterste kaars alleen door het glas kunnen zien. Steek nu de voorste kaars aan, maar doe alsof je beide kaarsen aansteekt, dus even iets tussen aansteker en leerlingen houden. Door het spiegelbeeld in het glas lijkt het alsof beide kaarsen aan zijn. Dan vinger naar de vlam en snel terugtrekken. Au! Vinger naar achterste kaars, beetje spelen met terugtrekken, maar uiteindelijk lang in de "vlam" houden. Rara hoe kan dat? Het spiegelbeeld van de brandende kaars voor het glas valt over de kaars achter het glas waardoor het lijkt of die brandt. Zie Liem (1987, p272).

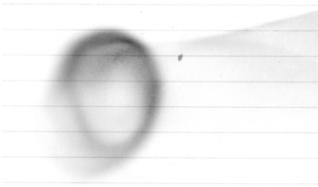
Vlamkleur

In tegenstelling tot een populaire verklaring is het blauwe deel van de vlam niet blauw vanwege zwarte straling piekend in blauw, maar als resultaat van emissie door moleculaire radicalen onderaan de vlam. Het gele deel en het donkere deel van de vlam zijn al besproken.

https://www.reddit.com/r/askscience/comments/3ss05s/why_do_candles_emit_light_of_a_continuous_range/?rdt=55578

Isothermen rond de vlam (Liem, 1987, p205)

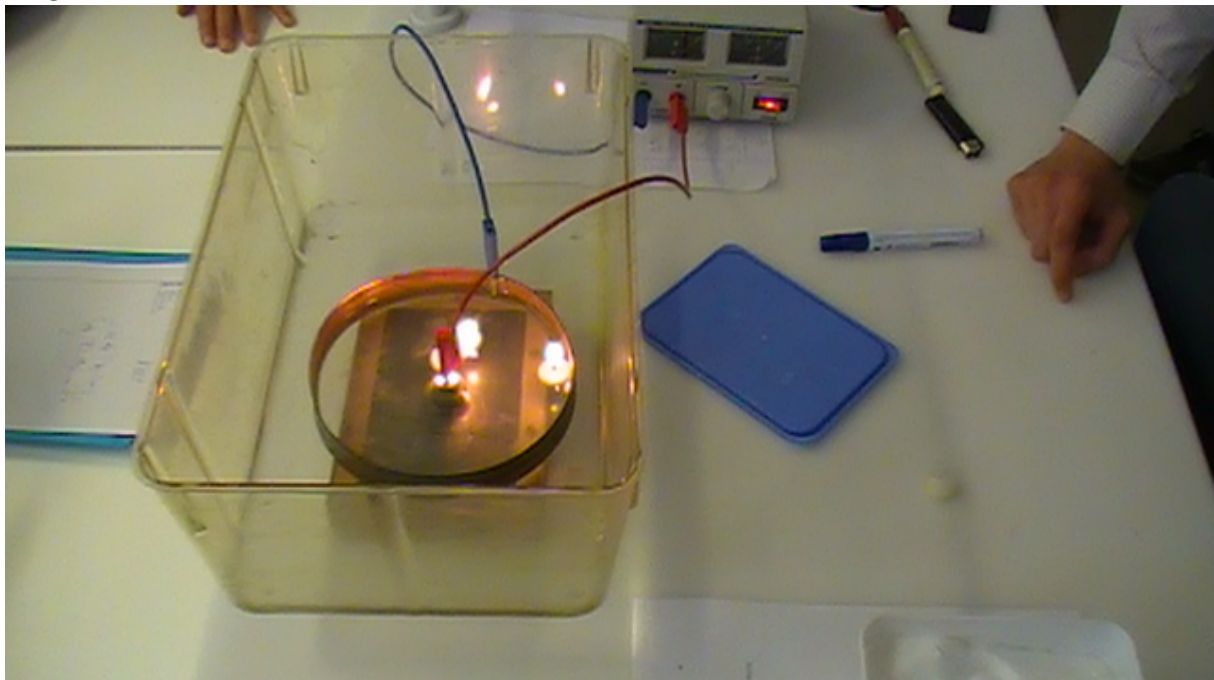
- x) Verken met je hand voorzichtig de temperatuur rond de vlam. Boven de vlam moet je afstand houden, van opzij kun je dichtbij komen. Boven is er die opstijgende hete lucht (convectie), opzij is voornamelijk verwarming door straling en die lijkt dus beperkt te zijn.
- y) In een practicum met een kaars en een stuk of tien lucifers per leerling proberen ze verticaal een lijn rond de vlam te tekenen waarop de lucifer ontbrandt bij het langzaam naderen van de vlam. Laat ze vervolgens de vorm van die lijn uitleggen. De ontbrandingstemperatuur van de lucifer zal ongeveer constant zijn, eventueel verifiëren. Leerlingen benaderen de vlam steeds op verschillende locaties met een lucifer. Onderaan en aan de zijkant kunnen ze dichtbij komen, bovenaan is de ontbrandingslocatie vrij ver van de vlam. Verklaar! De verklaring is vooral convectie rond de vlam.



Figuur 5 Temperatuur- of roetprofiel in donkere deel van de vlam.

- z) Een andere manier om een temperatuur- (of roet?) patroon in de vlam te krijgen is door een blad papier of index kaart horizontaal even de vlam in te duwen en houden op de plek waar die vlam donker is en dan snel terugtrekken. Even oefenen dat de vlam daardoor niet uitgaat en het papier niet in brand vliegt. Er wordt een donkere ring gevormd, blijkbaar is de buitenkant van de vlam heter dan de binnenkant waar de vlam wat donker is. Het ringpatroon wordt vervormd doordat het uit de vlam trekken ook een roetspoor achterlaat (figuur 5). Het is dan ook de vraag of dit een temperatuurpatroon of een gewoon roetpatroon is. Bovenin de vlam krijg je geen ring maar een pikzwarte cirkel.

Toegift



Figuur 6 Kaarsen, stroom, elektrolyt, en Lorentzkracht

Tot slot de mooiste kaarsdemo die ik ken afkomstig van het Stevin team en beschreven door Onne Slooten en ik (ShowdeFysica 2, p132-133). De opstelling heeft een koperen blokje met aansluiting in het centrum en een losse koperen ring eromheen, geplaatst in een zoutoplossing met een platte, sterke magneet onder de bak (Figuur 6). Tussen blok en ring laat je theelichtjes (aangestoken) drijven. Dan zet je spanning tussen blok en ring en daar beweegt een rivier met lichtjes. Dit is duidelijk geen broekzak demonstratie.

Grafieken en relaties

Er zijn diverse mogelijkheden om kwantitatieve metingen te doen en grafieken te maken. Bijvoorbeeld bij experimenten q en u. Dit laten we over aan de lezers.

Onderzoeken met kaarsen

Je kunt natuurlijk leerlingen indelen in groepjes, een kaars en aansteker geven en nog wat spullen, met de opdracht "stel vragen over de kaars en onderzoek". Beter is eerst twee spectaculaire demo's te doen ter motivatie en dan de opdracht te geven vragen te formuleren en te onderzoeken. Een alternatieve manier van motiveren is met concept cartoons met vervolgens de vraag experimenten te bedenken om het gelijk of ongelijk van cartoonuitspraken aan te tonen of nieuwe vragen te stellen en te onderzoeken (Figuur 7). Met Hammack's 2016 artikel en website heeft de docent alle achtergrondkennis beschikbaar.



Figuur 6 Concept cartoon over brandende kaars

Literatuur

Faraday, M. (1860). A course of six lectures, adapted to a juvenile auditory, on the chemical history of a candle.

Hammack, W.S., DeCoste, D.J. (2016). Michael Faraday's The Chemical History of a Candle. With Guides to Lectures, Teaching Guides, & Student Activities. Articulate Noise Books, Urbana, Illinois.

<https://engineerguy.com/faraday/pdf/faraday-chemical-history-complete.pdf>

Hammack, W.S., De Coste, D.J. (2016). Faradays lectures re-enacted on video:

<https://engineerguy.com/faraday/#video-series>

Liem, T. (1987). Invitations to Science Inquiry, 2de editie. Chino Hills (California): Science Inquiry Enterprises. Een pdf zwerft over het internet. Het beste demonstratieboek ooit geschreven.

Wikipedia: <https://en.wikipedia.org/wiki/flame>

Tjossem, P.J.H., Case, W.B, Bass, R.M. (2019). The candle seesaw. Am. J. Phys., Vol. 87, No. 5, May 2019

<https://pubs.aip.org/aapt/aip/article/87/5/370/1057039/The-candle-seesaw>

Streamers:

Faraday: "there is not a law under which any part of the universe is governed which does not come into play, and is touched upon in the chemistry of a candle".

Faraday: "We come here to be scientists ... whenever a result happens, especially if it be new, you should say "What is the cause? Why does it occur?" and you will in the course of time find out the reason".