

Zichtbaarheid van een waterstofvlam, een “brandende” vraag

Sander van Woudenberg, augustus 2021

Sinds een aantal jaren is er een groeiende belangstelling voor waterstof als belangrijke bouwsteen in de energietransitie. Mede daardoor komt regelmatig de vraag naar voren of waterstof met het blote oog zichtbaar is wanneer het brandt. Een terechte vraag, kijkend naar mogelijke consequenties van een niet zichtbare vlam en de veiligheid. In dit artikel beantwoorden we deze vraag.

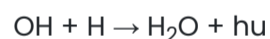
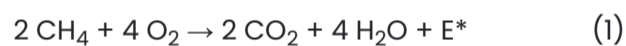
De kleur van de waterstofvlam

Uit studies blijkt dat het onderwerp regelmatig aan de orde komt. Dit is vaak niet specifiek in relatie tot de energietransitie, maar als onderwerp van veiligheid bij toepassingen met waterstof. Zo heeft de NASA in zowel het verre als het meer recente verleden gepubliceerd over de zichtbaarheid van waterstof bij ontbranding ([“Visible emission of hydrogen flames”, Schefer et al 2009](#)), toepassing in brandstofcellen. In deze studies wordt waterstof gemengd met lucht in verschillende verhoudingen voor ontsteking, waarna de ontbranding wordt bestudeerd samen met de karakteristieken van brandend waterstof. De ontbranding van waterstof vindt plaats in een experimentele branderopstelling. De branderkamer zorgt door de geometrie voor een donkere achtergrond. De kleur van de waterstofvlam is grijs-blauw en minder zichtbaar in vergelijking met een vlam waarbij koolwaterstoffen worden verbrand. Tevens meldt een ander studie ([“Investigation of visible light emission from hydrogen-air research flames”, Zhao et al 2019](#)), dat andere kleuren dan blauw worden waargenomen tijdens de verbranding van waterstof. Deze kleuren variëren van grijs-blauw tot paars-rood. Maar wat is nu werkelijkheid, wat kan worden verwacht bij een gecontroleerde dan wel spontane ontbranding van waterstof?

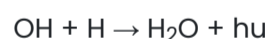
Het verbrandingsproces

Allereerst wordt een vergelijking gemaakt tussen koolwaterstoffen en waterstof. De karakteristieken bij ontbranding van beide gassen worden besproken en vergeleken om zo goed te kunnen duiden waar de verschillen liggen en waarom dat zo is.

Tijdens de verbranding van koolwaterstoffen en waterstof worden deze componenten omgezet in andere componenten waarbij energie vrijkomt. Voor koolwaterstoffen, in dit geval methaan (CH_4), kan de volgende reactievergelijking opgesteld worden die opgaat voor een volledige verbranding:



Bij een onvolledige verbranding, komen naast water ook koolstof en koolmonoxide vrij. Hiervoor geldt een andere reactievergelijking. Tijdens de verbranding van waterstof kan de volgende reactievergelijking worden opgesteld:



In de bovenstaande vergelijkingen is de stoichiometrische verhouding weergegeven. De E^* staat voor de hoeveelheid energie en hu staat voor de hoeveelheid straling, al dan niet in het zichtbare spectrum. In alle gevallen zal een mengsel van de brandstof en lucht gemaakt moeten worden om deze te kunnen ontsteken. Met andere woorden: de zuivere brandstofcomponent zonder de aanwezigheid van lucht, zal niet spontaan ontsteken. In beide vergelijkingen zal, naast de omzetting van de componenten in de reactievergelijking, tevens een bepaalde hoeveelheid energie vrijkomen in de vorm van conductie, convectie en thermische emissie. In beide reactievergelijkingen wordt OH samen met waterstofradicalen omgezet in water, hetgeen volgens onderzoek ([“Visible emission of hydrogen flames”, Schefer et al 2009](#)) gezien wordt als een belangrijke bijdrage voor de blauwe component in een vlam.

De zichtbaarheid van de vlam

In onderstaande foto is een vergelijk gemaakt tussen het branden van propaan (C_3H_8) en het branden van waterstof. Bij nachtelijke omstandigheden is de waterstofvlam slechter zichtbaar dan de propaanvlam. Dit experiment is tevens gefilmd en [hier](#) ([“Hydrogen Safety: Hydrogen Flame Prop Demonstration”, YouTube 2020](#)) te bekijken.



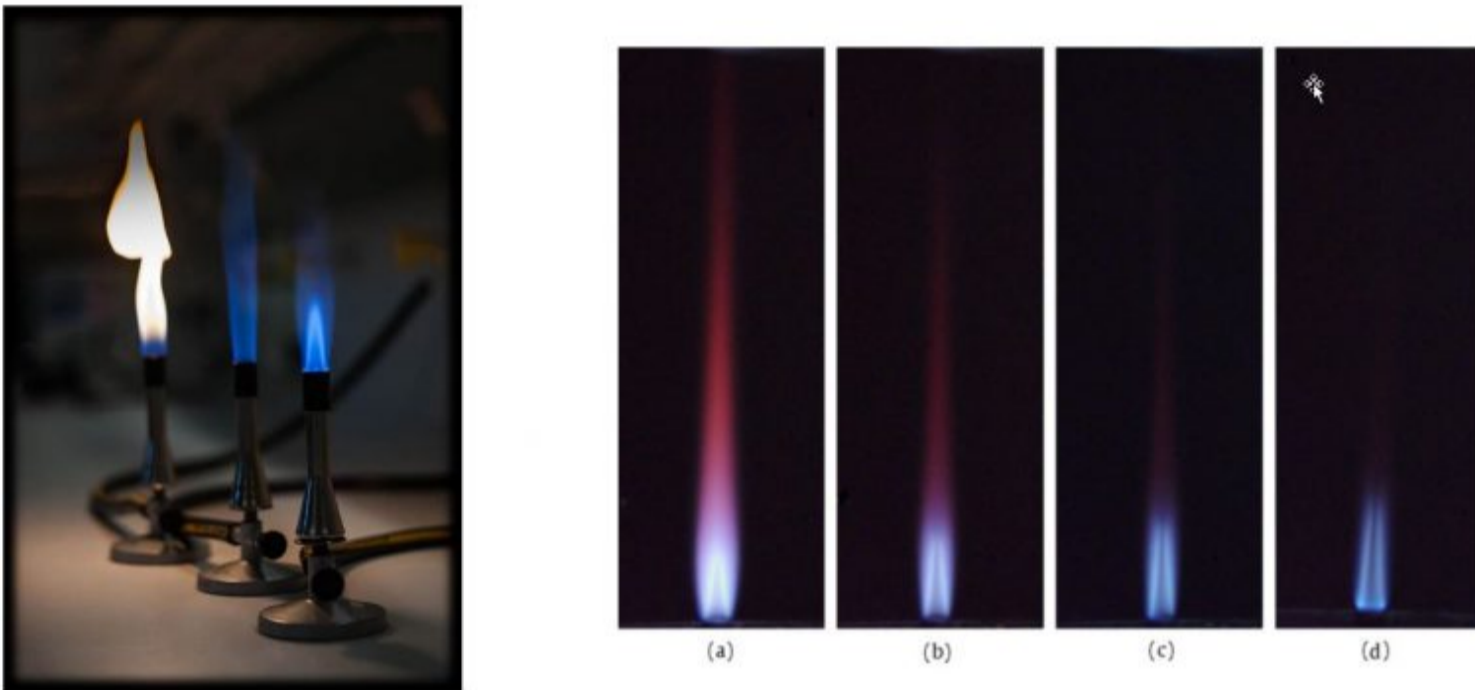


Figuur 1: de verbranding van propaan en waterstof in een nachtelijke opname

Uit zowel de foto als het filmpje wordt duidelijk dat waterstof veel minder goed zichtbaar ('s nachts) tot onzichtbaar (overdag) is in vergelijking met propaan bij ontbranding in de buitenlucht. Hoe komt dat, heeft de vlamkleur dan te maken met de temperatuur van de vlam? Of is er iets anders aan de hand?

Gas-lucht verhouding

Wanneer de literatuur wordt nageslagen op de verbranding van waterstof, zijn er veel artikelen te vinden die het voormengen van waterstof en lucht in verschillende verhoudingen bespreken. Deze verhouding tussen waterstof en lucht heeft invloed op de verbranding. Dit is goed te zien bij experimenten met de Bunsenbrander die bij de meesten bekend zal zijn van de scheikundeles. In de onderstaande foto's wordt een vergelijk gemaakt tussen aardgas en waterstof.

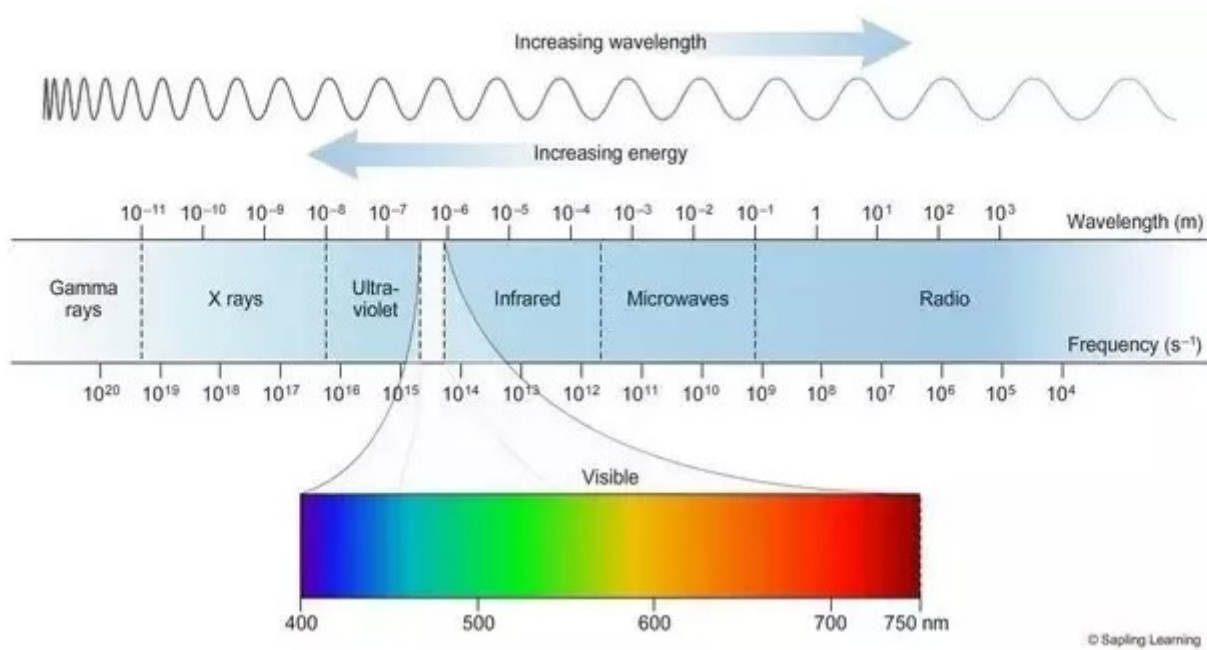


Figuur 2: de verbranding van aardgas (links) en waterstof (met afnemende ratio H_2 / lucht)(rechts)

De invloed van een mengsel van de brandstof en lucht is gelijk voor aardgas en waterstof en heeft invloed op de kleur van de vlam. Voor aardgas geldt dat de gele vlam een onvolledige verbranding aangeeft terwijl de toevoer van meer lucht (en dus vollediger verbranding) leidt tot een felblauwe vlam. In zekere mate geldt hetzelfde voor waterstof. Een onvolledige verbranding is in de meest linkse foto (voor waterstof) zichtbaar door de rode kleur. Naarmate meer lucht wordt bijgemengd, kleurt ook hier de vlam blauwer, echter deze kleur blijft minder intens blauw dan bij aardgas. Voor zowel aardgas als waterstof geldt dat de temperatuur bij onvolledige verbranding lager is.

Zichtbare straling

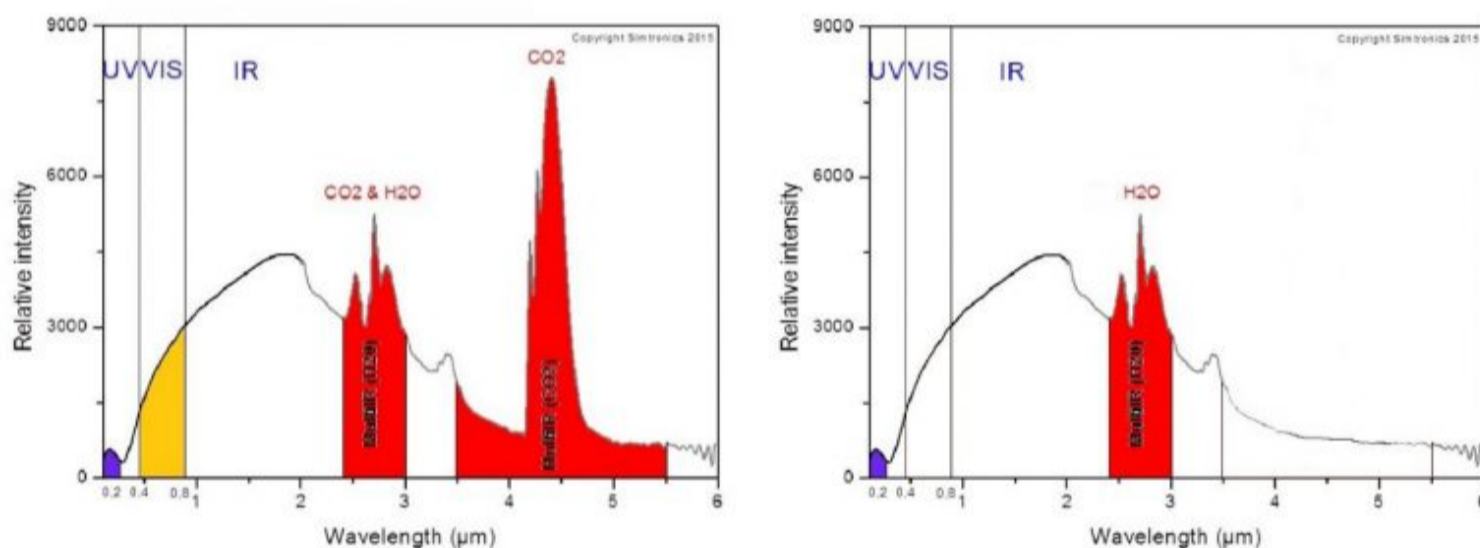
Nu geconcludeerd kan worden dat de temperatuur van de vlam geen directe verklaring is voor de vlamkleur, worden nogmaals de formules 1 en 2 uit dit artikel bekeken. In beide gevallen komt een hoeveelheid energie vrij als gevolg van de verbranding van de brandstof. Deze energie wordt afgegeven in de vorm van conductie, convectie en thermische emissie. Deze thermische emissie is een elektromagnetische straling die ontstaat door de excitatie van atomen in een reactie/verbranding. Elk object met een temperatuur, afwijkend van zijn omgeving, zendt deze straling uit naar zijn omgeving. Deze straling kan zichtbaar zijn, maar dat hoeft niet per se. Of straling visueel waargenomen kan worden, is afhankelijk van de specifieke golflengte van de straling. Het onderstaande overzicht laat zien hoe klein het golflengtegebied (het zichtbare spectrum) is dat de mens kan waarnemen.



Figuur 3: elektromagnetische straling en het de zichtbare spectrum

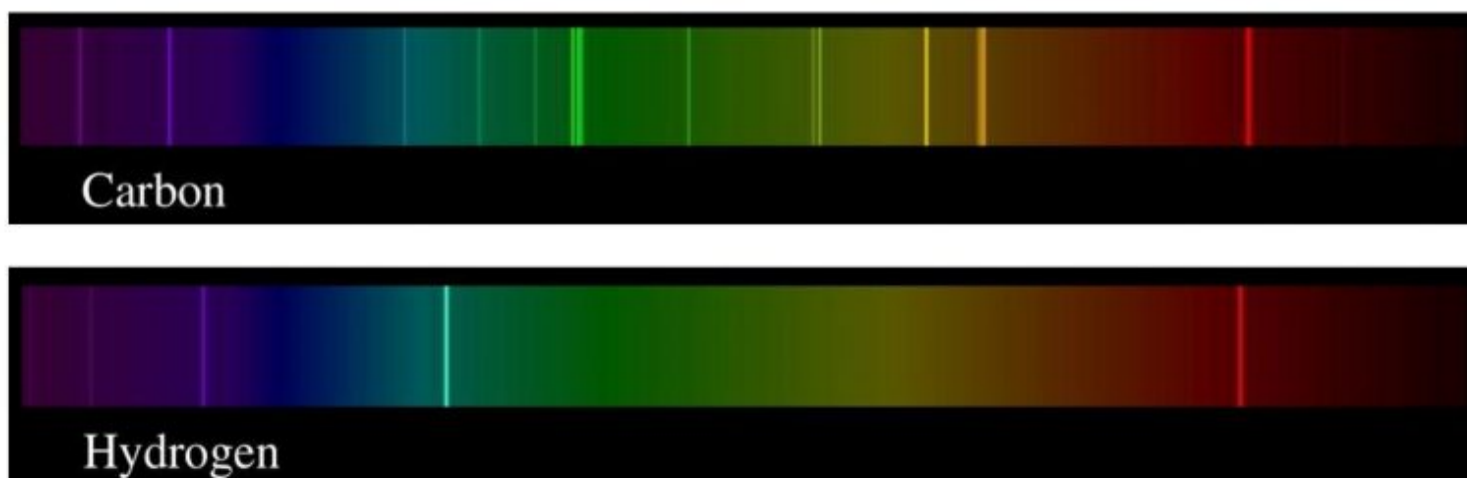
Terugkomend op de verbranding van een koolwaterstof of waterstof, is de verdeling tussen conductie, convectie en thermische emissie afhankelijk van het soort verbranding dat plaatsvindt. Koolwaterstoffen hebben per eenheid typisch een hoge thermische emissie (meer stralingsintensiteit/ zendt meer straling uit) in vergelijking met waterstof. Daarentegen is de kerntemperatuur van een waterstofvlam typisch hoger dan die van een koolwaterstofvlam.

Als bovenstaande theorie vertaald wordt naar een grafiek waarbij wordt gekeken naar de golflengte per component (zoals weergegeven in formules 1 en 2), blijkt dat de straling tijdens de verbranding van een koolwaterstof (onderstaande grafiek links) sterk afwijkt van de straling tijdens de verbranding van waterstof (rechts).



Figuur 4: relatieve intensiteit als functie van golflengte voor de verbranding van aardgas (links) en waterstof (rechts) met de kleuren volgens het visuele spectrum

In deze grafieken staat de relatieve intensiteit uitgezet tegen de golflengte van de specifieke component die vrijkomt tijdens de verbranding. De straling van deze componenten vallen respectievelijk in het ultraviolet spectrum (UV), het visuele spectrum (VIS, wat door de mens waargenomen kan worden) en het infrarood spectrum (IR). Het visuele spectrum heeft een relatief smalle bandbreedte, wat ook al te zien was in figuur 3. Wanneer de verbranding van koolwaterstoffen en waterstof wordt beschouwd op basis van elektromagnetische straling, kan de volgende vergelijking gemaakt worden (figuur 5).

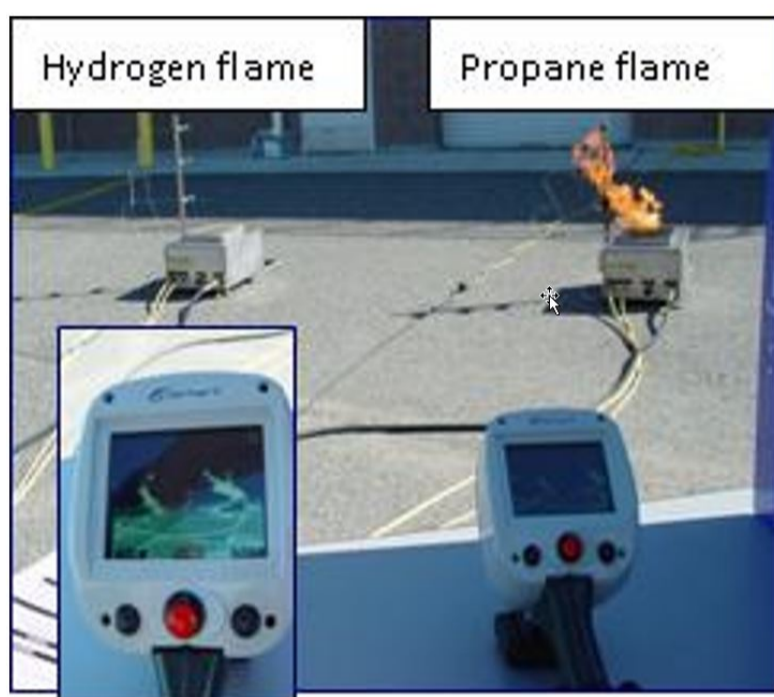


Figuur 5: elektromagnetisch (visuele) stralingsspectrum voor componenten in koolwaterstoffen/ waterstof

Op basis van bovenstaande grafieken valt op dat de kleur vooral veroorzaakt wordt door de aanwezigheid van koolstof. Dit zijn de gele/ oranje kleuren in het spectrum. De blauwige "streep" in figuur 5 wordt veroorzaakt door de verbranding van waterstof, hetgeen zowel in koolwaterstoffen als in waterstof aanwezig is. Beide brandstoffen hebben tevens een sterke golflengte intensiteit in het infrarood spectrum hetgeen vertaald wordt in stralingsintensiteit tijdens de verbranding. Door de vorming van kooldioxide ontstaat meer stralingswarmte bij verbranding van een koolwaterstof in vergelijking met waterstof. De afwezigheid van componenten in het visuele spectrum tijdens de verbranding van waterstof zorgen ervoor dat een waterstofvlam slecht zichtbaar is.

Toevoegingen maken waterstof zichtbaar

De zichtbaarheid van een waterstofvlam kan beïnvloed worden door het toevoegen van elementen die bij excitatie een golflengte uitzenden binnen het visuele spectrum. Zo hebben experimenten aangetoond dat wanneer waterstofgas door een waterbad geleid wordt, de vlam beter zichtbaar wordt omdat de rode component versterkt wordt. Ook zijn [experimenten bekend \("Visualization of dilute hydrogen jet flame in air flow", Chinone & Fujisawa 2004\)](#), waarbij voormengen van CO₂, stof of water de zichtbaarheid van een vlam mogelijk kan verbeteren. In technische installaties zou dit een oplossing kunnen zijn. Met het oog op toepassen van waterstof (zonder voormenging) in het Nederlandse gasdistributienet is het aan te bevelen om storingsploegen een warmtecamera mee te geven die goed in staat is om een waterstofvlam waar te nemen (["hydrogen compared other fuels" h2tool.org 2021](#)). Bij de Nederlandse brandweer is dit reeds geïntroduceerd (["Aandachtskaart Bestrijding incidenten Voertuigbrand met H2 versie 01", Brandweer Nederland 2019](#)). Mogelijk is een gaslek zichtbaar doordat zand en grond wordt meegevoerd tijdens de uitstroming van waterstofgas. De meest voorkomende elementen in grond zullen waarschijnlijk niet leiden tot de verandering van de vlamkleur bij een waterstofbrand gezien de geringe piek van de elementen in het visuele emissiespectrum.



Figuur 6: een waterstofvlam, waargenomen met een warmtecamera

Samenvatting

Een waterstofvlam is veel minder goed zichtbaar dan een aardgasvlam door de afwezigheid van koolwaterstoffen. Dit is de eigenschap van de waterstofvlam en hier zal rekening mee moeten worden gehouden bij het opsporen van een gasvlam, bijvoorbeeld door het gebruik van een warmtecamera. Het eventuele voormengen van CO₂, stof of water kan de zichtbaarheid van een vlam mogelijk verbeteren.