

## Het verschijnsel brand

Kennisbank Bouwfysica

Auteur: prof.ir. J. Vorenkamp, prof.ir. P.H.H. Leijendeckers, ir. R.A.P. van Herpen

### 1 Het verbrandingsproces

Verbranding is oxidatie van een stof, bij hoge temperatuur, waarbij warmte vrijkomt. Het is dus een exotherme reactie. Voor verbranding is nodig:

- de aanwezigheid van brandstof;
- voldoende luchttoevoer in verband met de nodige zuurstof;
- een ontstekings temperatuur, waarop de brandstof moet worden gebracht;
- omgevingscondities, waardoor de verbranding kan worden onderhouden, als een voortschrijdende kettingreactie.

Als een van deze vier voorwaarden ontbreekt, dan gaat de brand niet door. Daarop zijn de brandpreventie en het brandblussen gebaseerd.

Brandstoffen zijn te onderscheiden in:

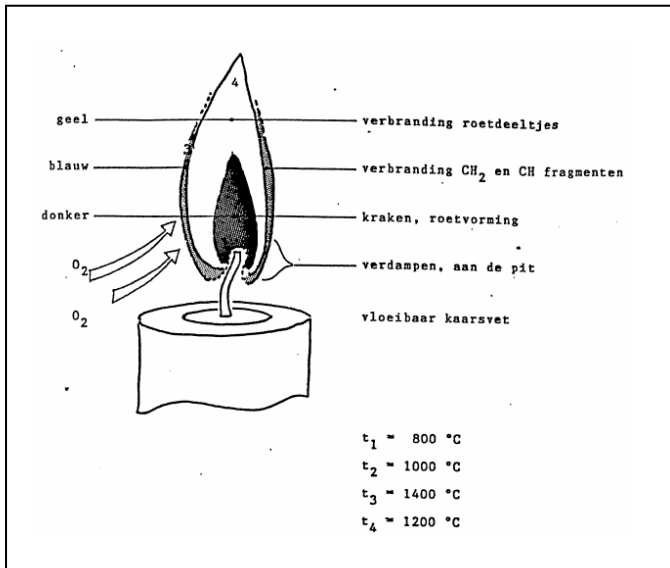
- vaste stoffen (bij voorbeeld hout, textiel, vloerbedekking, asfalt, kunststoffen);
- vloeistoffen (bij voorbeeld olie, benzine, spiritus, alcohol);
- gassen (bij voorbeeld aardgas, mijn gas, koolmonoxide);
- aerosolen of stofdeeltjes (bij voorbeeld houtzaagsel, roet, poederkruid, bruinkoolstof).

De producten, die ontstaan bij verbranding zijn:

- warmte (vlammen);
- verbrandingsgassen ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_2$ );
- rook bij onvolledige verbranding (roet, aerosolen).

Rook is zichtbelemmerend en daardoor gevaarlijk; men kan de weg niet meer vinden. De verbrandingsgassen (en dus ook rook) zijn verstikkend en in de regel heet. Eventueel aanwezige koolmonoxide verbindt zich met de rode bloedlichaampjes en verhindert daardoor de zuurstofopname.

De brandstoffen zijn hoofdzakelijk organische stoffen, dus behorend tot de koolstofchemie. Het zijn koolstofketens of ringverbindingen, met waterstofatomen verbonden en sporen van andere elementen. Soms echter zijn elementen brandgevaarlijk, mits voldoende verdeeld, zoals plaatstaal en aluminium, waarvan evenwel de ontstekings temperatuur hoog ligt (ca.  $1500\text{ }^\circ\text{C}$ ).



figuur 1. Kaarsvlam

kleuren bij verbranding		
	°C	K
vuurrood	900	1170
Oranje	1100	1870
Wit	1400	1670

tabel 1. kleuren en temperaturen.

Hoe het verbrandingsproces verloopt, is goed te beschrijven aan de hand van een kaarsvlam (zie figuur 1). Circa 4 à 5% van de ontwikkelde warmte straalt terug naar de kaars. Daardoor smelt een deel van het kaarsvet en wordt capillair opgezogen via de pit. Boven in de pit verdampt het kaarsvet en gaan de moleculen steeds sneller bewegen door de energietoevoer. In de reactiezone diffundeert zuurstof naar binnen en worden de kaarsvetmoleculen gekraakt.

Veel ervan zal verbranden tot CO<sub>2</sub> en H<sub>2</sub>O, maar bij het kraken komen in de regel roetdeeltjes vrij (blauwe zone). Door de voldoende hoge temperatuur zullen deze roetdeeltjes ook verbranden tot CO<sub>2</sub>; dit gebeurt in het lichtgevende gele deel van de vlam.

Bij de berekening van alle processen gaat men altijd uit van:

- de wet van behoud van massa;
- de wet van behoud van energie;
- andere (thermodynamische, chemische of fysische) wetmatigheden.

Dat doen we hier dus ook. We trekken een controlevlak om de kaarsvlam en kijken wat erin komt en wat eruit gaat. (Een stationaire beschouwing):

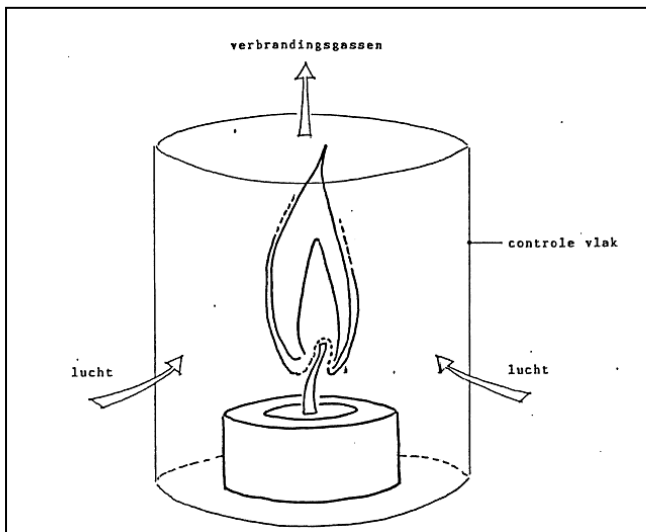
Voor de massawet kunnen we eenvoudig schrijven:

$$Massa (brandstof + lucht) = massa verbrandingsgassen \quad (1a)$$

De verbrandingsgassen bestaan uit CO<sub>2</sub> en H<sub>2</sub>O, bij volledige verbranding van een koolwaterstof brandstof (in dit geval kaarsvet).

Voor de energiewet is het wat moeilijker. Er ontstaat verbrandingswarmte, per massa-eenheid kaarsvet. Een deel daarvan wordt gebruikt voor het onderhouden van het proces, het andere deel komt vrij naar de omgeving:

*Verbrandingswarmte + energie in toegevoerde lucht = energie voor:  
(smelten + capillair transport + verdampen + kraken) + straling naar de omgeving +  
warmteafvoer via de verbrandingsgassen naar de omgeving = proceswarmte +  
omgevingswarmte* (1b)



Bij de berekening van verbrandingsgassen wordt van de volgende begrippen gebruik gemaakt; men onderscheidt boven- en onderverbrandingswaarde:  
De bovenverbrandingswaarde  $Q_b$  is de warmte die vrijkomt bij volledige verbranding van 1 kg of  $1 \text{ m}_n^3$  voor de betreffende droge stof (of gas) in lucht (of zuurstof), waarbij de verbrandingsgassen afgekoeld worden tot de begintoestand (de barometerdruk en  $20^\circ\text{C}$ ) en de ontstane waterdamp is gecondenseerd.  
De onderverbranding  $Q_o$  is de bovenverbranding minus de condensatiewarmte van het gevormde water.  
Een normaal kubieke meter ( $\text{m}_n^3$ ) is  $1 \text{ m}^3$  van een betreffend gas bij 101.325 kPa (1 atmosfeer) en 273.15 K ( $0^\circ\text{C}$ ), in volkomen droge toestand. Van een ideaal gas heeft 1 kMol een volume van  $22,4 \text{ m}_n^3$ .

figuur 2. Conrolevlak rond de kaarsvlam

Circa 4 à 5% van de verbrandingswarmte is nodig voor het onderhoud van het proces, dus ongeveer 95% komt vrij naar de omgeving in de vorm van straling en convectieve warmteoverdracht van de verbrandingsgassen.

Bij de andere brandstoffen verloopt het proces net zo, met dien verstande dat:

- vaste stoffen, als hout, niet smelten en verdampen, maar rechtstreeks vergassen (kraken);
- vloeistoffen alleen verdampen en kraken;
- gassen direct met het krakingsproces beginnen;
- in de regel geen capillair transport (via de pit) plaatsvindt.

Een brandstof is des te gevaarlijk naarmate:

- de verbrandingswarmte per kg (of per  $\text{m}^3$ ) hoger is;
- de verhouding van verbrandingswarmte/ vergassingswarmte groter is;
- de naar het brandende oppervlak terug gestraalde warmte groter is (voor het onderhoud van het proces);
- de ontstekings temperatuur laag is.

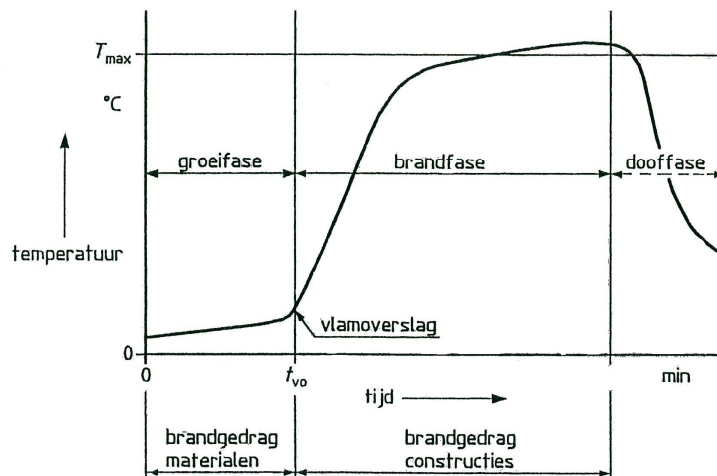
Verder spelen een rol:

- de oppervlakte/ volumeverhouding van het materiaal (verbranding is een oppervlakteverschijnsel);
- de temperatuurvereffening in het materiaal (afhankelijk van de warmtegeleidingscoëfficiënt  $\lambda$  (W/m.K), de soortelijke warmte  $c$  (J/kg.K), de soortelijke massa  $\rho$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )):

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c};$$

- de productie van giftige gassen;
- de mate van rookontwikkeling;
- de uitbreidingsnelheid van de brand.

Dit laatste is geen eenvoudig begrip, maar aangezien brand een oppervlakteverschijnsel is, kunnen we stellen dat de warmteontwikkeling evenredig moet zijn met het brandend oppervlak. De branduitbreiding over dit oppervlak is exponentieel. We kunnen dit in een grafiekje globaal weergeven ( zie figuur 3). In de praktijk is er sprake van een groeifase A (smeulen), een exponentiele toename (brandfase B) en een dooffase C door gebrek aan brandstof of zuurstof, of veranderde omgevingscondities. In een besloten ruimte zal de temperatuurtoename een dergelijk beeld geven.



figuur 3. Verschillende stadia bij brand.

## 2 Onbeheerste verbranding

In de industrie maakt men gebruik van verbrandingsprocessen - die men beheerst laat verlopen - om zoveel mogelijk profijt van te trekken (ketels, verbrandingsmotoren, etc.).

Hier hebben wij echter te doen met ongewenste en onbeheerste verbranding, waarvan wij de eigenschappen moeten kennen om de veiligheid in gebouwen te kunnen bevorderen. Daarvoor moeten we onderscheid maken tussen volledige verbranding, waarvoor voldoende, of een overschot aan zuurstoftoevoer nodig is, en onvolledige verbranding door een te lage temperatuur of onvoldoende zuurstof, waardoor koolmonoxide en roet ontstaan.

### 2.1 Verbrandingsgassen en energie

Zoals eerder vermeld, bestaat brandstof in hoofdzaak uit C en H atomen. Om inzicht in het proces te krijgen, verwaarlozen we de sporen van andere elementen, die in de brandstof voor kunnen komen. Ook verwaarlozen we het vochtgehalte van de brandstof, hetgeen eigenlijk niet toelaatbaar is door het afkoelend effect daarvan, maar het verandert niets aan de volgende redenering, als we uitgaan van droge brandstof. Verder gaan we ervan uit dat 1 kmol gasvormige stof een volume inneemt van  $22,4 \text{ m}_n^3$  (normaalvolume bij 1 atm en  $0^\circ\text{C}$ ), respectievelijk dat de lucht bestaat uit 79 volumepercenten  $\text{N}_2$  en 21 volumepercenten  $\text{O}_2$ . We bekijken dan wat de verbranding van de elementen C en H oplevert, met de theoretisch benodigde hoeveelheid lucht (stochiometrische verbranding).

We zien dan, dat bij volledige verbranding van 1 kg koolstof in de lucht 33,8 MJ aan warmte vrijkomt en dat er, afgerond,  $5/12 \times 22,4 \text{ m}_n^3$  verbrandingsgassen ontstaan (zie rekenvoorbeeld in 2.2).

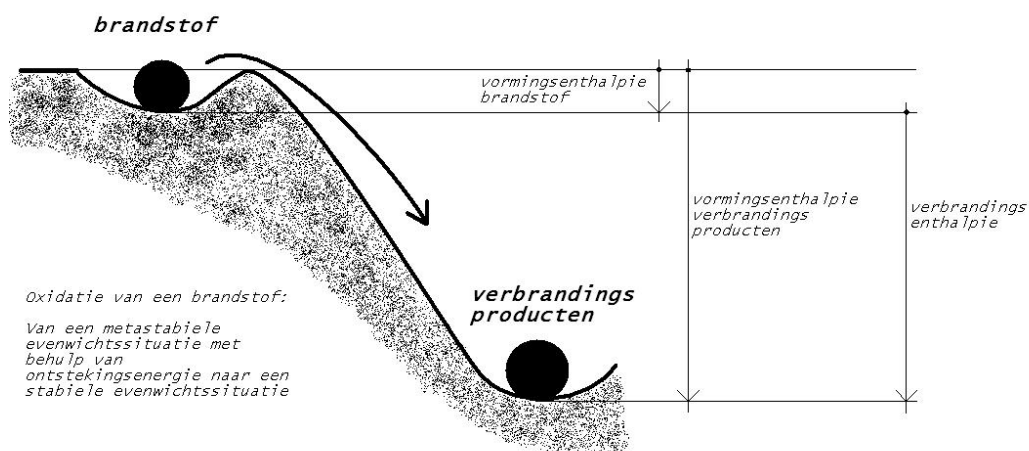
Bij onvolledige verbranding van 1 kg koolstof tot koolmonoxide komen vrij 10,2 MJ aan warmte en ontstaan  $3/12 \times 22,4 \text{ m}_n^3$  verbrandingsgassen. De warmteontwikkeling is dan tot ca.  $1/3$  gedaald en de hoeveelheid rookgassen tot  $3/5$ , ten opzichte van volledige verbranding van koolstof.

Bij verbranding van waterstof tot waterdamp komt per kg  $\text{H}_2$  122,6 MJ vrij (dit is de onderverbrandingswaarde) en ontstaan  $18/12 \times 22,4 \text{ m}_n^3$  rookgassen. Waterstof levert dus, ten opzichte van volledige verbranding van koolstof, circa 3,6 maal zoveel warmte op, maar ook 3,6 maal zoveel verbrandingsgassen. (Milieutechnisch is het gunstig als een brandstof een grote waterstof/ koolstof verhouding heeft).

Als de verhouding nu niet plaatsheeft met de theoretisch benodigde luchthoeveelheid, dan zal het overschot aan lucht zich ook in de verbrandingsgassen bevinden; deze gassen zullen daardoor in temperatuur dalen.

De verbrandingswaarde van een brandstof (in MJ/kg) wordt bepaald uit de verbrandingsenthalpie van de brandstof (in MJ/kMol). In het voorbeeld wordt deze bepaald uit de vormingsenthalpieën van de verbrandingsproducten. Wanneer de brandstof uit moleculen bestaat die uit meerdere elementen zijn opgebouwd moeten de vormingsenthalpieën van de verbrandingsproducten worden verminderd met de vormingsenthalpie van de brandstof. Dit is gelijk aan de enthalpie die nodig is om de moleculen van de brandstof te kraken.

In figuur 4 is visueel gemaakt hoe de brandstof in een metastabiel evenwicht bij verbranding in verbrandingsproducten op een lager energieniveau (stabiel evenwicht) wordt omgezet.



figuur 4. Onder invloed van ontstekingsenergie wordt de brandstof uit het metastabiele evenwicht gebracht en kan het oxideren tot de verbrandingsproducten. De stabiele evenwichtstoestand bevindt zich op een lager energieniveau. Bij verbranding wordt dus energie geleverd.

## 2.2 Rekenvoorbeeld

### Berekening theoretisch benodigde luchthoeveelheid

1 kMol van een gas heeft een volume van  $22,4 \text{ m}_N^3$ .

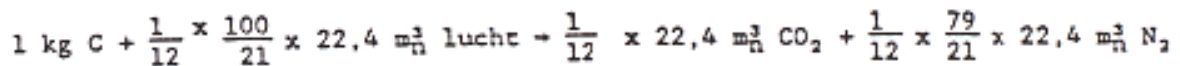
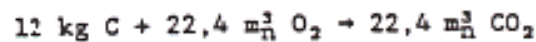
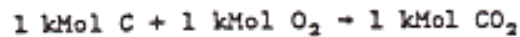
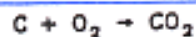
lucht bevat: ca. 79%  $\text{N}_2$  (volumeprocenten)

en 21%  $\text{O}_2$

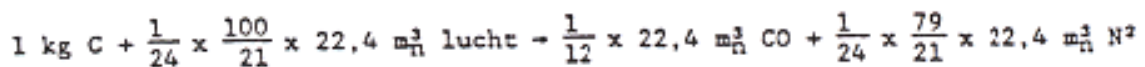
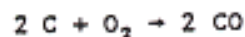
Atomaire massa C = 12

O = 16

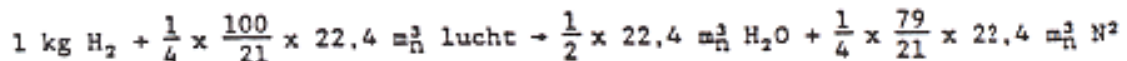
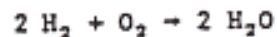
H = 1



Daarbij:  $Q_0 = 33,8 \text{ MJ/kg}$



Daarbij:  $Q_0 = 10,2 \text{ MJ/kg}$



Daarbij:  $Q_0 = 122,6 \text{ MJ/kg}$

---

De theoretische (stochiometrische) luchthoeveelheid is de benodigde lucht om 1 kg ( $\text{lm}_N^3$ ) brandstof volledig te verbranden.

luchtfactor	$n = 1$	stochiometrische luchthoeveelheid
	$n > 1$	luchtovermaat
	$n < 1$	luchtondermaat

### 2.3 Warmtebalans en warmteverliezen

Als we de warmteverliezen door geleiding, bij voorbeeld via de vloer, verwaarlozen, dan wordt de energiebalans per kg brandstof als volgt:

Stel dat het warmteverlies door geleiding te verwaarlozen is.  
Dan geldt:

$$Q_o = Q_c + Q_s \quad (2)$$

Hierin is:

$Q_o$	onderverbrandingswaarde	(J);
$Q_c$	de in de rookgassen afgevoerde (convectieve) warmte	(J);
$Q_s$	de door straling afgevoerde warmte	(J).

$$Q_c = \rho \cdot C_p \cdot V(T - T_o) \quad (3)$$

Hierin is:

$\rho$	soortelijke massa rookgassen	(kg/ m <sub>n</sub> <sup>3</sup> );
$C_p$	soortelijke warmte rookgassen	(J/kg.K);
$V$	volume rookgassen	(m <sub>n</sub> <sup>3</sup> );
$T$	temperatuur van de rookgassen	(K);
$T_o$	omgevingstemperatuur	(K).

$$Q_s = A \cdot \text{constante} (T^4 - T_o^4) \quad (4)$$

Hierin is:

$A$	oppervlakte van de brand	(m <sup>2</sup> )
-----	--------------------------	-------------------

$$\text{Constante} = \varepsilon_b \cdot \varepsilon_o \cdot \tau \cdot F_{b \rightarrow o} \quad (5)$$

Hierin is:

$\varepsilon_b$	emissiefactor van het vuur;
$\varepsilon_o$	emissiefactor van de omgeving;
$\tau$	constante van Boltzmann = $5,67 \cdot 10^{-8}$ W/m <sup>2</sup> .K;
$F_{b \rightarrow o}$	hoekfactor (zicht- of geometrische factor) van de brand naar de omgeving.

Meestal zijn  $\varepsilon_b$  en  $\varepsilon_o$  ongeveer 0,9 à 0,95 en  $F_{b \rightarrow o}$  ongeveer 1, zodat de constante ongeveer  $(4,6 \text{ à } 5,1) \cdot 10^{-8}$  bedraagt bij een rookvrije brand.



### 3 Samenvatting

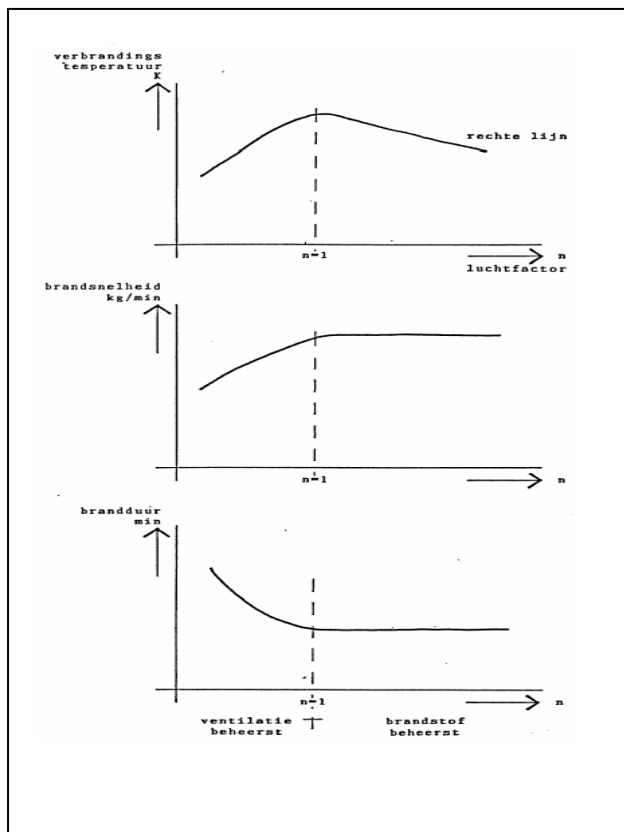
Als onvoldoende  $O_2$  aanwezig is, dan ontstaat er CO en wordt er minder warmte ontwikkeld. Als een vlam teveel afkoelt, dan ontstaat roet. Voor een beheerste verbranding is een geringe luchtvermaat en een goede mening van brandstof en lucht nodig (luchtvermaat = 1,1 à 1,3).

Bij een onbeheerste verbranding gebeurt alles tegelijk:

Plaatselijk is er onvoldoende  $O_2$  aanwezig en elders een overschot. In de rookgassen komen dus CO en  $O_2$  gezamenlijk voor.

Plaatselijk ontstaat door afkoeling (door de omgeving of door teveel koude luchttoevoer) roet. Door de aanwezigheid van CO,  $O_2$  en roet kunnen de rookgassen een explosief gasmengsel vormen.

Met voorgaande beschouwingen kunnen we nu globaal enige eigenschappen van een brand beschrijven. We gaan daarbij uit van de mogelijkheden van de luchttoevoer (de ventilatie) en beschouwen deze ten opzichte van de theoretisch benodigde luchthoeveelheid om 1 kg brandstof volledig te kunnen verbranden. Kom je daaronder, dan treedt er onvolledige verbranding op (zie figuur 5).



figuur 5. De luchtfactor bepaalt of een brand brandstofbeheerst of ventilatiebeheerst is