

Kennemer Wijn- en BierGilde
Over het koken van het wort
12-6-2002 Kier Heeck

Op de verenigingsavond “bier” j.l. bleek dat er enige misvattingen rond koken, energie en hoeveelheid wort in de vereniging rondwaarden. Misvattingen kunnen door een juiste belichting verschrompelen en daarom wil ik hier nu enig licht laten schijnen op de verschijnselen rond het verwarmen van het wort en het daarop volgende koken. Maar om te beginnen de zaken die nooit en te nimmer vergeten mogen worden:

De hoeveelheid water die per m^3 aardgas kokend verdampt kan worden hangt **niet** af van

- het volume water dat verhit wordt. (Er moet natuurlijk wel genoeg water aanwezig zijn!)
- de grootte van het open oppervlak van het water.
- de kooktijd, als de isolatie van de brouwketel perfect is.

De kooktemperatuur wordt **uitsluitend** door de luchtdruk bepaald. Het zachtjes koken of het hevig zieden heeft geen merkbare invloed op de kooktemperatuur.

Het verkoken van 1 liter water kost 2.26 MJ. Als alle toegevoerde warmte voor het verdampen benut wordt, is daar ten minste 0.07 m^3 aardgas voor nodig. Het beetje gas kost 0.014 €.

Deze uitspraken behoeven enige achtergrond, in dit geval natuurkunde, om ze ruggegraat te geven.

In het volgende gaat het steeds over arbeid, ook wel energie genoemd en de maat daarvoor. Maar wat is arbeid eigenlijk? In de natuurkunde is arbeid het produkt van kracht (in Newton) maal afgelegde weg (in meter) in de richting van die kracht.

Voorbeeld. Bij het opduwen van een auto is de kracht vóóruit gericht en beweegt de auto ook vooruit. De kracht is precies in richting van de afgelegde weg, er moet dus resultaat zijn. En dat is er. En wel in twee vormen. Ten eerste krijgt de auto snelheid en daarmee bewegingsenergie. Ten tweede zal uit eindelijk alle inspanning van de duwer in warmte omgezet worden. Een lollige buurman, die dwars op de deur duwt en schrijlings meeloopt, levert geen enkele bijdrage tot het verplaatsen van de auto. De door hem ontwikkelde kracht en de door de auto afgelegde weg staan namelijk haaks op elkaar. In zo'n situatie wordt er nooit arbeid geleverd en dus ook geen enkel doel bereikt. Het doel is hier het veranderen van de bewegingstoestand van de auto.

De maat voor arbeid is natuurlijk het produkt van de kracht en afgelegde weg, dus Newton.meter afgekort tot Nm. En herbenaemd met Joule (uit te spreken als dzjoel) en afgekort tot J; $1 \text{ J} = 1 \text{ Nm}$. Eén Joule is niet veel. Eén flits van een elektronenflitsers is goed voor zo'n 3 J. Om als mens op de been te blijven hebben we energie nodig, in de orde van 4 Mega (miljoen) Joule per dag. Dat blijkt een hoeveel energie die bij het brouwen nog niet veel teweeg brengt. Het is een behoorlijk energie vretend proces, let maar op.

Bij de verbranding van aardgas 31.65 miljoen Joule per kubieke meter vrij. In technisch steno als 31.65 MJm^{-3} geschreven. Tegen een kostprijs van 0.2 €/m^3 , oftewel $31.65/0.2 = 158 \text{ MJ€}^1$. Om vragen over elektrische verwarming alvast voor te zijn, elektrische energie brengt maar 48 MJ voor elke €. Elektrische energie is momenteel $3.3x$ zo duur als de warmte uit aardgas. De voordelen moeten wel groot zijn om het gebruik van elektriciteit voor verwarming te overwegen.

Het verrichten van arbeid (het laten inwerken van energie) op een stuk stof (materie) heeft twee mogelijke gevolgen. Ten eerste een verandering van bewegingstoestand en ten tweede verhoging van temperatuur. Deze beide gevolgen kunnen gelijktijdig optreden. De auto is hier een prachtig voorbeeld. Bij het vrijmaken van de chemische energie uit de brandstof komt warmte vrij, die voor slechts ca 30% aan het voortbewegen van de auto ten goede komt. De overige 70% wordt al in de auto als verloren warmte weggegooid. Uiteindelijk is de situatie nog somberder. De 30% nuttige energie wordt via de rolweerstand van de banden en de luchtweerstand van de carrosserie tot slot ook in warmte omgezet.

Kennemer Wijn- en BierGilde

Dit is een mooie plek om de aandacht even op het verschijnsel temperatuur te laten rusten.

Warmte is het trillen van molekulen en atomen. Temperatuur is de maat voor deze trilling. Bij kamertemperatuur zijn de uitwijkingen, die de molekulen t.o.v. hun gemiddelde positie maken, erg klein 10^{-15} m. Dit is ongeveer een duizendste van de grootte van een atoom. Als de naburige molekulen dezelfde temperatuur hebben, kan een trillend molekuul zijn trillingsenergie nooit aan zijn burens verliezen en behoudt het zijn temperatuur. Dit is in overeenstemming met alle daagse waarneming: binnen een goed geïsoleerde ruimte verandert de temperatuur niet en is bovendien overal gelijk.

In een vloeistof hebben de molekulen een zekere afstand tot elkaar en is er sprake van een **enige ruimtelijke ordening**. De ordening zorgt voor enige samenhang tussen de molekulen: ze vormen een vloeistof. Een bak gevuld met vloeistof lijkt eigenlijk als twee druppels water op een bak knikkers. De knikkers zitten ruwweg en niet beter, op gelijke afstanden van elkaar. In een vloeistof kunnen buurmolekulen, in tegenstelling tot de knikkers, zonder energieverlies van plaats wisselen. Dit gebeurt onophoudelijk. De molekulen zitten dus niet op vaste plaatsen, zoals in een vaste stof.

In een gas (=damp) vliegen de molekulen kriskras door de hun toegemeten ruimte en botsen op elkaar dat het een lust is. De situatie is **wanordelijk**.

Het losmaken uit de vloeistof kost elk molekuul dat dat doet een beetje arbeid. De hoeveelheid arbeid hangt van de scheikundige samenstelling van de vloeistof af. Niet alle vloeistoffen verdampen even gemakkelijk. In 1 kg water zitten buitengewoon veel molekulen, wel $3.345 \cdot 10^{25}$ en om die allemaal te verdampen is de totale arbeid de som van al de molekulaire bijdragen. De arbeid om 1 kg van een vloeistof naar damp van dezelfde temperatuur om te zetten heet verdampingswarmte. In tabellenboeken staan de gemeten waarden voor de verdamping van 1 kg vloeistof voor vele verschillende vloeistoffen opgesomd. De verdampingswarmte van water blijkt heel groot te zijn, wel 2.26 MJkg^{-1} . De hoeveelheid arbeid wordt uitsluitend bepaald door het aantal molekulen dat verdampt. De achterblijvers in de vloeistof blijven op een konstante temperatuur en blijven daardoor buiten de energie boekhouding.

Bij verdamping uit een kokende vloeistof wordt alle toegevoerde energie uitsluitende aan de verdampte molekulen meegegeven. De hoeveelheid vloeistof doet dus niet ter zake.

Uit ervaring blijkt dat er **altijd** energie (arbeid) in de vorm van warmte nodig is om van een ordelijke toestand een wanorde te maken. Omgekeerd blijkt dat bij de overgang van wanorde naar orde altijd warmte vrij komt. De populairste voorbeeld is uiteraard water.

Om van ijs van 0°C , water van 0°C te maken is 334 kJkg^{-1} nodig. Het toppunt van molekulaire ordening, het kristalrooster, wordt vernietigd en er blijft de minimale orde van een vloeistof over.

In het traject 0°C tot 100°C is 4.18 kJkg^{-1} voor elke graad temperatuurverandering nodig.

De overgang water 100°C naar stoom van 100°C vereist 2.26 MJkg^{-1} , de prijs voor het volkomen vernietigen van de nog aanwezige orde.

Het brouwen

Het wort begint zijn levensweg bij de kraan, waar het water met een temperatuur van ca 12°C uitstroomt.

Om 1 kg (een liter) wort tot het kookpunt te brengen is er $(100-12) \cdot 4.18 \text{ kJ} = 368 \text{ kJ}$ nodig. Om die liter dan door koken te verdampen is 2.26 MJ oftewel meer dan zes keer zoveel energie nodig als voor de opwarming.

Als onze ketel volkomen ideaal warmte geïsoleerd zou zijn, zou de snelheid van opwarmen geen enkele invloed op de te gebruiken hoeveelheid energie hebben. Vergeleken met snel opwarmen kost langzaam opwarmen vanwege de optredende warmteverliezen meer energie. Het absolute minimum voor 100 liter is 36.8 MJ , oftewel $36.8/31.65 = 1.16 \text{ m}^3$ aardgas.

Kennemer Wijn- en BierGilde

Er zijn een aantal redenen om het wort te koken.

1. Garantie op het inaktiveren van alle enzymen.
2. Coaguleren (samenklonteren) van eiwitten.
3. Het verhogen van het soortelijk gewicht als er per ongeluk teveel water gebruikt is.
4. Een energetisch heel dure manier van omroeren. Een 50 Watt roerder heeft net zoveel effect als de ettelijk kW verwarming. De ketel in de Schuimkraag is goed voor zo'n 5 kW als ik het wel heb.
5. Hevig koken betekent dat op de bodem met een damplaaag bedekt is. Daardoor wordt de bodem plaatselijk belangrijk heter dan het kokend wort, waardoor er uitbundig karamelisatie optreedt.

Bij het koken verandert de temperatuur niet meer. De toegevoerde warmte moet allereerst de warmtelekkage van de ketel aanvullen. De waakvlam levert daar al voldoende warmte voor. Wat er aan energie overschiet zal tot verdamping van het wort leiden. Om 10 liter water te verdampen is 22.6 MJ nodig, wat idealiter 0.71 m³ aardgas kost. Je ziet zonder verliezen zou deze brouw met 1.87 m³ aardgas bekeken zijn. Hier gaat nog een flinke kloof tussen deze eenvoudige theorie en de praktijk. Het is aan mij bekend dat er wel eens 10 m³ gas gebruikt is! Ook is de grote invloed van luchtverversen boven de ketel (Deksel open en wapperen maar) niet besproken.

Als ik nu dit kookverhaal zo bezie, valt mij het volgende op:

- De punten 1 en 2 maken het op 100⁰ C (zachtjes koken is de garantie!) houden van het wort echt noodzakelijk.
- Punt 3 door goed voorbereiden onnodig te maken.
- Voor het roeren (4) is het installeren van een langzaam draaiende roerder dé oplossing.
- En punt 5 vraagt om een betere oplossing. Hier zijn proeven nodig. B.v. vergelijking van brouwsels die door koken aan de karamel gekomen zijn, met een soortgelijke brouwsels met karamelmout. Het kan ook geen kwaad om eens over een aparte voorziening voor karameliseren te denken.
- Een meting van het vermogen en het thermisch rendement van onze ketel is hard nodig. Het zal het definitieve einde van onduidelijke folklore betekenen. Voorwaar een goede zaak!

Heb je vragen, stel ze op de verenigingsavond (je krijgt op maat gesneden antwoord) of via k.heeck@mdw.vu.nl (antwoord via verenigingsblad)

Maar onthoudt bovenal:

De hoeveelheid water die per m³ aardgas kokend verdampt kan worden hangt **niet** af van

- het volume water dat verhit wordt. (Er moet natuurlijk wel genoeg water aanwezig zijn!)
- de grootte van het open oppervlak van het water.
- de kooktijd, als de isolatie van de brouwketel perfect is.

De kooktemperatuur wordt **uitsluitend** door de luchtdruk bepaald. Het zachtjes koken of het hevig zieden heeft geen merkbare invloed op de kooktemperatuur.

Het verkoken van 1 liter water kost 2.26 MJ. Als alle toegevoerde warmte voor het verdampen benut wordt, is daar ten minste 0.07 m³ aardgas voor nodig. Het beetje gas kost 0.014 €.