



## Spoelexperiment

Peter Wester\*, Kier Heeck, John Tuip en Marchel Keyzer

### Inleiding

Bij het *ontwikkelen* van een recept wordt getracht om aan allerlei randvoorwaarden te voldoen zoals: hoe bitter moet het uiteindelijke bier worden (hoppgiften), wat wordt de einddichtheid (aanpassen maisschema), hoe zwaar wordt het bier (storting bepalen), wat voor kleur moet het bier krijgen, en hoeveel koolzuur moet het uiteindelijke bier bevatten en voldoet het recept *an sich* aan een biertype? Om het recept te *verwezenlijken* in de praktijk, is het handig om antwoord de volgende vragen te hebben:

- Hoeveel wort verkrijgen we?
- Welk suikergehalte heeft dit?
- Hoeveel spoelwater is er eigenlijk nodig?
- Tot hoever moeten we spoelen?

Dit zijn geen makkelijke vragen om te beantwoorden. De antwoorden zijn afhankelijk van de gebruikte grondstoffen (welke, vers of oud?) en de gebruikte installatie. De hoeveelheid *hoofdwort* die we krijgen en de bijbehorende suikerconcentratie blijken nog redelijk eenvoudig te schatten. Maar hoeveel spoelwater er nodig is en tot welke suikerconcentratie er gespoeld moet worden, blijken lastige vragen. Verder is het zaak de juiste hoeveelheid spoelwater verwarmd te hebben; te weinig spoelwater vermindert de opbrengst en teveel spoelwater verwarmen kost nodeloos energie.

Het aantal liters spoelwater is nl. afhankelijk van:

- de hoeveelheid uit te spoelen suikers
- de manier waarop gespoeld wordt
- geometrie van de filterkuip
- tot welke suikerconcentratie men spoelen wil

Dit laatste is zeker van belang als men bijvoorbeeld volmoute barley wines wilt maken. Spoelen tot ca. 30 gram suiker per liter (3° Plato) zoals gebruikelijk, levert een dusdanig verdund wort op, dat er lang ingekookt dient te worden om het streef suikergehalte te bereiken.

Om enigszins betrouwbare berekeningen aan het benodigde hoeveelheid spoelwater te doen, dient er inzicht te worden verkregen hoe de suikerconcentratie afneemt tijdens het spoelproces. Tijdens het brouwen d.d. 31-1-1999 in 'de Schuimkraag' te Heemskerk is van **elke liter wort het suikergehalte** gemeten. Daarna hebben we het verloop van het suikergehalte in een model gevat, zodat we voor onze installatie de benodigde hoeveelheid spoelwater voortaan **vooraf** kunnen berekenen.

Verder is het brouwzaalrendement uit deze spoelcurve te berekenen.

### Afspraken

Om verwarring te beperken gebruiken wij graag duidelijke eenheden, die steeds weer vermeldt worden. Gissen (= fouten maken) naar gebruikte eenheden is dan onnodig. De in dit artikel gehanteerde eenheid voor de suikerconcentratie is gr/l. Indien andere eenheden gebruikt worden, staan hieronder een drietal formules vermeld om van dichtheden en percentage extract naar gr/l te komen.

- De suikerconcentratie  $E$  wordt weergegeven in gr/l
- De dichtheid (SG van soortelijk gewicht) van het wort of bier wordt uitgedrukt in  $\text{kg/m}^3$  of  $\text{g/dm}^3$  (=  $\text{kg/m}^3$ , officiële SI-eenheid). Vb:  $\text{SG}=1060 \text{ kg/m}^3$  of  $\text{SG}=1060 \text{ g/dm}^3$
- Het percentage extract wordt weergegeven als gr suiker/100gr wort wordt uitgedrukt in %S; beter bekend als graden Plato, Brix of Balling. Voor de thuisbrouwer zijn de kleine verschillen tussen graden Plato, Brix of Balling van weinig belang.



### Spoelexperiment 31-1-'99

De formules (1), (2) en (3) zijn afgeleid uit referentie 1 en te gebruiken in het gebied waarbij het SG tussen 1010 en 1100 g/dm<sup>3</sup> is [1]. Bedenk overigens wel dat een wort oplossing anders is dan een maltoseoplossing!!

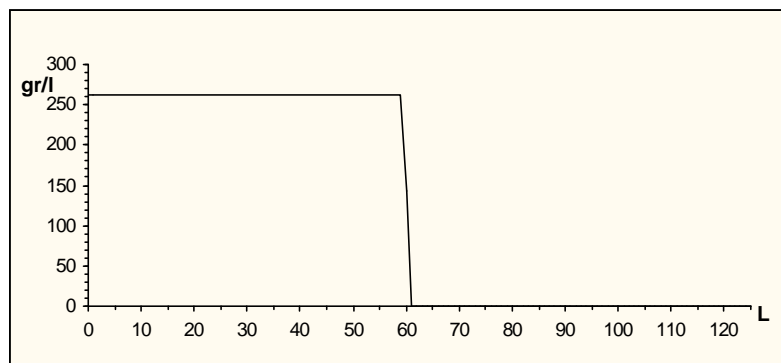
(1) gehalte	$E = \frac{SG - 1000.7484}{0.3779}$	[gr/l]	$SG = 1000.7484 + 0.3779 * E$	[kg/m <sup>3</sup> ]
(2) perc. extract	$\%S = \frac{SG - 999.5410}{4.1168}$	[-]	$SG = 999.5410 + 4.1168 * \%S$	[kg/m <sup>3</sup> ]
(3) gehalte	$E = \frac{\%S - 0.29328}{0.091795}$	[gr/l]	$\%S = 0.29328 + 0.091795 * E$	[-]

### Experiment

De storting (S) bedroeg 30 kg en het inmaischen geschiedde met 2 l/kg S, dus 60 liter (dik beslag!). Er werd een standaard maischschemata doorlopen van 52 °C (30 min), 62 °C (60 min), 72 °C (min) en 80 °C (5 min). Na het storten in de filterkuip bleek dat het filterbed precies opgevuld was met hoofdwort (onverdunde 'suikeroplossing'). De filterkuip heeft een diameter van 57 cm en een hoogte van bijna 60 cm; dit geeft een volume van ca. 150 liter. Het dode volume tussen de filterplaat en de bodem bedroeg ca. 8 liter. Dit betekent dat het filterbed 60-8 = 52 liter bevat. Oftewel 52/30 = 1.7 literkg<sup>-1</sup> storting. Verder is bekend dat 1 kg mout ca. 1.6 liter water vasthoudt [2]. Om de holtes tussen het filterbed op te vullen is er dus ca. S\*0.1 literkg<sup>-1</sup> beschikbaar.

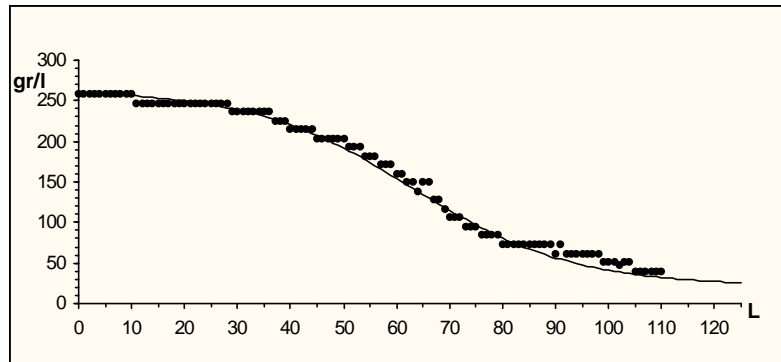
Het suikergehalte van het hoofdwort bedroeg 24% bij meting wat ca. 263 gr/l is [1]. Het percentage suiker werd gemeten met een bij 20 °C geijkte saccharimeter 0-45% van Nedoptifa Zeist (bouwjaar 1956). Dit suikergehalte blijkt als volgt redelijk simpel te schatten: de storting S vermenigvuldigd met het veronderstelde brouwzaalrendement gedeeld door het volume inmaisch water, benadert dit vrij redelijk. In ons geval 30\*0.55/60=275 gr/l. Niet gecorrigeerd dat een geconcentreerde suikeroplossing als deze een groter volume krijgt (~15% groter [1]) en dat er water door de pilsnoutkorrels wordt opgenomen. Het brouwzaalrendement van 55% is overigens laag (in de 'Schuimkraag' worden normaal gesproken BZR van 65-70% gehaald), maar de pilsnout bleek reeds drie jaar oud... Voor andere brouwsels bleek deze schatting voor het hoofdwort redelijk betrouwbaar te zijn.

De ideale manier van spoelen van onze installatie zou zijn als deze S\*1.7 literkg<sup>-1</sup> + 8 liter als een prop door het spoelwater verdreven zou worden. Deze ideale spoelcurve zou er als in Fig. 1 uitzien.



Figuur 1: ideale spoelcurve

Tijdens dit ideale filterproces wordt het wort onder medeneming van alle suikers als het ware door spoelwater vervangen. Het oppervlak onder de spoelcurve is gelijk aan de totale hoeveelheid suikers in de gewonnen wort. De verhouding van de massa's gewonnen suikers en storting is het brouwzaalrendement. Het experiment in 'de Schuimkraag' liet echter een andere spoelcurve zien, zoals afgebeeld in Fig. 2.



Figuur 2: opgenomen datapunten plus berekende spoelcurve in de Schuimkraag

Deze S-kromme (sigmoïdale kromme) is gevonden door de datapunten (liter verkregen wordt met bijbehorende suikerconcentratie) te laten 'fitten' door een computerprogramma. De formule die de S-kromme voor de suikerconcentratie als functie van het aantal liters gewonnen wordt vanaf spoelen beschrijft, luidt:

$$(4) \quad E_L = \left( a + \frac{b}{1 + \exp\left(\frac{L-c}{d}\right)} \right) E_{HW} \quad [\text{gr/l}]$$

met:

$E_{HW}$	[gr/l]	suikergehalte van het hoofdwort
$E_L$	[gr/l]	suikergehalte van het gewonnen wort ná $L$ liter
$L$	[liter]	gewonnen wort vanaf het begin van het spoelen
Coëfficiënten, door computerprogramma aan te passen aan gemeten verloop:		
$a, b$	dimensieloos	
$c, d$	[liter]	
$\exp[]$	het getal van Euler ( $e=2.7181$ ) verheven tot de macht []	

Deze functie is gekozen, omdat de overeenstemming met de meting zo goed is. En verder omdat de functie analytisch geïntegreerd kan worden, wat verder rekenwerk belangrijk vereenvoudigd.

De met de computer berekende en naar de praktijk geïnterpreteerde coëfficiënten zijn:

$$a = 1/12 ; \quad b = 11/12 ; \quad c = 1.7 \cdot S + DV \text{ liter} ; \quad d = 15$$

liter

De coëfficiënten  $a+b$  zijn gelijk aan 1; deze waarden zijn bruikbaar totdat de suikerconcentratie ca. 20-30 gr/l gedaald is. Voor lagere suikerconcentraties vertoont het model een lichte afwijking (in de praktijk zal bij flink spoelen de suikerconcentratie de 0 gr/l benaderen, overigens een zeer ongewenste situatie!). Coëfficiënt  $c$  is een maat voor het aantal liter wort wat vastgehouden wordt door de bostel. Ten slotte geeft coëfficiënt  $d$  aan hoe gekromd de curve is (hoe dichter  $d$  0 benadert, des te scherper wordt de spoelcurve, zie Fig. 1). Deze coëfficiënten gesubstitueerd in vergelijking (4) geven de S-kromme die ons experiment modelleert.

$$(5) \quad E_L = \left( \frac{1}{12} + \frac{\frac{11}{12}}{1 + \exp\left(\frac{L-60}{15}\right)} \right) * 263 \quad [\text{gr/l}]$$



### Spoelexperiment 31-1-'99

Het spoelen begint met  $L = 0$  liter. Het suikergehalte  $E_L$  is dan gelijk aan  $E_{HW}$  van het hoofdwort.

$E_L$  is het suikergehalte van de uitstromende wort na het winnen van  $L$  liter. Door bij een bepaalde  $E_{stop}$  het spoelen te beëindigen, ligt het volume te winnen wort  $L_{stop}$  vast!

$$(6) \quad L_{stop} = c + d \ln \left( \frac{b}{\frac{E_{stop}}{E_{HW}} - a} - 1 \right) \quad [\text{liter}]$$

met  $\ln[ ]$  de natuurlijke logaritme uit [ ]  
N.B.  $E_{stop}/E_{HW} > a$  ! Gevolg van het gekozen model.

De coëfficiënten ingevuld voor ons experiment levert de volgende hoeveelheid liters wort op:

$$L_{stop} = 60 + 15 * \ln \left( \frac{11/12}{30/263 - 1/12} - 1 \right) = 110 \text{ liter}$$

Het is nutteloos als het spoelwater (SV) aan het einde van de spoeling de loze ruimte in de bostel en het dode volume (DV) tussen filterplaat en bodem opvult.  $L_{stop}$  kan met dit volume verminderd worden.

$$(7) \quad \begin{aligned} SV &= L_{stop} - (S * 0.1 * \text{liter/kg} + DV) \\ SV &= 110 - (30 * 0.1 + 8) \\ SV &= 99 \text{ liter} \end{aligned}$$

#### Résumé:

- Bepaal aan de hand van de doelstellingen van de brouw (biertype, hoeveelheid bier, alcohol-percentages, kleur, bitterheid) de storting  $S$ .
- Bepaal de hoeveelheid water waarmee je in gaat maischen.
- Ga uit van je ervaring en kennis wat het BZR zal zijn
- Schat het suikergehalte van het hoofdwort
- Bepaal  $E_{stop}$ .
- Reken  $L_{stop}$  en SV uit m.b.v. respectievelijk formule (6) en (7)

N.B. Als tijdens het brouwen het suikergehalte van de hoofdwort bepaald wordt, zal  $E_{stop}$  en  $L_{stop}$  nog nauwkeuriger geschat kunnen worden!

#### Het brouwzaalrendement.

Het oppervlak onder de spoelcurve, de integraal van de spoelcurve, geeft de totale massa gewonnen suiker  $Z_L$  in het verkregen wort aan. De integraal van de S-kromme van 0 tot  $L_{stop}$  liters gewonnen wort luidt:

$$Z_{stop} = \int_0^{L_{stop}} E_L dL = E_{HW} \cdot \int_0^{L_{stop}} a + \frac{b}{1 + \exp\left(\frac{L-c}{d}\right)} dL = \left( aL - bd \ln \left( 1 + \exp\left(\frac{L-c}{-d}\right) \right) \right) \cdot E_{HW} \Bigg|_0^{L_{stop}}$$



$$(8) \quad Z_{stop} = \left( aL_{stop} - bd \ln \left( \frac{1 + \exp\left(\frac{L_{stop} - c}{-d}\right)}{1 + \exp\left(\frac{c}{d}\right)} \right) \right) * E_{HW} \quad [\text{gr}]$$

Met de coëfficiënten voor ons experiment gesubstitueerd geeft dit:

$$Z_{stop} = \left( \frac{1}{12} * 110 - \frac{1}{12} * 15 * \ln \left( \frac{1 + \exp\left(\frac{110 - 60}{-15}\right)}{1 + \exp\left(\frac{60}{15}\right)} \right) \right) * 263 \quad \text{gr}$$

Het brouwzaalrendement  $BZR = Z_{stop} / \text{Sorting}$ , kg suiker dat per kg storting gewonnen wordt.

$$\text{In ons geval } BZR = \frac{16815}{30000} = 0,56 \quad \text{g suiker/g storting}$$

$$\text{Procentueel BZR} = \frac{16815}{30000} * 100\% = 56\%$$

Als we tijdens het brouwen  $E_{HW}$  bepalen, kunnen we dus nu redelijk betrouwbaar de hoeveelheid SV schatten en het bijbehorende BZR bepalen. Vergeet niet het aantal liters hoofdwort maal de suikerconcentratie vóór het spoelen mee te nemen in de berekening! Blijkt het nu dat het aantal liter spoelwater (plus reeds gewonnen liters hoofdwort voordat het filterbed droogviel), ruimer is dan verwacht en teveel liters verdunde wort geeft, zal er eerder gestopt moeten worden om de kooktijd niet te lang te moeten maken om het streef SG te bereiken.

Als  $E_{HW}$  echter *geschat* wordt in het stadium van het uitrekenen van het recept, kan al voortijdig enig inzicht verkregen worden over de hoeveelheid uiteindelijke wort en bijbehorend SG. De brouwer zelf zal dan al kunnen beslissen of hij bijvoorbeeld langer wil koken, dikker wil inmaischen of de storting wil verhogen.

Ter illustratie volgt een uitgewerkt voorbeeld waarin het aantal liters (hoofd)wort en bijbehorende SG, liters spoelwater en BZR wordt berekend van een recept. De gebruikte formules zijn allen terug te vinden in dit artikel en zijn daarom niet ten overvloede geheel uitgeschreven.

Doelstelling: 100 liter bier, 9.5 vol%, 5.0 gr/l koolzuur

Geschat: FG~1018 kg/m<sup>3</sup>, BZR=0.65

Dit resulteert in een OG~1088 kg/m<sup>3</sup> oftewel 230 gr suiker per liter en S=35.36 kg.

In maischen met 3.2 l/kg, in totaal 113 liter water nodig om in te maischen.

Hoofdwort zal 57 liter bedragen met een SG~1072 kg/m<sup>3</sup>.

Spoelen tot 30 gr/l suiker levert in totaal 147 liter wort met een SG~1060 kg/m<sup>3</sup> oftewel ca. 100 liter met een SG~1088 kg/m<sup>3</sup> (doelstelling!). Echter om van 147 naar 100 liter te komen door koken, zal ca. 2.5 uur vergen. Indien men dit te lang vindt, kunnen de volgende maatregelen genomen worden:

- Spoelen tot ca. 70 gr/l. Dit levert 123 liter wort met een SG~1067 kg/m<sup>3</sup> oftewel oftewel ca. 95 liter met een SG~1088 kg/m<sup>3</sup>. Men verkrijgt dus uiteindelijk 5 liter minder dan verwacht, maar de kooktijd wordt teruggebracht naar ca. 1.5 uur.
- Inmaischen met 2.5 l/kg S en spoelen tot ca. 40 gr/l levert ca. 120 l wort met een SG~1072 kg/m<sup>3</sup> oftewel ca. 99 liter met een SG~1088 kg/m<sup>3</sup>.



- Naar aanleiding van het eerste puntje kan de storting met 5% worden verhoogd. Vervolgens inmaischen met 3.2 l/kg S en spoelen tot ca. 70 gr/l. Dit levert 129 liter wort met een SG~1068 kg/m<sup>3</sup> oftewel oftewel ca. 100 liter met een SG~1088 kg/m<sup>3</sup>. Kooktijd ca. 1.5 uur.

### Conclusie en aanbeveling

Door het opnemen van een spoelcurve is het spoelen van de bostel een voorspelbaar proces geworden. Aangezien brouwinstallaties van elkaar verschillen, kunnen de in dit artikel gebruikte waarden voor de coëfficiënten a, b en d NIET klakkeloos overgenomen worden. De aanbeveling luidt dan ook om (het liefst meerdere malen) een spoelcurve op te nemen en deze zo goed mogelijk in de hier gebruikte S-kromme te fitten.

Door het toepassen van deze kennis (spreadsheet!) in het ontwikkelen/uitvoeren van recepten zal men niet langer voor ongename verrassingen komen te staan als tekort/teveel speelwater en wort en een te lange kooktijd.

### Opmerkingen

Deze kennis stelt de brouwer in staat om zogenaamde 'dubbelbrouwen' (tegelijkertijd een zwaar en lichter bier vervaardigen uit één storting) te realiseren. Door bij een bepaalde suikerconcentratie tijdens het spoelproces over te schakelen van het verzamelen van het wort voor het zware naar het lichte bier, is dus te schatten hoeveel suiker er in het zware en hoeveel in het lichtere bier komt. Het kost wederom wat rekenwerk, maar is ook makkelijk te verwerken in een spreadsheet.

Nog een opmerking over het inkoken van het wort. Door inkoken wordt de hoeveelheid water vermindert. De hoeveelheid suikers  $Z$  blijft gelijk.  $E$  kan op deze dure manier verhoogt worden. Hoe duur, is uit te rekenen, zie Tabel 1. Voor het verdampen van 1 liter water is 2,26 MJkg<sup>-1</sup> nodig.

Tabel 1: prijzen van warmtebronnen

Warmtebron, eenheid	Prijs in euro €	Prijs per Joule, €J	Verdamppt aantal liters per €
Electriciteit 1 kWh = 3.6 MJ	0.11	3.15 10 <sup>-8</sup>	14
Aardgas 1 m <sup>3</sup> = 32 MJ	0.27	0.85 10 <sup>-8</sup>	51

Om  $E$  tot  $f \cdot E$  te verhogen moet de hoeveelheid water tot  $1/f$  maal de originele hoeveelheid vermindert worden. Dus de hoeveelheid  $(1-1/f)$  verminderen. Om enig idee te krijgen een voorbeeld. Gegeven 100 liter wort met  $E = 160$  gr/l  $E$  te verhogen tot 200 gr/l.  $f = 200/160 = 1,25$ . Te verdampen  $100 \cdot (1-1/f) = 20$  liter. Om dit te bewerkstelligen kost FI 3.05 (€1.39) aan elektriciteit of FI 0,84 (€0.38) aan gas. Het is zo klaar als een klontje, voor verwarming is elektriciteit 3,7 maal duurder dan gas.

Spoel ze!

### Afkortingen

%S	percentage extract aan suiker, uitgedrukt in gr suiker/100gr wort
BZR	brouwzaalrendement
DV	dode volume tussen filterplaat en bodem filterkuip
$E$	suikerconcentratie in gr/l
$E_{HW}$	suikergehalte van het hoofdwort [gr/l]
$E_L$	suikergehalte van het gewonnen wort ná $L$ liter [gr/l]
$E_{stop}$	suikergehalte waarbij het spoelen gestopt wordt
$L$	gewonnen wort vanaf het begin van het spoelen [liter]
$L_{stop}$	het aantal te winnen liters wort



*Spoelexperiment 31-1-'99*

FG	Final Gravity
OG	Original Gravity
S	Storting
SG	Soortelijk Gewicht
SI-eenheid	eenheid volgens het Système International
SV	spoelvolumen, hoeveelheid spoelwater
Z	massa gewonnen suiker
Z <sub>stop</sub>	massa gewonnen suiker bij L <sub>stop</sub>

**Referenties**

- [1] A.V. Wolf, M.G. Brown and P.G. Prentiss, Concentrative properties of aqueous solutions: conversion tables, CRC press Handbook of Chemistry 58th edition, D235-236 1977/1978
- [2] Bart Balis, Het spoelen van de bostel: hoe en hoeveel, blz. 25-26 PROOST 22, juli/augustus 1997

*Revisie:*

- Rev. 1.0 [9 mei 1999], *Eerste Publicatie door Peter Wester\*, Kier Heeck, John Tuip en Marchel Keyzer, gepubliceerd in PROOST!*
- Rev 1.1 [27 februari 2009], *aangepast aan KWBG layout*