

# Groene chemie toegepast in oefeningen en experimenten

*Karien Van Royen en Mario Smet\**  
*Katholieke Universiteit Leuven, Departement chemie*  
*Celestijnenlaan 200f bus 2404 , 3001 Heverlee*  
*Mario.Smet@chem.kuleuven.be*

## Wat is groene chemie?

Met de term groene (of duurzame) chemie wordt verwezen naar een bepaalde manier om chemie te bedrijven, met name rekening houdend met de impact die de uitgevoerde chemische processen hebben op de huidige en komende generaties mensen en op natuur en leefmilieu. De groene chemie tracht bijvoorbeeld het gebruik van grondstoffen en energie en de productie van afval zoveel mogelijk te beperken. Verder probeert de groene chemicus reagentia te gebruiken met zo laag mogelijke toxiciteit en tracht hij functionele producten (plastics, geneesmiddelen, schoonmaakproducten, bestrijdingsmiddelen...) met minimale giftigheid en maximale biologische afbreekbaarheid te ontwerpen.

Het gedachtegoed van de groene chemie kan worden samengevat in de zogenaamde twaalf principes van de groene chemie<sup>1</sup> :

### 1. Afvalpreventie

Het is beter afval te voorkomen dan het na vorming af te voeren en/of onschadelijk te maken.

### 2. Atoomefficiëntie

Bij de bereiding van chemicaliën moet men trachten zoveel mogelijk atomen van de gebruikte reagentia in het uiteindelijke product in te bouwen (m. a. w. dit komt neer op afvalpreventie).

### 3. Minder gevaarlijke chemische synthese

Chemische syntheses moeten zodanig ontworpen worden dat ze zo min mogelijk gebruik maken van schadelijke reagentia en/of zo min mogelijk schadelijke stoffen voortbrengen.

### 4. Veilige oplosmiddelen en andere adjuvantia

Oplosmiddelen en andere 'hulpmiddelen' (zoals silica voor chromatografische scheidingen) moeten zo min mogelijk gebruikt worden en indien ze toch noodzakelijk zijn, moet de keuze gaan naar de minst schadelijke.

### 5. Veiligere chemicaliën ontwerpen

Chemische producten moeten zodanig ontworpen worden dat ze maximale functionaliteit combineren met minimale schadelijkheid.

### 6. Energie-efficiëntie

Energie moet zo efficiënt mogelijk worden aangewend. Daartoe worden reacties zoveel mogelijk uitgevoerd op omgevingstemperatuur en bij atmosferische druk.

---

<sup>1</sup> Deze principes zijn vooral met het oog op toepassing in de industrie geformuleerd.

## 7. Gebruik van hernieuwbare grondstoffen

Fossiele brand- en grondstoffen moeten zoveel mogelijk vervangen worden door hernieuwbare bronnen.

## 8. Onnodige synthesestappen vermijden

Bij syntheses dienen stappen die niet strikt noodzakelijk zijn voor het samenstellen van de gewenste molecule (zoals beschermingsstappen) zoveel mogelijk vermeden te worden.

## 9. Katalyse

Reagentia die in katalytische hoeveelheden gebruikt kunnen worden zijn te verkiezen boven reagentia die in stoichiometrische hoeveelheden nodig zijn.

## 10. Afbreekbaarheid

Functionele producten dienen zodanig te worden ontworpen dat ze gemakkelijk biologisch afbreekbaar zijn tot onschadelijke producten.

## 11. Continue bewaking en bijsturing van productieprocessen

Tijdens het uitvoeren van reacties, dient de samenstelling van het reactiemengsel voortdurend in het oog te worden gehouden en moet het mogelijk zijn op elk ogenblik de reactieomstandigheden aan te passen zodat maximaal rendement kan bekomen worden en de vorming van ongewenste producten vermeden kan worden.

## 12. Gebruik van inherent veilige processen

Gebruikte producten en procedures dienen zodanig te worden gekozen dat ze inherent weinig gevaar opleveren, zelfs in geval van een (zeer onwaarschijnlijk) ongeluk zoals een lek, brand, explosie...

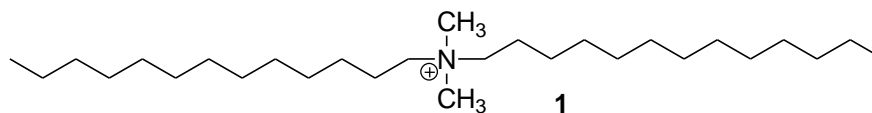
Onze huidige maatschappij en economisch systeem worden meer en meer geconfronteerd met de inherente grenzen aan de draagkracht van de aarde, de natuur en het leefmilieu. Het is duidelijk dat er aan de voorraden fossiele brandstoffen ooit eens een einde zal komen. De discussie wanneer dit zal zijn is in feite een achterhoedegevecht. Bijgevolg is het noodzakelijk zuinig om te gaan met energie en hernieuwbare alternatieven aan te spreken zoals wind- en zonne-energie, waterkracht en biomassa. Het is eveneens reeds voldoende malen aangetoond dat het (gewild of ongewild) verspreiden van bepaalde synthetische chemicaliën in het leefmilieu uitgesproken nefaste gevolgen kan hebben. Gekende voorbeelden zijn het insecticide DDT en oestrogenen uit anticonceptiva. Hoewel het onmogelijk is de gevolgen van het gebruik van een bepaalde chemische stof volledig op voorhand te kennen, dient men dus zeer voorzichtig te zijn alvorens nieuwe stoffen op de markt toe te laten.

Onze kennis van toxicologie is vandaag ook voldoende ontwikkeld om verbindingen zodanig te ontwerpen dat ze minder giftig en/of sneller biologisch afbreekbaar zijn. Een mooi voorbeeld vormen de tetra-alkylammoniumverbindingen van type **1**, een klasse van synthetische detergenten die reeds decennia op grote schaal worden gebruikt als wasverzachter (Figuur 1). Het bleek al gauw dat het inbouwen van een amidegroep in de lange alkylketens ter vorming van analoga van type **2** de biologische afbreekbaarheid sterk verhoogt. Bovendien zijn de fragmenten die daarbij ontstaan relatief weinig giftig door hun hoge wateroplosbaarheid.<sup>2</sup> Het hydrolyseren van een amidebinding is voor levende systemen

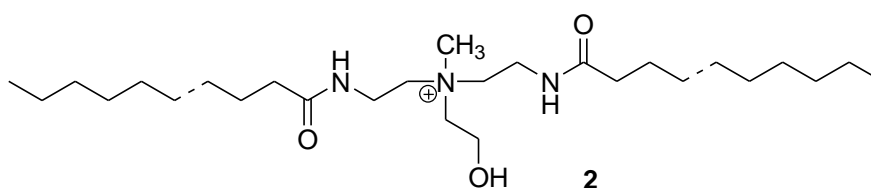
---

<sup>2</sup> Zeer polaire (wateroplosbare) moleculen zijn over het algemeen relatief weinig giftig omdat ze vlot uit het bloed verwijderd worden via de nieren en omdat ze doorgaans niet gemakkelijk in de cellen binnendringen. Hiervoor zouden ze namelijk doorheen de apolaire celwand moeten diffunderen.

een eenvoudige, nagenoeg ‘pijnloze’ operatie, terwijl de afbraak van een alkylketen zonder functionele groep de oxidatie ervan vereist waarbij intermediair veelal hoogreactieve radicalen worden gevormd. Deze radicalen kunnen met allerlei gevoelige verbindingen in de cel (zoals genetisch materiaal en onverzadigde vetzuurketens in celmembranen) gaan interageren en op die manier schade veroorzaken.



'klassiek' tetra-alkylammoniumdetergent



'groen' tetra-alkylammoniumdetergent

**Figuur 1.** Klassieke tetra-alkylammoniumdetergenten en ‘groene’ alternatieven

### Verdient groene chemie een plaats in het onderwijs?

De leerplannen chemie vermelden groene chemie niet of nauwelijks expliciet. Veilig en verantwoord omgaan met (chemische) stoffen is daarentegen wel een expliciete doelstelling. Daarnaast is het duidelijk dat ook een milieubewuste houding tot de vakoverschrijdende eindtermen behoort en van groot belang is in onze huidige maatschappij. Daarnaast wint groene chemie ook in de industrie dag na dag aan belang. De kosten voor energie, het afvoeren van afval, het verzekeren van werknemers tegen ongevallen met of ziekte door chemische stoffen e.d. nemen immers hand over hand toe. Ook de industrie is derhalve vragende partij voor wetenschappers en ingenieurs die oog hebben voor deze problematiek. Een laatste argument om expliciet groene accenten in de chemieles te introduceren is de motiverende werking die ervan kan uitgaan voor de leerlingen. Al te vaak wordt chemie immers geassocieerd met een ongezonde omgeving, giftige stoffen, milieuproblemen en gevaren allerhande, wat niet zelden een zekere afkeer oproept. De chemie is echter zelf het best geplaatst om deze mogelijke problemen op te lossen en de groene chemie is daartoe een zeer belangrijke stap. Wanneer de leerlingen dit beseffen, is een belangrijk psychologisch obstakel op de weg naar de ongemeen boeiende inzichten die de chemie te bieden heeft, uit de weg geruimd.

## Groene chemie in de klas

Ondanks het feit dat de huidige leerplannen reeds omvangrijk zijn, kan groene chemie wel degelijk binnen het bestaande tijdsbestek worden geïntroduceerd in de klas. Uit het voorgaande kan de lezer wellicht reeds concluderen dat groene chemie slechts in beperkte mate nieuwe kennis vereist. Veeleer vraagt groene chemie een ingesteldheid, een constante bekommernis, een voortdurende kritische analyse van alle manipulaties en processen van chemische aard met de twaalf fundamentele principes in het achterhoofd. Zodoende kunnen aspecten van groene chemie in zekere mate worden bijgebracht zonder de tijds- en 'leerstofdruk' op te voeren.

Groene chemie kan in de klas toegepast worden op drie niveaus:

*1) Er wordt zorgzaam omgegaan met chemicaliën. Persoonlijke beschermingsmiddelen zoals labojas, veiligheidsbril, handschoenen... worden gedragen indien nodig. Chemisch afval wordt op verantwoorde wijze afgevoerd.*

Dit is het basisniveau. Het past groene chemie in **beperkte mate** toe en dit op **impliciete wijze**. Dit niveau zou in feite in iedere chemieles die aan de huidige leerplannen wil voldoen, aanwezig moeten zijn.

*2) Schadelijke reagentia en onnodige productie van afval worden zoveel mogelijk vermeden. De schaal waarop de experimenten worden uitgevoerd wordt zo klein mogelijk gehouden. Dit alles wordt bewust in sterkere mate toegepast voor leerlingenproeven.*

Op dit niveau is sprake van **bewuste toepassing** van de twaalf principes van de groene chemie door de leerkracht.

*3) Bepaalde goed gekozen concepten en principes van groene chemie worden expliciet aangebracht en toegelicht door de leerkracht. Dit kan gebeuren aan de hand van oefeningen en/of proeven die gemaakt/uitgevoerd worden met het oog op het verwerken van andere leerstof zoals stoichiometrische berekeningen of redoxreacties.*

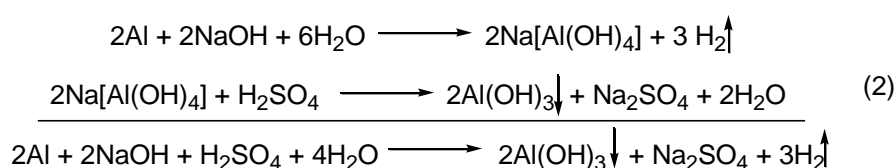
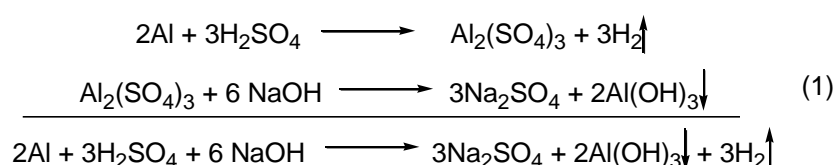
Op dit niveau past de leerkracht de principes van groene chemie niet alleen bewust toe, maar **legt hij ze ook expliciet uit aan de leerlingen** waardoor ze worden uitgenodigd er zelf over na te denken. Het spreekt voor zich dat de toepassing van groene chemie op dit derde niveau, de toepassing van de twee lagere niveaus impliceert.

Naast een enigszins rudimentair idee over wat groene chemie precies is en waarvoor ze van belang is, kan het ook interessant zijn de leerlingen een zeker gevoel bij te brengen voor de complexiteit van de problemen waarmee de groene chemie de confrontatie aangaat. Dit kan mooi geïllustreerd worden aan de hand van een eenvoudig voorbeeld uit het dagelijks leven. Veronderstel dat men wil nagaan welke verpakking het minst milieubelastend is: herbruikbare glazen flessen of plastic wegwerpflessen. Op het eerste gezicht lijken herbruikbare glazen flessen milieuvriendelijker. Wanneer we de zaak echter meer in detail bekijken wordt het antwoord al gauw minder evident. Men moet immers ook de grondstoffen en energie die verbruikt worden om de flessen te produceren en de hoeveelheid en de schadelijkheid van het afval dat daarbij ontstaat in rekening brengen. Verder dient rekening gehouden te worden met het energieverbruik voor het transport van de verpakte drank en van de lege flessen. Ook het verbruik van water, detergenten en energie voor het spoelen van de herbruikbare flessen is een factor van belang.

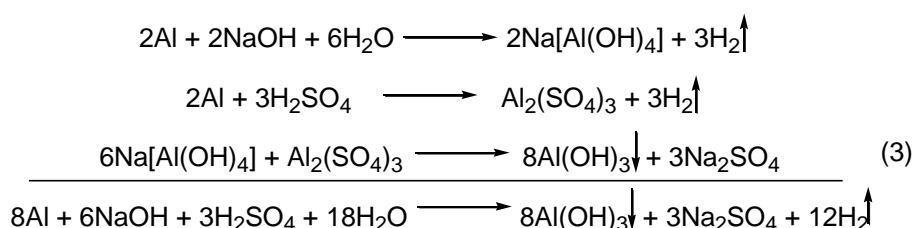
## Groene chemie aangebracht via reactievergelijkingen/stoichiometrische berekeningen<sup>3</sup>

### Bereiding van aluminiumhydroxide

Aluminiumhydroxide is een stof die gebruikt wordt in geneesmiddelen tegen brandend maagzuur. Veronderstel dat men het wenst te bereiden uitgaande van aluminiummetaal. Op het eerste gezicht lijken twee bereidingswijzen mogelijk. Aangezien aluminium amfoteer is, kan het zowel opgelost worden in zuren als in basen om vervolgens het hydroxide neer te slaan. De twee bereidingswijzen (1) en (2) verschillen enkel in de volgorde waarin deze beide processen gebeuren. Oppervlakkig gezien lijkt er geen verschil te zijn in de mate van duurzaamheid van beide processen. Een eenvoudige stoichiometrische berekening leert ons echter dat voor de bereiding van 8 mol aluminiumhydroxide volgens (1), 24 mol NaOH en 12 mol H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> nodig zijn, terwijl voor de bereiding van dezelfde hoeveelheid Al(OH)<sub>3</sub> volgens (2) slechts 8 mol NaOH en 4 mol H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> nodig zijn.



De oefening kan uiteraard wat complexer gemaakt worden door te vragen welke **massa** reagentia er nodig is om een bepaalde massa Al(OH)<sub>3</sub> te bereiden. Bovendien is er een derde strategie (3) die, gebruik makend van dezelfde reagentia, nog atomefficiënter is. Sterke leerlingen kunnen daar misschien zelf achter komen, eventueel mits enige welgekozen tips. De strategie bestaat erin een hoeveelheid aluminium op te lossen in base en een andere hoeveelheid in zuur en vervolgens de beide oplossingen te mengen. Zodoende zijn slechts 3 mol H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> en 6 mol NaOH nodig voor de bereiding van 8 mol Al(OH)<sub>3</sub>.

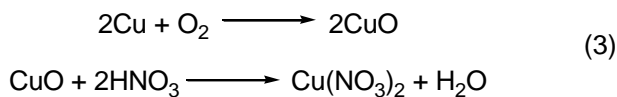
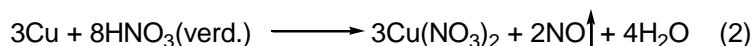
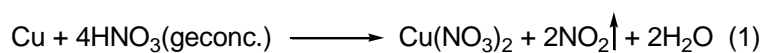


### Bereiding van koper(II)nitraat

Voor de bereiding van koper(II)nitraat uitgaande van koper kunnen leerlingen met voldoende kennis van redoxreacties mits wat begeleiding zelf gemakkelijk een paar suggesties doen. De

<sup>3</sup> Y. Song, Y. Wang, Z. Geng, *J. Chem. Educ.*, **2004**, *81*, 691.

meest voor de hand liggende strategieën zijn (1), (2) en (3). Men ziet onmiddellijk in dat deze grote verschillen vertonen qua duurzaamheid.



Strategie (1) is de minst atomefficiënte en produceert 2 mol van het sterk giftige stikstofdioxide per mol  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ . Strategie (2) verbruikt duidelijk minder  $\text{HNO}_3$  en laat toe (vereist zelfs) dat dit corrosieve reagens onder de intrinsiek minder gevaarlijke verdunde vorm wordt gebruikt. Bovendien worden er kleinere hoeveelheden giftige afvalproducten gevormd. Strategie (3) verbruikt het minst  $\text{HNO}_3$  en produceert geen afval, op het onschadelijke water na.

### Groene chemie toegepast in experimenten

Het zogenaamde ‘experiment met de blauwe fles’ kan gebruikt worden voor het illustreren van verschillende chemische concepten die van belang zijn binnen de context van de schoolchemie. Het gaat hier met name over de gaswetten, stoichiometrie en redoxreacties. De klassieke vorm van dit experiment maakt gebruik van een oplossing van 20 g glucose, 16 g kaliumhydroxide en 1 mg methyleenblauw in 600 ml water. Deze oplossing wordt in een afgesloten fles met een inhoud van 1 l gebracht, zodat de fles nog ongeveer 400 ml lucht bevat. Na het oplossen van de bestanddelen ontkleurt het methyleenblauw omdat het door het glucose wordt gereduceerd tot zijn kleurloze gereduceerde vorm. Bij schudden van de fles ontstaat intensief contact tussen het zuurstofgas van de lucht ingesloten in de fles en de oplossing, zodat het methyleenblauw opnieuw tot de gekleurde vorm wordt geoxideerd. Wanneer men ophoudt met schudden, verdwijnt de blauwe kleur weer geleidelijk, om weer terug te keren wanneer men opnieuw schudt. Dit kan talrijke keren worden herhaald. Dit experiment vormt een mooi voorbeeld van een eenvoudig uit te voeren en visueel te volgen reactie waarin een gas betrokken is. Men kan bijvoorbeeld de leerlingen het theoretisch aantal cycli laten berekenen uitgaande van de hoeveelheid zuurstofgas die in de fles zit en de globale stoichiometrie van de reactie. (Kennis van de precieze structuur van de reagentia is hiervoor niet vereist.)

Het hoeft geen betoog dat dit experiment (waarvan talrijke varianten zijn beschreven<sup>4</sup>) niet echt strookt met de principes van de groene chemie aangezien gebruik wordt gemaakt van relatief grote hoeveelheden van het uiterst corrosieve KOH. Een alternatieve, uitgesproken ‘groenere’ versie van de blauwe fles maakt gebruik van andere reagentia in combinatie met een katalysator en kan dus ook gebruikt worden om katalyse te illustreren.<sup>5</sup> Het recept voor deze en de klassieke versie vindt men in onderstaande tabel. De groenere versie maakt gebruik van ascorbinezuur in plaats van glucose als reductans (Schema 1). Het  $\text{Cu}^{2+}$  fungeert als katalysator (zowel voor de oxidatie van methyleenblauw door zuurstofgas als voor de reductie van methyleenblauw door ascorbinezuur).<sup>6</sup> Dit kan mooi geïllustreerd worden door het mengsel te bereiden zonder de katalysator toe te voegen: de kleur blijft dan behouden.

<sup>4</sup> <http://www.chem.leeds.ac.uk/delights/texts>

<sup>5</sup> E. W. E. Welleman, M. E. Noble, *J. Chem. Educ.*, **2003**, *80*, 537

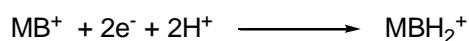
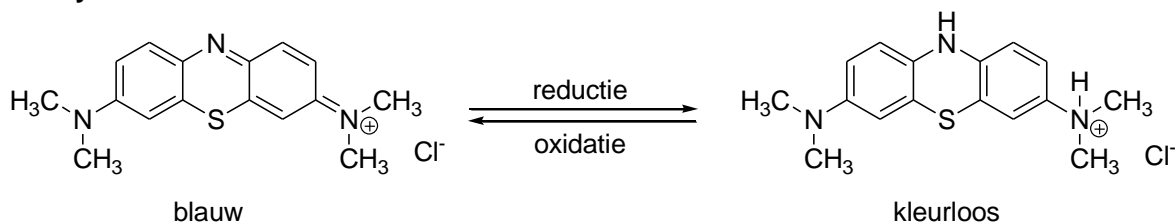
<sup>6</sup>  $\text{NaHCO}_3$  brengt de pH op een optimale waarde van 3 en het toegevoegde keukenzout levert chloride-ionen die de efficiëntie van de katalysator  $\text{Cu}^{2+}$  optimaliseren door complexatie.



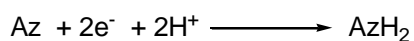
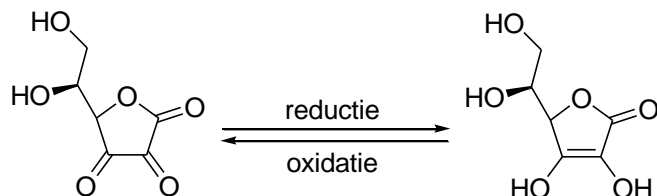
Klassieke versie	Groene versie
20 g glucose	2,4 g ascorbinezuur
16 g KOH	75 mg NaHCO <sub>3</sub>
1,0 mg methyleenblauw	3,0 mg methyleenblauw
600 ml water	1 g NaCl
	36 mg CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O
	600 ml H <sub>2</sub> O

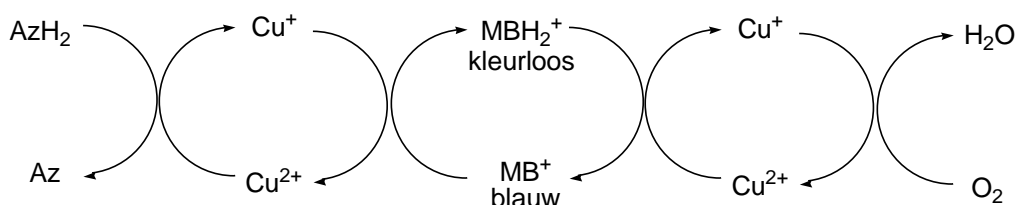
Het is duidelijk dat het gevaar voor leraar en leerlingen zowel als de belasting voor het milieu bij gebruik van de groene versie heel wat geringer is. De pH van de oplossing ligt veraf van de corrosieve 13+ bij de klassieke versie. Bovendien werkt de fles beter omdat de permanente vergeling die zich voordoet bij de klassieke versie veel minder sterk optreedt.

### Methyleenblauw



### Ascorbinezuur (vitamine C)





**Schema 1.** Redoxreacties in de groene versie van de blauwe fles

### Besluit

Mits een goed gekozen strategie kunnen bepaalde aspecten van groene chemie gemakkelijk expliciet geïntroduceerd worden in het secundair onderwijs. Dit werkt niet alleen ondersteunend voor het preventiebeleid van de school zelf, maar komt ook de motivatie en de latere studie- en professionele activiteiten van de leerlingen ten goede.

### Interessante informatiebronnen over groene chemie

Green chemistry: theory and practice, P. T. Anastas, J. C. Warner, Oxford : Oxford University Press, 2000.

Green chemistry: an introductory text, M. Lancaster, Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 2002.

Praxis der Naturwissenschaften/Chemie in der Schule, **2007**, 56, nr. 5.

European Technology Platform for Sustainable Chemistry, <http://www.suschem.org/>