

**Leren van Green Chemistry
voor Safe-by-Design**

Dit verslag geeft de bevindingen weer van een kortlopend onderzoek naar de opkomst en invloed van *green chemistry* als beweging binnen de chemie, en doet suggesties om de rol van Safe-by-Design als opkomende beleidsbeweging te versterken.

Opdrachtgever

Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM). Contactpersoon: Bart Walhout.

Looptijd onderzoek

1 december 2017 – 31 maart 2018

Datum rapport

18 juli 2018

Auteur

Dr. Daan Schuurbiers

De Proeffabriek

Josef Israelslaan 63
6813 JB Arnhem
t: +31 6 143 652 16
e: daan@proeffabriek.nl
w: www.proeffabriek.nl



Inhoudsopgave

Samenvatting.....	5
Inleiding.....	9
Een korte geschiedenis van <i>green chemistry</i>	10
Bevindingen.....	12
Definitie: positieve boodschap en een praktische aanpak.....	13
Positionering: <i>green chemistry</i> als voorwaarde voor duurzame beleidsdoelen.....	14
Communicatie: toegevoegde waarde is helder voor alle doelgroepen.....	16
Conclusie.....	20
Leren van <i>green chemistry</i> voor Safe-by-Design?.....	21
1. Creëer institutionele ondersteuning.....	22
2. Combineer een positieve definitie met een praktische aanpak.....	22
3. Definieer de toegevoegde waarde voor alle doelgroepen.....	23
4. Bepaal de positie ten opzichte van aanpalende bewegingen.....	23
Bijlage 1: De 12 principes van <i>green chemistry</i>	25
Literatuur.....	29

Samenvatting

Het begrip *green chemistry* – chemische producten en processen zo ontwerpen dat de productie en emissie van gevaarlijke stoffen wordt verminderd of zelfs geheel voorkomen – komt voort uit een toenemende onvrede over de productie van gevaarlijk afval door de chemische industrie in de jaren '80 en '90 van de vorige eeuw. De Amerikaanse Environmental Protection Agency (EPA) introduceerde het begrip in navolging van de *Pollution Prevention Act* uit 1990. In de afgelopen 25 jaar heeft *green chemistry* zich vooral in de Verenigde Staten en het Verenigd Koninkrijk, en tot op zekere hoogte in Europa, ontwikkeld tot een relatief invloedrijke beweging binnen de chemie.

Dit verslag geeft de bevindingen weer van een kortlopend onderzoek naar de opkomst van *green chemistry* in opdracht van RIVM. Het onderzoek benaderde *green chemistry* als een *beweging*: het bestudeerde niet alleen de inhoudelijke betekenis van de term (zoals de definitie van het begrip, de aard van de principes, de verschillende toepassingen en behaalde besparingen), maar vooral ook de ontstaansgeschiedenis: hoe is het begrip ontstaan? Wie waren de vaandeldragers van de beweging? Op welke manieren probeerden zij aandacht voor het begrip te genereren? Het onderzoek doet dus geen uitspraken over de mate waarin *green chemistry* inderdaad heeft bijgedragen aan de daadwerkelijke 'vergroening' van de chemie; daarvoor zou verder, kwantitatief, onderzoek nodig zijn. De aandacht ging hier vooral uit naar de wijzen waarop de voorvechters van de beweging erin geslaagd zijn om het begrip onder de aandacht te brengen. Het onderzoek is gebaseerd op literatuurstudie en interviews.

Uit het onderzoek blijkt dat de huidige positie van *green chemistry* deels het gevolg is van een toevallige samenloop van omstandigheden. *Green chemistry* had het tij mee, met de gelukkige combinatie van een urgent maatschappelijk probleem (de productie van gevaarlijk afval door de chemische industrie) en een constructieve oplossing (chemisch ontwerp zo aanpassen dat de productie en emissie van gevaarlijk afval wordt voorkomen). Maar dat juist dit begrip 25 jaar na dato gezien wordt als een veelbelovend antwoord op deze maatschappelijke opgaven is mede het gevolg van strategische positionering, communicatie en alliantievorming door de voorvechters van de beweging zoals Paul Anastas van de EPA en chemicus John Warner. De volgende punten illustreren hoe zij de beweging kracht hebben bijgezet.

Ten eerste combineert *green chemistry* een positieve chemische filosofie met een praktische aanpak. Het begrip verwoordt een optimistische en eenvoudige boodschap: *green chemistry* zorgt ervoor dat er geen ongewenste gevaarlijke stoffen vrijkomen bij het ontwerp van chemische producten en processen. Het biedt dus wel de lusten van chemie, maar niet de lasten. Die boodschap zorgt ervoor dat uiteenlopende belangengroeperingen zich achter de doelstellingen van de beweging kunnen scharen. Het blijft echter niet bij die *feelgood-philosophy*: Anastas en Warner hebben een concreet maakperspectief aan de definitie verbonden door middel van twaalf ontwerpprincipes die concrete handvatten bieden om *green chemistry* te bedrijven. De boodschap is: "*green chemistry* maakt een betere wereld mogelijk – en zo doe je het!" (Nogmaals: dit onderzoek was er niet op gericht om vast te stellen in hoeverre de beweging die betere wereld daadwerkelijk dichterbij heeft gebracht, maar om te verkennen op welke manieren de algemene boodschap onder de aandacht is gebracht.)

Ten tweede zijn de ontwerpprincipes zelf zo opgesteld dat de meeste concurrerende vakgebieden binnen de definitie van *green chemistry* vallen. De twaalf principes worden door

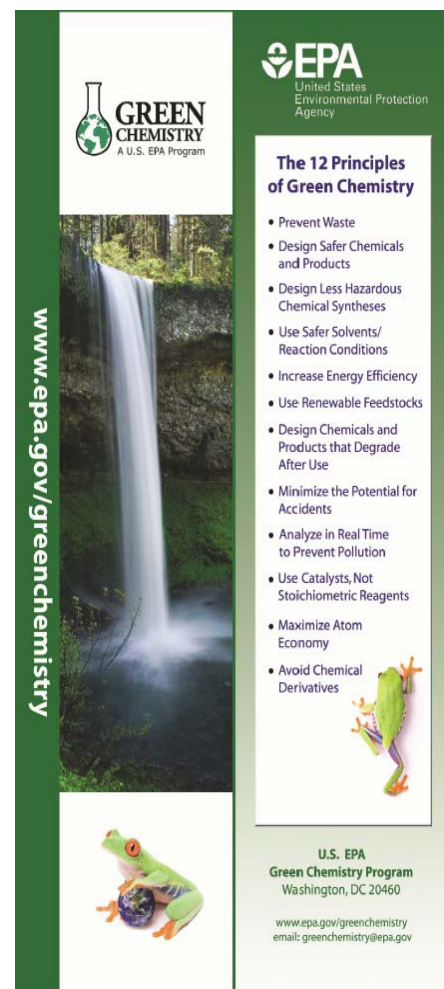
chemici wel bekritiseerd omdat ze een te ruime definitie zouden geven. Aan hoeveel principes moet een chemisch proces of product voldoen om als *green chemistry* te kwalificeren? Als bij het ontwerp van een proces of product slechts gebruik is gemaakt van één van de twaalf principes (zoals het gebruik van hernieuwbare grondstoffen), is het dan ook meteen *green chemistry*? En zo niet, waar ligt dan de grens? Maar vanuit communicatieoogpunt is dat nou juist de kracht: dankzij de ruime definitie kunnen alle goede voorbeelden uit aanpalende vakgebieden onder de banier van *green chemistry* geschaard worden. *Green chemistry* positioneert zich daarmee als de *voorwaarde* waaronder de richtinggevende beleidsconcepten van deze tijd, zoals duurzaamheid en *circular economy*, verwezenlijkt kunnen worden.

Een derde punt dat vanuit communicatieoogpunt opvalt, is dat de toegevoegde waarde van de term voor alle doelgroepen helder is gedefinieerd in de 'eigen valuta' van de doelgroep. Voor de overheid beantwoordt *green chemistry* aan de behoefte om de maatschappelijke kosten van vervuiling te voorkomen, en draagt het bij aan de legitimiteit van de chemische sector. Voor onderzoekers biedt het begrip nieuwe kansen voor onderzoek en innovatie, en geeft het tegelijkertijd vorm aan de maatschappelijke verantwoordelijkheid van chemici. Voor het bedrijfsleven biedt het naast een beter imago vooral ook significante kostenbesparingen. Tot slot biedt *green chemistry* voor burgers en milieuorganisaties een aanknopingspunt om onderzoek en ontwikkeling meer te baseren op milieuoverwegingen, waarmee ook zij zich achter de doelstellingen van de beweging kunnen scharen. Door het belang van het begrip voor verschillende doelgroepen inzichtelijk te maken, was het mogelijk om institutionele steun van uiteenlopende belangengroeperingen te vergaren. Dit komt tot uitdrukking in de lancering van de *Presidential Green Chemistry Challenge*, en de steun van belanghebbende organisaties zoals de *American Chemical Society* (ACS) en de *Green Chemistry and Commerce Council* (GC3).

Doordat de toegevoegde waarde van *green chemistry* in de eigen valuta van alle doelgroepen uitgedrukt kan worden, ontstaat een positieve spiraal: de positionering van het begrip als een beleidsdoel (inclusief financiering) wekt de interesse van onderzoekers; het ontstaan van een volwassen onderzoeksveld verleent de beweging geloofwaardigheid, en wekt de interesse van de industrie; concrete voorbeelden binnen de industrie geven de beweging meer zichtbaarheid; positieve berichtgeving vergroot het vertrouwen in *green chemistry*; en dat vertrouwen maakt weer verdere overheidssteun mogelijk.

Leren van *green chemistry* voor Safe-by-Design?

'Zachte' factoren als strategische positionering, communicatie en alliantievorming blijken dus van invloed te zijn geweest op de opkomst van *green chemistry* als beweging binnen de chemie. In hoeverre zouden de elementen uit de bovenstaande analyse kunnen helpen om Safe-by-



Figuur 1: De twaalf principes van green chemistry (bron: www.epa.gov)

Design als beleidsbeweging kracht bij te zetten? De bevindingen uit het onderzoek leiden tot de volgende suggesties:

1. Creëer institutionele ondersteuning.

Anastas en Warner hebben van meet af aan institutionele ondersteuning gezocht voor *green chemistry* bij uiteenlopende belangengroeperingen. Die institutionele ondersteuning verleende de beweging status en geloofwaardigheid. Voor de verdere verankering van Safe-by-Design zou het eveneens zinvol kunnen zijn om te verkennen of vergelijkbare institutionele steun denkbaar is: zijn er belangrijke voorvechters voor de beweging uit het onderzoeksveld, het bedrijfsleven of nationale of Europese beleidsmakers die op hoog niveau ondersteuning kunnen bieden?

2. Combineer de positieve associatie van Safe-by-Design met een praktische aanpak.

Net als *green chemistry* in de jaren '90, lijkt Safe-by-Design eveneens het tij mee te hebben: de visie dat producten inherent veilig moeten zijn, kan op brede steun rekenen bij de overheid, het bedrijfsleven, het maatschappelijk middenveld en burgers. Maar – net als *green chemistry* in de jaren '90 – is het begrip nog in flux: het is niet voor iedereen direct duidelijk wat ermee bedoeld wordt, of hoe je het aanpakt. De combinatie van een positieve definitie met twaalf concrete ontwerpprincipes vergemakkelijkt de acceptatie van *green chemistry*: het maakte potentieel geïnteresseerden enthousiast om deel te nemen aan de beweging, en maakte tegelijkertijd duidelijk wat ze moesten doen. Is het mogelijk om de positieve associatie van Safe-by-Design eveneens te verbinden aan een concreet maakperspectief? Heldere communicatie kan voor onderzoekers en producenten inzichtelijk maken wat Safe-by-Design concreet betekent in de praktijk van innovatie.

3. Definieer de toegevoegde waarde van Safe-by-Design voor alle doelgroepen.

Green chemistry creëerde een positieve spiraal door de boodschap voor alle doelgroepen helder te definiëren in de eigen 'valuta'. Is de toegevoegde waarde van Safe-by-Design eveneens helder voor alle doelgroepen? Is bijvoorbeeld duidelijk op welke manieren Safe-by-Design tot kostenbesparingen of nieuwe innovatiekansen voor de industrie zou kunnen leiden? Zijn er *incentives* voor onderzoekers om op een andere manier naar hun onderzoek te kijken (zoals subsidies, publicatiemogelijkheden of nieuwe kansen voor samenwerking)?

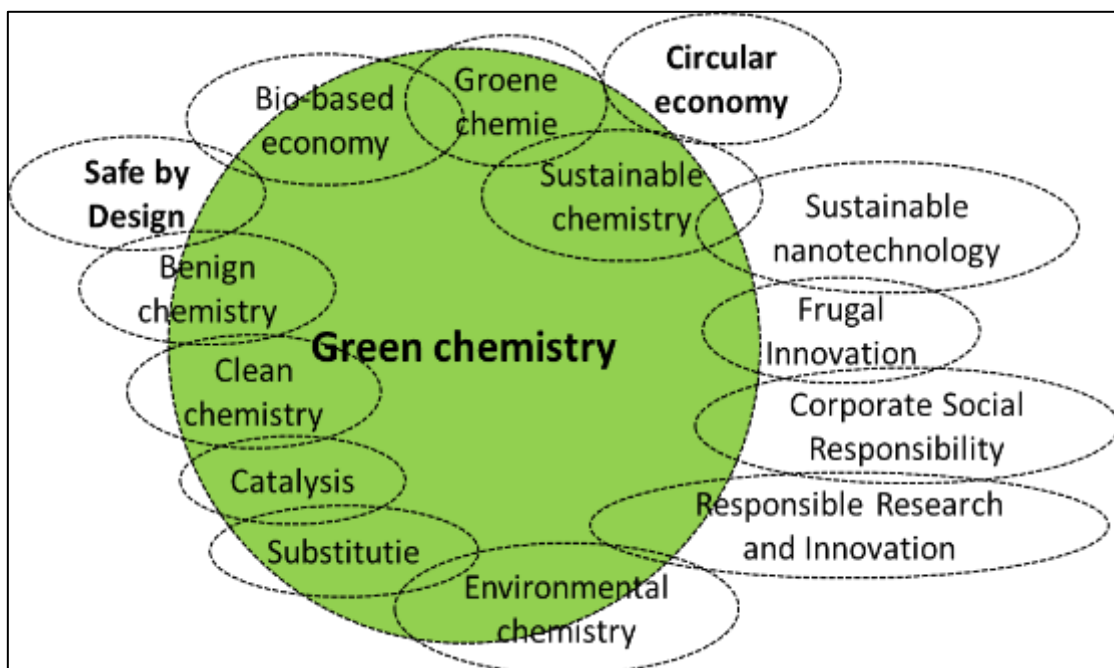
4. Positioneer Safe-by-Design ten opzichte van aanpalende bewegingen.

De veelomvattende definitie van *green chemistry* zorgde ervoor dat het begrip gezien wordt als de *voorwaarde* waaronder de richtinggevende beleidsconcepten van deze tijd, zoals duurzaamheid en *circular economy*, verwezenlijkt kunnen worden. Heldere positionering kan de specifieke betekenis en reikwijdte van een beleidsbeweging verduidelijken. Hoe verhoudt Safe-by-Design zich tot aanpalende bewegingen zoals de Safe Innovation Approach, Regulatory Preparedness of de Safe Chemicals Innovation Agenda? Moet Safe-by-Design als zelfstandige beweging gepositioneerd worden, of wellicht als aanvulling op bestaande concepten zoals *circular economy*, *green chemistry* of *sustainable chemistry*? Er zijn verschillende opties denkbaar, maar de ontstaansgeschiedenis van *green chemistry* laat zien dat een bepaalde mate van continuïteit nodig is om een beleidsbeweging over een lange periode kracht bij te zetten: naast de inhoudelijke betekenis zijn de herkenbaarheid en zichtbaarheid van de term van belang.

Inleiding

Dit verslag geeft de bevindingen weer van een kortlopend onderzoek naar de opkomst en invloed van *green chemistry* als beweging binnen de chemie, en doet suggesties om de rol van Safe-by-Design als opkomende beleidsbeweging te versterken. Het begrip komt voort uit een groeiend milieubewustzijn binnen de chemie sinds de jaren '80 en '90. Het uitgangspunt is om de negatieve invloed van chemische producten en processen voor mens en milieu zoveel mogelijk te beperken door al in de ontwerpfase rekening te houden met de schadelijke effecten van chemische stoffen. Dit gedachtegoed wordt ruim 25 jaar later, zeker in de Verenigde staten, breed gedragen: *green chemistry* is stevig verankerd als beleidsterrein van de Amerikaanse Environmental Protection Agency (EPA), als onderzoeksgebied binnen de chemie, en als ontwerprichtlijn voor chemische innovatie in het bedrijfsleven.

De vraagstelling van dit onderzoek was: wat kunnen we leren van de opkomst van *green chemistry* om de rol van Safe-by-Design als ontwerpprincipie te versterken? Het onderzoek benaderde *green chemistry* als een *beweging*: het bestudeerde niet alleen de inhoudelijke betekenis van de term (zoals de definitie van het begrip, de aard van de principes, de verschillende toepassingen en behaalde besparingen), maar vooral ook de ontstaansgeschiedenis: hoe is het begrip ontstaan? Wie waren de vaandeldragers van de beweging? Op welke manieren probeerden zij aandacht voor het begrip te genereren? *Green chemistry* is immers niet de enige beleidsbeweging die verduurzaming van de chemie probeert te verwoorden: het begrip opereert binnen een krachtenveld van concurrerende bewegingen, zoals *clean chemistry*, *benign chemistry* en *sustainable chemistry*. In dat krachtenveld spelen ook overkoepelende beleidsbewegingen zoals *bio-based economy*, *corporate social responsibility*, *responsible research and innovation* en *Safe-by-Design* een rol. Die begrippen hebben allemaal een inhoudelijke betekenis, maar het zijn ook 'vaandels' die door voorvechters naar voren gebracht worden om chemiebeleid, onderzoek en innovatie te beïnvloeden.



Figuur 2: *green chemistry* overlapt concurrerende bewegingen in chemie en beleid.

Het onderzoek is gebaseerd op literatuurstudie (een combinatie van sociaalwetenschappelijke en chemische literatuur, grijze literatuur en online informatie) en interviews met onderzoekers en beleidsmakers.¹ Het onderzoek is in december 2017 gestart en is in april 2018 afgerond.

Dit verslag geeft de belangrijkste bevindingen uit het onderzoek weer: na een korte schets van de ontstaansgeschiedenis van het begrip volgt een overzicht van de manieren waarop de voorvechters van *green chemistry* de beweging hebben gepositioneerd en gecommuniceerd. Vervolgens verkent het verslag in hoeverre de elementen uit de analyse zouden kunnen helpen om Safe-by-Design als opkomende beleidsbeweging kracht bij te zetten.

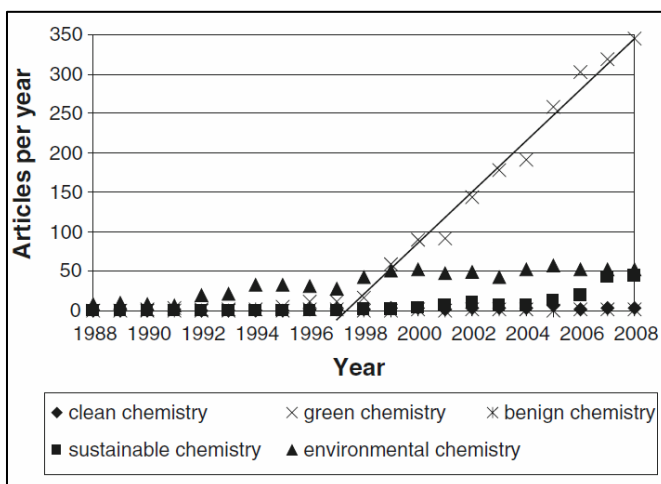
Een korte geschiedenis van Green Chemistry

De term '*green chemistry*' komt voort uit een toenemende onvrede over de productie en emissie van gevaarlijk afval door de chemische industrie en daarmee samenhangende milieuschandalen zoals het Love Canal incident in Niagara Falls in 1978, waar een hele woonwijk ontruimd moest worden door de ontdekking van grote hoeveelheden zwaar chemisch afval die daar begraven lagen, de ramp in Bhopal in 1984, waar duizenden omwonenden omkwamen door een gaslek in een fabriek van Union Carbide, en de ontdekking van dioxinebesmetting in Times Beach, Missouri, waardoor het hele dorp in 1983 geëvacueerd moest worden (Sanderson, 2011).

In reactie op die milieuproblematiek werd in 1990 de Pollution Prevention Act aangenomen, die een belangrijke beleidsverschuiving belichaamt: van '*end-of-pipeline control*' naar *pollution prevention*, het voorkomen van vervuiling (Linthorst, 2010). De maatschappelijke kosten van vervuiling waren een belangrijke factor: het Amerikaanse congres zag het voorkomen van de maatschappelijke kosten die met milieuvervuiling gepaard gaan als een gezamenlijk belang van de overheid en de chemische industrie. In reactie op het groeiende milieubewustzijn in de chemie en de Pollution Prevention Act ontstonden in de vroege jaren '90 diverse 'milieubewuste' bewegingen die zich richtten op het tegengaan van ontstaan en emissie van gevaarlijke stoffen.

Zoals chemiedocent Arjan Linthorst in zijn historisch onderzoek naar *green chemistry* aantoont, was er een sterke toename in het gebruik van de term sinds halverwege de jaren '90. De grafiek hiernaast geeft het aantal wetenschappelijke artikelen weer dat verwijst naar de verschillende termen: vanaf 1997 neemt het gebruik van de term *green chemistry* sterk toe.

De grafiek van Linthorst is uit 2010, dus er kunnen zich in de laatste jaren verschuivingen hebben voorgedaan. Zeker in Europa is de term *sustainable chemistry* in opmars, getuige beleidsinitiatieven als het *European Tech-*



Figuur 3: Het gebruik van 'milieubewuste' termen in wetenschappelijke artikelen van 1988 - 2008. Bron: Linthorst (2010).

¹ Met dank aan: John Warner (Warner Babcock Institute for Green Chemistry), Frank Hollmann (Afdeling Biotechnologie, TU Delft), Claire Skentelbery (Nanotechnology Industries Association), Peter van der Ham (Green Chemistry Campus), Adrienne Sips (RIVM) en Bart Walhout (RIVM) voor hun bijdragen aan dit onderzoek.

nology Platform for Sustainable Chemistry,² het Duitse *International Sustainable Chemistry Collaborative Centre*,³ en het *Sustainable Chemistry* programma van TNO.⁴ Ook de OECD lijkt de voorkeur te geven aan *sustainable chemistry*.⁵

Over de mate van overlap tussen *green chemistry* en *sustainable chemistry* lopen de meningen uiteen. Voor sommigen zijn de termen synoniem. Zo schrijft de EPA bijvoorbeeld op haar website: “*Green chemistry is also known as sustainable chemistry.*”⁶ Anderen maken een duidelijk onderscheid. Zo stelt Petro Tundo in het voorwoord van een special issue van *Pure and applied chemistry*:

“*Recently, in fact, the difference between sustainable chemistry and green chemistry is becoming more evident. Sustainable chemistry envisions industrial processes that create better products, result in fewer pollutants, and are profitable. Green chemistry, in contrast, is more innovative. It deals with the fundamental aspects of chemistry without regard for industrial processes or profitability.*”⁷

Het International Persistent Organic Pollutants Elimination Network (IPEN) ondersteunt de doelstellingen van *green chemistry*, maar niet die van *sustainable chemistry*, omdat *sustainable chemistry* volgens IPEN veel minder concreet is en daarmee gevoeliger zou zijn voor *window dressing* (zie ook het punt over ‘toegevoegde waarde voor burgers en het maatschappelijk middenveld’ op bladzijde 19).⁸ Daarentegen heeft een Europese Joint Working Group, opgericht door CEN en de Europese Commissie, onlangs voorgesteld om de twaalf ontwerpprincipes van *green chemistry* als leidraad te gebruiken om normen te ontwikkelen voor ‘sustainable chemicals’.⁹

Hoe dan ook is duidelijk dat *green chemistry* ook vandaag de dag nog stevig verankerd is als vakgebied binnen de chemie. Er zijn verschillende wetenschappelijke tijdschriften over het onderwerp, zoals *Green Chemistry*¹⁰ en *Green Chemistry Letters and Reviews*;¹¹ er verschijnen regelmatig handboeken en *edited volumes*: onlangs is de derde editie van ‘*Green Chemistry: An Introductory Text*’ van Mike Lancaster verschenen;¹² er zijn jaarlijks vele congressen over het onderwerp, en er zijn instituten voor *green chemistry* over de hele wereld, waaronder natuurlijk de *green chemistry*-afdeling van de EPA¹³ en het *Green Chemistry Institute* van de *American Chemical Society*,¹⁴ maar ook *GreenCentre Canada*,¹⁵ en het *Centre for Green Chemistry* aan de *Monash Universiteit* in Australië.¹⁶ Het *Safer Nanomaterials and Nanomanufacturing Initiative* (SNNI) aan de *Universiteit van Oregon* in de VS beoogt de principes van *green chemistry* toe te

² <http://www.suschem.org/>

³ <https://www.isc3.org/en/home.html>

⁴ <https://www.tno.nl/en/focus-areas/industry/roadmaps/sustainable-chemical-industry/>

⁵ <http://www.oecd.org/chemicalsafety/risk-management/sustainablechemistry.htm>

⁶ <https://www.epa.gov/greenchemistry/basics-green-chemistry>

⁷ *Pure and applied chemistry*, Special issue, 79(11): 1831/2100.

https://www.iupac.org/publications/ci/2008/3002/bw1_bull.html

⁸ <http://ipen.org/sites/default/files/documents/IPEN%20Comments%20UNEA%20Green%20Chem%20Sustainable%20Chem%2030%20June%202017.pdf>

⁹ <http://nenmagazine.nen.nl/nenmagazine-2-2017#!/sustainable-chemicals>

¹⁰ <http://www.rsc.org/journals-books-databases/about-journals/green-chemistry/>

¹¹ <https://www.tandfonline.com/toc/tgcl/current>

¹² <http://pubs.rsc.org/en/content/ebook/978-1-78262-294-9>

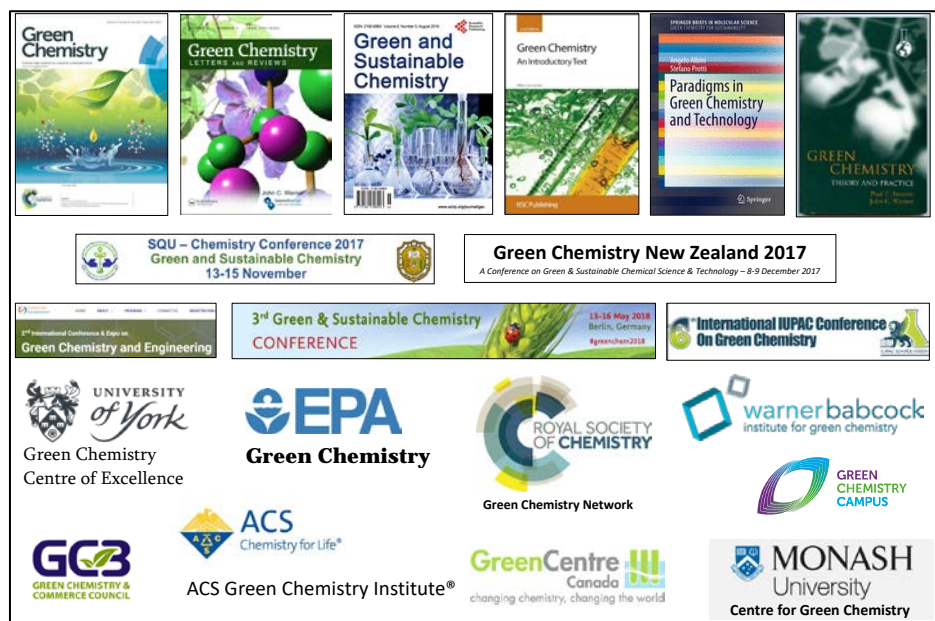
¹³ <https://www.epa.gov/greenchemistry>

¹⁴ <https://www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry.html>

¹⁵ <https://www.greencentrecanada.com/>

¹⁶ <http://www.monash.edu.au/strip/tenants/university/centre-greem-chemistry.html>

passen op de ontwikkeling van veiligere nanomaterialen.¹⁷ Ook in Nederland is er een Green Chemistry Campus,¹⁸ al moet hierbij vermeld worden dat deze innovatiecampus in Bergen op Zoom zich vooral richt op de overgang in de chemie naar hernieuwbare grondstoffen (wat in Nederland ook wel ‘groene chemie’ wordt genoemd), en minder op *green chemistry* als ontwerpprincipe.



Figuur 4: een greep uit het huidige aanbod van activiteiten rond *green chemistry*: wetenschappelijke tijdschriften, congressen, onderzoeksinstituten en belangenorganisaties.

Bevindingen

In dit onderzoek zochten we een antwoord op de vraag: waarom is juist *green chemistry* de term die – vooral in de Verenigde staten – bij uitstek gebruikt wordt, en niet een van de concurrerende bewegingen in de chemie? Let wel, het onderzoek bestudeerde vooral de wijzen waarop de voorvechters van de beweging erin geslaagd zijn om *green chemistry* onder de aandacht te brengen. De mate waarin *green chemistry* inderdaad heeft bijgedragen aan de daadwerkelijke ‘vergroening’ van de chemie laten we daarbij in het midden; daarvoor zou verder kwantitatief onderzoek nodig zijn.¹⁹

Allereerst moet vermeld worden dat de opkomst van *green chemistry* deels te danken is aan een toevallige samenloop van omstandigheden. *Green Chemistry* had het tij mee (het was, zoals John Warner het omschreef, een ‘*perfect storm*’): ten eerste schreeuwde de vervuilingproblematiek in de VS om een oplossing. Volgens de EPA werd in 1991 naar schatting 278 miljoen ton gevaarlijk chemisch afval geproduceerd op 24.000 plaatsen in de VS, voornamelijk door bedrijven (Sanderson, 2011). Daarnaast verschoof de Pollution Prevention Act uit 1990 de nadruk van *end-of-pipe control* naar het voorkomen van vervuiling. Er was dus een duidelijke behoefte aan oplossingen die het beleidsdoel van *pollution prevention* konden verwezenlijken.

¹⁷ <https://greennano.org/>

¹⁸ <https://www.greenchemistrycampus.com>

¹⁹ Er zijn op dat gebied ook kritische geluiden te horen. Zo stelt Burnett (1998) bijvoorbeeld dat het *pollution prevention* beleid van de EPA vooral symbolische waarde heeft.

Tot slot was er significante financiering beschikbaar vanuit de EPA om met nieuwe oplossingen te komen: de Pollution Prevention Act maakte in de jaren 1991, 1992 en 1993 zo'n 16 miljoen dollar per jaar vrij voor nieuwe oplossingen.²⁰ Dus de wereld was er zagezegd klaar voor. Maar deels hebben de voorvechters van *green chemistry*, met name Paul Anastas (in de vroege jaren '90 werkzaam als beleidsmedewerker van de EPA) en John Warner (in die tijd onderzoeker bij Polaroid), de beweging kracht bijgezet door strategische positionering, alliantievorming en slimme communicatie. Hieronder volgen enkele voorbeelden van de wijzen waarop ze dat gedaan hebben.

Definitie: positieve boodschap en een praktische aanpak

Ten eerste combineert *green chemistry* een positieve boodschap met een praktische aanpak. De definitie belichaamt een hele positieve en verraderlijk eenvoudige boodschap (Arjan Linthorst (2010) spreekt van een duidelijke 'chemische filosofie'): *green chemistry* voorkomt de productie en emissie van gevaarlijke stoffen door slim ontwerp van chemische producten en processen. Het biedt dus wel de lusten van chemie, maar niet de lasten.

Het blijft echter niet bij die *feelgood-philosophy*. In *Green Chemistry: Theory and Practice*,²¹ het veelvuldig geciteerde werk van Anastas en Warner uit 1998, wordt de positieve definitie verbonden aan een concreet maakperspectief door middel van twaalf ontwerpprincipes. Met dit concrete maakperspectief onderscheidt *green chemistry* zich van bewegingen zoals *Responsible Research and Innovation*, die wel een vergelijkbare positieve filosofie belichamen, maar niet direct een concreet handelingsperspectief bieden. De boodschap is: "een betere wereld is mogelijk – en zo doe je het!"²² (Voor de goede orde: we laten hier buiten beschouwing of de toepassing van de ontwerpprincipes die betere wereld ook daadwerkelijk dichterbij hebben gebracht.) De American Chemical Society schrijft op haar website:

"The concept of greening chemistry is a relatively new idea which developed in the business and regulatory communities as a natural evolution of pollution prevention initiatives. In our efforts to improve crop protection, commercial products, and medicines, we also caused unintended harm to our planet and humans. By the mid-20th century, some of the long-term negative effects of these advancements could not be ignored. Pollution choked many of the world's waterways and acid rain deteriorated forest health. There were measurable holes in the earth's ozone. Some chemicals in common use were suspected of causing or directly linked to human cancer and other adverse human and environmental health outcomes. Many governments began to regulate the generation and disposal of industrial wastes and emissions. The United States formed the Environmental Protection Agency (EPA) in 1970, which was charged with protecting human and environmental health through setting and enforcing environmental regulations. Green chemistry takes the EPA's mandate a step further and creates a new reality for chemistry and engineering by asking chemists and engineers to design chemicals, chemical processes and commercial products in a way that, at

²⁰ Pollution Prevention Act, § 13109. Authorization of appropriations: "There is authorized to be appropriated to the Administrator \$8,000,000 for each of the fiscal years 1991, 1992, and 1993 for functions carried out under this chapter (other than State Grants), (FOOTNOTE 1) and \$8,000,000 for each of the fiscal years 1991, 1992, and 1993, for grant programs to States issued pursuant to section 13104 of this title." <https://www.epa.gov/p2/pollution-prevention-act-1990>

²¹ <https://global.oup.com/academic/product/green-chemistry-theory-and-practice-9780198506980?cc=nl&lang=en&>

²² Zie ook Rusyn & Greene (2018), blz 215: "As long as pollution prevention remains nothing more than a conceptual goal, it meets little resistance from affected parties; after all, it is hard to argue with the goal of reducing pollution for the betterment of all".

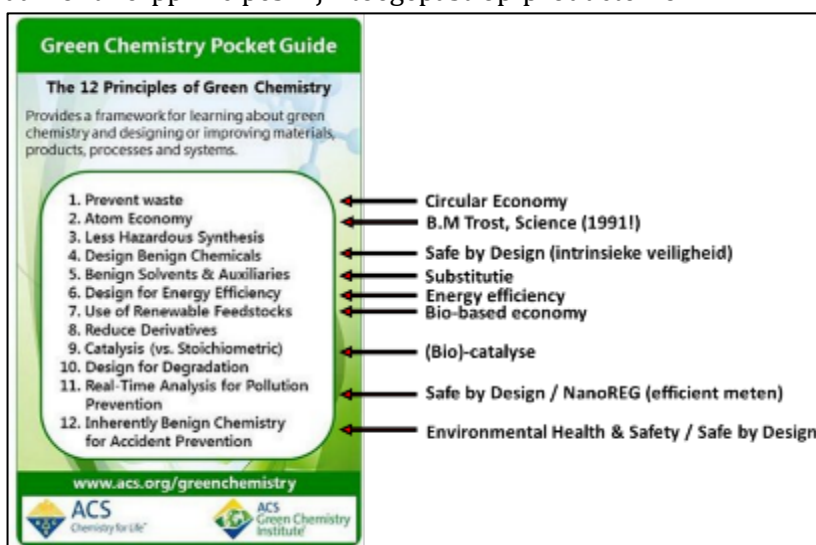
the very least, avoids the creation of toxics and waste. Green Chemistry is not politics. Green Chemistry is not a public relations ploy. Green chemistry is not a pipe dream. We are able to develop chemical processes and earth-friendly products that will prevent pollution in the first place. Through the practice of green chemistry, we can create alternatives to hazardous substances we use as our source materials. We can design chemical processes that reduce waste and reduce demand on diminishing resources. We can employ processes that use smaller amounts of energy. We can do all of this and still maintain economic growth and opportunities while providing affordable products and services to a growing world population. This is a field open for innovation, new ideas, and revolutionary progress. This is the future of chemistry. This is green chemistry.”²³

Positionering: green chemistry als voorwaarde voor duurzame beleidsdoelen

Ten tweede zijn de twaalf ontwerpprincipes zelf ook een voorbeeld van slimme positionering: ze zijn zo opgesteld dat de meeste concurrerende vakgebieden binnen de definitie van green chemistry vallen. De twaalf principes worden door chemici wel bekritiseerd omdat ze een te ruime definitie zouden geven. Aan hoeveel principes moet een chemisch proces voldoen om als *green chemistry* te kwalificeren? Als bij het ontwerp van een proces of product slechts gebruik is gemaakt van één van de twaalf principes (zoals het gebruik van hernieuwbare grondstoffen), is het dan ook meteen *green chemistry*? En zo niet, waar ligt dan de grens? Er zijn geen duidelijke indicatoren voor de mate waarin de twaalf ontwerpprincipes zijn toegepast op producten of

processen, zoals bij de vijf niveaus van productcertificering van Cradle to Cradle, een andere op duurzaamheid gerichte ontwerpfilosofie, wel het geval is.²⁴ Maar vanuit communicatie-oogpunt is dat nou juist de kracht: dankzij de ruime definitie kunnen alle goede voorbeelden onder de banier van *green chemistry* geschaard worden (zie figuur 5, en de bespreking van de twaalf principes in bijlage 1). Het is opmerkelijk dat de onduidelijkheid rond de vraag wanneer er nou precies sprake is van *green chemistry* geen afbreuk aan het begrip heeft gedaan.

Het lijkt zelfs eerder andersom te zijn: de breedte van het begrip laat ruimte om verwante positieve ontwikkelingen met green chemistry te associëren. Ter illustratie: het artikel ‘*The Greening of Chemistry*’ in het tijdschrift *Distillations* van het *Science History Institute* noemt de schonere productie van ibuprofen als een van de succesverhalen van *green chemistry*,²⁵ terwijl het voorbeeld dateert van voor de tijd dat de term gemeengoed werd. De boodschap is: *atom economy*, *e-factors*, biokatalyse, substitutie, *Cradle to Cradle*, het is uiteindelijk allemaal *green chemistry*! De beweging positioneert zich als de *voorwaarde* waaronder de richtinggevendende beleidsconcepten van deze tijd, zoals duurzaamheid en *circular economy*, verwezenlijkt kunnen



Figuur 5: De twaalf ontwerpprincipes van *green chemistry* zijn ‘veelomvattend’.

²³ <https://www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/what-is-green-chemistry.html>

²⁴ <https://www.c2ccertified.org/>

²⁵ <https://www.sciencehistory.org/distillations/magazine/the-greening-of-chemistry>

worden. Daarbij valt op dat *green chemistry* gepresenteerd wordt als een geheel nieuw vakgebied, en niet zozeer als een collage van bestaande praktijken. Naar de erfenis van de milieuchemie en -filosofie uit de jaren '80 wordt niet uitbundig verwezen. 'Groene' pioniers in de chemie voorafgaand aan de opkomst van *green chemistry* zoals Kenneth Hancock (voormalig directeur van de afdeling scheikunde van de National Science Foundation in de VS), Barry Trost (de scheikundige die het begrip atomeconomie introduceerde)²⁶ of Roger Sheldon (bedenker van de E-factor)²⁷ worden wel genoemd, maar dan toch vooral vanwege hun bijdrage aan *green chemistry*.

Overigens speelt veiligheid een rol in verschillende principes van *green chemistry* (zie ook bijlage 1), zoals:

- Principe 4: ***Design Benign Chemicals***: *Design chemical products that are fully effective yet have little or no toxicity.* Met dit principe wordt veiligheid als ontwerp vraag geïntroduceerd. Het heeft daarmee raakvlakken met Safe-by-Design. Nicholas D. Anastas, medewerker van de EPA, schrijft op de ACS website: *'hazard is a design flaw and must be addressed at the genesis of molecular design.'*²⁸ Veiligheid is dus een kwestie van slim ontwerpen: het vraagt om een andere *mindset* van chemici.

- Principe 11: ***Real-time Analysis for Pollution Prevention***: *Include in-process, real-time monitoring and control during syntheses to minimize or eliminate the formation of byproducts.* Dit principe richt zich op het ontwikkelen van meet- en analysemethoden om de vorming van gevaarlijke stoffen gedurende het chemisch ontwerpproces te volgen en beheersen. Het omvat dus elementen van de analytische chemie en procestechnologie. Het heeft ook raakvlakken met de wijze waarop Safe-by-Design momenteel wordt ingevuld in Europese initiatieven zoals NanoReg2: maak effectief gebruik van de beschikbare instrumenten om de mogelijke risico's gedurende de verschillende stadia van technologische ontwikkeling te monitoren. (Al moet daarbij opgemerkt worden dat principe 11 zich vooral richt op de beheersing van het productieproces, terwijl NanoReg2 zich vooral toelegt op de verschillende fasen van onderzoek en innovatie. Maar er is een vergelijkbare gedachtegang: zorg dat je gedurende het productie- en/of innovatieproces zoveel mogelijk te weten komt over de eigenschappen van je reactie en mogelijke onbedoelde effecten of bijproducten.)

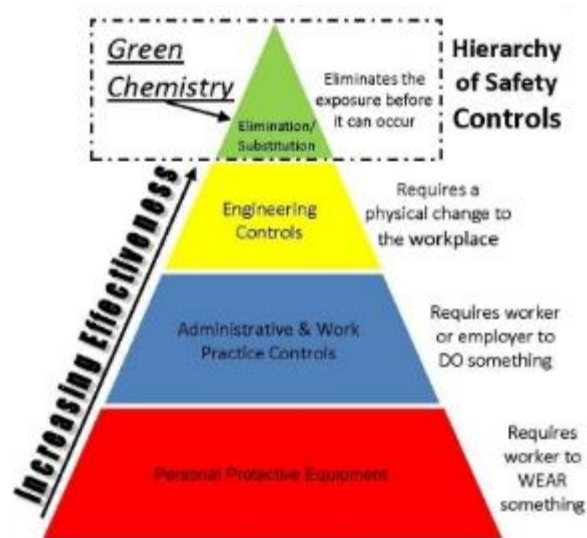
- Principe 12: ***Inherently Benign Chemistry for Accident Prevention***: *Design chemicals and their physical forms (solid, liquid, or gas) to minimize the potential for chemical accidents including explosions, fires, and releases to the environment.* Dit principe staat bekend als het 'veiligheidsprincipe': het beoogt veiligheid in te bouwen in de keuze voor en het ontwerp van chemische stoffen, maar omvat ook de bredere regelgeving rond gezond en veilig werken (de Occupational Health and Safety-regelgeving). Zoals Shelly Bradley, David Finster en Tom Goodwin op de ACS-website opmerken, wordt dit principe doorgaans over het hoofd gezien. Onterecht, volgens de auteurs, want aangezien de essentie van *green chemistry* is om de productie van gevaarlijk stoffen te verminderen of voorkomen, is er een intrinsiek verband met veiligheid in het lab en op de werkvloer. Ze schrijven: *"The Hierarchy of Safety*

²⁶ https://en.wikipedia.org/wiki/Barry_Trost

²⁷ <http://www.sheldon.nl/roger/index.html>

²⁸ <https://www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/what-is-green-chemistry/principles/gc-principle-of-the-month-4.html>

Controls as highlighted in the Occupational Safety and Health Administration (OSHA)'s new Transitioning to Safer Chemicals Toolkit illustrates the difference between focusing on the control or hazard part of the safety definition. Traditional chemical safety models focus primarily on the control component of that definition. The graphic (adapted from OSHA) shows that the most effective means of increasing safety is eliminating the hazard component. Since the elimination of hazards is the basic tenet of Green Chemistry, this marriage of the ideas of Green Chemistry from both OSHA and EPA should have a synergistic impact on hazard reduction. Combining the forces of these two agencies toward a common goal may lead to conversations and changes that result in safer conditions for workers, a safer environment for the general public, and a safer planet for us all."



Figuur 6: De hiërarchie van veiligheidsmaatregelen volgens de Amerikaanse *Occupational Safety and Health Administration* (OSHA).

Bron: www.acs.org.

Ook in andere principes komt veiligheid terug (zoals principe 3: *'Design less hazardous chemical syntheses'*, en principe 5: *'Use safer solvents and reaction conditions'*). Veiligheid is dus – in ieder geval in theorie - een essentieel onderdeel van het gedachtegoed van *green chemistry*. Toch lijkt *green chemistry* in de praktijk meer gedreven te worden door de *duurzaamheids*aspecten dan door veiligheidsoverwegingen. Wel gaf John Warner in een interview aan dat veiligheid voor de industrie in potentie een belangrijke *driver* is: vooral als je het mechanisme kunt aangeven waarin de industrie in een vroeg stadium kan bepalen of een stof of product veilig is.

Communicatie: toegevoegde waarde is helder voor alle doelgroepen.

Een derde punt dat opvalt als we kijken naar de positionering van *green chemistry* is dat de toegevoegde waarde van de term voor alle doelgroepen helder is gedefinieerd in de 'eigen valuta' van de doelgroep. Ook hier is dat deels te danken aan de tijdgeest, maar deels ook aan strategische positionering.

Toegevoegde waarde voor de overheid

Voor de overheid is *green chemistry* een middel om de maatschappelijke kosten van vervuiling te voorkomen, en draagt het bij aan de legitimiteit van de chemische sector. Voortbouwend op de Pollution Prevention Act hebben Anastas *cum suis* gebruik gemaakt van die beleidsruimte om van meet af aan high-level support te zoeken. Dat leidde onder andere tot de lancering van de *Presidential Green Chemistry Award* onder het presidentschap van Clinton in 1995,²⁹ een competitie voor de beste projecten op het gebied van *green chemistry*. Die Award bood zichtbaarheid, en genereerde tegelijkertijd een continue stroom van pilotprojecten, allemaal onder de noemer *green chemistry*.

Toegevoegde waarde voor onderzoekers

Voor onderzoekers geeft *green chemistry* vorm aan de maatschappelijke verantwoordelijkheid van chemici, en geeft tegelijkertijd nieuwe kansen voor onderzoek en innovatie. Het succes van *green chemistry* is volgens Sanderson (2011) te danken aan de positionering van de term als een onderzoeksgebied: daarmee wist de term zich te onderscheiden van een politieke of maatschappelijke beweging. Ook volgens Linthorst (2010) is de ontwikkeling van het onderzoeksveld een belangrijke succesfactor. Zo organiseerde de EPA in de beginperiode (1993-94) internationale symposia om richting te geven aan de invulling van het begrip.³⁰ Daarnaast werd *green chemistry* ook overgenomen als een beleidsspeerpunt voor de American Chemical Society. Overigens speelde de Engelse Royal Society of Chemistry ook een belangrijke rol in de vestiging van *green chemistry* als een legitiem wetenschapsgebied door de lancering van het wetenschappelijke tijdschrift *Green Chemistry*.

Door het organiseren van wetenschappelijke symposia, subsidies voor onderzoekers en nieuwe publicatiemogelijkheden (de 'valuta' van onderzoekers) werd *green chemistry* stevig gepositioneerd als onderzoeksveld binnen de chemie.

Desalniettemin blijven sommige chemici sceptisch over *green chemistry*: ze zien het als politieke correctheid, of als een nieuwe hype om onderzoeksgeld binnen te slepen, al lijkt die houding te veranderen naarmate er meer voorbeelden van praktische toepassingen komen. Omdat *green chemistry* zo afhankelijk is van de *mindset* van chemici, besteden de voorstanders veel aandacht aan onderwijs binnen *green chemistry*. Chemici worden traditioneel niet opgeleid om te denken in termen van product- of procesontwerp of levenscyclus. Als ze al les in veiligheid krijgen, dan gaat het over veilig werken in het lab. De organisatie *Beyond benign*,³¹ een ander geesteskind van John Warner, is er volledig op gericht om de nieuwe generatie chemici een breder perspectief te bieden, waarin toxicologie,



Figuur 7: De EPA ondersteunt de verankering van *green chemistry* door onderzoekssubsidies beschikbaar te maken.

²⁹ <https://www.epa.gov/greenchemistry/information-about-presidential-green-chemistry-challenge>

³⁰ Zoals in 1993: '*Benign by Design: Alternative Synthetic Design for Pollution Prevention*', in Chicago,

³¹ <http://www.beyondbenign.org/about-green-chemistry/>

milieuchemie en ontwerpen integraal onderdeel vormen van chemieonderwijs. Zoals blijkt uit de bespreking van de principes van *green chemistry* in bijlage 1, proberen verschillende principes (zoals bijvoorbeeld principe 4, 7, 9 en 10) de *mindset* van chemici te verbreden: door milieuchemie, katalyse en *bio-based economy* te integreren als centrale chemische ontwerpprincipes, worden deze onderzoeksvelden opgenomen als wezenlijk onderdeel van de chemie).

Toegevoegde waarde voor het bedrijfsleven

Voor het bedrijfsleven biedt *green chemistry* een beter imago, maar vooral ook significante kostenbesparingen. Hedendaagse toepassingen van *green chemistry* zijn vooral de vervanging van conventionele, vervuilende methoden door minder toxische alternatieven: bijvoorbeeld superkritisch CO₂: op hoge temperatuur en druk gedraagt CO₂ zich zowel als een gas en als een vloeistof. Daarmee is het een goed oplosmiddel voor een scala aan organische en inorganische reacties. Ionische vloeistoffen zijn een ander voorbeeld voor minder vervuilende vervangers voor oplosmiddelen. Gujral et al (2012) noemen daarnaast het gebruik van waterstofperoxide-oplossingen als oxidant, en het gebruik van waterstof in asymmetrische synthese.³²

De Green Chemistry Challenge heeft door de jaren heen uiteenlopende voorbeelden gegenereerd. De Amerikaanse farmaceut Pfizer heeft veel geld bespaard dankzij aanpassingen in de productie van geneesmiddelen. De *environmental factor*, of E-factor, het aantal kilogram afval dat geproduceerd wordt voor een kilo product, kan 25-100 bedragen voor de productie van geneesmiddelen. Daar zijn dus flinke besparingen te halen. Viagra had bij de eerste synthese door Pfizer een E-factor van 105. Door vervanging van schadelijke oplosmiddelen en terugwinning en hergebruik van stoffen is de E-factor van Viagra teruggebracht tot 8. Dat succes heeft binnen Pfizer in 2001 tot een meer systematische *green chemistry* drive geleid. De E-factor van Lyrica, een medicijn dat gebruikt wordt ter behandeling van zenuwpijn en epilepsie, is teruggebracht van 86 naar 9. Vergelijkbare verbeteringen zijn gemaakt voor het antidepressivum sertraline en celecoxib, een ontstekingsremmer. Volgens Peter Dunn, onderzoeksleider van de *green chemistry* beweging binnen Pfizer, produceert Pfizer alleen al dankzij



Figuur 8: Pfizer werd een warm pleitbezorger voor *green chemistry*.

de verbeteringen in die drie producten een half miljoen ton chemisch afval minder.³³ Dit was de opmaat voor Pfizer's Green Journey, waar voor verschillende producten enorme kostenbesparingen zijn gehaald.

Ook bij de Duitse chemiegigant BASF speelt *green chemistry* een belangrijke rol. BASF introduceerde in 2002 een proces dat gebruik maakt van ionische vloeistoffen op omgevingstemperatuur om zure bijproducten van reactiemengsels te verwijderen. Volgens onderzoeker Pete Licence van de University of Nottingham denkt BASF op een systematische

³² Gujral, S.A., M.A. Sheela, Smriti Khatri, Rajeev K Singla (2012) A Focus & Review on the Advancement of Green Chemistry. Indo Global Journal of Pharmaceutical Sciences, 2012; 2(4): 397-408.

³³ Dunn, P. (2012) The importance of Green Chemistry in Process Research and Development. Chem. Soc. Rev., 2012,41, 1452-1461.

manier na over de samenhang tussen verschillende processen in een chemische fabriek. In een geïntegreerd reactie-systeem kunnen de producten en bijproducten van reacties weer gebruikt worden in naburige faciliteiten, en overtollige energie van het ene proces kan gebruikt worden om de volgende reactie te verwarmen.

Hierbij moet opgemerkt worden dat de ‘vergroening’ van processen altijd een compromis is tussen voordelen, haalbaarheid en kosten. De noodzaak tot grootschalige herstructurering van chemische processen maakt meteen duidelijk waarom de overgang naar *green chemistry* niet altijd even eenvoudig is. Voor de productie van bulkchemicaliën gaat het om enorme volumes, grotendeels geoptimaliseerde processen (met E-factors tussen de 1 en 5) en enorme investeringen. Al is het meestal mogelijk om verder te optimaliseren (tot een E-factor van 0,1), loont dat vaak niet gezien de langetermijninvesteringen die al gedaan zijn. Fabrieken worden soms voor de duur van 30 of 40 jaar gebouwd. Investeringen zijn ook niet zonder risico: veelbelovende uitvindingen kunnen in de praktijk toch niet kostenefficiënt zijn, waarmee de investering verloren gaat. Er zijn ook technische barrières: er zijn niet altijd milieuvriendelijke alternatieven voor toxische oplosmiddelen beschikbaar.

De toepassing van *green chemistry* door de industrie is tot nog toe dus vooral een kwestie van incrementele veranderingen in bestaande processen – de echte groene revolutie, waarbij chemische processen geheel opnieuw worden ontworpen en productiefaciliteiten van de grond af worden opgebouwd, laat nog op zich wachten.

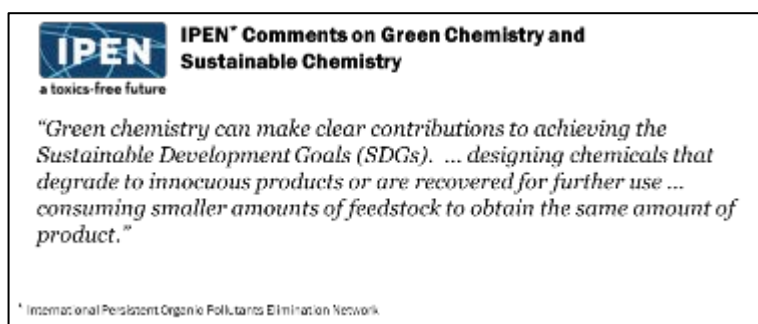
Toegevoegde waarde voor burgers en het maatschappelijk middenveld

Tot slot is de boodschap voor burgers en milieuorganisaties dat *green chemistry* een belangrijke rol inruimt voor milieuoverwegingen in onderzoek en ontwikkeling. Deze benadering van de chemie sluit ook aan bij de belangen van het maatschappelijk middenveld. Milieuorganisaties

zoals het International Persistent Organic Pollutants Elimination Network (IPEN) hebben zich achter de doelstellingen van *green chemistry* geschaard.

Wat opvalt is dat IPEN *green chemistry* steunt, maar tegelijkertijd *sustainable chemistry* bekritiseert, juist omdat *sustainable chemistry* veel minder concreet is, en daarmee volgens IPEN gevoeliger is voor *window dressing*. Zo schrijft IPEN in een commentaar op *green chemistry* voor de Verenigde Naties:

“Sustainable chemistry has only been vaguely defined, leaving the term open to any number of interpretations, including chemistries that do nothing to reduce harm. [...] This] invites labeling all kinds of current chemistries as sustainable chemistry, watering down the term to render it nearly useless and leaving opportunities to “greenwash” chemistries with a term that suggests social or environmental benefits that do not exist.”³⁴



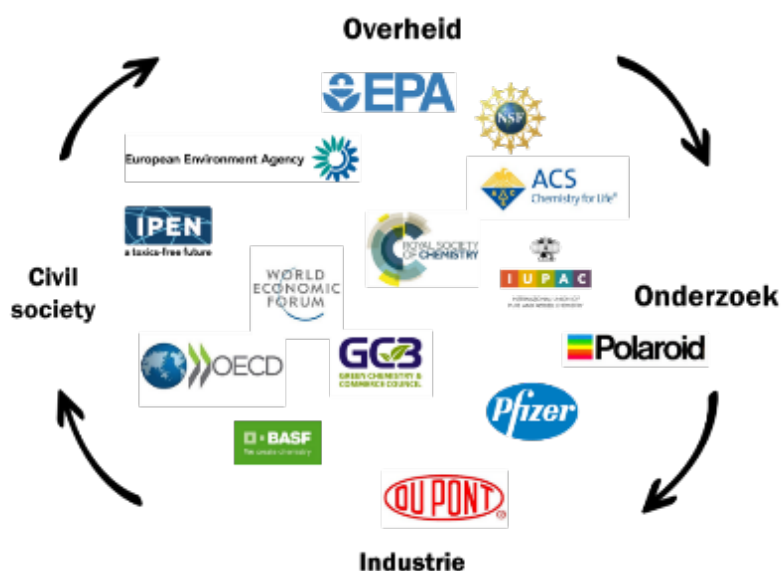
Figuur 9: Ook milieuorganisaties zoals het International Persistent Organic Pollutants Elimination Network (IPEN) ondersteunen *green chemistry*.

³⁴ <http://ipen.org/sites/default/files/documents/IPEN%20Comments%20UNEA%20Green%20Chem%20Sustainable%20Chem%2030%20June%202017.pdf>

Dit citaat onderstreept het belang van de koppeling van een *feelgood philosophy* met concrete resultaten.

Een positieve spiraal

Doordat de toegevoegde waarde van *green chemistry* in de eigen valuta van alle doelgroepen uitgedrukt kan worden, ontstaat een positieve spiraal: de positionering van *green chemistry* als een beleidsdoel leidt tot interesse vanuit onderzoek; het ontstaan van een volwassen onderzoeksveld verleent de beweging geloofwaardigheid, en wekt de interesse van de industrie; concrete voorbeelden binnen de industrie geven de beweging meer zichtbaarheid (zie bijvoorbeeld het commentaar van het World Economic Forum over “4 ways green chemistry is helping make the world a better place”);³⁵ positieve berichtgeving in de media vergroot het vertrouwen in *green chemistry*; dat vertrouwen maakt verdere overheidssteun mogelijk; enzovoort.



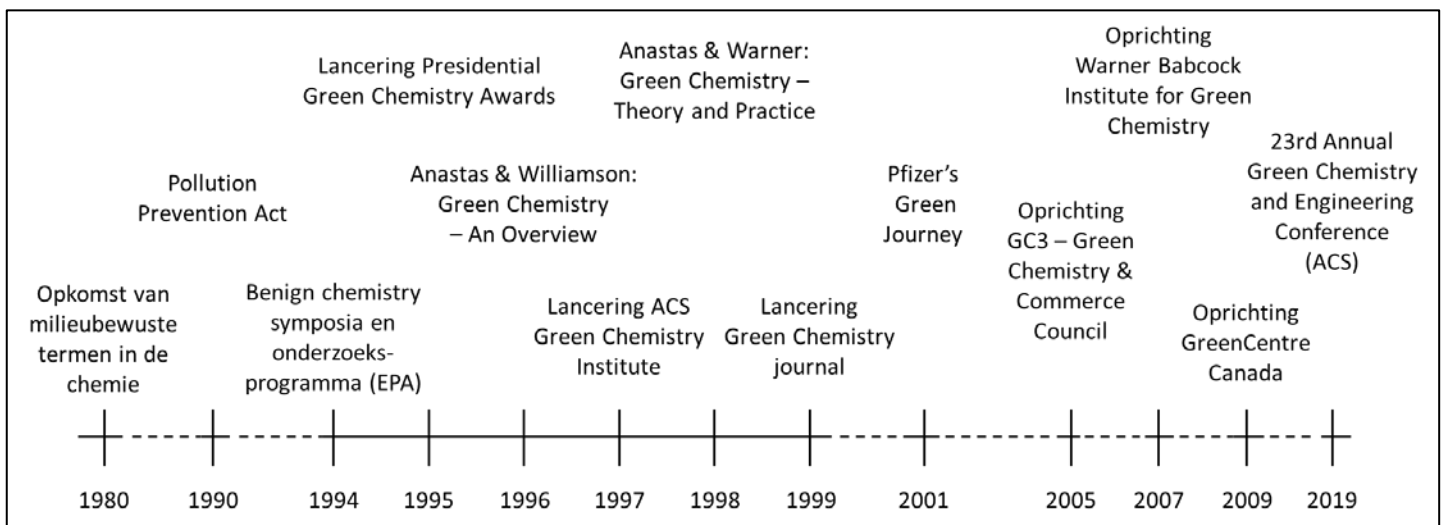
Figuur 10: Als de toegevoegde waarde in de eigen valuta van alle doelgroepen uitgedrukt kan worden, ontstaat een positieve spiraal.

Conclusie

Deze korte verkenning laat zien dat de brede steun voor *green chemistry* vanuit overheid, onderzoek, bedrijfsleven en het maatschappelijk middenveld (zeker in de Verenigde Staten) deels het gevolg is van een toevallige samenloop van omstandigheden. *Green chemistry* had het tij mee, met de gelukkige combinatie van een urgent maatschappelijk probleem (de productie en emissie van gevaarlijk afval door de chemische industrie) en een constructieve oplossing (chemisch ontwerp zo aanpassen dat de productie en emissie van gevaarlijk afval wordt voorkomen). Maar dat juist *green chemistry* gezien wordt als de voorwaarde voor de verwezenlijking van richtinggevende beleidsconcepten zoals duurzaamheid en *circular economy*, komt deels ook door strategische positionering, effectieve alliantievorming en slimme

³⁵ <https://www.weforum.org/agenda/2016/10/4-ways-green-chemistry-is-helping-make-the-world-a-better-place/>

communicatie van de voorvechters van de beweging. De onderstaande tijdbalk geeft een aantal belangrijke mijlpalen in de ontwikkeling van *green chemistry* weer. Daarbij valt op hoe het begrip zich in de loop van de tijd ontwikkeld van *een* mogelijk antwoord op de Pollution Prevention Act in de vroege jaren '90 tot *het* antwoord op de Pollution Prevention Act, zoals het nu door de voorstanders algemeen wordt voorgesteld. Merk op dat *green chemistry* pas jaren na de aanneming van de Pollution Prevention Act het vanzelfsprekende antwoord werd. In de tussenliggende jaren was de term veel minder vanzelfsprekend (het EPA-onderzoeksprogramma in '93-'94 ging bijvoorbeeld over 'benign chemistry'). Ook is het de vraag in hoeverre de principes zich verhouden tot de oorspronkelijke bewoordingen in de Pollution Prevention Act (waarin vooral de algemene ambitie om vervuiling te voorkomen werd verwoord). Het is – in ieder geval in communicatief opzicht – de verdienste van de voorvechters van de beweging dat *green chemistry* (tenminste in de VS) als het antwoord bij uitstek op die uitdagingen wordt gezien.



Figuur 11: Tijdbalk van *green chemistry*.

De combinatie van een *feelgood philosophy* met een praktische aanpak nodigde onderzoekers en ontwikkelaars uit om de ontwerpprincipes van *green chemistry* in de innovatiepraktijk toe te passen. Het definiëren van de toegevoegde waarde in de 'eigen valuta' van de doelgroep gaf vertegenwoordigers van de verschillende belanghebbenden een overtuigende reden om zich achter de beweging te scharen. Institutionele ondersteuning vanuit de EPA, de *American Chemical Society* (ACS) en de *Green Chemistry and Commerce Council* (GC3) verleende de beweging status en geloofwaardigheid. De *Presidential Green Chemistry Challenge* genereerde een continue stroom voorbeelden van concrete toepassingen. En succesverhalen vanuit het bedrijfsleven vergrootten de zichtbaarheid verder. 'Zachte' factoren blijken dus van invloed te zijn geweest op de opkomst van *green chemistry* als beweging binnen de chemie.

Leren van *green chemistry* voor Safe-by-Design?

In hoeverre zouden de elementen uit de bovenstaande analyse kunnen helpen om Safe-by-Design als beleidsbeweging kracht bij te zetten? We willen hier niet suggereren dat *green*

chemistry en Safe-by-Design eenvormige begrippen zijn. Er zijn weliswaar overeenkomsten, maar ook verschillen: beide begrippen hebben een andere ontstaansgeschiedenis, komen voort uit ander overwegingen, en spelen zich in een andere maatschappelijke context af. Daarnaast is het goed denkbaar dat *green chemistry* juist in de Amerikaanse politieke, juridische en commerciële context tot bloei kon komen. De maatregelen die in de VS goed werkten, laten zich mogelijk niet zo eenvoudig vertalen naar de Europese context. Toch zouden de bevindingen uit het onderzoek wellicht aanleiding kunnen geven tot enkele suggesties voor Safe-by-Design als opkomende beleidsbeweging, die we hieronder in vier ‘lessen’ samenvatten:

1. Creëer institutionele ondersteuning.

Institutionele ondersteuning voor *green chemistry* verleende de beweging status en geloofwaardigheid. Voor de verdere verankering van Safe-by-Design zou het eveneens zinvol kunnen zijn om te verkennen of vergelijkbare institutionele steun denkbaar is:

- Zijn er nationale of Europese beleidsmakers die high-level support kunnen bieden? Safe-by-Design speelt een rol in het Programma Bewust Omgaan met Veiligheid van het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat.³⁶ Binnen het NMBP-programma van de Europese Commissie lopen eveneens verschillende projecten rond Safe-by-Design.³⁷
- Zijn er belangrijke voorvechters voor de beweging uit het onderzoeksveld of bedrijfsleven? Te denken valt aan de KNCV, VSNU of KNAW in het geval van onderzoek, of federaties als VNCI of VNO-NCW voor het bedrijfsleven, waar Safe-by-Design al in meer of minder mate onderwerp van gesprek is.
- Is er ondersteunende wetgeving? Zou REACH³⁸ ondersteuning voor Safe-by-Design kunnen bieden, zoals de Pollution Prevention Act beleidsmatige en financiële ondersteuning bood voor *green chemistry*?

2. Combineer een positieve definitie met een praktische aanpak.

Net als *green chemistry* in de jaren ‘90, lijkt Safe-by-Design eveneens het tij mee te hebben: de visie dat producten inherent veilig moeten zijn, kan op brede steun rekenen bij de overheid, het bedrijfsleven, het maatschappelijk middenveld en burgers. Maar – net als *green chemistry* in de jaren ‘90 – is het begrip nog in flux: het is niet voor iedereen direct duidelijk wat ermee bedoeld wordt, of hoe je het aanpakt.

De combinatie van een positieve definitie met twaalf concrete ontwerpprincipes vergemakkelijkte de acceptatie van *green chemistry*: het maakte potentieel geïnteresseerden enthousiast om deel te nemen aan de beweging, en maakte tegelijkertijd duidelijk wat ze moesten doen. Is het mogelijk om de positieve associatie van Safe-by-Design eveneens te verbinden aan een concreet maakperspectief? Is het duidelijk wat onderzoekers en producenten moeten *doen* als ze Safe-by-Design willen bedrijven? Is er een algemene introductie die duidelijk maakt wat het begrip inhoudt, en hoe onderzoekers en ontwikkelaars het principe in hun

³⁶ <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/gezonde-en-veilige-leefomgeving/documenten/rapporten/2017/08/23/programma-bewust-omgaan-met-veiligheid>

³⁷ NMBP staat voor: Nanotechnologies, Advanced Materials, Biotechnology and Advanced Manufacturing and Processing. Een open *call* voor Safe by Design is te vinden op: <http://ec.europa.eu/research/participants/portal/desktop/en/opportunities/h2020/topics/nmbp-15-2019.html>.

³⁸ REACH is een verordening van de Europese Unie die erop is gericht om de gezondheid van mens en milieu beter te beschermen tegen de mogelijke risico's van chemische stoffen. REACH staat voor Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals. Zie: <https://echa.europa.eu/nl/regulations/reach/understanding-reach>.

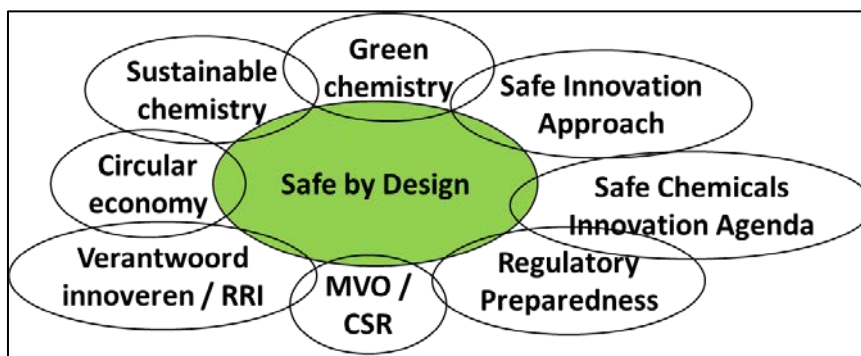
werkzaamheden kunnen integreren, bijvoorbeeld door middel van een overzichtelijke website, handboeken of trainingen? Een snelle zoektocht op het internet leert dat er wel veel materiaal over het onderwerp te vinden is, maar dat materiaal vooral ‘academisch’ van aard is, zoals onderzoeksrapporten, verslagen van Europese projecten zoals NanoReg, en *reviews* in wetenschappelijke tijdschriften. Daaruit wordt voor nieuwkomers niet direct duidelijk wat de term behelst en wat de toegevoegde waarde ervan is. Heldere communicatie kan voor onderzoekers en producenten inzichtelijk maken wat Safe-by-Design concreet betekent in de praktijk van innovatie.

3. Definieer de toegevoegde waarde voor alle doelgroepen.

Green chemistry creëerde een positieve spiraal doordat de boodschap voor alle doelgroepen helder is gedefinieerd in de ‘eigen valuta’. Is de toegevoegde waarde van Safe-by-Design eveneens helder voor alle doelgroepen? Is bijvoorbeeld duidelijk op welke manieren Safe-by-Design tot kostenbesparingen of nieuwe innovatiekansen voor de industrie zou kunnen leiden? Zijn er concrete voorbeelden te noemen van behaalde kostenbesparingen? En hoe zouden onderzoekers gemotiveerd kunnen worden om Safe-by-Design in hun dagelijkse onderzoekspraktijk te integreren? Zijn er *incentives* voor onderzoekers om op een andere manier naar hun onderzoek te kijken (zoals subsidies, publicatiemogelijkheden of nieuwe kansen voor samenwerking)?

4. Bepaal de positie ten opzichte van aanpalende bewegingen.

De veelomvattende definitie van *green chemistry* zorgde ervoor dat het begrip gezien wordt als de *voorwaarde* waaronder de richtinggevendende beleidsconcepten van deze tijd, zoals duurzaamheid en *circular economy*, verwezenlijkt kunnen worden. Heldere positionering kan de specifieke betekenis en reikwijdte van een beleidsbeweging verduidelijken. Moet Safe-by-Design als zelfstandige beweging gepositioneerd worden, of wellicht als aanvulling op bestaande concepten zoals *circular economy*, *green chemistry* of *sustainable chemistry*? Hoe verhoudt Safe-by-Design zich tot aanpalende bewegingen zoals de Safe Innovation Approach, Regulatory Preparedness of de Safe Chemicals Innovation Agenda? Zo zijn diverse principes van *green chemistry* gericht op veiligheid: Safe-by-Design zou bijvoorbeeld gepositioneerd kunnen worden als een essentiële schakel in die overkoepelende beweging, als de concretisering van die drie principes. Er zijn verschillende opties denkbaar, maar de ontstaansgeschiedenis van *green chemistry* laat zien dat een bepaalde mate van continuïteit nodig is om een beleidsbeweging over een lange periode kracht bij te zetten: naast de inhoudelijke betekenis zijn de herkenbaarheid en zichtbaarheid van de term van belang.



Figuur 12: Hoe verhoudt Safe by Design zich tot aanpalende beleidsbewegingen?

Bijlage 1: De 12 principes van *green chemistry*

Hieronder worden de 12 principes van *green chemistry* weergegeven zoals ze op de website van de American Chemical Society vermeld staan (in het Engels),³⁹ gevolgd door een korte bespreking van het principe in het Nederlands.

1. Prevent waste: Design chemical syntheses to prevent waste. Leave no waste to treat or clean up.

Dit principe beoogt chemische processen zo te ontwerpen dat de productie en emissie van chemisch afval wordt verminderd of zelfs geheel voorkomt. Dit principe vertoont overeenkomsten met het *cradle-to-cradle* ontwerpprincipe van William McDonough en Michael Braungart,⁴⁰ en met de notie van *circular economy*. Volgens Berkeley W. Cue Jr. van BWC Pharma Consulting is dit het belangrijkste principe; de andere principes laten vooral zien *hoe* je dit bereikt.⁴¹

2. Maximize atom economy: Design syntheses so that the final product contains the maximum proportion of the starting materials. Waste few or no atoms.

Principe 2 gaat over de *reactanten*. Chemici moeten niet alleen kijken naar de opbrengst van een reactie, maar ook naar de atomeconomie van de reactie: de mate waarin atomen in de reactie in het product eindigen. Het begrip atomeconomie is in 1991 geïntroduceerd door Barry M. Trost.⁴² Een andere veelgebruikte maatstaf is de E-factor, gedefinieerd door Roger Sheldon als het formulegewicht van het product gedeeld door het formulegewicht van alle reactanten.⁴³

3. Design less hazardous chemical syntheses: Design syntheses to use and generate substances with little or no toxicity to either humans or the environment.

Dit principe richt zich op het chemische *ontwerpproces*. David Constable, Directeur van het ACS Green Chemistry Institute, schrijft: *"It's not that adhering to this principle is particularly difficult to do; it's more that chemists are disinterested in doing it. For the synthetic organic chemist, effecting a successful chemical transformation in a new way or with a new molecule or in a new order is what matters. [...] This principle is asking chemists to broaden their definition of what constitutes good science."*⁴⁴ Dit principe introduceert dus een ander perspectief op 'wat ertoe doet' in de chemie. Het geeft aan dat de 'vergroening' van de chemie voor een groot deel afhankelijk is van een cultuuromslag in de chemie.

³⁹ https://www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/what-is-green-chemistry/principles/12-principles-of-green-chemistry.html#articleContent_columnbootstrap_0

⁴⁰ <http://www.cradletocradle.com/>

⁴¹ <https://www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/what-is-green-chemistry/principles/gc-principle-of-the-month-1.html>

⁴² The Atom Economy - A Search for Synthetic Efficiency; Barry M. Trost; *Science* 1991, (254), pp 1471-1477.

⁴³ <http://www.sheldon.nl/roger/efactor.html>

⁴⁴ <https://www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/what-is-green-chemistry/principles/green-chemistry-principle-3.html>

4. Design safer chemicals and products: Design chemical products that are fully effective yet have little or no toxicity.

Dit principe gaat over de *producten*. Het introduceert veiligheid als een ontwerpprincipe, en heeft daarmee raakvlakken met *Safe-by-Design*. Nicholas D. Anastas, medewerker van de EPA, schrijft op de ACS website: *“Minimizing toxicity, while simultaneously maintaining function and efficacy, may be one of the most challenging aspects of designing safer products and processes. Achieving this goal requires an understanding of not only chemistry but also of the principles of toxicology and environmental science. [...] Mastering the art and science of toxicology requires innovative approaches to chemical characterization that state that **hazard is a design flaw and must be addressed at the genesis of molecular design**. The intrinsic hazard of elements and molecules is a fundamental chemical property that must be characterized, evaluated and managed as part of a systems-based strategy for chemical design.”*⁴⁵ Ook hier vraagt de ontwerpbenadering dus om een andere *mindset* van chemici.

5. Use safer solvents and reaction conditions: Avoid using solvents, separation agents, or other auxiliary chemicals. If you must use these chemicals, use safer ones.

Dit principe gaat over de *reagentia / oplosmiddelen*. Het omvat elementen van substitutiedenken en *chemical alternatives*. Dr. Concepción Jiménez-González, directeur Operational Sustainability bij GlaxoSmithKline, schrijft: *“solvents account for about 75% of the cumulative life cycle environmental impacts of a standard batch chemical operation. [...] The object is to choose solvents that make sense chemically, reduce the energy requirements, have the least toxicity, have the fewest life cycle environmental impacts and don't have major safety impacts.”*⁴⁶ Zoals de ervaringen van Peter Dunn binnen Pfizer laten zien, is het vooral deze zoektocht naar minder belastende oplosmiddelen die tot grote kostenbesparingen in industriële productie heeft geleid.

6. Increase energy efficiency: Run chemical reactions at room temperature and pressure whenever possible.

Volgens David Constable is dit een van de vergeten principes van *green chemistry*: *“Energy—like thinking about how to arrange a synthesis to have the fewest number of steps, or use the lowest cost starting materials or any other aspect of interest to the synthetic or process chemist—is just another design parameter. Historically it has not been seen as that, but we can no longer afford to design new molecules in the absence of a detailed and extended consideration of how energy will be used.”*⁴⁷ In het artikel van Sanderson (2011) wordt beknopt uitgelegd hoe het hergebruik van warmte bij BASF tot kostenbesparingen heeft geleid.

⁴⁵ <https://www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/what-is-green-chemistry/principles/gc-principle-of-the-month-4.html>

⁴⁶ <https://www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/what-is-green-chemistry/principles/green-chemistry-principle-5.html>

⁴⁷ <https://www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/what-is-green-chemistry/principles/green-chemistry-principle-6.html>

7. Use renewable feedstocks: Use starting materials (also known as feedstocks) that are renewable rather than depletable. The source of renewable feedstocks is often agricultural products or the wastes of other processes; the source of depletable feedstocks is often fossil fuels (petroleum, natural gas, or coal) or mining operations.

Dit principe verwoordt grotendeels de doelstellingen van de *bio-based economy*, en sluit nauw aan bij wat in Nederland wel wordt verstaan onder 'groene chemie': de overgang van fossiele naar hernieuwbare grondstoffen. Dit principe heeft, evenals principe 1, duidelijke raakvlakken met begrippen als *circular economy*, de *cradle-to-cradle* filosofie van William McDonough en Michael Braungart.

8. Avoid chemical derivatives: Avoid using blocking or protecting groups or any temporary modifications if possible. Derivatives use additional reagents and generate waste.

Voor Peter Dunn, leider van het Green Chemistry programma bij Pfizer, is dit een van de kernprincipes van *green chemistry*. Het heeft in ieder geval geleid tot grote kostenbesparingen in de farmaceutische industrie. Dunn noemt de synthese van semi-synthetische antibiotica als voorbeeld: "*More than 10,000 metric tons of 6-APA is made every year and much of it by the greener enzymatic process so this is a fantastic example of Green Chemistry making a real difference*".⁴⁸

9. Use catalysts, not stoichiometric reagents: Minimize waste by using catalytic reactions. Catalysts are effective in small amounts and can carry out a single reaction many times. They are preferable to stoichiometric reagents, which are used in excess and carry out a reaction only once.

Dit principe omvat feitelijk het hele onderzoeksveld van katalyse. Roger Sheldon, Emeritus Professor Biokatalyse en Organische chemie aan de TU Delft, geeft op de ACS-website aan dat dit principe een paradigmaverandering ten aanzien van het begrip 'efficiëntie' in organische synthese belichaamt: van een focus op chemische opbrengst naar het minimaliseren van afval. Sheldon verwacht dat katalysatoren, en in het bijzonder enzymen, een belangrijke rol zullen spelen in de overgang naar de *bio-based economy*.

10. Design chemicals and products to degrade after use: Design chemical products to break down to innocuous substances after use so that they do not accumulate in the environment.

Dit principe beoogt de mogelijke negatieve gevolgen van end-of-life afbraakproducten al in het ontwerpproces mee te nemen. Milieuchemie en -toxicologie worden daarmee een essentieel onderdeel van chemisch ontwerp. Rich Williams, directeur van Environmental Science & Green Chemistry Consulting, schrijft: "*Biodegradation, hydrolysis, and photolysis can be designed into chemical products. In the same way that mechanistic toxicology knowledge is essential to identify and design out molecular features that are the basis for hazards, an understanding of the mechanisms of degradation and persistence are required to design in chemical features that promote degradation and eliminate features that promote*

⁴⁸ https://www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/what-is-green-chemistry/principles/green-chemistry-principle--8.html#articleContent_headingtext

persistence. [...] Prediction methods that can guide the design of molecular architecture expected to degrade include rules of thumb linking structural features to degradability or persistence, databases of existing knowledge, models that evaluate biodegradability or PBT attributes, and experimental testing. All of these tools can be adapted to individual chemical sectors and specific objectives."

11. Analyze in real time to prevent pollution: Include in-process, real-time monitoring and control during syntheses to minimize or eliminate the formation of byproducts.

Dit principe richt zich op het ontwikkelen van *meet- en analysemethoden* om de vorming van gevaarlijke stoffen gedurende het chemisch ontwerpproces te volgen en beheersen. Douglas Raynie, UD Chemie en Biochemie aan de South Dakota State University, schrijft op de ACS-website: *"Just as we need real-time feedback for driving safety, real-time feedback is essential in proper functioning chemical processes. Most chemists are familiar with laboratory analysis from their undergraduate training. But analysis can also be performed in-line, on-line, or at-line in a chemical plant, a subdiscipline known as process analytical chemistry. Such analysis can detect changes in process temperature or pH prior to a reaction going out of control, poisoning of catalysts can be determined, and other deleterious events can be detected before a major incident occurs."* Dit principe omvat dus elementen van de analytische chemie en procestechnologie. Het probeert effectief gebruik te maken van de beschikbare instrumenten om de mogelijke risico's gedurende de verschillende stadia van technologische ontwikkeling te monitoren: zorg dat je gedurende het productie- en/of innovatieproces zoveel mogelijk te weten komt over de eigenschappen van je reactie en mogelijke onbedoelde effecten of bijproducten.⁴⁹

12. Minimize the potential for accidents: Design chemicals and their physical forms (solid, liquid, or gas) to minimize the potential for chemical accidents including explosions, fires, and releases to the environment.

Dit principe staat bekend als het 'veiligheidsprincipe': het beoogt veiligheid in te bouwen in de keuze voor en het ontwerp van chemische stoffen, maar omvat ook de bredere regelgeving rond gezond en veilig werken (de Occupational Health and Safety-regelgeving). Zoals Shelly Bradley, David Finster en Tom Goodwin op de ACS-website opmerken,⁵⁰ wordt dit principe doorgaans over het hoofd gezien. Onterecht, volgens de auteurs, want aangezien de essentie van *green chemistry* is om de productie van gevaarlijke stoffen te verminderen of voorkomen, is er een intrinsiek verband met veiligheid in het lab en op de werkvloer. Ze schrijven: *"Traditional chemical safety models focus primarily on the control component of that definition. Since the elimination of hazards is the basic tenet of Green Chemistry, this marriage of the ideas of Green Chemistry from both OSHA and EPA should have a synergistic impact on hazard reduction. Combining the forces of these two agencies toward a common goal may lead to conversations and changes that result in safer conditions for workers, a safer environment for the general public, and a safer planet for us all."*

⁴⁹ <http://www.nanoreg2.eu/>

⁵⁰ <https://www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/what-is-green-chemistry/principles/green-chemistry-principle--12.html>

Literatuur

- Abraham, M. & Nguyen, N. (2004) Green engineering: Defining principles – Results from the Sandestin conference. *Environmental Progress* (22):233-236.
- Anastas, P. T. & Warner, J. C. (1998). *Green Chemistry: Theory and Practice*. Oxford University Press: New York.
- Burnett, M.L. (1998): The Pollution Prevention Act of 1990: A Policy Whose Time Has Come or Symbolic Legislation? *Environmental Management* 22(2):213-224.
- Cathcart, C (1990). Green chemistry in the Emerald Isle. *Chem. Ind.* 5: 684-687.
- Dunn, P. (2012). The importance of Green Chemistry in Process Research and Development. *Chem. Soc. Rev.* 41:1452-1461.
- Tundo, P. (2007). Green-Sustainable Chemistry Special Topic Issue – Preface. *Pure and Applied Chemistry*, 79(11): 1831–2100.
- Gujral, S.A., Sheela M.A., Khatri, S. & Singla, R.K. (2012). A Focus & Review on the Advancement of Green Chemistry. *Indo Global Journal of Pharmaceutical Sciences* 2(4): 397-408.
- IPEN (2017). *Comments on Green Chemistry and Sustainable Chemistry in Response to Resolution 2/7 of the UN Environment Assembly*.
- Linthorst, J.A. (2010). An overview: origins and development of green chemistry. *Found. Chem.* 12:55-68.
- Rusyn, I. & Greene, N. (2018). The impact of novel assessment methodologies in toxicology on green chemistry and chemical alternatives. *Toxicological Sciences* 161(2): 276–284.
- Sanderson, K. (2011). It's not easy being green, *Nature* 469: 18-20.
- Sheldon, R.A (2007). The E Factor: fifteen years on. *Green Chemistry* 9:1273-1283.
- Trost, B.M. (1991). The Atom Economy - A Search for Synthetic Efficiency. *Science* 254: 1471-1477.
- US Senate Committee on Environment and Public Works (1990). *Pollution Prevention Act of 1990*. 101st Cong. 2d Sess., S. Rept. 526.