



Marit van Lieshout

Visie op de toekomst van de Nederlandse procesindustrie

en de rol van het lectoraat Procesoptimalisatie en -intensificatie bij de realisatie daarvan

Visie op de toekomst van de Nederlandse procesindustrie

en de rol van het lectoraat Procesoptimalisatie en
-intensificatie bij de realisatie daarvan



Hogeschool Rotterdam Uitgeverij

Colofon

ISBN: 90-5179-968-3

1^e druk, 2017

© Marit Lieshout

Dit boek is een uitgave van Hogeschool Rotterdam Uitgeverij

Postbus 25035

3001 HA Rotterdam

Publicaties zijn te bestellen via

www.hr.nl/onderzoek/publicaties

De copyrights van de afbeeldingen (figuren en foto's) berusten bij Hogeschool Rotterdam en de makers tenzij anders vermeld.

Deze publicatie valt onder een Creative Commons Naamsvermelding-NietCommercieel-GelijkDelen 4.0 Internationaal-licentie.



Visie op de toekomst van de Nederlandse procesindustrie

en de rol van het lectoraat Procesoptimalisatie en -intensificatie bij de realisatie daarvan

Marit Lieshout

Lector Procesoptimalisatie en -intensificatie

Rotterdam, dinsdag 10 oktober 2017

INHOUD

Ten geleide	7
1. Nederlandse procesindustrie	9
1.1. Economisch belang van de procesindustrie	11
1.2. Energie-intensieve industrie	13
1.3. Afhankelijkheid van fossiele brandstoffen	15
1.4. Kapitaalintensief	18
2. Uitdagingen van de procesindustrie	21
2.1. Aantrekkelijk blijven voor investeerders	22
2.2. Reductie van broeikasgasemissies	28
3. Relevante innovaties in de procesindustrie	37
3.1. Verschillende typen emissies	38
3.2. Innovaties om emissies te reduceren	41
4. Lectoraat schakel tussen praktijkgericht onderzoek bij bedrijven en in het onderwijs	49
4.1. Praktijkgericht onderzoek bij Kenniscentrum Duurzame HavenStad	50
4.2. Onderzoeksthema's	52
Dankwoord	61
Literatuurlijst	66

Ten geleide

7

Deze publicatie is geschreven is geschreven voor mensen uit de procesindustrie, in het hoger onderwijs en bij onderzoeksinstituten. Het heeft als doel om u te betrekken bij het onderzoek van het Kenniscentrum Duurzame HavenStad van Hogeschool Rotterdam naar verduurzaming van de procesindustrie en om mijn rol daarbij als lector Procesoptimalisatie en -intensificatie, te verduidelijken. Om de context van dit onderzoek te schetsen, geef ik in het eerste hoofdstuk een beschrijving van de procesindustrie. Hierbij komen aan bod de redenen waarom deze industrie een pijler van de Nederlandse economie genoemd wordt, de mate van energie-intensiviteit en de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen, de daaruit voortvloeiende hoge broeikasgasemissies en de implicaties van het kapitaal-intensieve karakter van de procesindustrie. Uit deze beschrijving blijkt dat de branche van de procesindustrie voor twee uitdagingen staat, die ze moet oppakken om de overlevingskansen op de lange termijn te verbeteren:

1. het sterk verminderen van de broeikasgasemissies
2. het aantrekkelijk blijven voor investeerders

In hoofdstuk 2 licht ik deze twee uitdagingen verder toe en geef ik aan dat deze beide uitdagingen een hoge mate van broeikasgasreductie vereisen. In hoofdstuk 3 bespreek ik de soorten processen die het grootste deel van de broeikasgasemissies veroorzaken. Ik toon aan dat innovaties nodig zijn om het energieverbruik en daarmee samenhangend de emissies te verminderen.

Vervolgens specificeer ik de technologische benaderingen voor het verminderen van de broeikasgasreducties, die het grootste effect hebben. Hierbij introduceer ik de Trias Energetica 2050, die de volgende stappen kent:

- Stap 1: inherent energiezuinigere processen kiezen. Bijvoorbeeld het toepassen van een innovatief reactordesign waarmee de gewenste chemische conversie niet meer in massaoverdracht gelimiteerd is en een zuiver(der) product oplevert, zodat er na de chemische conversie geen of minder scheidingsprocessen nodig zijn. Een ander voorbeeld is het scheiden met membranen in plaats van via destillatie, aangezien scheiden met membranen inherent minder energie nodig heeft.

- Stap 2: zoveel mogelijk energie besparen door het treffen van efficiencymaatregelen en hergebruiken van restwarmte. Bijvoorbeeld door restwarmtestromen weer geschikt te maken voor gebruik in de fabriek, door inzet van (nieuwe generatie) warmtepompen.
- Stap 3: de overblijvende vraag duurzaam invullen (dit bespaart geen energie maar verlaagt wel de broeikasgasemissie).

Ten slotte bespreek ik in hoofdstuk 4 hoe het onderzoek bij het Kenniscentrum Duurzame HavenStad georganiseerd is en aan welke randvoorwaarden het moet voldoen. Ik benoem de drie thema's waar ik me op wil richten: innovatief reactor design, membranen en warmtepompen. Ik geef aan wat ik in gedachten heb voor dat onderzoek en wat de betekenis van het onderzoek van het lectoraat is voor Hogeschool Rotterdam en de procesindustrie. Ik nodig u als professional van de hogeschool, een andere kennisinstelling of het bedrijfsleven uit om deel te nemen aan dit onderzoek. Ook studenten van de hogeschool zijn uiteraard welkom.

Nederlandse procesindustrie



De procesindustrie is een belangrijke pijler van de Nederlandse economie: er werken veel mensen en er wordt veel waarde gecreëerd. Een goed voorbeeld van een gebied met veel procesindustrie is de Rotterdamse haven, met name Pernis, de Botlek en Europoort. De Rotterdamse haven roept tegenstrijdige gevoelens bij me op.

Het gebied fascineert me door de indrukwekkende, machtige machines die onvoorstelbare hoeveelheden chemicaliën produceren voor de wereld, betoverend als 's nachts de lichtjes aangaan. Maar ik kan daar toch nooit echt helemaal van

genieten. Altijd is er de wetenschap van de enorme hoeveelheden emissies die dit complex uitstoot. Vaak is het ook goed te ruiken. Tegelijkertijd is ons luxe leven onmogelijk zonder deze industrie. Ik wil niet terug naar het pre-industriële tijdperk, dus wil ik werken aan het verbeteren van wat we hebben.

In dit boekje geef ik weer hoe ik de procesindustrie in Nederland zie en wat ik met het lectoraat Procesoptimalisatie en -intensificatie in gang wil zetten om Hogeschool Rotterdam meer te betrekken bij de verduurzaming van de procesindustrie. Het is een open uitnodiging aan ieder die het leest, om samen te werken aan de toekomst van deze industrie.

De Nederlandse procesindustrie kent twee uitdagingen: aantrekkelijk blijven voor investeerders en verlagen van de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen. Voor beide uitdagingen is significante reductie van verbruik van fossiele brandstoffen een mogelijke oplossing. Om vermindering van het verbruik van fossiele brandstoffen mogelijk te maken, is een breed scala van technologieën beschikbaar. Het doel van het lectoraat is om een aantal van deze technologieën beter bekend en breder toegepast te krijgen in de procesindustrie.

Om context te geven aan deze doelstelling, beschrijf ik in dit eerste hoofdstuk de procesindustrie meer in detail; hieruit volgen de twee bovengenoemde uitdagingen. In hoofdstuk 2 beschrijf ik de uitdagingen van de procesindustrie gedetailleerder. In hoofdstuk 3 laat ik zien welke innovaties ervoor kunnen zorgen dat deze uitdagingen het hoofd worden geboden. Daaruit afgeleid volgen in hoofdstuk 4 de onderzoeksthema's waar het lectoraat zich mee bezig gaat houden.

Onder procesindustrie versta ik in dit boekje het geheel van energie-intensieve grootschalige industriële productie in Nederland. Als ik cijfers gebruik, heb ik ze (zover beschikbaar) gebaseerd op cijfers over de onderstaande sectoren, omdat deze sectoren over het algemeen gerekend worden tot de procesindustrie:

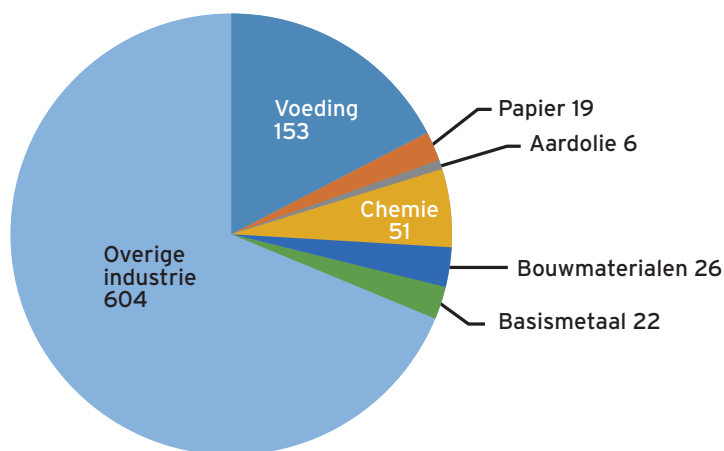
- aardolieraffinaderijen (SBI 19)
- basismetalaalproductie (SBI 24)
- bouwmaterialen industrie (SBI 23)
- chemische industrie (SBI 20)
- papierindustrie (SBI 17)
- voedingsmiddelenindustrie (SBI 10)

1.1 Economisch belang van de procesindustrie

De industrie is een van de grootste sectoren in de Nederlandse economie en is daarmee van groot economisch belang voor Nederland. De Nederlandse industrie biedt 880.000 mensen een baan. Een derde van deze banen¹ (ruim 275 duizend) zit in de procesindustrie. Dit betekent dat drie van de honderd banen in Nederland in de procesindustrie te vinden zijn (CBS, 2017 maart), zie ook figuur 1 en tabel 1. Omdat de procesindustrie grote concentraties in kleine gebieden kent, kunnen deze aantallen regionaal sterk verschillen. In Rotterdam werkt circa 10% van de mensen met een baan in de procesindustrie.

Daarnaast zijn er ook nog mensen die indirect werken voor de procesindustrie; hun baan bestaat dankzij de aanwezigheid van de industrie. Hierbij valt te denken aan een verkoper in een groothandel voor chemicaliën, een adviseur die adviesdiensten levert aan industriële bedrijven of een lector die onderzoek doet naar verduurzaming van de procesindustrie.

Banen (x 1000) in de Nederlandse Industrie (2014)

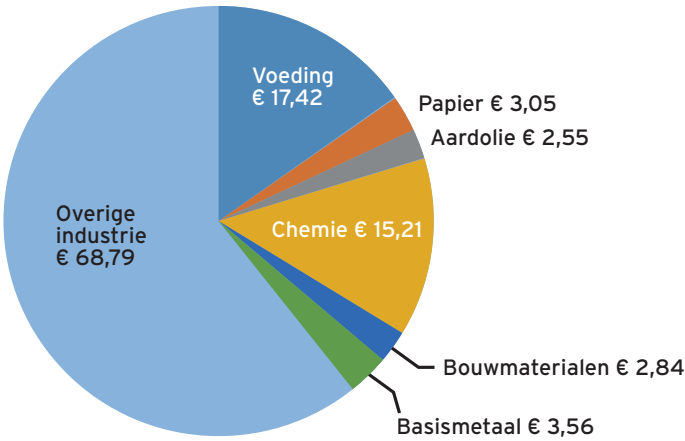


Figuur 1 Werkgelegenheid in de Nederlandse industrie, opgesplitst naar de sectoren van de procesindustrie en overige industrie (referentiejaar 2014)²

Bron: data CBS statline (CBS, 2017 maart), eigen figuur

- 1 Het gaat hier om banen voor werkzame personen, dus werknemers en zelfstandigen samen. Het aantal FTE is iets lager. Het verschil tussen banen en FTE is het grootst in de voedingsmiddelenindustrie, met 20% meer banen dan voltijdsaanstellingen, in de andere sectoren in de procesindustrie ligt dit verschil onder de 10%. In 2014 waren er 276.000 banen in de procesindustrie (SBI-codes 10, 17, 19, 20, 23, 24), in 2015 waren het er 277.000. Het aantal banen varieert, afhankelijk van de conjunctuur.
- 2 Ik gebruik in de plaatjes de cijfers over 2014, omdat dat de meest recente definitief vastgestelde cijfers zijn.

Toegevoegde waarde in miljard euro in de Nederlandse Industrie (2014)



Figuur 2 Toegevoegde waarde in de Nederlandse industrie, opgesplitst naar de sectoren van de procesindustrie en overige industrie (referentiejaar 2014)

Bron: data CBS statline (CBS, 2017 maart), eigen figuur

Het werk in de procesindustrie wordt over het algemeen goed betaald, dat is mogelijk doordat de procesindustrie een hoge toegevoegde waarde realiseert. Toegevoegde waarde is het verschil tussen de marktwaarde van de productie en de daarvoor ingekochte grondstoffen. Het is dus gelijk aan de omzet minus het aankoopbedrag (niet gelijk aan omzet minus de kosten, dit is winst). In 2014 werd 39% van de toegevoegde waarde in de industrie gegenereerd in de procesindustrie. Zie figuur 2 en tabel 1.

Alles bij elkaar geeft het bovenstaande aan dat de procesindustrie een belangrijke bijdrage levert aan de welvaart in Nederland. Er zijn op dit moment geen industrieën in Nederland die deze bijdrage aan de economie kunnen opvangen als de procesindustrie wegvalt.

Tabel 1 Economische cijfers Nederland (referentiejaar 2014)

	Werkzame personen (x 1000)	Toegevoegde waarde (€ mld.)
Nederland	9790 (100%)	663 (100%)
Nederlandse industrie	880 (9%)	113 (17%)
Nederlandse procesindustrie	276 (3%)	45 (7%)

Bron: CBS Statline (CBS, 2017 maart)

Natuurlijk kan er aan de ontwikkeling van een alternatieve economische activiteit gewerkt worden die op termijn de bijdrage van de procesindustrie over zou kunnen nemen. Maar aangezien de producten van de chemische industrie toch nodig zijn en Nederland goed is in het produceren van deze producten, heeft het mijn voorkeur dat Nederland zich concentreert op het toekomstklaar maken van de procesindustrie. Dit toekomstklaar maken van de procesindustrie krijgt wat mij betreft de komende tijd de onverdeelde aandacht van alle betrokkenen. Ook van de scholen die opleiden voor deze branche, zodat dat iedereen die nu begint, kennis heeft van de nieuwe mogelijkheden. Om dit goed te kunnen doen is het wel essentieel dat duidelijk is wat toekomstklaar maken dan inhoudt. Daarom ga ik in de volgende paragrafen in op wat de belangrijkste kenmerken van de procesindustrie zijn: energie-intensief (1.2), in hoge mate afhankelijk van fossiele brandstoffen (1.3) en kapitaalintensief (1.4).

1.2 Energie-intensieve industrie

De procesindustrie wordt een energie-intensieve industrie genoemd. Daarmee wordt bedoeld dat deze industrie veel brandstoffen, zoals aardolie(fracties), aardgas en kolen, en veel warmte en elektriciteit verbruikt. Het totale verbruik van brandstoffen, elektriciteit en warmte in heel Nederland (finaal en niet-energetisch verbruik samen) bedroeg in 2014 2328 PJ (peta=10¹⁵); hiervan werd 1035 PJ door de Nederlandse procesindustrie verbruikt.

Je zou verwachten dat het totale verbruik van brandstoffen, elektriciteit en warmte bepaald wordt door de energievraag van de processen. Het opmerkelijke van de procesindustrie is dat dit maar voor circa de helft van het verbruik opgaat: 580 PJ komt voort uit de energievraag van de processen. De andere 555 PJ wordt ingezet als grondstof. Deze inzet als grondstof vindt grotendeels (553 PJ) plaats in de chemische industrie. Zo wordt er bijvoorbeeld bij de productie van kunststoffen zoals polyethyleen (PE) en polypropyleen (PP) nafta gebruikt als grondstof. Nafta is een aardoliefractie en dus een brandstof, maar in deze toepassing wordt het verbruikt als grondstof om er kunststof van te maken.

Op zich lijkt inzet van brandstoffen als grondstof niet relevant voor inzicht in het energiegebruik, toch is dat wel het geval. Dat komt doordat in een proces een brandstof vaak gedeeltelijk ingezet wordt als grondstof en gedeeltelijk als brandstof (zie de voorbeelden in het kader). Dit betekent overigens dat zolang fossiele brandstoffen als grondstof gebruikt worden, de procesindustrie niet klimaatneutraal kan produceren. Dus om het energieverbruik in de procesindustrie volledig te verduurzamen, zal ook het grondstofgebruik moeten verduurzamen. Op termijn zijn daar zeker mogelijkheden voor, in hoofdstuk 3 zal ik een aantal ontwikkelingen op dat gebied aanstippen.

Twee voorbeelden van een proces waarbij brandstof gedeeltelijk wordt ingezet als grondstof en gedeeltelijk als brandstof

1. In een naftakraker wordt nafta sterk verhit (850-900°C), waardoor het uit elkaar valt in etheen, propeen, buteen, aromaten en kraakgas. Etheen en propeen worden ingezet voor de productie van polyethyleen (PE) en polypropyleen (PP). Ook voor buteen en aromaten zijn tal van toepassingen en uit het kraakgas wordt gedeeltelijk de waterstof verwijderd voor gebruik elders in de fabriek; het overblijvende kraakgas wordt verbrand om de temperatuur van de kraker op peil te houden en voor andere energietoepassingen.
2. Bij de productie van ijzer uit ijzererts worden cokes (ontgaste en daardoor poreuze steenkool) en steenkool gebruikt om het ijzererts te reduceren tot ijzer. Sterk versimpeld komt dat neer op de volgende reacties:
 - $\text{C (cokes)} + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{CO}$
 - $\text{Fe}_3\text{O}_4 \text{ (ijzererts)} + 8 \text{CO} \rightarrow 3 \text{Fe (ijzer)} + 4 \text{CO} + 4 \text{CO}_2$ (overmaat aan CO waardoor uiteindelijk maar de helft wordt gebruikt in de reductiereactie).
 Het hoogovensgas (CO-CO₂ mengsel) dat hierbij vrijkomt, wordt verbrand voor energietoepassingen.

In tabel 2 staan de cijfers van het verbruik in 2014 samengevat. Het verbruik van de brandstoffen elektriciteit en warmte is op twee manieren weergegeven: met en zonder toepassing als grondstof voor de industrie. Inclusief inzet als grondstof is het verbruik van brandstoffen, elektriciteit en warmte in de procesindustrie 49% van het totale verbruik in Nederland. Als alleen naar het energiegebruik gekeken wordt, is het energiegebruik van de procesindustrie 33% van het energiegebruik in heel Nederland. De procesindustrie heet dus met recht een energie-intensieve industrie.

De hoge energie-intensiteit maakt de procesindustrie gevoelig voor prijsverschillen in de tijd of tussen regio's. Daarnaast is de hoge energie-intensiteit een risico vanuit duurzaamheidsoogpunt. Als al de energiedragers die de procesindustrie verbruikt, hernieuwbaar waren (bijvoorbeeld groene grondstoffen, wind, zon, water), zou het vanuit duurzaamheidsperspectief geen probleem zijn dat deze industrie energie-intensief is. Als er sprake is van hoge afhankelijkheid van fossiele brandstoffen, betekent een hoge energie-intensiteit ook een hoge emissie van broeistofkasgassen, dat is wel problematisch.

Tabel 2 Finaal verbruik energiedragers in Nederland (referentiejaar 2014)

Verbruik energiedragers in 2014 (PJ)	Totaal finaal verbruik	Energetisch finaal verbruik	Niet-energetisch finaal verbruik (als grondstof)
Nederland	2.328	1.758	570
Nederlandse industrie	1.185	628	557
Nederlandse procesindustrie	1.135	580	555

Bron: CBS Statline (CBS, 2016)

1.3 Afhankelijkheid van fossiele brandstoffen

Vanwege het zeer energie-intensieve karakter van de procesindustrie is de mate van verduurzaming van de brandstoffen, elektriciteit en warmte die zij verbruikt, een belangrijke maat voor de duurzaamheid van deze industrie. Als we kijken naar de samenstelling van de energiedragers in de procesindustrie, dan zien we dat deze grotendeels van fossiele origine zijn (zie figuur 3). De fossiele brandstoffen

Voorbeelden van de complexe relatie tussen verbruik van fossiele brandstoffen als grondstof en broeikasgasemissies

1. Als aardgas verbruikt wordt als grondstof voor de productie van waterstof, komt daar direct het broeikasgas koolstofdioxide (CO_2) bij vrij, gemiddeld een ton CO_2 voor iedere ton waterstof. Circa de helft van deze CO_2 gaat direct de lucht in, de andere helft wordt afgevangen omdat het zeer schoon is en dus direct ingezet kan worden in de glastuinbouw of bij de productie van frisdranken. Echter in deze toepassingen komt het meestal binnen zeer korte tijd alsnog vrij.
2. Als nafta omgezet wordt in kunststof, dan bepaalt de manier waarop met die kunststofvoorwerpen wordt omgegaan wanneer en in welke mate de koolstof uit de nafta die omgezet is in kunststof, alsnog vrijkomt als het broeikasgas koolstofdioxide. Als de kunststoffen worden verbrand bijvoorbeeld in een afvalenergiecentrale, dan komt de koolstof vrij als CO_2 . Als de kunststoffen na productie volledig gerecycled worden, kan dat betekenen dat het koolstof voor zeer lange tijd vastgelegd is in het kunststof en vindt er al die tijd nauwelijks emissie van CO_2 plaats door het plasticgebruik. Daarvoor is het wel belangrijk dat het aandeel gerecycled plastic als grondstof voor nieuw plastic sterk toeneemt.

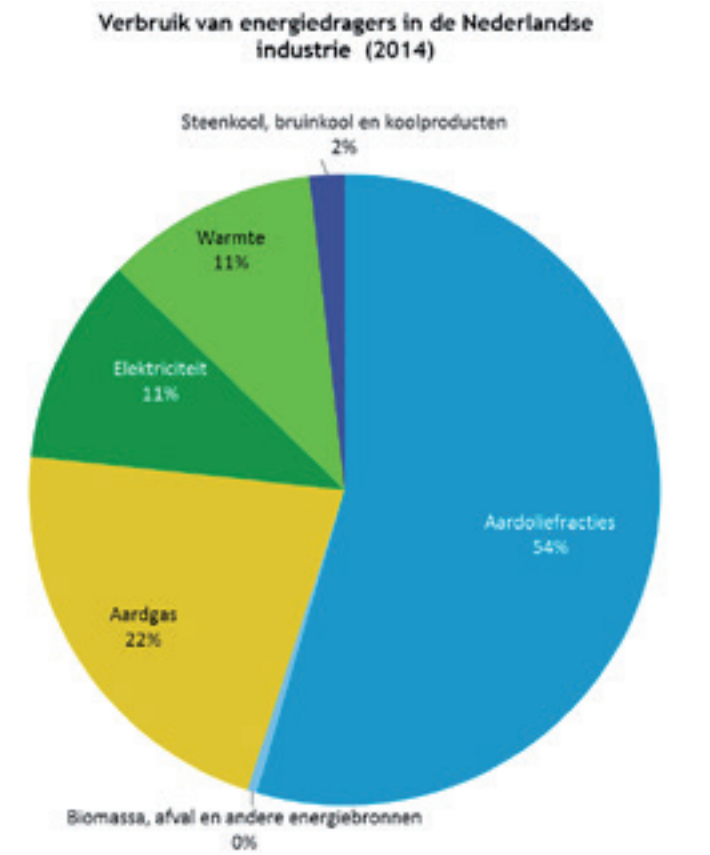
aardoliederivaten (stookolie, kerosine, nafta, lpg, gasolie, dieselolie, lichte stookolie, restgassen uit olie en overige aardolieproducten), aardgas en steenkoolfracties beslaan samen 903 PJ (76%) van het verbruik van energiedragers door de procesindustrie. Hiervan wordt circa 348 PJ verbruikt voor energietoepassingen. Dat betekent dat deze fossiele brandstoffen worden verbrand, waarbij energie en het broeikasgas koolstofdioxide vrijkomen. De resterende 555 PJ wordt verbruikt als grondstof voor de productie van chemicaliën. Dat leidt ook tot broeikasgas-emissies, maar minder direct (zie kader).

Daarnaast bestaat bijna 24% van het verbruik van energiedragers uit verbruik van warmte en elektriciteit. Hiervan is het op basis van deze informatie onduidelijk wat de bron van deze warmte en elektriciteit is.

Aangezien het algemeen bekend is dat de procesindustrie aardgas of restgassen van processen op basis van aardolie of steenkool en een enkele keer stookolie of steenkool verbrandt voor het opwekken van warmte, kunnen we wel zeggen dat de gebruikte warmte een fossiele oorsprong heeft.

Bij elektriciteit ligt de situatie complexer. Een deel van de elektriciteit in Nederland wordt op een duurzame manier opgewekt. Het aandeel van deze zogenoemde hernieuwbare energie in de gemiddelde Nederlandse elektriciteitsmix bedroeg in 2014 9,7% (CBS, 2017 juni). Dus als we daarvan uitgaan, is 2,4% van de energie van de Nederlandse procesindustrie hernieuwbaar. Echter vanuit een economisch oogpunt moeten we in beschouwing nemen dat de Nederlandse overheid van alle hernieuwbare elektriciteitsprojecten de onrendabele top (het prijsverschil tussen reguliere energieproducten en hernieuwbare energieproductie) betaalt, dus is het reëel om het aandeel duurzame energie dat gerealiseerd wordt, toe te rekenen aan degenen die de belastingen opbrengt waarmee de overheid dat mogelijk maakt. Daarmee komt het aandeel duurzame energie in de elektriciteitsmix van de procesindustrie dus onder de 1% uit. Het volledige finale verbruik van elektriciteit en warmte in de procesindustrie komt dus voort uit energieopwekking uit fossiele brandstoffen waarbij niet alleen energie, maar ook broeikasgassen vrijkomen.

Figuur 3 Finaal (energetisch en niet-energetisch) verbruik van energiedragers in de Nederlandse procesindustrie (2014)



Bron: data CBS statline (CBS, 2016), eigen figuur

* De categorie 'overige aardolieproducten' omvat de overige aardolieproducten plus 115 PJ aan niet nader benoemde aardolieproducten die gebruikt zijn als grondstof

Samenvattend kan gezegd worden dat de energiedragers in de procesindustrie uit fossiele brandstoffen bestaan of op basis daarvan geproduceerd zijn. Het hoge verbruik aan energiedragers staat dus gelijk aan een hoog verbruik aan fossiele brandstoffen. Dit heeft de volgende twee consequenties:

1. Als het lukt om het verbruik aan fossiele energiedragers in deze sector sterk terug te dringen, dan heeft dat direct effect op de uitstoot van broeikasgassen in Nederland.

2. Europa heeft relatief weinig voorraden aan fossiele brandstoffen. Hierdoor is de prijs van fossiele brandstofdragers hoger dan in regio's met veel fossiele brandstoffen, zoals het Midden-Oosten of de Verenigde Staten. Dit maakt de concurrentiepositie van Nederlandse bedrijven zwakker.

In hoofdstuk 2 werk ik deze punten verder uit.

1.4 Kapitaalintensieve industrie

De procesindustrie is niet alleen energie-intensief maar ook zeer kapitaalintensief. De installaties zijn duur en de prijs voor het vervangen van gedeeltes van fabrieken loopt snel in de tientallen miljoenen euro's. Omdat het vaak om complexe installaties gaat, moeten er bij wijzigingen meestal meerdere elementen in een lijn vervangen worden. Dit brengt risico's met zich mee voor de bedrijfscontinuïteit en heeft tot gevolg dat het risicoprofiel van de modificatie stijgt. Dat kan prijsopdrijvende gevolgen hebben in de aanbesteding of financiering van de wijzigingen aan de installaties, zeker in geval het reduceren van het risico door de toegenomen complexiteit niet afgewend kan worden door te werken met bewezen technologie en solide toeleveranciers.

Om continue het benodigde kapitaal bijeen te brengen om processen te kunnen vernieuwen, is deze industrie in hoge mate afhankelijk van investeerders zoals aandeelhouders, kapitaalverstrekkers en equity³ providers. Dit gaat in de huidige markt nog wel goed, omdat de procesindustrie van oudsher zeer hoge rendementen levert op de investeringen. Rendementen van 10 tot 15% zijn eerder norm dan uitzondering. Die rendementen worden gerealiseerd door productiviteitstijgingen. Dus, om dergelijke financieringsconstructies ongewijzigd overeind te houden, is het essentieel dat de productiviteit blijft stijgen. In de jaren van 1950 tot 1990 was er sprake van grote groei in de productiviteit door de bouw van nieuwe fabrieken, procesoptimalisatie en het wegnemen van bottlenecks in de productiecapaciteit, waardoor de productiviteit sterk steeg. De laatste twintig tot dertig jaar viel er op die manier echter veel minder productiviteitstijging in Europa te realiseren en hebben multinationals hun waardeinstijging vooral gerealiseerd door bedrijven over te nemen. Resultaat van beide ontwikkelingen is dat er een sterk geconsolideerde markt is ontstaan waarin overnames nauwelijks nog mogelijk zijn en dat het technologisch optimum voor de bestaande installaties bijna is bereikt. Daardoor is innovatie feitelijk de enige optie die nog openligt.

3 Equity wordt vaak vertaald als vermogen. De equity van een bedrijf is de waarde van het bedrijf in termen van land, gebouwen en apparatuur dat in eigendom is van het bedrijf plus de inkomsten die het bedrijf genereert minus de verplichtingen zoals leningen, hypotheek en uitstaande betalingsverplichtingen.

Het verkrijgen van middelen voor het financieren van innovatie van bestaande fabrieken is niet eenvoudig. Investeerder kiezen er vaak voor om te investeren in een nieuwe fabriek in een groeimarkt. Het ombouwen van een bestaande fabriek in een stabiliserende markt zien zij als minder aantrekkelijk. Het is daarom niet vanzelfsprekend dat de markt zelf wel zal zorgen dat de innovatie alsnog plaatsvindt in Europa. Er zijn genoeg economische scenario's denkbaar waarin de markt kiest voor het economisch optimaal exploiteren van de bestaande faciliteiten in Nederland, terwijl er elders nieuwe fabrieken worden gebouwd die op termijn – als de Nederlandse fabrieken niet meer concurrerend zijn – de Nederlandse productie overnemen, waarna de producten per schip naar de Nederlandse havens vervoerd worden. Het behoeft geen uitleg dat dit uitermate ongunstig is voor de Nederlandse economie.

Hoe langer het duurt voordat er geïnvesteerd wordt in energiebesparing, hoe groter het verschil wordt met de nieuwe fabrieken die in het buitenland gebouwd worden. Het is dus urgent om actief bezig te zijn met het ontwikkelen van economische randvoorwaarden waarbinnen het wel loont voor investeerders om in de benodigde innovatie van de Europese industrie te investeren. Hierdoor blijft er toekomstperspectief voor de procesindustrie en het behoud van de inkomsten voor de Nederlandse economie. Om investeringen aantrekkelijk te maken, is er een multidisciplinaire aanpak nodig die gericht is op financiële optimalisatie, technische optimalisatie en optimalisatie van de beleidscontext.

Vanuit mijn werk als lector beperk ik me hier tot de technische optimalisatie, maar financiële en beleidsmatige aspecten zouden eveneens onderdeel moeten zijn van een masterplan dat ertoe leidt dat de procesindustrie voorbereid is op de uitdagingen van de toekomst. Wanneer dit helder voor het voetlicht wordt gebracht, wordt het ook weer mogelijk om investeringen op gang te krijgen.

Uitdagingen voor de procesindustrie



Om de economische waarde te behouden en succesvol in Nederland te kunnen opereren zal de procesindustrie twee grote uitdagingen het hoofd moet bieden: (1) aantrekkelijk blijven voor investeerders en (2) zorgen voor een reductie van de broeikasgasemissies door het verminderen van het verbruik van fossiele brandstoffen.

2.1 Aantrekkelijk blijven voor investeerders

Er zijn meerdere redenen waarom investeerders kritisch kijken naar investeren in de Nederlandse procesindustrie: het verschil in brandstofkosten met andere regio's, de opkomst van andere markten, het fenomeen van *stranded assets* en het overbruggen van (tijdelijke) meerkosten.

Effect van verschil in brandstofkosten tussen regio's

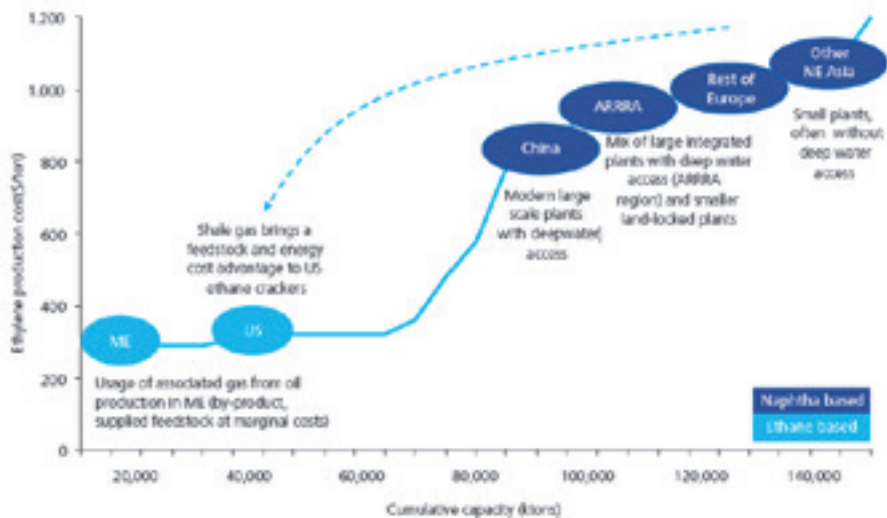
De energie-intensiteit van de procesindustrie maakt deze industrie kwetsbaar voor concurrentie uit regio's waar de brandstoffen, elektriciteit en warmte goedkoper zijn. Voorbeelden van zulke regio's zijn de VS sinds de schaliegasrevolutie en het Midden-Oosten sinds daar een petrochemische industrie wordt opgebouwd op basis van LPG en andere fossiele energiedragers die vrijkomen bij de oliewinning. Het valt te verwachten dat de ontwikkelingen in deze groeiregio's een effect hebben op het marktaandeel van de Nederlandse procesindustrie. Het is onduidelijk hoe groot dit effect zal zijn. Enerzijds doordat de meeste kosteninformatie als concurrentiegevoelige informatie wordt gezien en dus geheim wordt gehouden. Anderzijds doordat de procesindustrie zeer divers is, in die zin dat er zeer veel verschillende producten geproduceerd worden voor verschillende markten; iedere fabriek werkt daarom met andere marktomstandigheden en ook andere grondstoffen.

Door de schaliegasrevolutie is er echter wel veel informatie beschikbaar gekomen over het effect van de schaliegasprijs op de concurrentiepositie van etheen-producenten. Hier kunnen we wel wat uit afleiden voor andere producten. Etheen is wereldwijd de meest geproduceerde chemische verbinding en de productie van etheen is zowel mogelijk op basis van schaliegas (dit gas bevat, naast methaan, ook ethaan) als op basis van nafta. Daarom gebruik ik in dit hoofdstuk de productie van etheen om het effect van regionale prijsverschillen te illustreren. Het effect van deze regionale prijsverschillen is voor de productie van etheen voor de situatie van 2012 in kaart gebracht (zie figuur 4).

De figuur laat zien dat de productiekosten voor etheen (X-as: *ethylene production costs*) in het Midden-Oosten en de VS lager zijn dan in de rest van de wereld. Dit komt doordat de fabrieken in die regio's produceren op basis van lokaal beschikbare goedkope grondstof. Installaties elders in de wereld produceren op basis van nafta en dat heeft een hogere kostprijs dan de ethaan in het Midden-Oosten of de VS. Voorheen behoorden de Amerikaanse producenten, die ethaan gebruiken om etheen te produceren, tot de producenten met de hoogste productiekosten in de wereld (zie gestippelde pijl in figuur 4). Door de schaliegasrevolutie veranderde dit sterk. Ten eerste doordat hierdoor de prijs voor ethaan sterk daalde, met als gevolg dat de grondstof- en energiekosten voor deze

bedrijven daalden. Ten tweede doordat deze revolutie grootschalige investeringen in *upgrades* en uitbreidingen van bestaande fabrieken en de bouw van nieuwe fabrieken uitlokten in de VS. Sinds 2012 is de capaciteit van etheenproductie op basis van schaliegas in de VS sterk toegenomen en deze neemt nog steeds verder toe, naar 34 miljoen ton in 2020 (METI, 2016). Analisten voorzien ook voor het Midden-Oosten, maar met name voor de VS, een sterke uitbreiding van de productiecapaciteit.

Figuur 4 Mondiale kostencurve van de etheenproductie (in 2012)



Bron: addendum bij Visie 2030-2050 van de VNCI (Deloitte, 2013)

Het kostenverschil zoals weergegeven voor etheenproductie in figuur 4 is een momentopname en niet van toepassing op de hele procesindustrie (zie kader). Bovendien is sinds 2014 het kostenverschil veel kleiner geworden door de daling van de olieprijs van boven de 100 naar rond de 50 Amerikaanse dollars per barrel (Platts, 2016). Desondanks illustreert figuur 4 wel waarom nog steeds veel meer capaciteit bijgebouwd wordt in de VS dan in Europa. Hierdoor heeft de Europese procesindustrie te maken met concurrentie van een groeiende productiecapaciteit gebaseerd op goedkopere energie (en grondstoffen) dan waar de Europese procesindustrie toegang toe heeft.

Geldigheid van kostencurve voor etheenproductie zoals weergegeven in figuur 4

De situatie als geschetst in figuur 4 is niet algemeen geldig. De belangrijkste beperkingen zijn de volgende:

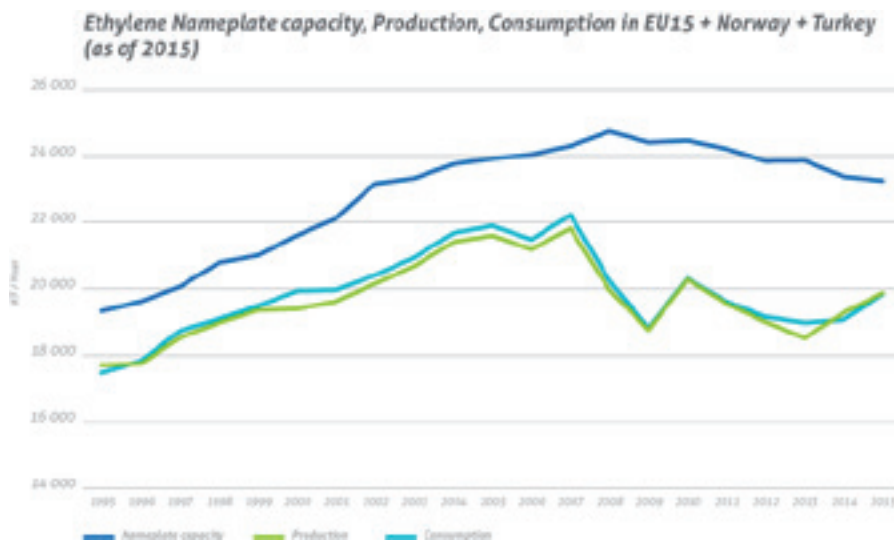
1. In 2012 waren de prijsverschillen tussen nafta-gebaseerde productie en (schalie)gasgebaseerde productie maximaal, doordat de prijs van het schaliegas zeer laag was (2\$/Mbtu) en de aardolieprijs hoog (100-120 \$/barrel). Inmiddels zijn deze prijzen naar elkaar toe bewogen. Hiermee zijn op dit moment de verschillen kleiner dan weergegeven in figuur 4. Echter het internationale energie-agentschap (IEA) voorziet dat dit prijsverschil binnen een aantal jaar weer sterk zal toenemen (IEA, 2016). Hoe meer aardolie de wereld verbruikt (*current policy scenario*), hoe sneller de aardolieprijs weer stijgt. Het prijsverschil blijft het kleinst als het verbruik van fossiele energiedragers wordt beperkt tot de maximale hoeveelheid waarbij temperatuurstijging beperkt blijft tot tot 1,5°C (450 Scenario). Minder vraag naar aardolie zal immers minder druk zetten op de prijs. Echter om dit kleine prijsverschil te realiseren, is productie van etheen op basis van productiemethodes met een relatief lage *carbon footprint* waarschijnlijker dan productie op basis van fossiele brandstoffen.
2. Niet alle chemicaliën kunnen even gemakkelijk uit schaliegas en/of LPG geproduceerd worden als etheen. Bij sommige belangrijke chemische producten als bijvoorbeeld benzeen, tolueen en xyleen vergt het een aantal extra productiestappen en is daarmee productie op basis van schaliegas, zeker bij de huidige lage olieprijs, minder gunstig vergeleken met productie uit nafta.

Effect van opkomende markten

Naast de concurrentie uit regio's met lagere prijzen, is er sprake van toenemende concurrentie vanuit regio's waar de markt voor de chemische producten nog sterk groeit en er dus geïnvesteerd wordt in nieuwe, grote en efficiënte fabrieken. Zo wordt ook een sterke groei van de productiecapaciteit in China voorzien. De wereldwijde toename van productiecapaciteit is echt een verandering ten opzichte van de situatie in de vorige eeuw: tot eind vorige eeuw betekende groei van de wereldwijde vraag naar etheen automatisch een groei van de afzetmarkt voor Europese fabrieken. In die tijd groeide de productiecapaciteit in Europa dan ook sterk. Inmiddels is er op andere continenten productiecapaciteit gebouwd, terwijl er een afvlakking van de Europese productiecapaciteit heeft plaatsgevonden. Figuur 5 illustreert deze situatie aan de hand van de ontwikkeling van productie- en capaciteitscijfers voor etheenproductie. Het is dus de vraag of de Europese

industrie haar huidige productiecapaciteit kan handhaven of dat de toegenomen productiecapaciteit in China, het Midden-Oosten en de VS ten koste zal gaan van de Europese productiecapaciteit. Het antwoord op deze vraag is afhankelijk van de ontwikkelingen in de vraag naar chemische producten. Als de vraag sterker stijgt dan het aanbod, dan is het mogelijk dat Europa haar capaciteit behoudt. In welke mate de vraag naar chemische producten groeit, is sterk afhankelijk van de groei van de economie in met name Azië (METI, 2016). Een andere mogelijkheid is dat de vraag verschuift naar producten met een hogere toegevoegde waarde, bijvoorbeeld meer duurzame producten. Deze laatste manier om de vraag naar Europese producten te laten toenemen, werkt alleen als de Europese fabrieken in staat zijn om zich op dit punt van hun concurrenten te onderscheiden.

Figuur 5 Ontwikkeling van de Europese productiecapaciteit van etheen



Bron: Petrochemicals Europe (Petrochemicals Europe, 2017)

Het is niet vanzelfsprekend dat de Europese fabrieken in het algemeen en de Nederlandse fabrieken in het bijzonder duurzamer kunnen produceren dan hun concurrenten in het buitenland. Al was het maar omdat de nieuw gebouwde fabrieken buiten Europa zeer efficiënt zijn. Het internationale Energy Agency (IEA) voorspelt dat de mondiale autonome groei van energie-efficiency door de bouw van nieuwe fabrieken met gemiddeld 2% per jaar stijgt tussen nu en 2030 en met ruim 1% per jaar tussen 2030 en 2050; dus in totaal 50% toename van energie-efficiency tussen 2015 en 2050 (IEA, 2016). Dit betekent dat de Nederlandse industrie in steeds sterkere mate te maken krijgt met steeds modernere en vooral efficiëntere fabrieken in andere regio's die voor dezelfde mondiale markt produceren.

Stranded assets

Een ander aspect dat maakt dat investeerders kritisch staan ten opzichte van investeringen in de procesindustrie, betreft het fenomeen van de *stranded assets*. *Stranded assets* zijn investeringen die heel snel in waarde gedaald zijn. Vaak wordt deze term ook gebruikt om aan te geven dat er een risico is dat investeringen heel snel kunnen gaan dalen. De laatste tijd wordt deze term ook vaak gebruikt in relatie met de olievoorraden van oliemaatschappijen. Tot voor kort werd de waarde van een oliemaatschappij voor een groot deel bepaald door de aangetoonde reserves aan olie waar zij exploratievergunningen voor had. De in Parijs voorgenomen beperking van klimaatverandering tot een temperatuurstijging van maximaal 2 oC en bij voorkeur tot 1,5 oC heeft als gevolg dat het grootste deel van deze voorraden helemaal niet verbruikt kan worden. Investeerders die toch volledige olievoorraden meenemen in hun taxatie van de waarde van een oliemaatschappij, lopen dus het reële risico dat de waarde van hun investering zakt doordat overheden verbruik van deze voorraden verbieden of dat beleggers en consumenten niet accepteren dat deze voorraden aangesproken worden. De olie heeft op dat moment geen waarde meer. In die gevallen is er sprake van een *stranded asset*. Vanwege het risico dat dat gebeurt, vinden veel investeerders nu al dat oliereserves overgewaardeerd zijn met als gevolg dat zij er niet meer in willen investeren.

Deze trend beïnvloedt niet alleen de aantrekkelijkheid van oliemaatschappijen voor investeerders, maar de aantrekkelijkheid van alle bedrijven die sterk afhankelijk zijn van fossiele brandstoffen. Aangezien investeerders hun risico willen spreiden en daarom toch in zoveel mogelijk sectoren actief willen blijven, betekent dit ook dat bedrijven die laten zien dat ze wel gestructureerd werken aan vermindering van hun afhankelijkheid van fossiele brandstoffen, aantrekkelijker worden voor investeerders.

Aanvankelijk bestond er geen methodiek die bedrijven in staat stelde om op een transparante en objectieve manier hun afhankelijkheid van fossiele brandstoffen en de manier waarop ze dit reduceren, te rapporteren aan investeerders. Dit vergt een hogere mate van transparantie dan gebruikelijk was en een systematiek van het presenteren van de emissiecijfers die vergelijkbaar is met die van andere bedrijven. Een van de eerste organisaties die insprong op deze nieuwe informatiebehoefte bij producenten en investeerders, is het Carbon Disclosure Project (CDP). Het CDP is een niet-overheidsgebonden organisatie die zich sterk maakt voor vermindering van broeikasgasemissies door nadruk te leggen op rapportage (*disclosure*) van de hoeveelheid broeikasgasemissies in CO₂ eq (*carbon*). Hun filosofie is: eerst meten, dan managen en vervolgens reduceren.

Het CDP is in 2000 begonnen met de rapportage van cijfers van alleen klimaatverandering (*carbon disclosure*), maar richt zich inmiddels ook op

bosbeheer en watergebruik. Ondanks het feit dat het CDP deze informatie deelt met beleidsmakers en academici, rapporteren wereldwijd meer dan 5600 bedrijven aan het CDP, waaronder meer dan 80% van de 500 grootste bedrijven in de wereld. Zij vullen de zeer gedetailleerde vragenlijsten van het CDP in, terwijl deze bedrijven erom bekend staan liefst zo weinig mogelijk data te delen. Ze geven de informatie omdat het CDP inmiddels ook 827 investeerders vertegenwoordigt, die samen 100 biljoen Amerikaanse dollars (US\$ 100.000.000.000.000) aan investeringsfondsen beheren. Inmiddels zijn er meer organisaties zoals het CDP, bijvoorbeeld Carbon Tracker.

De investeerders die zich bij organisaties zoals CDP en Carbon Tracker aansluiten, doen dat om toegang te krijgen tot de informatie over de bedrijven die al aangesloten zijn en om druk uit te oefenen op de bedrijven die nog niet zover zijn, om ook meer aandacht te hebben voor hun *carbon footprint* (zie kader). Door lid te worden, steunen zij het CDP en diens doelstelling van systematische verlaging van de *carbon footprint* van het internationale bedrijfsleven. Dit betekent dat niet alleen overheden willen dat bedrijven hun broeikasgasemissies verminderen, maar ook investeerders.

Overbrugging (tijdelijke) meerkosten

Ondanks het groeiend aantal investeerders dat afhankelijkheid van fossiele brandstoffen en de daarmee samenhangende broeikasgasemissies als een zwaarwegend risico beoordeelt, wil dit niet zeggen dat de klimaatdoelstellingen kunnen worden gehaald zonder bijsturing van overheidswege. Daarvoor moet er op nog grotere schaal en nog veel verdergaand ontwikkeld worden. Dat kan niet meteen kostenconcurrerend of zelfs kostenneutraal plaatsvinden; daarom is het belangrijk dat de overheid zorgt voor een duidelijk kader waarmee het voor bedrijven duidelijk is wat de beleidsdoelstellingen zijn en er ook voor zorgt dat belemmeringen in wet- en regelgeving en business cases opgeheven worden. In de huidige markt worden producten van processen die geen of nauwelijks broeikasgassen uitstoten niet of nauwelijks beter gewaardeerd dan dezelfde producten die geproduceerd zijn in processen die veel broeikasgassen uitstoten. Om te zorgen dat het bedrijfsleven zelf kiest voor de productieprocessen met een lage uitstoot van broeikasgassen is het belangrijk dat de overheid dit marktfalen corrigeert door deze meerkosten te compenseren. Hetzij door subsidies op de gewenste technologie, hetzij door belasting van broeikasgasemissies. Op die manier kan er een nieuwe markt voor duurzamere producten en processen ontstaan en wordt het voor bedrijven en investeerders interessant om nieuwe processen met een significant lagere *carbon footprint* te ontwikkelen en toe te passen zonder dat deze innovatie direct ook een kostenreductie moet brengen.

Carbon footprint

Met de *carbon footprint* van een individu, evenement, organisatie of product wordt de totale hoeveelheid broeikasgasemissies uitgedrukt in CO₂ eq (carbondioxide in het Engels) bedoeld, die door dat individu, evenement, organisatie of product wordt veroorzaakt (uitgaande van GW100-data). In dit katern gaat het om de *carbon footprint* van de producten die bedrijven maken of van de investeringen die investeerders doen. In dat laatste geval kun je denken aan de *carbon footprint* van een aandeel in een fabriek.

2.2 Reductie van broeikasgasemissies

Om te kunnen begrijpen voor welke uitdaging Nederland staat, helpt het als we meer begrijpen van klimaatverandering en de urgentie van de beperking daarvan, en als we meer inzicht hebben in het beleid dat is ontwikkeld en de technische maatregelen die al zijn getroffen. Pas dan kunnen we inzichtelijk maken welke alternatieve technologieën houvast kunnen bieden en welke resultaten toepassing van alternatieve technologieën op het gebied van emissiereductie kunnen opleveren.

Beperken van de klimaatverandering

Er is de laatste jaren steeds meer kennis ontwikkeld over klimaatverandering, vooral als gevolg van de toegenomen belangstelling voor dit onderwerp. Uit die informatie rijst het beeld dat de mens door het vergroten van de hoeveelheid broeikasgassen (zie kader voor uitleg van dit begrip) in de atmosfeer, een belangrijke rol speelt in de wereldwijde klimaatverandering. Klimaatverandering is niet langer een theoretisch concept; wereldwijd treden grote verstoringen op in weerpatronen die in voorgaande decennia constant en voorspelbaar waren. De hogere gemiddelde temperatuur zorgt voor meer energie in de atmosfeer, waardoor in de ene regio meer en heftigere stormen voorkomen terwijl andere regio's te maken krijgen met langere en intensievere perioden van droogte. Bovendien heeft het potentieel een nog veel gevaarlijker effect: door de veranderingen in weerpatronen haperen de mechanismen die wereldwijd het klimaat bepalen, zoals de warme en koude golfstroom. Dit heeft niet alleen effect op het klimaat maar ook op de levensvatbaarheid van allerlei ecosystemen in het water en op het land (National Geographic, 2017; Solomon, 2017).

Het beperken van een temperatuurstijging tot minder dan 2°C (Verdrag van Parijs) betekent dat de concentratie van broeikasgassen in de lucht wereldwijd niet verder mag stijgen dan tot maximaal 450 ppm in CO₂ eq. Het wereldwijde gemiddelde ligt nu al boven de 400 ppm.

Broeikasgassen vormen een groep van gasen waarvan methaan (CH₄), lachgas (N₂O) en koolstofdioxide (CO₂) de meest bekende en meest voorkomende zijn. Ook veel andere verbindingen horen erbij, met name fluorkoolwaterstoffen en chloorkoolwaterstoffen. Het IPPC houdt bij welke verbindingen welk effect op het broeikasgaseffect hebben (Myhre, 2013). Om de effecten van de emissies van verschillende soorten broeikasgassen met elkaar te kunnen vergelijken, worden deze emissies vaak omgerekend⁴ naar de concentratie CO₂ die een vergelijkbaar effect op het klimaat heeft, ook wel CO₂-equivalenten genoemd. De hoeveelheden die geëmitteerd worden naar of opgenomen worden uit de atmosfeer, worden uitgedrukt in de massa-eenheden CO₂ eq., bijvoorbeeld ton CO₂ eq. Heel vaak wordt het 'eq' weggelaten in de media, waardoor het beeld kan ontstaan dat het alleen over CO₂ gaat.

De mate van effect van broeikasgassen op het klimaat wordt bepaald door de concentratie van broeikasgassen in de atmosfeer. De broeikasgasconcentratie in de atmosfeer wordt uitgedrukt in ppm (*parts per million*), dat wil zeggen: het aantal deeltjes van deze stoffen per miljoen deeltjes in de atmosfeer. De mate waarin de broeikasgasconcentratie stijgt, hangt af van de hoeveelheden broeikasgassen die geëmitteerd worden naar de atmosfeer en de hoeveelheid broeikasgassen die opgenomen worden uit de atmosfeer. Zowel de mens als de natuur kan voor significante emissies naar de atmosfeer zorgen. De natuur neemt echter ook grote hoeveelheden CO₂ op (zo nemen bossen grote hoeveelheden CO₂ op omdat bomen CO₂ nodig hebben om te groeien). Ook mensen kunnen CO₂ uit de atmosfeer halen en opslaan in de ondergrond of gebruiken als grondstof voor de productie van andere chemische verbindingen. Dit afvangen van CO₂ voor opslag of productie wordt respectievelijk CCS en CCU⁵ genoemd. De technologie die nodig is voor CCS als de meeste CCU toepassingen is bewezen op industriële schaal, maar de toepassing is nog zeer beperkt.

Er zijn heel veel verschillende mechanismen waardoor broeikasgassen vrijkomen in de atmosfeer. Gelukkig zijn er ook heel veel verschillende mechanismen waardoor

4 We gebruiken voor de omrekening GW100-waarden zoals bepaald door het IPPC (Myhre, 2013).

5 CCU staat voor carbon capture and usage en CCS voor carbon capture and storage. Met carbon capture wordt bedoeld op het afvangen van koolstofdioxide uit processen en/of rookgassen van verbrandingsinstallaties om ze vervolgens ergens te gebruiken (usage) of om op te slaan diep onder de grond, bijvoorbeeld in een leeg gasveld (storage). In het geval van CCS wordt de koolstofdioxide in principe voor eeuwig opgeslagen, in het geval van CCU varieert dat sterk met de toepassing: bij gebruik voor de productie van methanol als benzinevervanger of ter bevordering van plantengroei in een kas, komt >95% vrijwel direct weer in de atmosfeer terecht; in het geval van toepassing in de productie van alternatief beton kan het voor eeuwen vastgelegd worden.

broeikasgassen opgenomen kunnen worden uit de atmosfeer. Alles bij elkaar is het een heel complex systeem, wat het moeilijk maakt om te bepalen hoeveel CO₂ nog geëmitteerd kan worden tot 2050, voordat de wereldwijde concentratie van broeikasgassen de 450 CO₂ eq bereikt, en dus hoeveel reductie van CO₂-emissie er moet plaatsvinden om daar niet overheen te gaan. De complexiteit van het systeem verklaart waarom in een recent artikel in het tijdschrift *Nature* de berekeningen van de hoeveelheid broeikasgassen die wereldwijd nog geëmitteerd kunnen worden voordat het onvermijdelijk is dat de gemiddelde wereldwijde broeikasgasconcentratie de 450 ppm bereikt, uiteen lopen van 150 tot 1050 Gton CO₂ tussen nu en 2050 (Figueres, 2017). De huidige wereldwijde CO₂-emissie wordt geschat op 41 Gton per jaar (vergeleken met 27 Gton in 1990) (Figueres, 2017).

De brede range van 150 tot 1050 Gton CO₂ heeft als gevolg dat er veel verschillende scenario's mogelijk zijn.

In het meest ongunstige geval is een emissie van slechts 150 Gton voldoende om te zorgen dat de wereldwijde broeikasgasconcentratie vóór 2050 de 450 ppm bereikt en de temperatuur stijgt al in deze eeuw met 1,5 oC. Als dit scenario werkelijkheid wordt, betekent dat dat de vereiste reductie van de CO₂-emissie nooit op tijd kan worden gerealiseerd en de stijging van 1,5 oC vóór 2050 onvermijdelijk is.

In het meest gunstige geval is de emissieruimte 1050 Gton voordat de wereldwijde broeikasgasconcentratie de 450 ppm bereikt. Dat zou betekenen dat als nu een start wordt gemaakt met de reductie tot bijna nul emissie in 2050, de temperatuurstijging kan worden beperkt tot 1,5°C.

De schrijvers van het artikel in *Nature* beargumenteren dat ieder jaar dat er wordt gewacht met reduceren, het behalen van de doelstelling iedere keer een stukje moeilijker wordt. De auteurs van het artikel gaan overigens uit van een gemiddelde emissieruimte van maximaal 600 Gton en niet van 1050 Gton, gezien de onzekerheid van de cijfers. Dat maakt de noodzaak om per direct maatregelen te nemen om onze emissies in de komende twintig jaar naar nul te reduceren, alleen maar groter.

De Nederlandse CO₂-emissie en de doelstellingen

Op wereldschaal neemt de emissie van broeikasgassen nog steeds toe. In Nederland is er al sinds eind jaren '90 van de vorige eeuw sprake van een lichte daling. Volgens het *Compendium van de Leefomgeving* (een jaarlijkse publicatie van de overheid over de stand van zaken betreffende het milieu) was in 2015 de totale broeikasgasemissie van Nederland 12% lager dan in 1990.

Niettemin is de totale broeikasgasemissie in Nederland met 188 miljoen ton nog aanzienlijk. Hiervan komt 48 miljoen ton vrij in de procesindustrie. Het finale verbruik van energiedragers voor energietoepassingen in de industrie leidt tot een emissie van broeikasgassen van 36 miljoen ton CO₂ eq⁶; dit betreft de emissies die vrijkomen bij de energievoorziening van de processen (verhitten, drogen, koelen, motoraandrijving, etc.). Daarnaast komt nog circa 7 miljoen ton broeikasgas vrij door procesemissies bij het kraken van nafta en de productie van ammoniak en cement (VEMW, 2017) en 5 miljoen ton bij productie van ijzer uit ijzererts in de hoogovens (Croezen, 2016) (zie kader). Verder is er een aantal kleinere stromen van andere broeikasgassen zoals methaan, lachgas, cfk's en hcfc's. Daar komen nog de emissies bij die vrijkomen in de energiesector bij opwekking van de 126 PJ aan elektriciteit, die de procesindustrie inkoopt voor haar processen (zie hoofdstuk 1). Uitgaande van de gemiddelde Nederlandse elektriciteitsmix (dus inclusief 9,7% hernieuwbare energie), zorgt dit voor 17,6 miljoen ton aan indirecte broeikasgasemissies door de energiesector om te voldoen aan de vraag uit de proces-technologie. Het totaal van de procesindustrie komt daarmee op 66 miljoen ton broeikasgassen per jaar, een derde van de emissie in heel Nederland. Dus als Nederland de reductiedoelstellingen wil halen, dan zal ook de procesindustrie haar emissies moeten reduceren.

Procesemissies waarbij broeikasgas vrijkomt

- CO₂-productie bij het reformen van methaan tot waterstof ($\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 4\text{H}_2$), zoals plaatsvindt bij de ammoniakproductie.
- Waterstofproductie tijdens raffinage. Dit betreft een aantal reacties waarvan kraken een belangrijke is ($\text{C}_n\text{H}_{2n+2} \rightarrow n\text{C}_2\text{H}_4 + \text{H}_2$). Bij dit proces wordt ook koolstof afgezet aan de randen in de vorm van teerachtige substanties, die worden periodiek weggebrand ($\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$).
- Decarbonitatie van mergel tijdens de productie van Portland-cement ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$).
- De reductie van erts met (steen)kool ($\text{Fe}_3\text{O}_4 + 4\text{CO} \rightarrow 3\text{Fe} + 4\text{CO}_2$).

De doelstellingen die in Nederland genoemd worden in het kader van klimaatbeleid zijn: 40% reductie van broeikasgasemissies in 2030 ten opzichte van het emissieniveau in het referentiejaar 1990 en 80-95% broeikasgasemissies in 2050 ten opzichte van het referentiejaar 1990. Dat betekent dus dat voor 40% reductie in 2030 de emissies in de komende 15 jaar nog met 28% moeten afnemen ten

opzichte van 1990. Deze doelstellingen gelden ook voor de procesindustrie. Of dat veel is, hangt af van de moeite die gedaan moet worden om die doelstelling te realiseren. Daarom wil ik hier kijken naar wat er in de voorgaande jaren in de procesindustrie aan beleid is gevoerd om broeikasgasemissies te verminderen en wat daarvan het resultaat was.

Beleid tot nu toe om emissies te reduceren

De procesindustrie kent een lange traditie van verbeterprogramma's voor energie-efficiency. Vanaf het moment dat de fabrieken gebouwd zijn (grotendeels tussen 1965 en 1975) hebben er *de-bottlenecking operations* plaatsgevonden, waardoor niet alleen de capaciteit van de installaties sterk uitgebreid is, maar ook de efficiëntie van de productie verhoogd is. Vanaf de jaren '80 kwam daar de aandacht voor het beperken van emissies van zware metalen en emissies die tot verzuring (zure regen) of aantasting van de ozonlaag kunnen leiden. In dat kader was er ook aandacht voor energiebesparing.

In 1989 is het eerste vrijwillige convenant met de industrie afgesloten: MJA1 (1989-2000), die later voortgezet is in de MJA2 en het huidige MJA3 (voor de kleine en middelgrote verbruikers) en de MEE-programma's voor de grootverbruikers. De verbeteringen in energie-efficiency-die binnen deze programma's uitgevoerd worden, hebben een terugverdientijd van vijf jaar of minder en bestaan uit bewezen technologie, zoals efficiëntere afstelling van elektromotoren van pompen en aandrijfsystemen, isolatie van installaties en leidingen, en gebruik van restwarmte en bijproducten. Sinds een paar jaar bestaat de mogelijkheid om niet alleen op het eigen terrein maar ook door samenwerking in de keten energiebesparing te realiseren. Vrij recent hebben overheden en bedrijfsleven de mogelijkheid opgepakt om gecoördineerd samenwerking op te zetten op regionale schaal en zo tot afval- en energiebesparing te komen. Hierbij kan gedacht worden aan het gebruik van de reststroom of het bijproduct van de ene fabriek als grondstof voor de andere fabriek en/of de restwarmte van de ene fabriek als warmtebron voor de andere fabriek. In de Rotterdamse regio worden deze initiatieven uitgevoerd onder de vlag van het plan Willems (Kernteam Versterking Industriecluster, 2016; Hoogcarspel, 2017).

Met het opstellen van het Kyoto-protocol in 1997 kwam naast het verbeteren van de energie-efficiency (relatieve doelstelling) ook het absoluut beperken van de broeikasgasemissies in beeld (6% reductie in 2012 t.o.v. de emissies in 1990). In het kader van de Kopenhagen-bijeenkomst werd het streven van toenmalig milieuminister Jacqueline Kramer: 20, 20, 20 in 2020. Dit stond voor 20% energie-efficiencyverbetering, 20% reductie van broeikasgasemissie en 20% hernieuwbare energieverbruik. Echter deze absolute emissiereductiedoelstellingen zijn niet vertaald naar absolute reductiedoelstellingen voor de procesindustrie.

Voor de industrie bleef daarom energie-efficiency zoals nagestreefd in de MJA en MEE-programma's leidend. Totdat er in 2005 op initiatief van de Europese Unie het Europese systeem voor emissiehandel (afgekort EU ETS, van het Engelse European Union Emissions Trading System) in werking werd gesteld voor de grootste energieverbruikers in de EU. Dit is een 'cap and trade'-systeem, wat betekent dat de maximale uitstoot van broeikasgassen wordt bepaald en vervolgens de rechten om uit te stoten verdeeld worden over de industrie. Als een bedrijf minder broeikasgassen uitstoot dan dat het toegekend heeft gekregen, kan het die rechten verkopen aan een ander bedrijf dat meer uitstoot dan waarvoor het de rechten heeft. Dit zorgt er in theorie voor dat zonder al te veel overheidsinterventie, de goedkoopste methode tot het terugdringen van broeikasgasemissies wordt gevonden. Dit is het eerste beleidsinstrument dat een absolute emissiereductie en niet alleen een efficiencydoelstelling aan de grootverbruikers in de Nederlandse industrie oplegt. Echter in praktijk blijkt de manier waarop de rechten toegekend worden te ruimhartig te zijn, waardoor de prijzen van de CO₂-rechten heel laag zijn en er een minimaal effect van uitgaat.

Welke maatregelen zijn effectief?

Alles bij elkaar blijkt het effect van het nationale en Europese milieubeleid op de broeikasgasemissies in de procesindustrie beperkt te zijn, al is er wel een verschil tussen sectoren.

Figuur 6 Broeikasgasemissies naar de lucht door verschillende industriële sectoren (1990-2015)



Bron: emissiegegevens via www.clo.nl, omgerekend naar broeikasgasequivalenten op basis van GW100-waarden (Myhre, 2013), eigen figuur

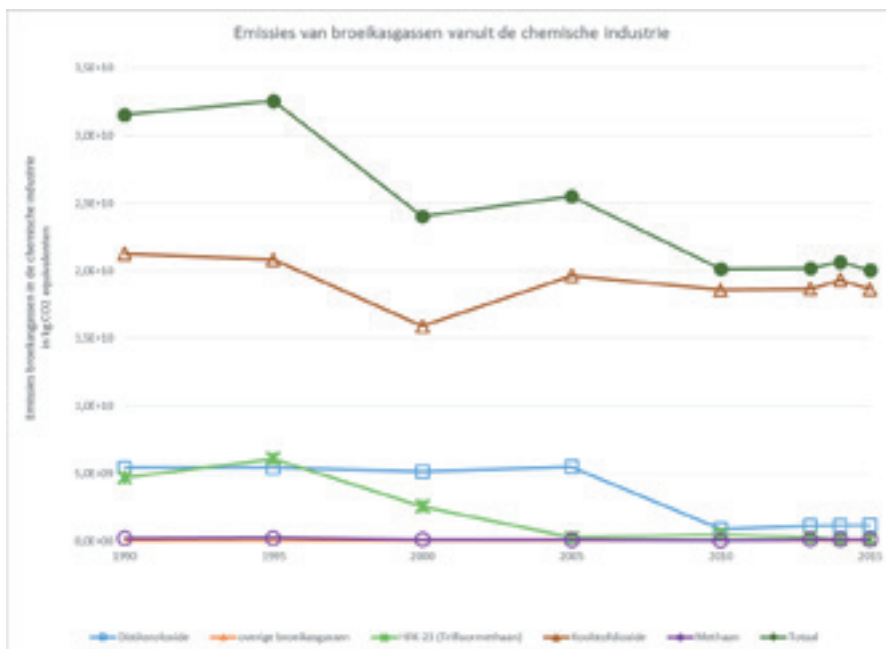
In figuur 6 is de minimale reductie van broeikasgassen weergegeven die nodig is om te voldoen aan het scenario van een temperatuurstijging met 2°C, samen met de totale broeikasgasemissies van de verschillende sectoren in de procesindustrie tussen 1990 en 2015. Nadere bestudering van de cijfers laat zien dat de broeikasgasemissies van de *raffinaderijen* gestaag toenamen, vervolgens afnamen ten tijde van de economische crisis en nu met de toenemende economische activiteit weer sterk zijn toegenomen. Bij de *overige industrie* waren de emissies tussen 1990 en 2010 vrij constant, om daarna met het doorzetten van de economische crisis ook sterk af te nemen en nu weer toe te nemen. De broeikasgasemissies van de chemische industrie bewogen aanvankelijk tussen de emissies van de andere twee sectoren, om van 1995 tot 2010 sterk af te nemen en daarna min of meer constant te worden. Hierdoor liggen deze emissies onder de (groen gestippelde) lijn van het 2°C-scenario. Ze zijn nu al met 37% afgenomen ten opzichte van 1990. Dit is opvallend, omdat in deze periode de productie in de chemische industrie niet is afgenomen.

Met uitzondering van de chemische industrie is de procesindustrie er dus niet in geslaagd de reductiedoelstellingen voor broeikasgasemissies te realiseren, ondanks de aandacht voor energie-efficiency. Aan de ene kant is dat logisch. Ten eerste is in een aantal sectoren de productie in dezelfde periode gestegen. Dus de energie-efficiency is wel toegenomen, maar onvoldoende om de toegenomen productie te compenseren. Ten tweede is er sprake van verminderde meerwaarde van procesverbeteringen. Bij het verbeteren van een technologie zijn in het begin nog grote verbeteringen te bewerkstelligen, maar als na een bepaalde tijd het theoretisch optimum benaderd wordt, is een verbetering steeds moeilijker te realiseren. Is het theoretisch optimum bereikt, dan is het oneindig moeilijk om überhaupt nog een verbetering te realiseren.

Aan de andere kant zijn de broeikasgasemissies in de chemische industrie in dezelfde periode wel sterk afgenomen. Om te snappen waarom dit het geval is, is een meer gedetailleerde blik op de emissies van de chemische industrie nodig; dan blijkt dat de emissie van koolstofdioxide licht afneemt, vergelijkbaar met het gemiddelde van de andere sectoren. Daar staat tegenover dat de emissies van de twee specifieke broeikasgassen trifluormethaan en lachgas sterk zijn afgenomen in een relatief korte periode. De emissies van trifluormethaan zijn met 98% verminderd, grotendeels tussen 1995 en 2000, als gevolg van het Europees verbod op het gebruik van HCFC 22 (trifluormethaan was daar een bijproduct van). De emissies van lachgas (N_2O) zijn tussen 2005 en 2010 met 78% afgenomen door een innovatie in de productie van salpeterzuur.

Figuur 7 geeft de emissies naar type broeikasgas.

Figuur 7 Opsplitsing van broeikasgasemissies door de Nederlandse chemische industrie naar type broeikasgas (1990-2015)



De emissiegegevens laten zien dat (1) jarenlange structurele aandacht voor incrementele verbetering van de energie-efficiency in geen enkele sector in de procesindustrie de benodigde emissiereductie heeft opgeleverd en (2) benodigde procesaanpassingen niet haalbaar zijn binnen de randvoorwaarde van bewezen technologie. Kijkend naar de ambitieuze doelstelling voor een broeikasgasemissiereductie van 40% in 2030 ten opzichte van het referentiejaar 1990 en 80-95% in 2050 ten opzichte van 1990, is het duidelijk dat er structurele veranderingen nodig zijn. Er zijn innovaties nodig. Het goede nieuws is dat die er ook zijn.

Relevante innovaties in de procesindustrie



Het verminderen van het verbruik van fossiele brandstoffen in de procesindustrie vormt een potentieel succesvolle strategie om de procesindustrie te behouden voor de Nederlandse economie. Ingrijpende veranderingen zijn daarvoor nodig. Om te kunnen bepalen welke technologieën er potentieel een significant effect hebben op de emissie, geef ik een overzicht van alle processen in de Nederlandse procesindustrie en de broeikasgasemissies die daarbij vrijkomen.

3.1 Verschillende typen emissies

Ik maak in deze bespreking onderscheid in procesemissies en emissies als gevolg van het verstoken van brandstoffen voor opwekking van warmte en kracht.

Procesemissies

Jaarlijks komt er circa 12 miljoen ton CO₂ eq aan procesemissies vrij: 7 miljoen ton broeikasgas door procesemissies bij het kraken van nafta en de productie van ammoniak en cement (VEMW, 2017) en 5 miljoen ton broeikasgas bij de productie van ijzer uit ijzererts in de hoogovens (Croezen, 2016). Verder is er een aantal kleinere stromen van andere broeikasgassen, zoals methaan, lachgas, cfk's en hcfk's. De emissies door cementproductie stoppen binnenkort in Nederland, omdat de laatste Nederlandse cementoven in 2018 gesloten wordt. Daarmee behoren de productie van ijzererts met steenkool, de productie van olefinen en aromaten door het kraken van nafta en stoomreforming van aardgas tot waterstof tot de processen die de grootste broeikasgasemissies veroorzaken. Er wordt veel onderzoek gedaan naar alternatieve processen.

Emissie uit energieopwekking per type proces

Naast de procesemissie is er nog de emissie als gevolg van het opwekken van energie die nodig is voor de verschillende processen in de procesindustrie. In totaal zijn deze emissies een factor 3 tot 4 groter dan de procesemissies. Helaas zijn de cijfers over energiegebruik per proces alleen beschikbaar als expertinschattingen en zelfs die inschattingen zijn op zijn best versnipperd beschikbaar. In tabel 3 is een overzicht gemaakt van de beschikbare inschattingen van energiegebruik naar toepassingen. Vanwege het bijna volledige gebruik van fossiele brandstoffen is er een directe relatie tussen energiegebruik en broeikasgasemissie, dus er is een directe relatie tussen energiegebruik en broeikasgasemissies.

Naar schatting heeft gemiddeld 25% van de energie die gebruikt wordt in de procesindustrie (~169 PJ), de vorm van elektriciteit, zie tabel 3. Dit is twee keer zoveel als beschreven in hoofdstuk 2, doordat naast de elektriciteit die bedrijven inkopen, ze zelf ongeveer een even grote hoeveelheid opwekken in eigen warmtekracht- en gascentrales. Ook al varieert dit aandeel sterk tussen sectoren, het laat zien dat het aandeel elektriciteit in iedere industrie nog een significant deel van het totale energiegebruik uitmaakt en dat verduurzaming van de elektriciteitsopwekking ook voor de industrie een belangrijk aspect is bij het verminderen van de broeikasgasemissies.

Echter het grootste deel van de emissies uit energiegebruik komt vrij bij het opwekken van warmte. Het gaat hierbij om een hele range aan verschillende toepassingen van warmte: chemische conversies (waaronder bakken), smelten, destilleren en drogen.

Tabel 3 Inschatting van het energiegebruik naar toepassing per industriesector

Finale energievraag per subsector (excl. niet-energetisch verbruik) in 2015		Elektriciteit	Warmte	Warmte				
				Chemische conversie, smelten, bakken	Destillatie	Drogen	Warm water*	Onbekend e/o overige processen
20 Chemie	279	~39	~240	>110	~85	>15	?	~30
19 Aardolie	132	~21	~111	?	65	?	?	~46
24 Basismetaleen	51	~18	~33	~33				0
25 Metaalproducten	21	9	12	12				0
10-12 Voedings- en genotmiddelen	85	30	55	7	2,5	26	16	4
17 Papier- en karton	23	5	18	2		14	1	1
23 Bouwmaterialen	24	5	19	19				0
Overige industrie (incl. 22 RKI)	57	42	15	?	?	?	?	15
Totaal	672	~169	~503	>183	~153	>55	>17	~30

Bron: opgesteld door Harry Croezen op basis van gegevens CBS statline en verschillende publicaties (Alders, 2013, 2014; Spoelstra, 2005; Willemsen, 2011; IF, 2016)

Energiebehoefte bij chemische conversies (waaronder bakken) en smelten

De energie voor chemische conversies (waaronder bakken) en smelten beslaat meer dan een kwart van het energiegebruik van de industrie (> 183 PJ). Chemische reacties zijn in te delen in exotherme reacties en endotherme reacties. Bij *exotherme reacties* komt energie vrij, die hebben dus geen continue toevoer van energie nodig. Bij *endotherme reacties* moet aan de grondstoffen continue een specifieke hoeveelheid energie worden toegevoegd om de reactie te laten plaatsvinden; de benodigde hoeveelheid wordt bepaald door de reactie-enthalpie. De reactie-enthalpie van de reacties varieert sterk. Sommige reacties hebben weinig warmte nodig en kunnen opgestart worden met een lage temperatuur warmte van 50 of 60 °C. Voor andere reacties is een hele hoge temperatuur warmte nodig. De benodigde energie kan zowel als elektriciteit als als warmte toegevoegd worden. Vervolgens de meeste energie wordt als warmte toegevoegd aan de grondstoffen. De hoeveelheid energie die nodig is, is afhankelijk van het type reactie.

Het kraken van nafta is een voorbeeld van een endotherme reactie, die plaatsvindt na verhitting van de grondstoffen tot 850-900 °C. Er is dus een hoge temperatuur

warmte nodig om deze reactie plaats te laten vinden. Ook buiten de chemische industrie vinden er volop chemische conversies plaats, zoals de reductie van ijzererts in de hoogoven, waarbij de ijzererts tot 2200-2400 °C verhit wordt om met de reductor (steenkool) te reageren tot ijzer. Bakken is strikt genomen ook een chemische conversie. Bekende voorbeelden uit de voedingsindustrie zijn het bakken van friet of brood, en in de bouwmaterialensector worden veel keramische materialen (zoals bakstenen) gebakken. Ook voor deze processen geldt dat ze alleen plaatsvinden bij de juiste combinatie van grondstoffen en omgevingstemperatuur. Een voorbeeld van elektriciteit als manier om de benodigde energie voor een chemische conversie toe te voegen, is de elektrolyse van een zoutoplossing tot waterstof, zuurstof en natronloogoplossing.

Een andere toepassing van warmte die sterk bepaald wordt door materiaaleigenschappen, is de warmte voor het smelten van materialen, met name van metalen. Het is dus niet verwonderlijk dat er in de sector van basismetaleen- en metaalproducten veel warmte nodig is voor het smelten. De smelttemperatuur van metalen is afhankelijk van het soort metaal. Deze temperaturen variëren sterk tussen verschillende soorten materialen, zo zijn de smelttemperaturen van de veel gebruikte metalen aluminium, ijzer en tin respectievelijk: 660, 1535 en 232°C.

Formeel gesproken is er in de glasindustrie geen sprake van smelten, want glas is een amorf materiaal. Er is daarom geen sprake van een smeltpunt, maar van een glastemperatuur. De glastemperatuur is de temperatuur waarbij een amorphe vaste stof, zoals een glas of polymeer, bros wordt bij koeling of zacht bij verwarming. In tegenstelling tot metalen is deze temperatuur niet een vaste, maar afhankelijk van de snelheid waarmee de warmte toegevoegd wordt. Niettemin treedt er na het toevoegen van een specifieke hoeveelheid hoge temperatuur warmte een verandering op in materiaaleigenschappen.

Energiebehoefte bij destilleren en drogen

Ook processen als destilleren en drogen vergen veel warmte (~153 PJ). Drogen vergt meestal een vrij lage temperatuurwarmte tot 120-140 °C.

Destillatie als manier om vloeistoffen van elkaar te scheiden, vindt plaats bij een wijde range aan temperaturen. Omdat het in principe toepasbaar is op alle mengsels van vloeistoffen die van elkaar gescheiden moeten worden, komt destillatie veel voor in de procesindustrie.

Aardolieraffinage is een voorbeeld van een industriesector waarin destillatie heel belangrijk is. Aardolie bestaat uit een groot aantal verschillende stoffen. Al deze stoffen bestaan voor een groot deel uit koolstof- en waterstofatomen. Daarom wordt dit type stoffen ook wel aangeduid als koolwaterstoffen. Benzine, diesel,

nafta en kerosine zijn voorbeelden van groepen koolwaterstoffen die voorkomen in aardolie. Benzine is dus niet één molecuul maar een groep van moleculen die in dezelfde temperatuurrange verdampen. De twee processtappen waarmee iedere aardolieraffinaderij begint, zijn: atmosferische destillatie en vacuümdestillatie. Vervolgens zijn er stappen om de fracties die vrijkomen bij de deze destillatiestappen verder te bewerken, waarna weer een destillatiestap kan volgen om de reactieproducten van elkaar te scheiden.

Ook in de voedingsmiddelenindustrie komt destillatie veel voor, bijvoorbeeld voor het terugwinnen van oplosmiddelen uit een vetzuurstroom. In de voedingsmiddelenindustrie wordt veel gewerkt met vetzuren. Zo wordt de slogan 'Smelt in je mond, niet in je hand', waargemaakt door de vetzuren met een lager smeltpunt te scheiden van de rest door ze op te lossen in een oplosmiddel. Op die manier blijft er een nauw gedefinieerd vetzuurmengsel over, dat ervoor zorgt dat bijvoorbeeld chocolade alleen smelt in de mond en niet in de hand. Om zo efficiënt mogelijk gebruik te kunnen maken van de oplosmiddelen, worden ze na gebruik door middel van destillatie weer gescheiden van de vetzuren.

Het principe achter destillatie is dat iedere stof een eigen verdampingstemperatuur heeft. Dus als een mengsel van twee of meerdere stoffen wordt verwarmd, zal in principe eerst de ene en daarna pas de andere stof verdampen, bij het bereiken van de juiste temperatuur. In de praktijk is de situatie iets complexer, maar voor nu voldoet deze uitleg. Het werkingsprincipe van destillatie is dus verdamping. Verdamping is een energie-intensief proces. Een vloeistof moet tot een heel hoge temperatuur worden verwarmd of tot een heel hoge druk gecomprimeerd, wil er voor deze bewerkingen evenveel energie nodig zijn als voor verdamping. Daarom is destillatie ook een zeer energie-intensieve manier om vloeistoffen van elkaar te scheiden.

3.2 Innovaties om emissies te reduceren

De hoeveelheid energie die nodig is voor het krijgen van een reactie, wordt sterk bepaald door de fysische eigenschappen van de betreffende materialen. Daarom is het niet mogelijk om dezelfde reactie met een beetje minder warmte te laten verkrijgen. Als er onvoldoende warmte wordt toegevoegd om de reactie te krijgen of de faseovergang mogelijk te maken, gebeurt er gewoon niets. De manier om de emissie te verminderen is dus niet het toevoegen van minder warmte, er zijn innovaties voor nodig. Om die innovaties systematisch in kaart te brengen, introduceer ik hier de Trias Energetica 2050.

In 1979 zijn de oorspronkelijke Trias Energetica⁷ geformuleerd, als een manier om systematisch energiezuinige gebouwen te ontwerpen. Deze Trias Energetica schrijven voor om te besparen, duurzame energie te gebruiken en de fossiele energie die nog nodig is, zo efficiënt mogelijk te gebruiken. In het licht van de uitdaging waar de branche nu voor staat, leidt deze aanpak tot onvoldoende innovatie en onvoldoende broeikasgasreductie. Inmiddels zijn er daarom verdergaande concepten ontwikkeld om tot een lagere *carbon footprint* te komen. Ik noem deze inzichten de Trias Energetica 2050, bestaand uit de volgende stappen:

Stap 1. Kiezen voor processen die leiden tot inherent lagere *carbon footprint*, door:

- a. overgaan op biobased of circulaire productie, dat wil zeggen: op basis van grondstoffen met een inherent lagere *carbon footprint*
- b. doorvoeren van procesintensificatie, dat wil zeggen: optimaliseren van de effectiviteit van de chemische conversie
- c. veranderen van het scheidingsprincipe: met membranen in plaats van via destillatie

Stap 2. Restwarmte inzetten, in combinatie met warmtepompen, dat wil zeggen: de energiebehoefte verder reduceren door de beschikbare energie zo efficiënt mogelijk te gebruiken

Stap 3. De resterende vraag duurzaam opwekken met hernieuwbare energie of emissies van fossiele brandstoffen gebaseerde energieopwekking afvangen met CCS of CCU

Stap 1. Kiezen voor processen die leiden tot een inherent lagere carbon footprint

Om te kunnen kiezen voor inherent zuinige concepten moet eerst bekend zijn wat de bepalende factoren zijn voor de *carbon footprint* van het product. Er zijn enkele aspecten die kunnen leiden tot een inherent lagere *carbon footprint*. Welke relevant zijn voor het betreffende proces, is afhankelijk van de productiemethodes in het hele proces: van alle grondstoffen tot aan wat er met het product gebeurt als het niet langer gebruikt wordt. De manier om dit te bepalen, is het opstellen van een zogenoemde levenscyclusanalyse, oftewel LCA.

Keuzes die leiden tot een inherent lagere *carbon footprint* zijn:

- a. overgaan op biobased of circulaire productie, dat wil zeggen: op basis van grondstoffen met een inherent lagere carbon footprint

⁷

Aanvankelijk bekend als Trias Energetica, zijn de Trias Energetica ontwikkeld door de studiegroep StadsOntwerp en Milieu (SOM-1) aan de TU Delft onder leiding van Kees Duijvestein en gepubliceerd in het tijdschrift BOUW.

- b. doorvoeren van procesintensificatie, dat wil zeggen: optimaliseren van de effectiviteit van de chemische conversie
- c. veranderen van het scheidingsprincipe: met membranen in plaats van via destillatie

a. *Biobased of circulair produceren*

In het geval dat de grondstoffen grote invloed hebben de *carbon footprint*, kan de hoeveelheid energie (en grondstof) die nodig is om de benodigde producten te produceren, sterk verminderen door het proces opnieuw te ontwerpen op basis van andere grondstoffen. De twee mogelijkheden die de *carbon footprint* sterk kunnen reduceren, zijn biobased en circulaire productie.

Bij biobased produceren wordt biomassa of uit biomassa afgeleide verbindingen als grondstof gebruikt, in plaats van de huidige fossiele brandstoffen. Een voorbeeld van biobased etheenproductie is dehydratatie van bio-ethanol tot etheen. Deze route voor het produceren van etheen kent een circa 90% lagere carbon footprint (Croezen, 2012). Een voorbeeld van een innovatieve biobased productieroute is de productie van epichloorhydrine uit glycerol in plaats van uit fosgeen.

Bij circulair produceren wordt ingezameld restmateriaal en afval weer als grondstof gebruikt voor nieuwe producten. Een voorbeeld van circulaire productie is het terug laten reageren van bestaand polyester (een kunststof zoals gebruikt in textiel en PET-flessen) tot de twee grondstoffen: tereftaalzuur (1,4-benzeendicarbonzuur) en ethyleenglycol (1,2-ethaandiol). Vervolgens kunnen deze grondstoffen in de reguliere PET-fabriek gebruikt worden om nieuw PET mee te produceren. Dit proces heeft al op kleine schaal haar werking bewezen en wordt op dit moment door Ioniqa in samenwerking met Indorama opgeschaald tot een proces van 10.000 ton per jaar.

Deze voorbeelden laten zien dat overschakelen op een andere grondstof niet iets is wat een bedrijf op een achternamiddag doet. Naast de benodigde aanpassingen aan de hele logistieke keten, vergt het vaak ontwikkeling van een techniek (zoals in het geval van de PET-recycling) of een geheel andere fabriek (zoals in het geval van productie van etheen uit bio-ethanol).

b. *Procesintensificatie*

Als lector Procesoptimalisatie en -intensificatie leg ik de nadruk op het verlagen van de *carbon footprint* van het proces zonder noodzakelijkerwijs van grondstof te veranderen. Als de grondstoffen niet veranderen, is de volgende stap om broeikasgasemissie te verminderen, het controleren van de effectiviteit waarmee de gewenste chemische conversie optreedt. Mogelijke aanduidingen dat deze conversie niet optimaal verloopt, zijn: veel bijproducten, een lange reactietijd en grote recyclestromen.

Het eerste aspect dat in het kader van procesintensificatie wordt gecontroleerd, zijn de reactiemechanismen. Er kunnen mechanismen in de chemische conversie zelf zitten, die zorgen voor een beperking in de reactiesnelheid. Een voorbeeld van een reactie waarvan de snelheid inherent is beperkt, is een evenwichtsreactie waarbij het gewenste product terug gaat reageren naar de grondstoffen zodra een bepaalde concentratie is bereikt. In het geval van een evenwichtsreactie kan deze kinetische beperking opgeheven worden door het gewenste product zodra het ontstaat in de reactor, uit de reactor te verwijderen. Een manier om dit te realiseren, is het gebruik van membraanpervaporatie. Bij membraanpervaporatie wordt in de reactiekolom waar de chemische conversie plaatsvindt, een membraan geplaatst dat alleen het gewenste product doorlaat, waarna het product uit de reactor afgevoerd wordt. De drijvende kracht voor het afscheiden van het gewenste product kan het drukverschil over het membraan zijn of de chemische interactie tussen het membraan en het gewenste product.

Een reactie kan ook inherent langzaam verlopen. In een dergelijk geval kan met retrosynthese gezocht worden naar andere manieren om de reactie te laten verlopen. Retrosynthese is het systematisch terugwerken naar de optimale syntheseroute voor het gewenste product; dit omvat zowel het overschakelen op andere grondstoffen als het ontwikkelen van een andere katalysator.

Het tweede aspect dat wordt gecontroleerd als de reactiesnelheid op zich voldoende hoog is, zijn er mogelijke belemmeringen in de massaoverdracht of energieoverdracht waardoor een reactie nietop de maximale snelheid verloopt. Net als dat membraanpervaporatie voor verbetering kan zorgen bij een evenwichtsreactie, bestaan er verschillende soorten innovatieve reactorontwerpen die kunnen helpen om belemmeringen op het gebied van massa- en energieoverdracht op te heffen. Door de keuze voor een ander reactorontwerp is het dus mogelijk de reactiesnelheid te verhogen en de controle op welke reactie plaatsvindt, te verbeteren. Hierdoor stijgen de hoeveelheid en zuiverheid van de productie van het gewenste product, waardoor de energie die nodig is om het gewenste product op specificatie op te leveren, sterk kan verminderen. Op dit vlak heeft de laatste dertig jaar veel onderzoek plaatsgevonden bij de Nederlandse technische universiteiten en er zijn Nederlandse technologieaanbieders, zoals Flowid en Innosyn. Niettemin zijn er nog veel praktische vragen over welke reactorontwerpen nu meerwaarde bieden voor welke reacties. Als deze kennis al bestaat, dan is ze meestal niet openbaar.

c. Scheiden op basis van membranen in plaats van via destillatie

Membranen zijn installaties die gebruikt worden voor het scheiden van deeltjes, gassen en vloeistoffen op basis van verschillen in de bouw en samenstelling van deze deeltjes, gassen en vloeistoffen. Simpel gezegd zijn membranen zeven die werken op moleculaire schaal. Hierdoor is het mogelijk om bijvoorbeeld twee

vloeistoffen van elkaar te scheiden zonder verdamping te gebruiken. Een membraaninstallatie gebruikt daarom voor een bepaalde scheiding meestal veel minder energie dan een destillatie-installatie. Er zijn echter heel veel verschillende soorten membranen en membraaninstallaties en er is nog veel minder ervaring mee opgedaan dan met destillatie. Bovendien zijn veel membranen nog te kwetsbaar voor gebruik bij de temperaturen en drukken die in veel installaties in de procesindustrie van toepassing zijn. Er wordt daarom ook veel materiaal-onderzoek gedaan op het gebied van membranen, bijvoorbeeld naar de geschiktheid van verschillende materialen en de efficiëntie van de productie daarvan. Naast de ontwikkeling van nieuwe membraanproductiemethodes wordt ook meer toepassingsgericht onderzoek naar membranen gedaan. Onder de vlag van ISPT werken kennisinstituten en bedrijven samen aan de ontwikkeling van de optimale membraansamenstelling en membraanconfiguraties voor industriële toepassingen van membranen. Met name als (gedeeltelijke) vervanger voor destillatieprocessen. Er is dus nog veel uitzoekwerk naar welke membranen geschikt zijn voor welke scheidingsprocessen en onder welke omstandigheden.

Stap 2. Restwarmte en warmtepompen om de overblijvende vraag zo efficiënt mogelijk in te vullen

De tweede stap van de Trias Energetica 2050 is het optimaal inzetten van restwarmte. Ook als er sprake is van een inherent efficiënte oplossing, kan er een energievraag overblijven. De hoeveelheid energie die opgewekt moet worden om aan deze resterende energievraag te voldoen, kan worden verminderd door gebruik te maken van restwarmte uit het eigen proces of andere processen. Als deze restwarmte van onvoldoende kwaliteit is, kunnen warmtepompen een uitkomst bieden. Warmtepompen zijn bij uitstek geschikt voor het produceren van warmte op een manier die twee tot zes keer zo efficiënt is als directe verwarming. Echter de huidige generatie warmtepompen is alleen geschikt voor lage temperatuur warmte (max. 110 -120°C) en een beperkte temperatuurlift (30°C). Op dit moment gaan de ontwikkelingen op dit terrein echter erg snel en is er een nieuwe generatie warmtepompen voor de midden temperatuur warmte in ontwikkeling. Ik ga in hoofdstuk 4 verder op dit onderwerp in.

Stap 3. De resterende vraag duurzaam opwekken of emissies afvangen met CCS of CCU

De derde stap van de Trias energetica 2050 betreft verduurzaming van de resterende energievraag. Er is een groot aantal technologieën beschikbaar voor het verduurzamen van de resterende vraag naar warmte en elektriciteit. Bijvoorbeeld het gebruik van energie uit zon, wind of duurzaam beschikbaar gemaakte biomassa is een geschikte manier om de broeikasgasemissies sterk te verlagen.

Op dit moment zijn deze duurzame manieren om energie op te wekken nog duurder dan elektriciteit op basis van fossiele bronnen. Demissionair minister

Kamp wil de tenders (procedures door middel van inschrijving) voor vergunningverlening aan windparken aanpassen, omdat hij verwacht dat met name windmolens op zee al in de komende jaren subsidieeloos kunnen worden gerealiseerd (persbericht 28 juni 2017). Dit betekent dat de verwachting is dat binnen tien jaar wind op zee zonder subsidie kan concurreren met kolencentrales. Echter vanaf dat moment moet nog de benodigde capaciteit opgebouwd worden. Dat neemt ook nog minstens tien jaar in beslag. Vanaf een prijs van 160 tot 185 euro per ton CO₂ eq⁸ is ook warmte uit duurzame biomassa concurrerend. Hierbij zijn de logistiek en de commerciële aspecten van het beschikbaar maken en houden van voldoende duurzame biomassa mogelijk een grotere uitdaging dan de technologische aspecten.

Een manier om de energievoorziening van een proces te verduurzamen, is elektrificatie met behulp van duurzaam opgewekte elektriciteit. Elektrificatie kan op een aantal manieren toegepast worden. Deze manieren worden aangeduid met namen als power2heat en power2chemicals (of power2gas).

Power2heat refereert aan het gebruik van elektriciteit voor warmteopwekking. Dit kan direct plaatsvinden met de inzet van electrode-boilers voor warmteopwekking in plaats van reguliere gasgestookte boilers. Of door inzet van warmtepomptechnologie, via gesloten warmtepompsystemen waarbij warmtepompen in combinatie met restwarmte warmte of koude van een hoger energieniveau kunnen produceren. Het kan ook via een open systeem plaatsvinden (beter bekend als mechanische damprecompressie), waarbij de damp van een verdampingsstap gecomprimeerd wordt, zodat de condensatie-enthalpie ingezet kan worden voor het opwekken van de benodigde warmte in een volgende verdampingsstap.

Power2chemicals (of power2gas) refereert aan het laten verlopen van de gewenste chemische reacties op basis van elektrolyse en/of elektrochemie. De productie van waterstof op basis van elektrolyse is een voorbeeld van power2gas: uit elektriciteit en water wordt waterstofgas geproduceerd. Op zich vormen elektrolyse-processen allang bewezen technologie, maar de prijs van waterstofproductie via elektrolyse is nog relatief hoog.

Een ander proces dat al op basis van elektriciteit werkt, is de productie van staal uit schroot. De productie van ijzer uit schroot heeft een significant lagere *carbon footprint* dan productie van ijzer uit erts. IJzer wordt echter al in hoge mate gerecycled en de wereldwijde vraag naar ijzer is veel groter dan de hoeveelheid die

8 De 160 tot 185 euro per ton CO₂ eq is berekend op basis van de SDE-vergoeding voor houtpellets (~160 €/ton) en een onrendabele top van 60 tot 70%. Met als uitgangspunt dat uit aardgas opgewekte warmte vervangen wordt (warmtecapaciteit van houtpellets 17 GJ/ton, broeikasgasemissie aardgas 56,5 kg CO₂ eq./GJ).

geproduceerd kan worden op basis van schroot, dus moet er ook ijzer uit erts geproduceerd worden. Tenzij de vraag naar ijzer sterk vermindert, zorgt stoppen met het produceren van ijzer uit ijzererts vooral voor een verplaatsing van de productie naar locaties waar dezelfde productie plaatsvindt, alleen met meer broeikasgasemissies. Maar omdat de hoge emissie van broeikasgassen het huidige productieproces onhoudbaar maakt voor de lange termijn, werken binnen het Europese onderzoeksprogramma Ultra Low CO₂ Steelmaking (ULCOS) de grote staalfabrikanten met Europese vestigingen (ArcelorMittal, ThyssenKrupp en Tata) aan het ontwikkelen van ijzerproductie op basis van erts door middel van elektrolyse. Bij deze technologie komen geen procesemissies vrij. Deze technologie is momenteel alleen nog in het laboratorium bewezen (5kg/dag) en is dus nog erg ver van invoering in de praktijk.

Ander onderzoek op het gebied van elektrolyse richt zich op het verlagen van de kosten van bekende elektrolyseprocessen, om ze concurrerend te maken. In Nederland wordt hier door TNO, ECN en geïnteresseerde bedrijven aan gewerkt binnen het Voltachem-project. Verder is er veel interesse voor elektrificatie van de warmtevraag (zowel in de directe vorm met elektrische boilers als in de indirecte vorm door wijdere toepassing van warmtepompen en membranen), omdat deze technologie niet alleen een reductie van de benodigde energie mogelijk maakt, maar er ook voor zorgt dat de resterende energievraag met elektriciteit ingevuld kan worden en daardoor verduurzaamd kan worden door elektriciteit op basis van bijvoorbeeld windenergie in te zetten.

De interesse voor elektrificatie hangt samen met de grote rol die windenergie krijgt in de toekomst. Omdat de hoeveelheid energie die windmolens opwekken, sterk varieert met de windkracht, is de verwachting dat met een stijgend aantal windmolens er op windere dagen ook steeds meer uit windenergie opgewekte energie beschikbaar komt die niet kan worden afgenomen via de bestaande elektriciteitsnetwerken. Een manier om het overschot op te vangen, zou kunnen zijn het aanleggen van zeer zware kabels van Noord-Europa naar Zuid-Europa en van Oost-Europa naar West-Europa, maar dat is heel duur. Daarom is er op dit moment veel interesse voor elektrificatie, omdat dat een manier is om de elektriciteit te kunnen gebruiken op dagen dat er meer energie opgewekt gaat worden dan dat er afgenomen kan worden.

Een andere manier om de broeikasgasemissie bij energiegebruik sterk te verminderen, is het toepassen van CCS en CCU. Zowel voor CCU als voor CCS moet de CO₂ afgevangen worden. De kosten van het afvangen van de CO₂, zijn afhankelijk van een groot aantal aspecten: de concentratie en zuiverheid van de CO₂ in de stroom waaruit de CO₂ gewonnen wordt, de zuiverheid die de CO₂ moet hebben, de schaal waarop de technologie wordt toegepast en de beschikbaarheid van restwarmte

voor de regeneratie van de benodigde CO₂ *absorbens*. Inschattingen van een concurrerende prijs variëren tussen de 15 en 50 euro per ton voor grootschalige industriële toepassingen in situaties waarbij restwarmte beschikbaar is. Tot voor kort ging men ervan uit dat kolencentrales klimaatneutraal zouden kunnen opereren door een combinatie met CCS of CCU te maken. Echter vanwege de dalende prijs voor zon- en windenergie verwacht het PBL⁹ dat een steeds groter gedeelte van de Nederlandse energievraag opgewekt wordt door zonnepanelen en windmolens, zozeer dat in de toekomst kolencentrales zo discontinue geopereerd worden dat de prijs voor CCS of CCU bij kolencentrales vele malen hoger zal liggen, wat het gebruik van CCS of CCU bij kolencentrales op de lange termijn onwaarschijnlijk maakt.

Lectoraat als schakel tussen praktijkgericht onderzoek bij bedrijven en in het onderwijs



In hoofdstuk 3 heb ik laten zien dat er een hele range aan innovatieve technologieën bestaat en dat deze zijn in te delen naar de mate waarin ze ingrijpen op de energiebehoefte van de procesindustrie. Deze innovatieve technologieën kennen weer veel verschillende uitvoeringsvormen. Op zich is deze situatie niet

anders bij bewezen technologieën zoals compressoren of destillatie-units. Alleen bestaan er voor de bewezen technologieën handige tabellen en figuren die aangeven wat voor soort compressor of destillatie-unit een bedrijf nodig heeft, afhankelijk van de procesparameters. Dit soort informatie bestaat nog niet of zeer gefragmenteerd voor de innovatieve technologieën beschreven in hoofdstuk 3. Deze situatie maakt het voor procestechnologen bijna onmogelijk om op de hoogte te zijn van alle mogelijkheden en om goed onderbouwde keuzes voor innovaties te maken.

Mijn doel als lector is daarom om bij te dragen aan het ontwikkelen van handzame informatie die kan leiden tot het gebruik van innovaties in de praktijk. Gezien de kennisvragen uit de praktijk, de kennisvragen uit het onderwijs en de kennis bij andere lectoren verwacht ik dat ik mij zal richten op drie thema's:

1. innovatief reactordesign
2. membranen
3. warmtepompen

Ik zal gebruikmaken van praktijkgericht onderzoek, denk aan het ontwikkelen van praktische tabellen en figuren die aangeven wat voor soort warmtepomp, membraan of reactordesign een bedrijf nodig heeft, afhankelijk van de procesparameters.

Ik wil dan ook graag met docenten, bedrijven, andere lectoren en onderzoeksgroepen samen de beschikbare kennis in kaart te brengen en een systematiek ontwikkelen om de ontbrekende kennis te ontwikkelen. Verder ben ik ook geïnteresseerd in het verkennen van de niet-technische aspecten die een versnelde implementatie van deze technologie mogelijk maken. Ik denk daarbij aan samenwerking met bijvoorbeeld lectoren van Kenniscentrum Business Innovation voor het ontwikkelen van strategieën om de bovengenoemde innovaties beter financieerbaar te maken en aan samenwerking met de lector Maritieme Human Factors voor onderzoek om complexe innovaties geaccepteerd te krijgen op de werkvloer.

4.1 Praktijkgericht onderzoek bij Kenniscentrum Duurzame HavenStad

Zoals gezegd, ik doe dat onderzoek niet alleen, zelfs niet alleen met andere lectoren, maar samen met docenten, studenten, bedrijven en kennisinstellingen in het kader van het Kenniscentrum Duurzame HavenStad. Het kenniscentrum is een van de vijf kenniscentra binnen de hogeschool, dat onderzoek van docententeams

in samenwerking met onderzoekers van bedrijven naar oplossingen voor praktijkvragen opzet en begeleidt. Hierbij worden de docententeams vaak ondersteund door studenten die onderzoek doen in het kader van hun afstuderen of een minor. Het onderzoek aan het kenniscentrum is multidisciplinair van opzet. Het kenniscentrum werkt daarom samen met docenten van verschillende opleidingen, voornamelijk van de instituten Rotterdam Mainport University (RMU), Engineering Applied Sciences (EAS) en Instituut voor de Gebouwde Omgeving (IGO).¹⁰ Daarnaast werkt het kenniscentrum samen met het RDM Centre of Expertise.¹¹

Het Kenniscentrum Duurzame HavenStad legt bij al haar projecten de relatie tussen onderwijs, onderzoek en praktijk. Uitgangspunt is de combinatie van enerzijds een kennisvraag bij het onderwijs anderzijds een praktijkvraag uit het bedrijfsleven.

Het startpunt van een onderzoek is een praktijkprobleem waar een kennisvraag aan ten grondslag ligt. Dit moet een kennisvraag zijn die relevant is voor één of liefste meerdere opleidingen van Hogeschool Rotterdam. Betrokkenheid van bedrijven of groepen van bedrijven die een praktijkcase willen aanleveren, is cruciaal. Bedrijven die een onderzoeksvraag hebben op het gebied van membranen, warmtepompen of toepassingen van innovatieve reactorontwerpen, kunnen zich altijd melden bij het kenniscentrum. Mogelijk kunnen we een verbinding maken met een kennisvraag uit het onderwijs en zo een onderzoek opstarten.

De doelstelling van de onderzoeken is om docenten in staat stellen nieuwe inzichten te verwerven, die het onderwijs verrijken en vernieuwen. Dit kan gaan om nieuwe kennis over technologieën die relevant zijn voor de vakinhoud, maar het kan ook gaan om het verwerven en onderhouden van onderzoeksvaardigheden. Zoals onderbouwd in hoofdstuk 2 zal de procesindustrie in de komende 35 jaar

10 Hogeschool Rotterdam biedt een groot aantal opleidingen aan, van accountancy tot ergotherapie en van werktuigbouwkunde tot leisure en eventsmanagement. Deze opleidingen zijn georganiseerd in instituten zoals Rotterdam Mainport University (RMU) met daarin de opleidingen Maritiem Officier, Maritieme Techniek (Scheepsbouwkunde), Logistics Engineering (voltijd), Chemische Technologie / Procestechiek; Engineering Applied Sciences (EAS) met daarin Automotive, Biologie en Medisch Laboratoriumonderzoek, Chemie, Elektrotechniek, Mens en Techniek - Gezondheidszorg Technologie, Industrieel Product Ontwerpen en Werktuigbouwkunde; Instituut voor de Gebouwde Omgeving (IGO) met daarin Bouwkunde, Civiele Techniek, Ruimtelijke Ordening & Planologie, Watermanagement, Bachelor of Business Administration (BBA), Facility Management, Logistiek en Economie, Vastgoed en Makelaardij, Architectuur en Stedenbouw.

11 Hogeschool Rotterdam heeft twee expertisecentra opgezet: Expertisecentrum Maatschappelijke Innovatie (EMI) en RDM Centre of Expertise (RDM CoE). Het verschil tussen kenniscentra en expertisecentra is dat bij de expertisecentra projecten van studenten in de praktijk centraal staan, terwijl bij de kenniscentra kennisontwikkeling door docenten centraal staat. Beide instituten zijn ontwikkeld om het onderwijs beter aan te laten sluiten bij de vragen in de praktijk.

sterk moeten innoveren om te kunnen overleven. Lang niet alle kennis die daarvoor nodig is, kan al tijdens de opleiding geleerd worden. Het is essentieel dat studenten leren om zelfstandig in kaart te brengen welke factoren bepalend zijn voor de broeikasgasemissies die vrijkomen in het proces waar zij na hun afstuderen aan gaan werken en hoe ze in kaart kunnen brengen welke technologieën beschikbaar zijn om deze emissies te reduceren. Dit vraagt om een onderzoekende houding en basisonderzoeksvaardigheden. Voor het overbrengen van een dergelijke houding en de bijbehorende onderzoeksvaardigheden is het nodig dat docenten zelf onderzoeksvaardigheden hebben. Om deze te verwerven, is het van belang dat docenten zelf betrokken zijn bij praktijkgericht onderzoek.

De eisen die het kenniscentrum stelt aan onderzoek (naast dat het onderwijs en praktijk verbindt), is dat er een wetenschappelijk verantwoorde aanpak gevolgd wordt, zodat de resultaten verifieerbaar en betrouwbaar zijn. Het onderzoek wordt zo opgezet dat de uitkomsten breder toepasbaar zijn dan voor de ene praktijkcase waarin het onderzoek gedaan is. Als onderdeel van de wetenschappelijke benadering van het kenniscentrum worden deze algemene breder toepasbare uitkomsten ook gepubliceerd of anderszins bekendgemaakt, bijvoorbeeld via een Masterclass door het Kenniscentrum Duurzame HavenStad in samenwerking met technologieleveranciers; zowel binnen de hogeschool om bij te kunnen dragen aan het onderwijs, als daarbuiten om de opgedane kennis te kunnen verspreiden.

4.2 Onderzoeksthema's

Op basis van de kansrijke ontwikkelingen die zijn geschetst in hoofdstuk 2, heb ik ervoor gekozen het lectoraat te richten op de volgende drie onderzoeksthema's: reactordesign, membranen en warmtepompen. In deze paragraaf zal ik ieder van deze thema's verder uitwerken.

Onderzoeksthema 1: reactordesign

Aanpassen van het reactordesign valt onder stap 1 van de Trias Energetica 2050. Uitgangspunt bij dit thema is dat door de optimale keuze van het reactordesign, er meer controle is op de manier waarop grondstoffen omgezet worden, zodat de conversie naar het gewenste product optimaal is en er dus minder of geen scheidingsstappen na de reactor nodig zijn en dus minder energie nodig is voor het proces.

Er is de laatste 25 jaar een groot aantal nieuwe reactordesigns ontwikkeld na een paradigmashift in de procestechnologie begin jaren '90. Tot die tijd streefden procestechnologen ernaar om de effectiviteit van hun processen te verbeteren door te werken aan schaalvergroting. Het devies luidde: hoe groter de schaal, hoe

lager de kosten per eenheid product. Begin jaren '90 realiseerde een aantal procestechnologen in de chemische industrie zich dat het niet gaat om de schaal van de productie, maar om de netto-productiecapaciteit van het gewenste product. Dat kleine verschil in benadering had grote gevolgen. Niet langer is het opschalen van een productiemethode een doel op zich, maar de aandacht richt zich juist op het sneller produceren van de gewenste componenten door het optimaliseren van de massaoverdracht, energieoverdracht en reactiekinetiek. Dit is logisch als je realiseert dat in veel chemische fabrieken de meeste energie gebruikt wordt voor het terugwinnen van de gewenste producten uit een mengsel van niet-gereageerde grondstoffen, gewenst product en min of meer (on)gewenste bijproducten.

Het sneller produceren van de gewenste componenten, wordt ook wel aangeduid als procesintensificatie. Op dit vlak zijn de laatste jaren vele nieuwe technieken ontwikkeld, zoals roterende reactoren, miniaturisering van reactoren en pervaporatiemembraanreactoren. Procesintensificatie heeft invloed op het proces in het grootste deel van een fabriek. In feite vergt procesintensificatie het herontwerp (*redesign*) van de fabriek. Daarom vergt procesintensificatie vaak een uitgebreider ontwikkeltraject en meer tijd en investeringen dan reguliere vervangingsinvesteringen. Vanwege het ingrijpende karakter van procesintensificatie is het heel goed mogelijk dat een bedrijf op de korte termijn de nadruk legt op efficiency-maatregelen, zodat er meer tijd is om de kosten en baten van procesintensificatie boven tafel te krijgen en de benodigde procesveranderingen gestructureerd voor te bereiden.

Het onderzoeksveld van de procesintensificatie is nog sterk in beweging. Er worden nog steeds nieuwe reactorontwerpen ontwikkeld. Het onderzoek van mijn lectoraat richt zich echter op de vraag hoe je als procestechnoloog bepaalt welk type reactor je nodig hebt voor een specifiek proces. Een vraag die daarbij zowel voor het onderwijs als voor de beroepspraktijk relevant zou kunnen zijn is:

Bij welke meest voorkomende chemische reacties in de Nederlandse procesindustrie biedt een draaiende reactor significante voordelen ten opzichte van een conventioneel reactor ontwerp? Hoe groot zijn die voordelen?

Het beantwoorden van deze vraag vergt een multidisciplinaire aanpak. Analytisch chemici kunnen zich bezighouden met de vraag welke reacties gelimiteerd zijn en of ze in massaoverdracht, energetisch of kinetisch gelimiteerd zijn. Als een reactie in massaoverdracht gelimiteerd is, kunnen chemisch technologen en werktuigbouwkundigen uitzoeken hoe hard de reactor moet draaien om die beperking op te heffen. De vraag wat de draaiende reactor betekent voor de opbrengst en zuiverheid van de reactieproducten, is een vraag voor analytisch chemici en chemisch technologen. Werktuigbouwkundigen kunnen onderzoek doen

naar eventuele extra onderhoudskosten. We hebben technisch bedrijfskundigen nodig om de kosten van de nieuwe techniek te vergelijken met de kosten van de conventionele techniek.

De uitkomsten van dit onderzoek zijn direct toepasbaar voor procestechnologen in de chemische industrie en voedingsmiddelenindustrie en daarmee is dit onderzoek van belang voor chemisch technologen en werktuigbouwkundigen. Maar ook voor docenten analytische chemie is deelname aan een dergelijk onderzoek interessant, omdat het kennis uit vrij theoretische vakken, zoals reactiekinetiek, een heel duidelijk praktijkkader geeft. Voor bedrijfskundigen is het een manier om te leren omgaan met de risico's en onzekerheden van nieuwe technologie in een business case.

Onderzoeksthema 2: membranen

Ook het kiezen voor membranen valt onder stap 1 van de Trias Energetica 2050. Uitgangspunt bij dit thema is dat membranen inherent energiezuiniger scheiden dan destillatie-units, doordat de drijvende kracht voor het scheiden het drukverschil is (al dan niet in combinatie met de selectiviteit van het membraan) en niet het energie-intensievere verdampen dat bij destillatie de drijvende kracht voor het scheiden is. Zie tabel 4.

Membranen zijn semi-doorlatende materialen die gebruikt worden voor het scheiden van deeltjes, gassen of vloeistoffen op basis van de bouw en samenstelling van deze deeltjes, gassen en vloeistoffen. Er wordt al lang onderzoek gedaan naar membranen en er zijn ook een aantal processen waarbij membranen op industriële schaal worden toegepast. De bekendste is de toepassing bij *reversed osmosis*¹² (omgekeerde osmose), waarbij drinkwater geproduceerd wordt uit brak water; deze technologie wordt veel toegepast in het Midden-Oosten. Wat er al bekend is over membranen, is samengevat in tabel 4.

Tabel 4 Industriële toegepaste membraanprocessen

Proces	Drijvende kracht	Scheidingsprincipe	Toepassing
<u>Filtratie</u>	<u>Drukverschil, $\pm P = 0-1$ bar</u>	<u>Porie grootte: 2 micron-2 mm</u>	<u>Gistcellen, pollen, zand</u>
<u>Microfiltratie</u>	<u>Drukverschil, $\pm P = 0,1-3$ bar</u>	<u>Porie grootte: 0,1-20 micron</u>	<u>Pigmenten, bacteriën</u>
<u>Ultrafiltratie</u>	<u>Drukverschil, $\pm P = 0,1-10$ bar</u>	<u>Porie grootte: 2 nm-0,1 micron</u>	<u>Virussen, gelatines, colloïden (Si, Fe, Al)</u>
<u>Nanofiltratie</u>	<u>Drukverschil, $\pm P = 5-30$ bar</u>	<u>Poriegrootte: ~ 1 nm</u> <u>Selectiviteit membraan</u>	<u>Virussen, gelatines, ontzilting, organische oplosmiddelen (in ontwikkeling)</u>
<u>Omgekeerde osmose (RO)²</u>	<u>Drukverschil, $\pm P = 10-100$ bar</u>	<u>Poriegrootte: 0,1-1 nm</u> <u>Selectiviteit membraan</u>	<u>Ontzilting van drinkwater</u>
<u>Electrodialyse</u>	<u>Ladingsverschil</u>	<u>Lading</u>	<u>(Terug)winning van zouten en zuren, scheiden van kleine geladen organische componenten uit voedingsmiddelen: melk en melkwei, wijn en wijnzuur</u>
<u>Gasscheiding</u>	<u>Concentratie-gradiënt</u>	<u>Selectiviteit membraan</u>	<u>Gasscheiding O₂/N₂, CO₂/H₂,</u>
<u>Pervaporatie</u>	<u>Temperatuurverschil,</u> <u>Drukverschil (vacuüm),</u> <u>concentratiegradiënt</u>	<u>Selectiviteit membraan</u>	<u>Verwijderen van organische oplosmiddelen</u>

Bron: hand-out bij cursus Membraantechnologie 2017 van Vito (Bulut, 2017)

Membranen worden gemaakt van een breed scala van materialen en combinaties van materialen. De hoofdingeling die gemaakt wordt voor membranen is: polymeer membraan versus keramisch membraan (al is in de praktijk het porie-oppervlak van de meeste keramische membranen voorzien van een laagje polymeer om de selectiviteit van het membraan te vergroten). Over het algemeen kan gezegd worden dat keramische membranen een hogere stabiliteit kennen (ze zwellen niet op en worden niet ingedrukt) en ze zijn bestand tegen hogere temperatuur en extremere pH-waarden. Tot voor kort waren ze veel duurder, maar er vinden de laatste tijd veel ontwikkelingen plaats die de prijs mogelijk op korte termijn sterk verlagen. Deze grote variëteit in materialen maakt het voor potentiële gebruikers moeilijk om het juiste type materiaal te kiezen, er is immers een groot aantal variabelen: de geschiktheid voor het maken van de scheiding, de kans op ongewenste interacties met de voedingsstroom en de mate waarin het materiaal gevoelig is voor veroudering, slijtage en/of vervuiling. Dit alles natuurlijk in combinatie met de specifieke procesomstandigheden en samenstelling van de te scheiden stromen. Voor het bepalen van het juiste membraan in een

membraanunit is dus naast procestechnische kennis ook analytisch-chemische kennis nodig om de interactie van membranen in specifieke situaties te kunnen verklaren.

De configuratie van de membranen is heel belangrijk voor het gebruik van membranen in industriële processen. De manier waarop een koffiefilter gebruikt wordt, wordt ook wel *dead-end* genoemd; deze dead-end-geometrie kan alleen voor batch-processen worden gebruikt. Bij continue processen wordt daarom gekozen voor de cross-flow-geometrie, hierbij is sprake van minder membraanvervuiling en meer mogelijkheden om de membraanvervuiling tijdens het gebruik te verminderen door bijvoorbeeld tijdelijk de drukval over het membraan om te keren.

Om voldoende membraanoppervlakte beschikbaar te hebben voor de scheiding, worden combinaties gemaakt van membranen, soms wordt de te scheiden voedingsstroom over een heleboel membranen verdeeld, soms worden membranen achter elkaar geschakeld, soms parallel geschakeld en meestal een combinatie van parallel en in serie geschakelde membranen. De gekozen configuratie is afhankelijk van de proceseigenschappen.

Membraanonderzoek speelt zich daarom af op verschillende schaalniveaus. Het kleinste schaalniveau is het niveau waarop de membraan interactie heeft met zijn omgeving op moleculaire en nanometer-schaal. Het gaat om de structuur en chemische samenstelling en het belang daarvan voor de snelheid van de permeatie, de mate van retentie, de selectiviteit van de scheiding, de vervuiling van het membraan en de mate waarin het membraan bestand is tegen de procescondities. Een voorbeeld van een kennisvraag op dit schaalniveau is:

Welke typen membraanmaterialen zijn geschikt voor het terugwinnen van oplosmiddelen?

Om deze vraag op te pakken zou ik een samenwerking met het Kennisnetwerk NL GUTS kunnen opzetten. De aangesloten bedrijven kunnen de bij hen bekende deelonderzoeken aanleveren. De gegevens worden dan door het onderzoeksteam geanalyseerd om te komen tot een systematische benadering voor het bepalen van de parameters, die bepalen welke membranen geschikt zijn voor het terugwinnen van specifieke oplosmiddelen. De uitkomst van dit onderzoek is direct toe te passen op de opleiding Chemische Technologie. Daarnaast kan het ook voor docenten van de opleiding Chemie interessant zijn, omdat bij de interpretatie van de gepubliceerde onderzoeken chemische kennis nodig is om de interacties tussen membranen en de te scheiden stromen te begrijpen, zowel in termen van affiniteit, maar ook in termen van slijtage en vervuiling. Bovendien kan betrokkenheid van

docenten bij membraanonderzoek wenselijk zijn, zodat zij meer te weten komen over de reactiemechanismen die toegepast worden bij de productie van membranen; mogelijk vormen die ook een interessante aanvulling op het curriculum.

Het tweede niveau is meer een macroniveau en betreft de keuze voor de module en de configuratie van modules. Stel je hebt een membraan gekozen, maar hoe realiseer je voldoende membraanoppervlakte om de gewenste scheiding te krijgen en hoe combineer je die membranen zo optimaal mogelijk? Een voorbeeld van een kennisvraag op dit schaalniveau is:

Welke configuraties zijn het meest geschikt voor de voedingsmiddelenindustrie, gezien de hygiëne-eisen die in deze industrie gelden?

Deze vraag is interessant voor zowel aanbieders van membraantechnologie als bedrijven in de voedingsmiddelenindustrie en voor verschillende opleidingen van de hogeschool: naast de procestechnologen van Werktuigbouwkunde en Chemische Technologie kunnen hier ook de microbiologen van Biologie en Medisch Laboratoriumonderzoek met deze vraag aan de slag.

Onderzoeksthema 3: warmtepompen

Het principe van een warmtepomp is het verhogen van het warmteniveau van een medium (gas of vloeistof) door het toevoegen van arbeid, door gebruik te maken van omgevingswarmte en een faseovergang in het medium. Warmtepompen kunnen gebruikt worden voor verwarming of koeling. Het bekendste voorbeeld van gebruik van een warmtepomp voor koeling is de koelkast. Als een koelkast koelt, wordt er een vloeistof in de koelleidingen geëxpandeerd, die trekt dan warmte uit de koelkast om de faseovergang van vloeistof naar gas mogelijk te maken en zo wordt de koelkast koeler. Na het verlaten van de koelkast wordt dit gas weer gecomprimeerd tot een vloeistof en geeft het zijn warmte af aan de omgeving. Daarom is de achterkant van een werkende koelkast warm. Het is dus niet dat de warmtepomp warmte erbij tovert (de eerste hoofdwet van de thermodynamica blijft gewoon werken), maar door de faseovergang kan laagwaardige omgevingswarmte gebruikt worden om hoogwaardigere warmte of koude te creëren.

De capaciteit om uit omgevingstemperatuur nuttige warmte of koude te maken, maakt warmtepompen bij uitstek geschikt om reststromen aan warmte op een zeer efficiënte manier op te werken naar een energieniveau dat nog wel nuttig gebruikt kan worden, zowel voor verwarming als koeling (denk bijvoorbeeld aan een absorptiekoeling). Deze techniek hoort dan ook bij uitstek in de tweede stap van de Trias Energetica 2050.

Voor het onderwijs is het van belang dat studenten weten hoe restwarmte die vrijkomt in een fabriek of in de directe omgeving van de fabriek, optimaal benut kan worden. Dit is laatst nog onderstreept door VEMW, de organisatie voor de zware industrie in Nederland: zij heeft warmtepompen aangemerkt als de belangrijkste technologie in de eerste en zevende stap van haar achtstappenaanpak voor het realiseren van de gewenste emissiereductie van 80-95% in de procesindustrie in 2050 (VEMW, 2017). De eerste stap gaat over het grootschaliger gebruik van reststromen door toepassing van warmtepompen en mechanische damprecompressie (een specifieke toepassing van warmtepompen). De zevende stap gaat over het verder ontwikkelen en toepassen van de nieuwste generatie warmtepompen. Dus het opnemen in het curriculum van kennis over warmtepompen is relevant voor alle opleidingen die studenten opleiden voor de procesindustrie. Ik zie drie verschillende insteken voor dit onderzoek.

De eerste insteek is het in kaart brengen van het potentieel voor energiebesparing door warmtepompen via *pinch*-analyse. Industriële systemen zijn over het algemeen complex, er is een groot aantal stromen dat verwarmd dan wel gekoeld moet worden. Het is niet altijd even duidelijk welke combinatie van stromen het meest geschikt is om de beschikbare vraag naar warmte en koude het meest energie-efficiënt in te vullen.¹³ Om op een overzichtelijke manier in kaart te brengen welke warmte- en koudevraag bij welke temperatuur beschikbaar is, is *pinch*-analyse uitgevonden. Een belangrijk onderdeel van de *pinch*-analyse is de *grand composite curve*. Deze figuur vat de warmte- en koudevraag samen in een figuur, met de daarbij horende temperaturen. Ook laat het zien welke energievraag het meest energie-efficiënt via warmtewisselaars opgelost kan worden en de omvang en de temperatuurrange waarbij het systeem een warmteoverschot en een koudeoverschot heeft (Mohanty, 2012). Dit laatste is belangrijk omdat het combineren van het koudeoverschot en warmteoverschot de meest efficiënte manier is om een warmtepomp toe te passen in het systeem (Olsen, 2017). Daarbij is aangenomen dat de benodigde temperatuurlift en maximale temperatuur binnen het bereik van een (combinatie van) warmtepomp(en) ligt. Dat betekent dat op deze manier het potentieel voor energiebesparing door toepassing van zowel de huidige generatie als de toekomstige generatie warmtepompen in kaart gebracht kan worden. Een kennisvraag hierbij zou kunnen zijn:

In welke situaties in de industrie is er een groot potentieel voor warmtepompen en in welke toepassing?

13

De uitkomsten van een pinch-analyse betreffen de meest energie-efficiënte oplossingen. Uitgaande van de ideale situatie dat er geen effect is van een bestaand fabrieksontwerp dat de kosten van de benodigde pijpen beïnvloedt, zijn het ook de meest kosteneffectieve oplossingen. In praktijk kan het zo zijn dat de optimale combinatie van warmtevraag en -overschot zoals die berekend wordt met een pinch-analyse, toch niet de meest kosteneffectieve oplossing is, omdat de bestaande fabriekslay-out de combinatie van deze stromen dusdanig compliceert dat dit de kosten van deze oplossing sterk verhoogt

De Nederlandse papierindustrie heeft in samenwerking met haar leden in kaart gebracht waar toepassing van de huidige beschikbare warmtepompen in deze sector mogelijk is (Ligthart, 2012), in veel andere sectoren is dit nog niet gedaan.

Een mogelijke onderzoeksaanpak is dat een grote groep studenten van de opleidingen Chemische Technologie, Werktuigbouwkunde en Technische bedrijfskunde verdeeld worden in groepjes en ieder groepje een *pinch*-analyse bij een ander bedrijf uitvoert. De betrokken studenten hebben meteen een praktijksituatie die het belang van *pinch*-analyse duidelijk maakt. Op basis van de uitkomsten en eigen aanvullend onderzoek maakt een docententeam een overzicht van veralgemeniseerde situaties waarin warmtepompen zowel tot kosten- als energiereducties leidt. Deze uitkomsten kunnen direct in het curriculum opgenomen worden en toegepast worden als handleiding voor besparing in het bedrijfsleven. In dit onderzoek kunnen ook de mogelijkheden van de nieuwe generatie warmtepompen meegenomen worden. Dat laatste zou ook helpen bij het versneld ingevoerd krijgen van deze technologie.

De tweede insteek voor onderzoek is oplossingen voor discontinue operatie van warmtepompen identificeren en classificeren. Veel processen zijn zeer dynamisch, terwijl warmtepompen het meest efficiënt werken als ze toegepast worden om in een constante basisvraag te voorzien. Wanneer de operatie flexibel moet plaatsvinden, betekent dat meestal een zeer ernstige reductie van de effectiviteit. Dit geldt zowel voor de bestaande warmtepompen als de nieuwe generatie die nu ontwikkeld wordt. De verschillende mogelijkheden om warmtepompen te combineren met een flexibel aanbod van restwarmte, zijn nog niet systematisch in kaart gebracht. Een kennisvraag zou kunnen zijn:

Onder welke omstandigheden en op welke manier kan een bedrijf warmtepompen effectief combineren met een discontinu aanbod of een discontinue vraag naar warmte?

Het gaat hier om zowel procestechnologische kennis als kennis over regeltechniek. De uitkomsten van dit onderzoek zijn direct toepasbaar in het onderwijs en de praktijk. Er zijn inmiddels twee platforms in de industrie met deze vraag aan de slag geweest, dus de eerste vraag zal zijn: wat zijn de bevindingen van deze platforms, dekken die alle mogelijke situaties en is de opgeleverde kennis al concreet genoeg of vergt deze verdere uitwerking?

De derde insteek voor onderzoek is het ondersteunen van praktijktesten van de nieuwe generatie warmtepompen. ECN doet veel onderzoek naar het vergroten van het bereik van warmtepompen. De meest innovatieve warmtepompen, die echt breed inzetbaar zijn, moeten nog in de praktijk getest worden. Tot voor kort waren er vooral warmtepompen die een kleine temperatuurlift (<30°C) aankunnen en

maximaal tot 120°C kunnen verwarmen. Inmiddels zijn er onder andere bij ECN thermochemische en thermo-akoestische warmtepompen in ontwikkeling, die een temperatuurlift van 50 tot 100 oC hebben en een temperatuurbereik van -160 tot 200°C en mogelijk hoger (Boer, 2009). Een kennisvraag zou kunnen zijn:

Onder welke omstandigheden en op welke manier functioneert een nieuwe type warmtepomp en met welk rendement?

Betrokkenheid bij de ontwikkeling van deze nieuwe technologie, bijvoorbeeld door ondersteuning bij praktijktesten onder industriële omstandigheden, levert eerstehands kennis over de mogelijkheden van deze nieuwe technologie, die van belang is voor zowel het onderwijs als de praktijk.

Dankwoord

Deze publicatie is samen met de openbare les de officiële start van mijn lectoraat. Het bijzondere voor mij is dat ik het heb kunnen schrijven met de positieve support van mijn netwerk.

Ik denk hier met name aan mijn collega's bij het Kenniscentrum Duurzame HavenStad Liek Voorbij en Jolanda Dwarswaard; ik dank hen voor hun vertrouwen en hun redactionele aanwijzingen waarmee ze me geholpen hebben me te richten op de kern van mijn betoog.

Mijn collega bij CE Delft Harry Croezen, die zijn expertise in de vorm van tabel 3 beschikbaar heeft gesteld en voorbeelden van technologie hielp bedenken. Sander de Bruyn van CE Delft en Ronald de Vries van Royal HaskoningDHV, die suggesties heeft gedaan voor de beschrijvingen in de eerste twee hoofdstukken. Emile Jackson van het RDM Centre of Expertise, die me hielp om de eerste samenwerkingsprojecten met de opleidingen op te zetten. De docenten Urjan Jacobs, Sowande Boksteen en Michael Vlug, met wie ik projecten uitvoerde en zo beter bekend raakte met het onderwijs aan Hogeschool Rotterdam. De docent Brendon Raad, die klaarstaat om met mij het onderzoek te starten.

Mijn mede-lectoren voor hun warme welkom in hun midden.

Ik hoop dat deze inspirerende vormen van samenwerking een belangrijk bouwsteen zullen vormen voor de werkwijze van het lectoraat.

Literatuurlijst

- Alderliesten, P. (2013). ECN R & D plan voor 2014 Energiebesparing in de Industrie [Verkorte PowerPoint presentatie]. Geraadpleegd op 19-09-2017, van www.ecn.nl%2Ffileadmin%2Fecn%2Fcorp%2Fpersberichten%2FECN_R_D_plan_Energiebesparing_in_de_Industrie_Verkorte_webversie_20131022.pptx&usg=AFQjCNFmyOtwlKv87-uMFplcrCpXMwhC1Q
- Alderliesten, P. (2014). R&D plan ECN EBI 2015 Van onderzoek naar innovatie. Geraadpleegd op 19-09-2017, van <https://www.ecn.nl/publicaties/PDFfetch.aspx?nr=ECN-F-14-023>
- Boer, R. de, Van der Pal, M. (2009). Ontwikkeling van een hoge temperatuur chemische warmtepomp. Openbare eindrapportage OPTISORP project EOS-LT02027. Geraadpleegd op 19-09-2017, van <https://www.ecn.nl/publicaties/PdfFetch.aspx?nr=ECN-E-09-066>
- Bulut, M., De Wever, H., Dotremont, C., De Schepper, W., Helsen, J., Vandezande, P., Buekenhoudt, A., & Skiborowski, M. (2017). Membrane Technology Course - Principles & Practices. Mol (Belgie): VITO.
- Centraal Bureau voor de Statistiek. (2016, 21 december). Energiebalans; aanbod, omzetting en verbruik [Dataset]. Geraadpleegd op 09-05-2017, van <http://statline.cbs.nl/Statweb/publication/?DM=SLNL&PA=83140NED>
- Centraal Bureau voor de Statistiek. (2017, 17 maart). Bedrijfsleven; arbeids- en financiële gegevens, per branche, SBI 2008 [Dataset]. Geraadpleegd op 14-06-2017, van <http://statline.cbs.nl/StatWeb/publication/?VW=T&DM=SLNL&PA=81156ned&LA=NL>
- Centraal Bureau voor de Statistiek. (2017, 30 juni). Hernieuwbare elektriciteit; productie en vermogen [Dataset]. Geraadpleegd op 04-08-2017, van <http://statline.cbs.nl/statweb/publication/?dm=slnl&pa=82610ned>
- Croezen, H. (2016). Kansrijk beleid voor CCS - Bijdrage aan het programma Kansrijk Energie- en Klimaatbeleid. Geraadpleegd op 19-09-2017, via http://www.ce.nl/publicatie/kansrijk_beleid_voor_ccs/1837
- Figueres, C., Schellnhuber, H. J., Whiteman, G., Rockström, J., Hobley, A., & Rahmstorf, S. (2017). Three years to safeguard our climate. Nature, 546(7660), 593-595.
- Hoogcarspel, J. (2017). Kriskras zoeken naar verbanden. Europaort Kringen, februari 2017.

- IEA (2016). World Energy Outlook 2016. Paris: International Energy Agency (IEA).
- IF. (2016). De potentie van diepe geothermie voor de transitie naar duurzame chemie [PowerPoint presentatie]. Geraadpleegd op 19-09-2017, van <http://docplayer.nl/6698057-De-potentie-van-diepe-geothermie-voor-de-transitie-naar-duurzame-energie-technologische-kansen-voor-de-nederlandse-industrie.html>
- Kernteam Versterking Industriecluster Rotterdam/Moerdijk. (2016). Samen werken aan een cluster in transitie - Actieplan Versterking Industriecluster Rotterdam/Moerdijk. Geraadpleegd op 19-09-2017, van <https://fd.nl/binaries/34/29/67/lees-het-actieplan-versterking-industriecluster-rotterdam-moerdijk-als-pdf.pdf>
- Ligthart, M., De Vries, L., Pennartz, A.M.G., & Van Beek, T.J.J. (2012). Mechanische DampRecompressie - Technische haalbaarheid mechanische damprecompressie in de papierindustrie. Arnhem: Kenniscentrum Papier en Karton. Geraadpleegd op 19-09-2017, van <http://vnp.nl/wp-content/uploads/2014/01/19-Technische-haalbaarheid-mechanische-damprecompressie-in-de-papierindustrie.pdf>
- METI. (2016, 8 juli). Forecast of global supply and demand trends for petrochemical products (for the 2007-2020 period) Compiled. Geraadpleegd op 18-06-2017, van www.meti.go.jp.
- Mohanty, B. (2012). Grand composite Curve (National Program for Technology Enhanced Learning, India). Geraadpleegd op 19-09-2017, van <http://nptel.ac.in/courses/103107094/module4/lecture3/lecture3.pdf>.
- Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F. M., Collins, W., Fuglestvedt, J., Huang, J., ... & Nakajima, T. (2013). Anthropogenic and natural radiative forcing. Climate change, 423, 658-740.
- National Geographic (editorial). (2017). Climate Change - 7 things you need to know. National Geographic, april 2017.
- Olsen, D., Abdelouadoud, Y., Liem, P., Hoffman, S. & Wellig, B. (2017, 18 May). Integration of Heat Pumps in Industrial Processes with Pinch Analysis. Paper presented at 12th IEA Heat Pump Conference 2017, Rotterdam. Geraadpleegd op 19-09-2017, van <http://hpc2017.org/wp-content/uploads/2017/05/O.3.7.2-Integration-of-Heat-Pumps-in-Industrial-Processes-with-Pinch-Analysis.pdf>
- Petrochemicals Europe. (2017). Ethylenename plate capacity, production, consumption EU15 + Norway + Turkey (as of 2015) [afbeelding] Geraadpleegd op 15-08-2017, van <http://www.petrochemistry.eu/about-petrochemistry/facts-and-figures.html>
- PLATTS McGraw Hill Financial. (2016). EUROPEAN PETROCHEMICAL OUTLOOK 2016: PETROCHEMICAL SPECIAL REPORT. Geraadpleegd op 19-09-2017, van <https://www.platts.com/IM.Platts.Content/InsightAnalysis/IndustrySolutionPapers/SR-Europe-European-petrochemical-outlook-2016.pdf>
- Solomon, C. (2017). Life in the Balance. National Geographic, juni 2017.
- Spoelstra, S. (2005). Nederlandse en industriële energiehuishouding. Geraadpleegd op 19-09-2017, van <https://www.ecn.nl/docs/library/report/2005/i05004.pdf>

- VEMW. (2017). Decisions on the industrial energy transition. Geraadpleegd op 19-09-2017, via <http://issuu.sdcommunicatie.nl/2017/vemw/vemw-decisions-on-the-industrial-energy-transition/>
- Willemsen, A., Heller, R., & Van Wees, J.D. (2011). Diepe geothermie 2050, Een visie voor 20% duurzame energie voor Nederland. Geraadpleegd op 19-09-2017, van <https://www.rvo.nl/file/1686>
- Zijlema, P.J. (2016). Nederlandse lijst van energiedragers en standaard CO2 emissiefactoren, versie januari 2016. Geraadpleegd op 19-09-2017, van <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2016/08/Nederlandse%20lijst%20van%20energiedragers%20en%20standaard%20CO2%20emissiefactoren%202016.pdf>

Eerdere uitgaven

van Hogeschool Rotterdam Uitgeverij



Slim bewegen tussen haven en stad

Auteur Ron van Duin
ISBN 9789051799675
Verschijningsdatum oktober 2017
Aantal pagina's 84
Prijs € 14,95



Techniek is belangrijk, maar het zijn mensen die het verschil maken

Auteur Hans van den Broek
ISBN 9789051799644
Verschijningsdatum oktober 2017
Aantal pagina's 84
Prijs € 14,95



#DuurzaamRenoveren

Auteur Haico van Nunen
ISBN 9789051799651
Verschijningsdatum oktober 2017
Aantal pagina's 100
Prijs € 14,95



Bewegen naar gezondheid

Auteur Maarten Schmitt
ISBN 9789051799632
Verschijningsdatum september 2017
Aantal pagina's 86
Prijs € 14,95



Studiesucces

Auteur Ellen Klatter
ISBN 9789051799583
Verschijningsdatum juni 2017
Aantal pagina's 96
Prijs € 14,95



Samen opleiden

Auteur Mariëlle Theunissen
 ISBN 9789051799590
 Verschijningsdatum juni 2017
 Aantal pagina's 76
 Prijs € 14,95



Een goed begin is het halve werk

Auteur Hanneke Harmsen van der Vliet - Torij
 ISBN 9789051799521
 Verschijningsdatum juni 2017
 Aantal pagina's 136
 Prijs € 21,95



Professionele identiteit

Auteur Martin Reekers
 ISBN 9789051799514
 Verschijningsdatum maart 2017
 Aantal pagina's 54
 Prijs € 14,95



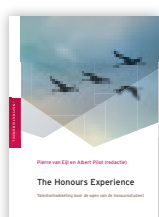
Creatieve Ruimte

Auteur Michiel de Ronde
 ISBN 9789051799373
 Verschijningsdatum juni 2016
 Aantal pagina's 96
 Prijs € 14,95



Ongebaande paden

Auteur Paul van der Aa
 ISBN 9789051799385
 Verschijningsdatum juni 2016
 Aantal pagina's 86
 Prijs € 14,95



The Honours experience

Auteurs Pierre van Eijl, Albert Pilot (redactie)
 ISBN 9789051799361
 Verschijningsdatum mei 2016
 Aantal pagina's 272
 Prijs € 26,95

Exemplaren zijn bestelbaar via www.hr.nl/onderzoek/publicaties. Hier zijn ook eerder verschenen uitgaven van Hogeschool Rotterdam Uitgeverij beschikbaar.

Marit van Lieshout

Visie op de toekomst van de Nederlandse procesindustrie

en de rol van het lectoraat Procesoptimalisatie en -intensificatie bij de realisatie daarvan

ISBN 90-5179-968-3



De Nederlandse procesindustrie ziet grote uitdagingen op zich afkomen: een energietransitie die 80-95% emissiereductie tussen nu en 2050 mogelijk moet maken, een groeiend aantal ultramoderne plants in het Midden-Oosten en Azië. Hoe blijf je dan als 'oude' Europese plant concurrerend? Business as usual is geen optie, maar wat dan wel?

Lector Marit van Lieshout verkent in deze openbare les de twee lange termijn uitdagingen van de Nederlandse procesindustrie:

- het sterk verminderen van de broeikasgasemissies
- het aantrekkelijk blijven voor investeerders

Hierbij geeft zij aan welke kansen zij ziet voor technologische innovatie, met name voor toepassingen van innovatief reactor design, warmtepomptechnologie en membraantechnologie.

Deze openbare les is een uitnodiging om samen met haar en betrokken docenten en studenten van de hogeschool deze toepassingen te verkennen en op die manier de benodigde kennis en vaardigheden te ontwikkelen, die de komende generaties studenten voorbereiden op deze uitdagende toekomst.

Marit van Lieshout is als lector Procesoptimalisatie en -Intensificatie verbonden aan het Kenniscentrum Duurzame Havenstad van de Hogeschool Rotterdam. Het lectoraat is onderdeel van de onderzoekslijn Groene Chemie en Materialen waarbinnen onderzoek gedaan wordt naar de technologische mogelijkheden voor versterking van de Nederlandse procesindustrie door het verlagen van de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen. Binnen deze onderzoekslijn richt het lectoraat Procesoptimalisatie en -Intensificatie zich op verduurzaming van de bestaande "grijze" chemie zonder noodzakelijkerwijs de grondstoffen te vergroenen.