



Energy research Centre of the Netherlands

# **Technologieverkenning**

**Kansrijke nieuwe technieken voor minder emissies  
naar de lucht in 2030**

**P. Kroon**

**P. Lako**

**J.A.Z. Pieterse**

## Verantwoording

Dit rapport is opgesteld in opdracht van ministerie van VROM/Directie Klimaat & Luchtkwaliteit in het kader van de beleidsondersteuning door middel van de evaluatie van nieuwe reductietechnologieën. De werkzaamheden in 2008 ten behoeve van dit project zijn bij ECN geregistreerd onder projectnummer 7.7947. Enkele afrondende werkzaamheden in 2009 zijn geregistreerd onder projectnummer 5.0036. Contactpersoon bij ECN is Pieter Kroon. (Tel. 0224-564891; E-mail: [kroon@ecn.nl](mailto:kroon@ecn.nl)).

## Abstract

To obtain a sustainable situation in the field of air emissions (including greenhouse gases) it remains imperative to take action. At the request of the Dutch Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment (VROM) ECN Policy Studies has conducted a survey study on new, improved and promising environmental technologies for energy and industry.

The Dutch government formulated ambitions in the NMP4 (VROM, 2001). One of the goals is that approximately 95% of the natural environment is protected. Prevention of environment-related health effects is a second goal. Translated into emission targets, this means that air pollutant emissions must still be substantially reduced compared to the emissions in 2005. The reduction rates in 2030 compared to 2005 are: for NO<sub>x</sub> 65 to 80%, for SO<sub>2</sub> 39 to 62%, for NMVOC 31 to 71%, for NH<sub>3</sub> 59 to 77% and for particulate matter 75 to 87%. Since a safe emission level for particulate matter probably does not exist, a further reduction after 2030 is required. For the main greenhouse gas, CO<sub>2</sub>, the NMP4 target entails a reduction of 40 to 60% in 2030, with continuous reduction efforts for CO<sub>2</sub> beyond 2030.

This study contains more than 80 techniques that are currently under development, including new prevention or add-on reduction techniques and new production methodologies. Moreover, existing techniques are available that can, possibly at higher costs per kg reduction, be applied in other places. Based on the inventory it is concluded that it is technically possible for the energy and industry sector to achieve the NMP4 reduction targets. Application of new prevention or add-on reduction techniques and new production methodologies are essential to obtain the required emission levels.

A significant reduction of CO<sub>2</sub> emissions can be obtained via energy saving, renewable energy and CO<sub>2</sub> capture and storage (CCS). There are also other ways to generate electricity more efficiently. With respect to emission of methane (CH<sub>4</sub>), its (catalytic) decomposition in low concentrations can be studied. As for nitrous oxide (N<sub>2</sub>O), the last major source of emission, the caprolactam production, can be addressed in cooperation with industry. Air pollution caused by NO<sub>x</sub> can be further reduced by means of ultra low NO<sub>x</sub> burners, flue gas cleaning with SCR and various reducing agents or catalytic absorption systems. Also fuel cells, with minimal NO<sub>x</sub> emission, can play a role. SO<sub>2</sub> emissions can be reduced by using scrubbers for process emissions as well. Coal fired power stations require an SO<sub>2</sub> removal yield beyond the reach of current scrubbers. Coal gasification can attribute to lower SO<sub>2</sub> emissions as well. NH<sub>3</sub> emission in the industry sector is limited (1% of the Dutch emission). An option would be to place ammonia strippers or absorbers at some locations. The NMVOC emission can be reduced by active policy in the field of leak detection and measures on low concentrations of NMVOC in suction air. For particulate matter (and not volatile heavy metals) the main option is the application of fabric filters at a larger scale. Volatile heavy metals, such as mercury, can be removed by means of activated charcoal.

For some sectors such as heavy metals, refineries and carbon black production, a long term vision on desirable changes and process innovations is required in consultation with the companies concerned.

## Inhoud

Lijst van tabellen	5
Lijst van figuren	5
Samenvatting	8
1. Inleiding	10
2. Wat zijn de uitdagingen?	11
2.1 Luchtverontreinigende stoffen	11
2.2 Stoffen die bijdragen aan klimaatverandering	12
2.3 2030 Perspectief	15
3. Emissies per sector	16
4. Technische reductiemogelijkheden	18
4.1 In welke fase verkeert de technologie?	18
4.2 Enkele drempels bij de toepassing van een nieuwe technologie	25
5. Reductiemogelijkheden per sector	27
5.1 In welke sector zitten de hoogste emissies?	27
5.2 Technische reductiemogelijkheden per sector	28
5.2.1 Kooldioxide (CO <sub>2</sub> ) uitstoot	28
5.2.2 Methaan (CH <sub>4</sub> ) uitstoot	29
5.2.3 Lachgas (N <sub>2</sub> O) uitstoot	30
5.2.4 Stikstofoxiden (NO <sub>x</sub> ) uitstoot	31
5.2.5 Zwaveldioxiden (SO <sub>2</sub> ) uitstoot	32
5.2.6 Ammoniak (NH <sub>3</sub> ) uitstoot	32
5.2.7 Uitstoot van vluchtige koolwaterstoffen exclusief methaan (NMVOS)	33
5.2.8 Uitstoot van fijn stof	33
5.2.9 Uitstoot van zware metalen en kwik	34
6. Conclusies	35
6.1 Nog forse reducties nodig maar technisch haalbaar	35
6.2 Mogelijke aangrijpingspunten per stof en sector	36
6.3 Nieuwe processen noodzakelijk op langere termijn	40
Referenties	41
Internet sites	42
Bijlage A Overzicht van technologieën	43
A.1 Nieuwe procesgeïntegreerde technologieën per sector	43
A.1.1 Elektriciteitsproductie	43
A.1.2 Raffinaderijen	47
A.1.3 Kunstmestproductie	48
A.1.4 Zware metaalindustrie	49
A.1.5 Papierindustrie	50
A.1.6 Industriële energiebesparing in de chemie	52
A.1.7 Industriële energiebesparing via betere chemische reacties	56
A.1.8 Voedingsmiddelen industrie	58
A.1.9 Industriële Materialenproductie	59
A.2 Nieuwe technologieën voor emissiereductie	61
A.2.1 Verbranding met lage NO <sub>x</sub> -uitstoot	61
A.2.2 Rookgasreiniging voor NO <sub>x</sub>	62
A.2.3 Reductie van NMVOS	64
A.2.4 Zwavelreductie-opties	65
A.2.5 Reductie van de emissie van fijn stof	67

	A.2.6	Reductie van de emissie van zware metalen	67
	A.2.7	Reductie van methaanemissies	68
	A.2.8	Reductie van CO <sub>2</sub> -emissies	69
	A.2.9	Overige 'end of pipe' reductie-opties	70
A.3		Duurzame elektriciteitsopwekking	71
	A.3.1	Productie technieken	71
	A.3.2	Opslagsystemen	77
A.4		Referenties	78
A.5		Internet sites	83
Bijlage B		Technologielijsten	86
	B.1	Process intensification studie	86
	B.2	Lijst met doorbraak technologieën uit 1997	87
	B.3	Nieuw Energie Onderzoek (NEO) projecten.	89
Bijlage C		Drie uitgewerkte technologie sheets	94
	C.1	Factsheet SCR-installaties voor NO <sub>x</sub> -verwijdering	94
	C.2	Factsheet Oxy-fuel verbranding (verbranden met zuurstof)	101
	C.3	Factsheet Kolenvergassing STEG (KV STEG)	107
	C.4	Referenties	111
	C.5	Internetbronnen	114

## Lijst van tabellen

Tabel S.1	<i>Kansrijke technieken om emissies verder te reduceren</i>	9
Tabel 2.1	<i>Reductiedoelen doorvertaald naar de sector industrie en energiebedrijven [kton/j]</i>	12
Tabel 3.1	<i>Emissie per sector in 2006</i>	16
Tabel 3.2	<i>Relatieve bijdrage per sector in 2006</i>	17
Tabel 3.3	<i>Emissie van zware metalen naar de lucht in 2006 (let op: onvolledig)</i>	17
Tabel 4.1	<i>Technologieën voor milieuverbetering uit Bijlage A: (energie) processen</i>	18
Tabel 4.2	<i>Technologieën voor milieuverbetering uit Bijlage A: Reductietechnieken</i>	19
Tabel 4.3	<i>Aspecten van de divers technologieën (1)</i>	21
Tabel 4.4	<i>Aspecten van de diverse technologieën (vervolg)</i>	22
Tabel 4.5	<i>Aspecten van de diverse technologieën (vervolg)</i>	23
Tabel 4.6	<i>Aspecten van de diverse technologieën (vervolg)</i>	24
Tabel 5.1	<i>Relatieve bijdrage per sector in 2006</i>	27
Tabel 5.2	<i>Relatieve bijdrage aan de CO<sub>2</sub>-emissie per sector en reductietechnieken</i>	28
Tabel 5.3	<i>Methaanuitstoot van de energiesector</i>	29
Tabel 5.4	<i>Relatieve bijdrage aan de CH<sub>4</sub>-emissie per sector en reductietechnieken</i>	30
Tabel 5.5	<i>Relatieve bijdrage aan de N<sub>2</sub>O-emissie per sector en reductietechnieken</i>	30
Tabel 5.6	<i>Bronnen van de N<sub>2</sub>O-emissie van de chemische industrie</i>	30
Tabel 5.7	<i>Relatieve bijdrage aan de NO<sub>x</sub>-emissie per sector en reductietechnieken</i>	31
Tabel 5.8	<i>Relatieve bijdrage aan de SO<sub>2</sub>-emissie per sector en reductietechnieken</i>	32
Tabel 5.9	<i>Relatieve bijdrage aan NH<sub>3</sub>-emissie per sector en reductietechnieken</i>	33
Tabel 5.10	<i>Relatieve bijdrage aan de NMVOS-emissie per sector en reductietechnieken</i>	33
Tabel 5.11	<i>Relatieve bijdrage aan de PM<sub>10</sub>-emissie per sector en reductietechnieken</i>	34
Tabel 5.12	<i>Reductiemogelijkheden voor vluchtige zware metalen</i>	34
Tabel 6.1	<i>Technieken voor CO<sub>2</sub>-emissiereductie bij sectoren met grootste uitstoot</i>	37
Tabel 6.2	<i>Technieken voor CH<sub>4</sub>-emissiereductie bij sectoren met grootste uitstoot</i>	37
Tabel 6.3	<i>Technieken voor NO<sub>x</sub>-emissiereductie bij sectoren met grootste uitstoot</i>	38
Tabel 6.4	<i>Technieken voor SO<sub>2</sub>-emissiereductie bij sectoren met grootste uitstoot</i>	38
Tabel 6.5	<i>Technieken voor NMVOS-emissiereductie bij sectoren met grootste uitstoot</i>	39
Tabel 6.6	<i>Technieken voor PM<sub>10</sub>-emissiereductie bij sectoren met grootste uitstoot</i>	39
Tabel C.1	<i>Hoofdbestanddelen rookgas van verschillende gasmotoren in Nederland</i>	96
Tabel C.2	<i>Technische en emissieparameters van demonstratie KV STEG-centrales</i>	109
Tabel C.3	<i>Technische en emissieparameters van KV STEG projectn in de VS</i>	111

## Lijst van figuren

Figuur 2.1	<i>Ontwikkeling van luchtverontreinigende emissies tot 2006 en doelstellingen voor 2010</i>	11
Figuur 2.2	<i>Ontwikkeling van luchtverontreinigende emissies 1990 tot 2005 met doelstelling voor 2010 en 2030</i>	12
Figuur 2.3	<i>Ontwikkeling van de Nederlandse uitstoot van broeikasgassen</i>	13
Figuur 2.4	<i>Ontwikkeling van de Nederlandse uitstoot van broeikasgassen bij de industrie, raffinaderijen en energiebedrijven</i>	14
Figuur 2.5	<i>Ontwikkeling van de Nederlandse uitstoot van broeikasgassen bij de industrie, raffinaderijen en energiebedrijven</i>	14
Figuur 4.1	<i>Schets van kosten bij nieuwe toepassing bestaande reductietechnieken</i>	25

Figuur A.1	<i>Opbouw van nieuwe KV-STEG centrale van de NUON</i>	43
Figuur A.1	<i>Schema van brandstofcel met geïntegreerde gasturbine</i>	44
Figuur A.2	<i>De verschillende typen brandstofcellen</i>	45
Figuur A.3	<i>Gasturbine met CO<sub>2</sub>-afscheiding via membraan</i>	46
Figuur A.4	<i>Principe van fusie en de ITER-reactor</i>	47
Figuur A.5	<i>HTR-brandstofballen. Uraniumkorrels ingebed in vier coatings.</i>	47
Figuur A.6	<i>Voorbeeld van hybridescheiding met membraan en destillatie</i>	48
Figuur A.7	<i>Schema van ijzerproductie met een Cyclone Converter Furnace</i>	49
Figuur A.8	<i>Schema van ijzerproductie via het Cicored proces</i>	50
Figuur A.9	<i>Schema van warmtepompdroger en foto van opstelling</i>	51
Figuur A.10	<i>Grote open ruimtes in het schuim waarop zich de katalysator bevindt</i>	52
Figuur A.11	<i>Principe van membraanreactoren</i>	53
Figuur A.12	<i>Scheiding van de azeotropen A en B via adsorptieve distillatie</i>	53
Figuur A.13	<i>HIDiC-schema en foto van ingebouwde warmtewisselaars in pilot installatie</i>	54
Figuur A.14	<i>Schema van Pervaporatie</i>	55
Figuur A.15	<i>Principe reactieve extractie</i>	55
Figuur A.16	<i>Voorbeeld van membraan geassisteerde reactieve destillatie</i>	56
Figuur A.17	<i>Werking van waterdoorlatend membraan voor energierugwinning</i>	56
Figuur A.18	<i>Roterend bed voor zuurstofverwijdering uit zeewater in de offshore</i>	57
Figuur A.19	<i>Principe van een Pulsed Compression Reactor</i>	58
Figuur A.20	<i>Hoge druk autoclaaf</i>	59
Figuur A.21	<i>Een algenkwekerij in bedrijf</i>	60
Figuur A.22	<i>Nanobuisjes</i>	60
Figuur A.23	<i>Infraroodbrander met &lt; 20 mg NO<sub>x</sub>/kWh</i>	61
Figuur A.24	<i>Ultra lage Nox-gasbrander</i>	62
Figuur A.25	<i>Absorptiesysteem van EmerChem voor motor</i>	63
Figuur A.26	<i>Scheepsmotor met SCR</i>	63
Figuur A.27	<i>De absorptiekatalysator</i>	64
Figuur A.28	<i>Het Flowpac system</i>	66
Figuur A.29	<i>Het SELOX-proces</i>	66
Figuur A.30	<i>COHPAC-naplaatsing of integratie met het elektrofilter</i>	67
Figuur A.31	<i>Schema voor toepassing TOXECOM kwikverwijdering</i>	68
Figuur A.32	<i>Het ARMIDE proces</i>	69
Figuur A.33	<i>Schema van Nox-afbraak door straatstenen</i>	70
Figuur A.34	<i>Windturbines op land en op zee</i>	71
Figuur A.35	<i>Foto van een zonnecel</i>	72
Figuur A.36	<i>Gewone zonnecel en een (triple) gestapelde zonnecel</i>	72
Figuur A.37	<i>Kunststoffen die zonlicht concentreren naar de randen</i>	73
Figuur A.38	<i>Zonne-energiecentrale te Almeria in Spanje</i>	73
Figuur A.39	<i>De SeaGen getijdeturbinen van 1,2 MW</i>	74
Figuur A.40	<i>Schema voor waterkrachtturbine op getijdewerking</i>	74
Figuur A.41	<i>Schema van een Osmosecentrale</i>	75
Figuur A.42	<i>Principe van het blue energy proces</i>	75
Figuur A.43	<i>Principe van energiewinning uit oceaandeining</i>	76
Figuur A.44	<i>Grootschalige algenkweek</i>	76
Figuur C.1	<i>Verwijderingsefficiency bij diverse gassamenstellingen van NO<sub>x</sub> en methaan<sup>12</sup></i>	96
Figuur C.2	<i>Verwijderingsgraad als functie van de tijd bij een gasmotor en een gasbrander</i>	97
Figuur C.3	<i>Temperatuureffect op verwijderingsgraad NO<sub>x</sub> (gesloten symbolen) en methaan</i>	97
Figuur C.4	<i>Methaan-SCR en methaanverbranding geplaatst in een seriele configuratie</i>	98
Figuur C.5	<i>Hoge verwijdering door SCR en verbrandingskatalysator geplaatst in serie</i>	98
Figuur C.6	<i>Bij syngas neemt door hogere temperatuur op NO<sub>x</sub>-verwijdering af</i>	99
Figuur C.7	<i>Generiek schema oxy-fuel verbranding</i>	102
Figuur C.8	<i>Schema oxy-fuel verbranding (Doosan Babcock Energy)</i>	102
Figuur C.9	<i>Projectschemata oxy-fuel project CS Energy (Queensland)</i>	103

Figuur C.10	<i>Schema oxy-fuel proces vor Circulating Fluidised Bed Combustion (CFBC)</i>	103
Figuur C.11	<i>Relatie tussen investeringskosten voor luchtscheiding en energiegebruik</i>	104
Figuur C.12	<i>CO<sub>2</sub>-compressie en gasreiniging CS Energy Queensland</i>	105
Figuur C.13	<i>Ontwikkeling oxy-fuel techniek voor kolengestookte elektriciteitsopwekking</i>	105
Figuur C.14	<i>Opwekkingsrendement van diverse kolengestookte elektriciteitsopties</i>	106
Figuur C.15	<i>Specifieke investeringskosten van diverse kolengestookte elektriciteitsopties</i>	107
Figuur C.16	<i>Elektriciteitsproductiekosten van diverse kolengestookte elektriciteitsopties</i>	107
Figuur C.17	<i>Drie generieke routes voor CO<sub>2</sub>-afvang en -opslag</i>	108
Figuur C.18	<i>Generiek schema KV STEG</i>	109
Figuur C.19	<i>Additionele opties waaronder CO<sub>2</sub>-afvang bij een KV STEG</i>	110

## Samenvatting

Het Nederlandse milieu wordt steeds schoner. Het beleid, bijvoorbeeld op het gebied van luchtverontreiniging, werpt zijn vruchten af. Een duurzame situatie op het gebied van luchtmissies (incl. broeikasgassen) is echter nog niet bereikt. Op verzoek van het Ministerie van VROM heeft ECN Beleidsstudies een inventarisatie verricht van nieuwe veelbelovende technieken voor de sector energie- en industrie die dit doel dichterbij kunnen brengen.

In het Nationale Milieubeleidsplan 4, 'Een wereld en een wil: werken aan duurzaamheid' (NMP4) heeft de Nederlandse overheid ambities geformuleerd (VROM, 2001). Zo is het doel dat de milieukwaliteit uiteindelijk zodanig is dat circa 95% van de natuur in Nederland duurzaam wordt beschermd. Daarnaast mogen er op termijn geen milieugerelateerde gezondheidseffecten meer optreden. Vertaald naar streefdoelen betekent dit dat ten opzichte van de luchtverontreinigende emissie in 2005 nog een flinke reductie noodzakelijk is. De reductiepercentages in 2030 ten opzichte van 2005 zijn: voor stikstofoxiden (NO<sub>x</sub>) 65 tot 80%, voor zwaveldioxide (SO<sub>2</sub>) 39 tot 62%, voor vluchtige organische stoffen (NMVOS) 31 tot 71%, voor ammoniak (NH<sub>3</sub>) 59 tot 77% en voor fijn stof (PM<sub>10</sub>) 75 tot 87%. Omdat er voor fijn stof waarschijnlijk geen veilige ondergrens is, is verder reductie na 2030 gewenst. Voor het belangrijkste broeikasgas koolstofdioxide (CO<sub>2</sub>) ligt het streefdoel uit het NMP4 op een reductie van 40 tot 60% in 2030. Daarna is ook hier verdere reductie nodig.

In deze studie zijn ruim tachtig veelbelovende technieken geïnventariseerd die op dit moment in ontwikkeling zijn. Het gaat hierbij om zowel integrale, procesgeïntegreerde als nageschakelde reductietechnieken en productietechnieken. Ook zijn er nog bestaande technieken beschikbaar die ook op andere plaatsen, met wellicht hogere kosten per kg emissiereductie, kunnen worden toegepast. Op basis van de inventarisatie wordt geconcludeerd dat het technisch gezien mogelijk is om in de sector energie en industrie de in het NMP4 aangegeven reductiepercentages te realiseren. Nieuwe integrale, procesgeïntegreerde als nageschakelde reductietechnieken en productietechnieken zijn hierbij een essentieel onderdeel van het reductiepad.

In grote lijnen zijn de kansrijke technieken onder te verdelen in acht stofemissies. In Tabel S.1 is voor deze negen stoffen aangegeven welke kansrijke technieken hiervoor interessant kunnen zijn. Het gaat te ver om in de samenvatting alle veelbelovende technieken te behandelen. In de tabel is daarom vooral gekeken naar de technieken die zich op de grootse emissies richten.



Tabel S.1 *Kansrijke technieken om emissies verder te reduceren*

Stofemissie	Kansrijke technieken
Kooldioxide (CO <sub>2</sub> )	Energiebesparing, duurzame energie en CO <sub>2</sub> -afvang en -opslag (CCS) zijn belangrijk. Ook zijn er nog mogelijkheden om elektriciteit efficiënter op te wekken.
Methaan (CH <sub>4</sub> )	Het (katalytisch) afbreken van methaan in lage concentraties.
Lachgas (N <sub>2</sub> O)	Het ontstaan van lachgas verminderen of emissie katalytisch afbreken bij de caprolactam productie.
Stikstofoxide (NO <sub>x</sub> )	Ultra lage NO <sub>x</sub> -branders. Op plaatsten waar een hoge emissie resteert rookgasreiniging met SCR en diverse reductiemiddelen of katalytische absorptiesystemen. Op termijn de toepassing van brandstofcellen, die nagenoeg NO <sub>x</sub> -emissie vrij zijn.
Zwavel dioxide (SO <sub>2</sub> )	Bij procesemissies van gaswassers gebruik maken. Voor kolencentrales wassers met hogere verwijderingsrendementen dan nu gebruikelijk. Ook kolenvergassing kan aan lage SO <sub>2</sub> -emissies bijdragen.
Ammoniak (NH <sub>3</sub> )	Bij bedrijven met deze procesemissie ammoniakstrippers of absorbers plaatsen.
Vluchtige organische stoffen (NMVOS)	Actief beleid op het gebied van lekdetectie Maatregelen om lage concentraties NMVOS in afgezogen lucht af te breken. Productieprocessen en producten die minder NMVOS emissie met zich meebrengen.
Fijn stof (PM <sub>10</sub> ) en niet vluchtige zware metalen	Meer toepassen van doekfilters.
Vluchtige zware metalen zoals kwik.	Actieve kool gebruiken om dit te verwijderen

Voor een aantal sectoren zoals de zware metaalindustrie, de raffinaderijen en de carbon black productie kan in overleg met de bedrijven een lange termijn visie uitgewerkt worden, waarin wenselijke procesveranderingen en vernieuwingen kunnen worden meegenomen.

## 1. Inleiding

Het Nederlandse milieu wordt steeds schoner. Het beleid, bijvoorbeeld op het gebied van luchtverontreiniging, werpt zijn vruchten af. Een duurzame situatie op het gebied van lucht-emissies (incl. broeikasgassen) is echter nog niet bereikt. Op verzoek van het Ministerie van VROM heeft ECN Beleidsstudies een inventarisatiestudie verricht naar nieuwe technologie die dit doel dichterbij kunnen brengen.

Met de huidige technologie lijkt het erop dat Nederland in een situatie van ‘met kleine stapjes vooruit’ terecht komt. Gaat het tempo van verduurzaming hierdoor afnemen of zijn er op dit moment nieuwe technieken of technologische doorbraken bekend of in ontwikkeling die na 2020 nieuw perspectief kunnen geven? Zaken waarmee Nederland, op plekken waar de verduurzaming dreigt vast te lopen, een stap verder kan zetten.

De studie richt zich op de sectoren industrie, raffinaderijen en energiebedrijven. De focus ligt hierbij op nieuwe technologieën of sterke verbeteringen van bestaande technologieën. De volgende technologische terreinen komen aan de orde.

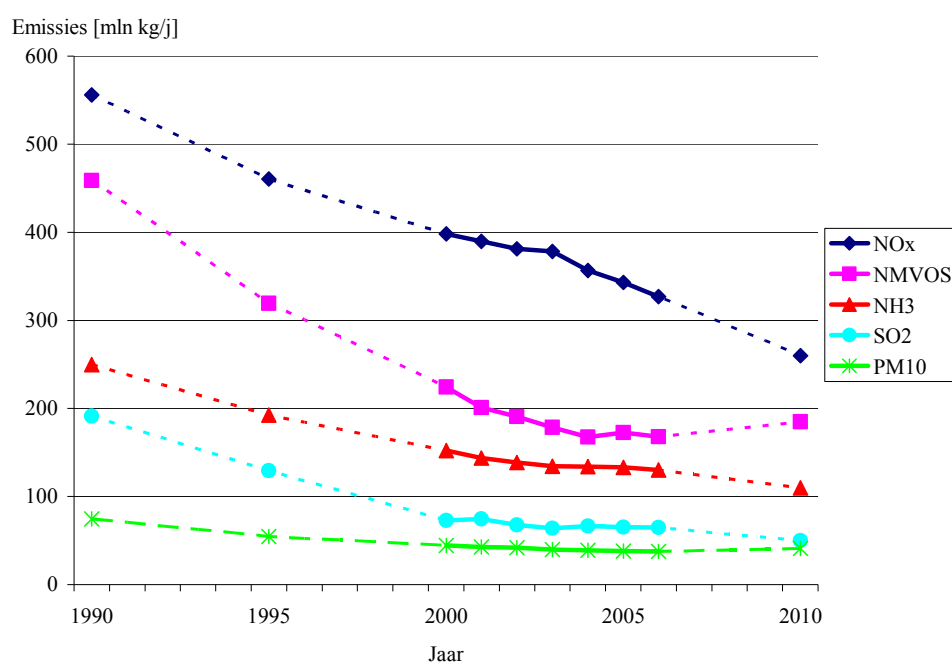
- Energieomzettingsinstallaties, zoals elektriciteitscentrales.
- Emissiereductietechnieken, zowel procesgeïntegreerd als ‘end of pipe’.
- Nieuwe productietechnieken en nieuwe materialen.
- Opwekking van schone duurzame energie.
- Energieopslag.

Aan de orde komen technieken die directe invloed hebben op de uitstoot van stikstofdioxide ( $\text{NO}_x$ ), zwaveldioxide ( $\text{SO}_2$ ), niet methaan koolwaterstoffen (NMVOS), Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ), fijn stof of zware metalen (me name kwik) en technieken die zich richten op de reductie van broeikasgassen. Na het in kaart brengen van de noodzakelijke reducties na 2020 in Hoofdstuk 2 (de uitdaging) wordt in Hoofdstuk 3 de emissie per sector besproken. In Hoofdstuk 4 wordt stilgestaan bij technische mogelijkheden voor emissiereductie die in diverse stadia van ontwikkeling zijn. Deze technieken worden in de bijlagen nog in meer detail worden besproken. Ook worden hier enkele belangrijke al ‘toegepaste’ technieken aangegeven. In Hoofdstuk 5 wordt per emissie aangegeven welke technische mogelijkheden er zijn om in de belangrijkste subsectoren uit de sector industrie en energie de emissies te reduceren. In Hoofdstuk 6 volgen hierna de conclusies. In Bijlage A van dit rapport zijn een groot aantal technische reductie-opties kort beschreven. Er zijn echter veel meer mogelijkheden, die in de Bijlage B geïllustreerd worden met lijsten (long-list) uit andere bronnen. Ook zijn drie in het oogspringende reductiemogelijkheden in de Bijlage C verder uitgewerkt.

## 2. Wat zijn de uitdagingen?

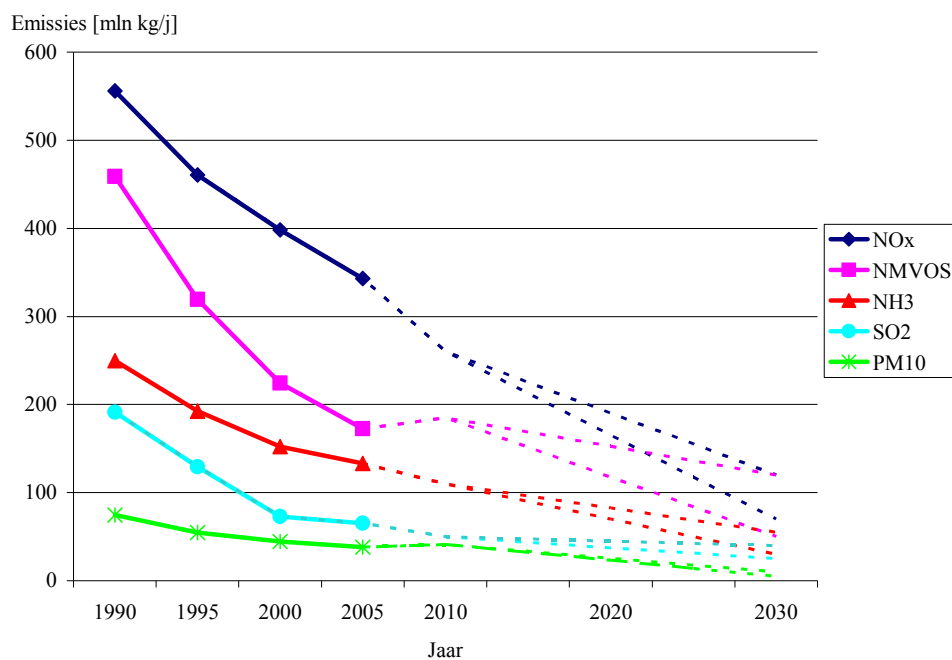
### 2.1 Luchtverontreinigende stoffen

In Figuur 2.1 is de emissieontwikkeling van 1990 tot 2006 geschetst voor een vijftal luchtverontreinigende stoffen (bron CBS). Het maakt duidelijk dat er de afgelopen jaren al grote reducties bereikt zijn. Voor SO<sub>2</sub> lagen eerdere emissieniveaus hier zelfs nog ver boven. In deze figuur zijn ook de NEC-doelstellingen (National Emissions Ceilings; emissieplafonds voor Nederland in het kader van EU-beleid) voor 2010 opgenomen aangevuld met de verwachtingswaarde voor de emissie van fijn stof. De figuur maakt duidelijk dat het niet onrealistisch is, dat bij voortzetting van de huidige reductiesnelheden, deze 2010 emissieniveaus inderdaad bereikt worden.



Figuur 2.1 *Ontwikkeling van luchtverontreinigende emissies tot 2006 en doelstellingen voor 2010*

Hoewel er in 2010 grote stappen voorwaarts gemaakt zijn, is een duurzame situatie dan nog lang niet bereikt. In het Nationaal Milieubeleidsplan 4 (NMP4) zijn streefdoelen geformuleerd voor de emissiereductie in 2030 ten opzichte van 1990. De ambities bij deze streefdoelen voor het oplossen van de hardnekkige milieuproblemen zijn hoog. Zo is het doel dat de milieukwaliteit uiteindelijk zodanig is dat circa 95% van de natuur in Nederland duurzaam wordt beschermd. Daarnaast mogen er op termijn geen milieugerelateerde gezondheidseffecten meer zijn. Om dit te bereiken worden de volgende emissiereducties genoemd: voor NO<sub>x</sub> van 80 tot 90%, voor SO<sub>2</sub> van 80 tot 90%, voor VOS van 75 tot 90%, voor NH<sub>3</sub> 75 tot 85% en voor fijn stof van 85 tot 95% (RIVM, 2001). Voor CO<sub>2</sub> liggen de 2030 streefdoelen rond de 40 tot 60% reductie. In Figuur 2.2 is de ontwikkeling richting de duurzame situatie in 2030 geschetst voor de vijf luchtverontreinigende emissies.



Figuur 2.2 *Ontwikkeling van luchtverontreinigende emissies 1990 tot 2005 met doelstelling voor 2010 en 2030*

Hoewel er nog geen verdeling gemaakt is van de streefdoelen over de diverse sectoren zal iedere sector hieraan een ‘evenredige’ bijdrage moeten leveren. Wat een recht evenredige bijdrage zou betekenen voor de sector industrie en energiebedrijven is zichtbaar in Tabel 2.1. Een verdere verdeling naar subsectoren is mogelijk. De tabel maakt duidelijk dat er ook ten opzichte van de situatie in 2005 nog aanzienlijke verdere reducties nodig zijn. Huidige technologieën gaan hier waarschijnlijk tekort schieten (of zijn nog extreem duur) zodat technologische verbeteringen nodig zijn om deze doelen te realiseren. Hoewel er in het NMP4 geen gekwantificeerde doelen voor genoemd zijn, zal in dit rapport ook gekeken worden naar zware metalen en separaat naar kwik.

Tabel 2.1 *Reductiedoelen doorvertaald naar de sector industrie en energiebedrijven [kton/j]*

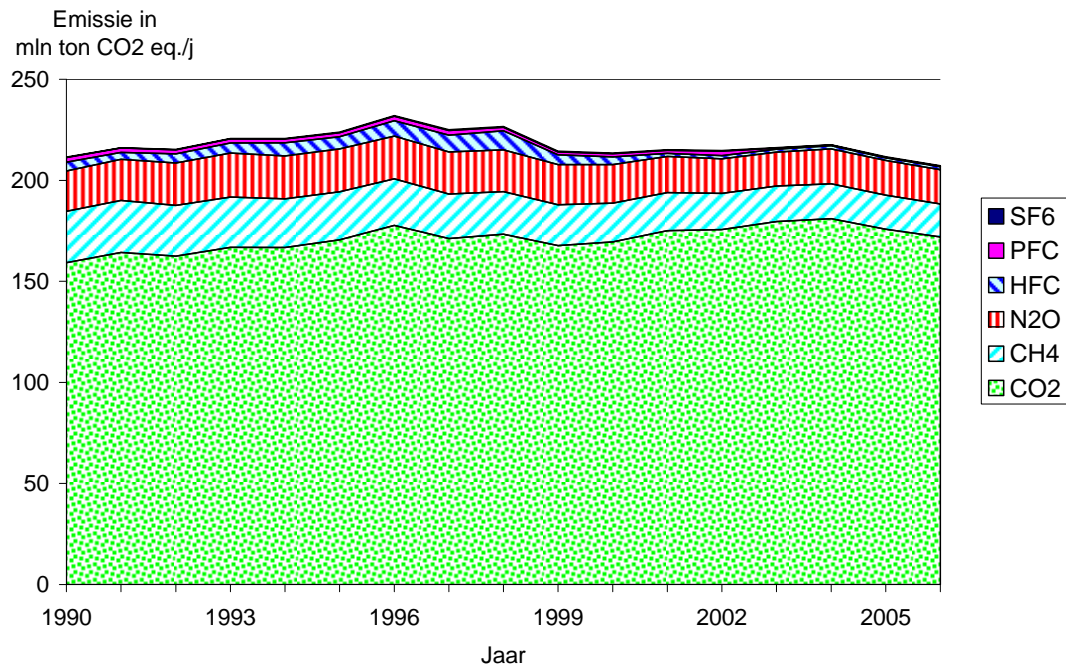
Stof	NO <sub>x</sub>	NMVOS	NH <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>	PM <sub>10</sub>
Reductiedoel t.o.v. 1990	80%-90%	75%-90%	75%-85%	80-90%	85-95%
Resteert t.o.v. emissie 2005	65%-80%	31%-71%	59%-77%	39%-62%	75%-87%
Emissie industrie&energie 2005	89,5	58,3	2,6	57,0	10,9
Emissie richting 2030	18-31	41-17	0,6-1,1	22-35	1,4-2,8

## 2.2 Stoffen die bijdragen aan klimaatverandering

De ontwikkeling van de uitstoot van broeikasgassen is zichtbaar in Figuur 2.3 (MNP, 2008). De totale uitstoot is na een aanvankelijke stijging ten opzichte van 1990 in 2006 uiteindelijk met 2% gedaald. Vooral na 1997 is de emissies van de fluorhoudende gassen als zwavelhexafluoride (SF<sub>6</sub>), fluorkoolwaterstof (HFC) en perfluorkoolwaterstof (PFC) fors afgenomen. Ten opzichte van 1990 is de daling bij de emissies van lachgas (N<sub>2</sub>O) 15% en bij methaan (CH<sub>4</sub>) zelfs 35%<sup>1</sup>.

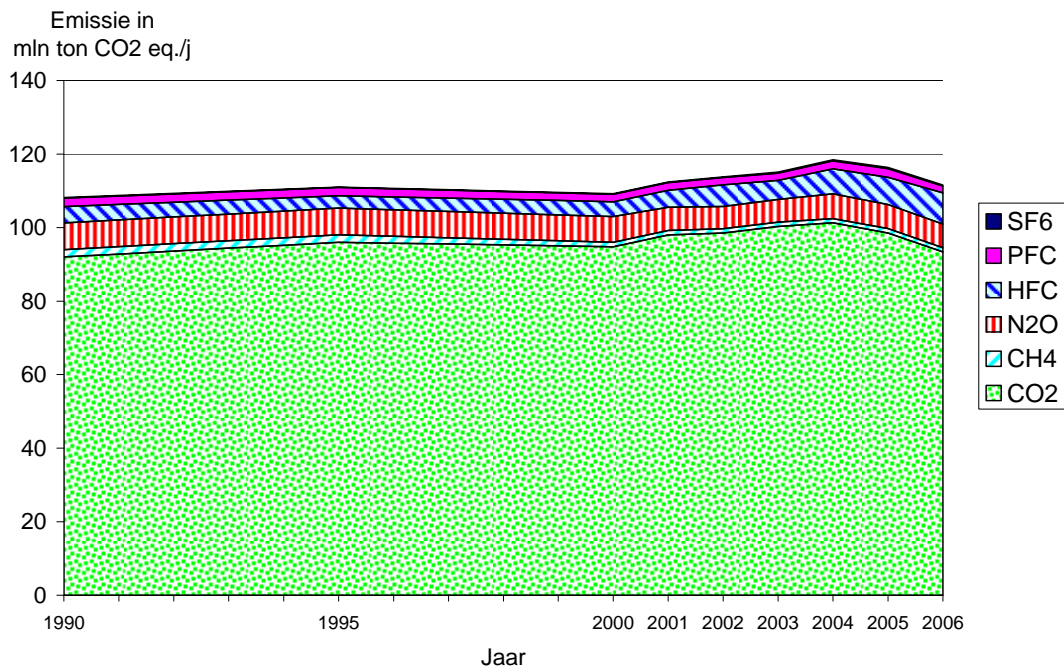
<sup>1</sup> Van de niet CO<sub>2</sub> broeikasgassen is de emissie soms heel specifiek aan bepaalde processen gebonden. De emissies van HFC's komen voor 80% uit het gebruik van deze stoffen en voor 20% uit de huidige productie. De emissies PFC's komen voor 25% vrij bij de metaalproductie en voor 75% bij het overige gebruik van deze stoffen. De emissies van SF<sub>6</sub> komt vrij bij het gebruik van deze stoffen (SF<sub>6</sub> wordt onder andere gebruikt in dubbelglas).

De emissie van CO<sub>2</sub> nam over de hele periode met 8% toe. De emissie ligt in 2006 met 207 Mton boven de circa 200 Mton die Nederland in Kyoto-periode 2008-2012 mag uitstoten (-6% reductie ten opzichte van 1990 en voor de F-gassen ten opzichte van 1995). In het Nederlandse plan om het Kyoto-doel te halen is daarom oorspronkelijk uitgegaan van de inkoop van 20 Mton aan CO<sub>2</sub>-emissierechten per jaar. Doordat in het huidige emissiehandelssysteem de verplichtingen voor de grote industrie en energiebedrijven door de EU scherper zijn gesteld, hoeft de Nederlandse overheid minder rechten in te kopen. De industrie en de energiebedrijven moeten nu meer maatregelen nemen dan voorzien of extra CO<sub>2</sub>-emissierechten inkopen.

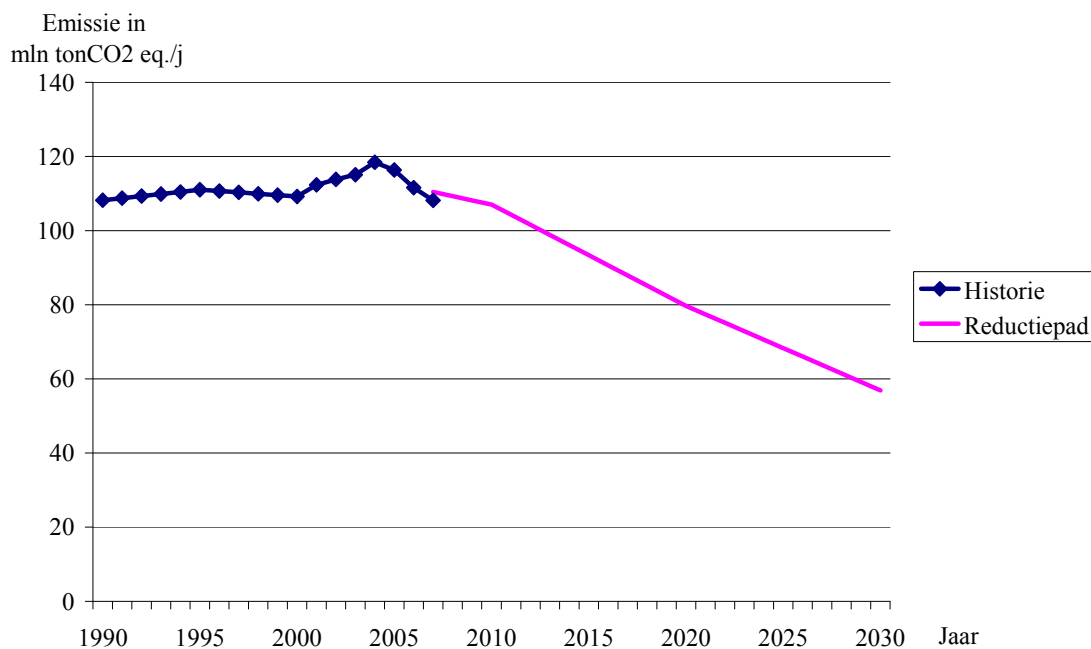


Figuur 2.3 *Ontwikkeling van de Nederlandse uitstoot van broeikasgassen*

Voor CO<sub>2</sub> ligt het streefdoel uit het NMP4 op een reductie van 40 tot 60%. Gesteld dat dit breder opgevat kan worden, namelijk als doel voor alle broeikasgassen samen, dan kan, net als bij de luchtverontreinigende stoffen, een analyse gemaakt worden voor de nog te realiseren reductie in de sector industrie en energiebedrijven.



Figuur 2.4 *Ontwikkeling van de Nederlandse uitstoot van broeikasgassen bij de industrie, raffinaderijen en energiebedrijven*



Figuur 2.5 *Ontwikkeling van de Nederlandse uitstoot van broeikasgassen bij de industrie, raffinaderijen en energiebedrijven*

De diverse klimaatdoelen kunnen ook afgezet worden tegen de emissie van de sector industrie en energiebedrijven. In Figuur 2.5 is een mogelijk ontwikkelingspad uitgezet, waarbij deze sector na 2006 evenredig aan de gewenste reducties bijdraagt. In de figuur is uitgaande van een gerealiseerde 2% reductie in 2006 een reductie van 6% in 2010, 30% in 2020 en 50% in 2030. De 30% in 2020 is het doel van de Nederlandse overheid. De 50% in 2030 is het gemiddelde van 40 en 60%. Ook al zouden de doelen minder scherp gesteld worden, dan nog is het duidelijk dat er

een forse emissiereductie noodzakelijk is.

Een reductie van broeikasgassen zal, als het om CO<sub>2</sub>-reductie gaat, ook een effect hebben op de emissie van de NEC-stoffen. Het effect is echter zeker niet lineair, en bij sommige opties zoals de inzet van biobrandstoffen, zal het effect zelfs negatief kunnen zijn. De inzet van andere vormen van duurzame energie en energiebesparing zal echter wel direct leiden tot verminderde inzet van fossiele brandstoffen en daarmee ook tot vermindering van de daarmee samenhangende emissies. Klimaatbeleid kan daarmee ook een bijdrage leveren aan het realiseren van met name de SO<sub>2</sub>- en NO<sub>x</sub>-doelen, maar maakt technologische verbeteringen om deze emissies te reduceren zeker niet overbodig, zie ook (Daniëls, 2008).

### 2.3 2030 Perspectief

De voorgaande paragrafen maken voldoende duidelijk dat er zowel op het gebied van luchtverontreiniging als op het gebied van klimaatverandering nog het nodige moet gebeuren na 2020. Als de luchtverontreinigingsdoelen in 2030 gehaald zouden worden dan kan min of meer gesproken worden van een op nationale schaal voldoende aangepakt en opgelost probleem, dat alleen nog onderhoud en geen aanscherping meer vraagt. Het gaat dan om NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> en NMVOS (voor wat betreft smogvorming<sup>2</sup>) en problemen als verzuring, vermisting en smogvorming. Dit onder voorbehoud, dat ook het buitenland afdoende maatregelen neemt. Wel kunnen er lokaal nog problemen optreden, als er veel bronnen op een klein gebied zijn. Verder is er voor fijn stof waarschijnlijk geen grens voor onschadelijkheid, zodat verdere reductie wenselijk blijft. De aanpak van klimaatverandering kan, ook na 2030 voor een verdere reductie van luchtverontreinigende emissies zorgen.

Voor klimaatverandering zal er rond 2020 een omslag plaats gaan vinden. Vooral bij de elektriciteitsvoorziening, maar ook bij grootschalige industrie. Wordt voor 2020 nog gekeken naar reductie van luchtverontreinigende emissies, na 2020 wordt, gezien de reductiedoelen, CO<sub>2</sub>-afvang en -opslag (Carbon Capture and Storage; CCS) de norm voor nieuwe centrales en nieuwe industriële grootverbruikers. Niet uitgesloten is dat dit zelfs tot aanpassings- of vervangingsinvesteringen gaat leiden. Grootschalige emissiereducerende technieken bij nieuwe installaties zonder CCS verliezen na 2020 dan ook hun waarde. Voor klimaatverandering is in 2030 nog geen duurzame situatie bereikt.

Ook op het gebied van elektriciteitsvoorziening gaat er het nodige veranderen. De doelstelling voor windenergie leidt ertoe dat Nederland, net zoals nu al in delen van Denemarken het geval is, na 2020 op tijdstippen met voldoende windaanbod en weinig elektriciteitsvraag volledig met wind in de elektriciteitsvraag kan voorzien. Bepaalde centrales, maar ook WKK-installaties zullen wellicht toch door willen of moeten draaien, wat grootschalige export van elektriciteit op dit soort momenten nodig maakt. Met een verdere uitbreiding van wind op zee, na 2020, zal deze problematiek alleen maar toenemen<sup>3</sup>. Om maximaal gebruik te kunnen maken van duurzame energie worden technieken extra interessant die:

- Alleen elektriciteit produceren als er geen duurzame (wind)energie beschikbaar is.
- Systemen die efficiënt elektriciteit gebruiken in plaats van warmte uit fossiele brandstoffen (warmtepompen, warmte/koude opslag).
- Systemen met relatief lage kosten die een kort overschot aan elektriciteit efficiënt in waterstof om kunnen zetten.
- Systemen die waterstof gebruiken in plaats van fossiele brandstof.

---

<sup>2</sup> Specifieke stoffen die onderdeel van NMVOS uitmaken kunnen ook geuroverlast geven of giftig zijn.

<sup>3</sup> Elektriciteitsproductie uit zonlicht (Zon PV) heeft een vergelijkbaar probleem, zij het dat het aantal bedrijfsuren veel lager is. Omdat Zon-PV en wind redelijk op elkaar aansluiten, wordt de inpassing van Zon-PV pas lastiger als dit vermogen 50% of meer van dat van wind bedraagt. Vermoedelijk treedt dit niet op voor 2030.

### 3. Emissies per sector

Het vorige hoofdstuk (Hoofdstuk 2) heeft duidelijk gemaakt dat er nog forse reducties in de industrie- en energiesector nodig zijn om duurzaamheidsdoelen voor 2030 te realiseren. Voor de volledigheid is in onderstaande tabellen voor een aantal stoffen nog de bijdrage van de diverse sectoren aan de emissie in 2006 aangegeven (bron CBS). In de overzichten zijn ook de emissies opgenomen van mobiele bronnen en stationaire installaties buiten de energie- en industriesector. Ook zeescheepvaart is toegevoegd, hoewel de sector definitie tussen de diverse emissies kan verschillen.

Tabel 3.1 *Emissie per sector in 2006*

[kton/j]	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	NM-VOS	PM <sub>10</sub>
Energiesector	52300	36,0	0,5	42,0	9,8	0,0	7,3	0,4
Raffinaderijen	11600	0,9	0,0	10,1	32,4	0,0	10,7	1,7
Chemische industrie	16300	13,3	20,2	13,9	4,0	1,3	8,6	1,3
Basismetaalindustrie	7100	1,2	0,0	7,9	6,9	0,1	1,5	2,0
Voedings- en genotmiddelen-industrie	3800	0,6	0,0	3,3	0,6	0,4	5,3	2,6
Bouwmaterialenindustrie	2400	0,2	0,0	5,3	3,1	0,4	2,1	1,7
Overige industrie	3600	0,4	0,0	3,2	0,4	0,0	21,5	1,2
Landbouw	7700	418,4	30,4	12,5	0,0	117,4	1,8	8,6
Handel, Diensten, Overheid	10800	1,1	0,1	11,3	0,4	0,6	19,9	0,9
Huishoudens	18600	16,2	0,2	14,2	0,5	7,4	31,7	3,5
Milieudienstverlening	7300	282,1	1,6	3,6	0,2	0,3	1,3	0,2
Overige	800	1,8	0,0	0,8	0,2	0,0	8,3	1,3
Mobiele bronnen exl zeevaart	41400	2,5	1,4	199,0	6,2	2,5	48,0	12,4
Totaal	183700	774,9	54,6	327,1	64,7	130,3	167,9	37,6
Pm zeevaart	1400	0,2	0,1	123,4	63,6	0,0	3,7	7,2

Uit Tabel 3.1 en Tabel 3.2 blijkt dat de energiesector, de raffinaderijen, de chemische industrie en de basismetaal samen met de voedings- en genotmiddelenindustrie verantwoordelijk zijn voor circa 50% van de CO<sub>2</sub>-uitstoot. Bij lachgas (N<sub>2</sub>O) en methaan (CH<sub>4</sub>) gaat het om specifieke veroorzakers als salpeterzuurproductie, gaswinning of stortplaatsen binnen diverse sectoren. Op de overige broeikasgassen, de fluorhoudende gassen, is in Paragraaf 2.2 al ingegaan. Voor NO<sub>x</sub>- en SO<sub>2</sub> uit stationaire bronnen is het aandeel van de vijf genoemde sector ruim boven de 50%. Bij NMVOS blijkt de overige industrie een belangrijke bron. De emissie van fijn stof is breder over de sectoren gespreid. De gemiddelde deeltjesgrootte per sector kan wel verschillen. De emissie van PM<sub>10</sub> van de energiesector is in het overzicht zelfs vrij beperkt te zijn. Het gaat hierbij wel om erg fijne deeltjes.

In Tabel 3.3 zijn de emissie naar lucht opgenomen van zware metalen zoals deze bij op de site van de emissieregistratie gevonden kunnen worden. Helaas blijkt dit niet compleet te zijn. Zo ontbreken de emissies van arseen, koper en nikkel van de zware metaalindustrie en ontbreken ook emissies van de raffinaderijen. De werkelijke emissie van arseen is meer dan 10 keer hoger dan aangegeven in de tabel, zie ook (Peek, 2007). Volgens een RIVM rapport zijn voor een aantal zware metalen als arseen, cadmium, nikkel en kwik de concentraties in de Nederlandse buitenlucht zodanig laag, dat er maar één meetstation nodig is om aan de Europese eisen te voldoen. Voor kwik zijn, volgens hetzelfde RIVM rapport, in Europees verband zelfs geen streef- en drempelwaarden vastgesteld omdat de concentraties in lucht nu al zo laag zijn dat er geen milieu- en gezondheidsrisico's verwacht worden (Manders, 2007).



Tabel 3.2 *Relatieve bijdrage per sector in 2006*

[%]	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	NM-VOS	PM <sub>10</sub>
Energiesector	28	5	1	13	15	0	4	1
Raffinaderijen	6	0	0	3	50	0	6	5
Chemische industrie	9	2	37	4	6	1	5	3
Basismetalaalindustrie	4	0	0	2	11	0	1	5
Voedings- en genotmiddelen-industrie	2	0	0	1	1	0	3	7
Bouwmaterialenindustrie	1	0	0	2	5	0	1	4
Overige industrie	2	0	0	1	1	0	13	3
Landbouw	4	54	56	4	0	90	1	23
Handel, Diensten, Overheid	6	0	0	3	1	0	12	2
Huishoudens	10	2	0	4	1	6	19	9
Milieudienstverlening	4	36	3	1	0	0	1	0
Overige	0	0	0	0	0	0	5	3
Mobiele bronnen exl zeevaart	23	0	3	61	10	2	29	33
Totaal	100	100	100	100	100	100	100	100
Pm zeevaart	1	0	0	38	98	0	2	19

Tabel 3.3 *Emissie van zware metalen naar de lucht in 2006 (let op: onvolledig)*

	Arseen- verb. (als As)	Cadmium- verb. (als Cd)	Chroom- verb. (als Cr)	Koper- verb. (als Cu)	Kwik- verb. (als Hg)	Lood- verb. (als Pb)	Nikkel- verb. (als Ni)	Zink- verb. (als Zn)
Energiesector		0	150	104		56		
Raffinaderijen			64	11	1	7		244
Chemische Industrie	0			43		2545	33	5761
Overige industrie		0	1529		301	24740		40620
Afvalverwijdering	11	254	121	61	186	168		4
Bouw	0	63	0	0	0	0	0	0
Consumenten	12	0	6	10270	23	2585	23	4,802
Drinkwatervoorziening	0	60	0	0	0	0	9	0
Handel, Diensten en Overheid (HDO)	1	11	11	6	94	7	325	16
Landbouw	0	1	0	0	0	0	0	6,504
Riolering en waterzuiverings- installaties	0	724	0	0	0	0	0	0
Verkeer en vervoer		0	413	70270	34	8,898	27740	39030

## 4. Technische reductiemogelijkheden

### 4.1 In welke fase verkeert de technologie?

In Bijlage A van dit rapport zijn een aantal mogelijkheden om tot emissiereductie te komen kort toegelicht, deze staan ook in Tabel 4.1 en Tabel 4.2 Omdat dit uiteindelijk buiten de scope van dit rapport valt, zijn de duurzame energie opties uit Bijlage A hierbij niet opgenomen.

Tabel 4.1 *Technologieën voor milieuverbetering uit Bijlage A: (energie) processen*

Nieuwe (energie) processen in sectoren	Nieuwe (energie) processen in sectoren
<i>Elektriciteitsproductie</i>	<i>Industriële energiebesparing in de chemie</i>
Kolenvergasser STEG (IGCC)	Katalytische schuim reactoren (besparing pompenergie)
Kolenvergasser met waterstofopslag en flexibele STEG	Membraanreactoren (niet Selectief)
Hoge temperatuurbrandstofcel (SOFC) met nageschakelde gasturbine	Adsorptive distillation
Hoge temperatuurbrandstofcel (SOFC) in WKK	Heat Integrated distillation
Oxi-fuel verbranding (verbranden met pure zuurstof)	Membraanhybride scheidingsprocessen
Oxi-fuel verbranding in gasturbine met membranen	Reactieve extractie
Verbetering conventionele centrales	Reactieve destillatie ondersteund met membranen
Kernfusie	Condenswater en energierugwinning uit rookgas met membranen
Hoge temperatuur kernreactor	Industriële energiebesparing via betere chemische reacties
<i>Raffinaderijen</i>	Roterende gepakte bedden
Hydrotreating met in vloeistof opgeloste waterstof (IsoTherming)	Reactoren met ultrageluid.
Energiebesparing door membraan scheiding bij raffinaderijen	Reactoren met compressie en drukpulsen.
Gebruik van Ionische vloeistof als ‘oplosmiddel’ bij alkylatie	Gebruik van microgolven in reacties
Membranen voor waterstofwinning uit gastromen	Gebruik van licht in reacties
<i>Kunstmestproductie</i>	Microreactors voor nauwkeurige productie fijnchemie
Ammonia productie uit (duurzame) elektriciteit	<i>Voedingsmiddelen industrie</i>
<i>Zware metaalindustrie</i>	Hogedruk behandeling in plaats van steriliseren bij voedingsmiddelen
Cyclone converter furnace ijzerproductie.	<i>Industriële Materialenproductie</i>
Cicored proces, ijzer maken met waterstof	Bioplastic
Papierindustrie	Combinatie van kunststof met goedkope nano vulmaterialen
Papierproductie zonder water	Algen als leverancier voor chemische grondstoffen
Houtchips voor papier voorbehandelen met enzymen	Nanomaterialen. Carbon nanobuisjes vervangen metalen
Drogen met warmtepompen	

Tabel 4.2 *Technologieën voor milieuverbetering uit Bijlage A: Reductietechnieken*

Reductietechnieken	Reductietechnieken
<i>Nieuwe technologie voor NO<sub>x</sub>-emissiereductie</i>	<i>Zwavelreductie-opties</i>
Verbranding met lage NO <sub>x</sub> -uitstoot	Flowpac bubbelbad SO <sub>2</sub> -wasser >99% (alternatief voor FGD)
Gasturbines met katalytische branders	H <sub>2</sub> S verwijdering uit stortgas en biogas met SELOX
Stralingsbranders 10 tot 25 ppm NO <sub>x</sub> in gasstook bij kleinere ketels	Zwavel verwijderen uit olie en gasstromen voor brandstofcellen
Gebruik van ultra low NO <sub>x</sub> burners voor gasstook	<i>Reductie van de emissie van fijn stof</i>
Gebruik van ultra low NO <sub>x</sub> burners voor oliestook	Stof verwijdering met Indigo Agglomerator
<i>Rookgasreiniging voor NO<sub>x</sub></i>	<i>Reductie van de emissie van zware metalen</i>
Katalytische absorptiesystemen voor NO <sub>x</sub> -reductie bij gasturbines	Stof en kwik verwijdering met COHPAC & TOXECON
Hoog rendement SCR-installaties voor NO <sub>x</sub> -verwijdering	Verwijderen van kwik in gas met actieve koolstof en metaal oxide
SCR-installaties voor NO <sub>x</sub> -verwijdering met aanwezige methaan	Verwijderen van kwik in kolencentrales met goedkope koolstof.
NO <sub>x</sub> -adsorptiekatalysator voor lean burn gasmotoren	<i>Reductie van methaanemissies</i>
SCR-installaties voor NO <sub>x</sub> -verwijdering met behulp van LPG	Methaankatalysator
<i>Reductie van NMVOS</i>	<i>Reductie van CO<sub>2</sub>-emissies</i>
Laminerende films in plaats van verven (NMVOS-reductie)	CO <sub>2</sub> -verwijdering uit rookgas met calcium oxide
Plasma technieken voor NMVOS-verwijdering	CO <sub>2</sub> -verwijdering uit rookgas door sterke koeling
Betere lekdetectie met lasertechnologie voor NMVOS-reductie	Overige 'end of pipe' reductie-opties
Verfterugwinning bij het spuiten door een waternevel (NMVOS-reductie)	Titaandioxide voor verwijdering van stikstofoxiden uit de buitenlucht
Vernietiging NMVOS en gevaarlijke stoffen met vloeibaar zout (ionic liquid)	Aanbrengen constructie die elektrostatische stof filtert bij wegen.
	Olivine als optie voor CO <sub>2</sub> -opslag

Na een overzicht van integrale, procesgeïntegreerde als nageschakelde reductietechnieken en productietechnieken die op andere plaatsen genoemd worden (Bijlage B) zijn in Bijlage C nog een drietal reductietechnieken als voorbeeld nader uitgewerkt..

Om de technieken uit Tabel 4.1 en Tabel 4.2 nader te kunnen beoordelen zijn een aantal zaken van belang Het gaat hierbij onder andere om: *In welke fase verkeert de technologie?*

Soms is een techniek nog in de fase van 'proof of concept' en is nog niet duidelijk of het in de werkelijkheid ook werkt. De techniek is dan vaak nog in onderzoek bij een universiteit. Een fase verder is de ontwikkelingsfase waarbij daadwerkelijk een kleine installatie gebouwd wordt op laboratorium schaal en later een grotere op semi-technische schaal (dit is de *R&D fase* waar GTI's als TNO en ECN een rol kunnen spelen). Hierna volgt de *demonstratiefase*, waarbij een installatie daadwerkelijk op (bijna) normale grootte gebouwd wordt. Als deze installatie een aantal jaren succesvol is kan gesproken worden van een Beschikbare Techniek. Voordat echt over daadwerkelijke *BBT (Best Beschikbare Techniek)* gesproken kan worden moeten er echter vaak meerdere installaties gebouwd zijn. Als er bijvoorbeeld tien installaties gebouwd zijn, kan gesproken worden van een beschikbare techniek, die afhankelijk van de financiële balans BBT genoemd kan worden.

In de Tabel 4.3, Tabel 4.4, Tabel 4.5 en Tabel 4.6 zijn van de diverse geïnventariseerde technieken de belangrijkste kenmerken opgenomen. Daarnaast kunnen ook reeds bestaande technieken, of technieken die al dicht tegen de toepassing aanliggen vaker worden toegepast om de emissies te reduceren. Het gaat hier met name om:

- Selectieve katalytische reductie met ammoniak om NO<sub>x</sub>-emissies te reduceren.
- Toepassing van water met een kalkoplossing om SO<sub>2</sub>-emissie te reduceren.
- Toepassing van doekfilters om emissies van fijn stof te reduceren.
- Hoewel nog in ontwikkeling: CO<sub>2</sub>-afvang en -opslag (CCS; Carbon Capture and Storage).
- N<sub>2</sub>O katalysatoren om procesemissies te reduceren.
- Afzuiging van NMVOS-emissies gevolgd door naverbranding.
- Verdere toepassing van energiebesparingsmaatregelen.

Het is dus niet zo dat uitsluitend nieuwe technieken nodig zijn om verdere reducties te bereiken. Ook huidige technieken kunnen door een bredere toepassing nog tot aanzienlijke reducties leiden. Natuurlijk kan men zich afvragen waarom deze huidige technieken nog niet overal, waar mogelijk is, worden toegepast. Dit heeft voornamelijk met de kosten te maken (zolang het niet verplicht is, spelen hier de bedrijfseconomische afwegingen) en voor een klein deel met onbekendheid en risico's.

Tabel 4.3 *Aspecten van de divers technologieën (1)*

	Doelstof	Andere emissies	Voor of na 2020	Opmerkingen
<b>Elektriciteitsproductie</b>				
<i>Kolenvergasser STEG (IGCC)</i>	CO <sub>2</sub> via rendement	Minder SO <sub>2</sub> , PM <sub>10</sub> , NO <sub>x</sub> dan gewone kolen	voor	
<i>Kolenvergasser met waterstofopslag en flexibele STEG</i>	CO <sub>2</sub> via CCS	Minder SO <sub>2</sub> , PM <sub>10</sub> , NO <sub>x</sub> dan gewone kolen	na	Goed inpasbaar met duurzame energie
<i>Hoge temperatuurbrandstofcel (SOFC) met nageschakelde gasturbine</i>	CO <sub>2</sub> via rendement	Gasstook vrijwel emissievrij	R&D	
<i>Hoge temperatuurbrandstofcel (SOFC) in WKK</i>	CO <sub>2</sub> via rendement	Gasstook vrijwel emissievrij	R&D	
<i>Oxi-fuel verbranding (verbranden met pure zuurstof)</i>	CO <sub>2</sub> via CCS	NO <sub>x</sub> -emissievrij	demo	
<i>Oxi-fuel verbranding in gasturbine met membranen</i>	CO <sub>2</sub> via CCS	Vrijwel emissievrij	R&D	
<i>Verbetering conventionele centrales</i>	CO <sub>2</sub> via rendement		voor	
<i>Kernfusie</i>	alle	Radioactief afval	na 2030	Grote investering Blijft een kerncentrale
<i>Hoge temperatuur kernreactor</i>	alle	Veel radioactief afval	demo	
<b>Raffinaderijen</b>				
<i>Hydrodreating met in vloeistof opgeloste waterstof (IsoTherming)</i>	Energiebesparing		voor	beperkt potentieel
<i>Energiebesparing door membraan scheiding bij raffinaderijen</i>	Energiebesparing		R&D	
<i>Gebruik van Ionische vloeistof als 'oplosmiddel' bij alkylatie</i>	Energiebesparing		R&D	beperkt potentieel
<i>Membranen voor waterstofwinning uit gasstromen</i>	Energiebesparing		voor	beperkt potentieel
<b>Kunstmestproductie</b>				
<i>Ammonia productie uit (duurzame) elektriciteit</i>	CO <sub>2</sub>	Wellicht wat verbrandingsemissies	na	Goed inpasbaar met duurzame energie
<b>Zware metaalindustrie</b>				
<i>Cyclone converter furnace ijzerproductie.</i>	Luchtvervuiling (groot)	CO <sub>2</sub> via CCS	voor/R&D	
<i>Cicored proces, ijzer maken met waterstof</i>	Luchtvervuiling (groot)	CO <sub>2</sub> via 'brandstof'	voor	Goed inpasbaar met duurzame energie

Tabel 4.4 *Aspecten van de diverse technologieën (vervolg)*

	Doelstof	Andere emissies	Voor of na 2020	Opmerkingen
Papierindustrie				
<i>Papierproductie zonder water</i>	Energiebesparing		R&D	
<i>Houtchips voor papier voorbehandelen met enzymen</i>	Energiebesparing		R&D	
<i>Drogen met warmtepompen</i>	Energiebesparing		voor	
Industriële energiebesparing in de chemie				
<i>Katalytische schuim reactoren (besparing pompenergie)</i>	Energiebesparing		demo	beperkt potentieel
<i>Membraanreactoren (niet Selectief)</i>	Energiebesparing		voor/R&D	beperkt potentieel
<i>Adsorptive distillation</i>	Energiebesparing		voor	beperkt potentieel
<i>Heat Integrated distillation</i>	Energiebesparing		voor	groot potentieel
<i>Membraanhybride scheidingsprocessen</i>	Energiebesparing		voor/R&D	groot potentieel
<i>Reactieve extractie</i>	Energiebesparing		voor/R&D	beperkt potentieel
<i>Reactieve destillatie ondersteund met membranen</i>	Energiebesparing		voor/R&D	beperkt potentieel
<i>Condenswater en energierugwinning uit rookgas met membranen</i>	Energiebesparing		voor/R&D	beperkt potentieel
Industriële energiebesparing via betere chemische reacties				
<i>Roterende gepakte bedden</i>	Energiebesparing		na	beperkt potentieel
<i>Reactoren met ultrageluid.</i>	Energiebesparing		na/R&D	beperkt potentieel
<i>Reactoren met compressie en drukpulsen.</i>	Energiebesparing		R&D	beperkt potentieel
<i>Gebruik van microgolven in reacties</i>	Energiebesparing		na/R&D	beperkt potentieel
<i>Gebruik van licht in reacties</i>	Energiebesparing		R&D	
<i>Microreactors voor nauwkeurige productie fijnchemie</i>	Energiebesparing		R&D	
Voedingsmiddelen industrie				
<i>Hogedruk behandeling in plaats van steriliseren bij voedingsmiddelen</i>	Energiebesparing		voor	
Industriële Materialenproductie				
<i>Bioplastic</i>	Besparing fossiele grondstof		voor	Goed inpasbaar met duurzame energie
<i>Combinatie van kunststof met goedkopen nano vulmaterialen</i>	Energiebesparing		voor	beperkt potentieel
<i>Algen als leverancier voor chemische grondstoffen</i>	Energiebesparing		voor	Goed inpasbaar met duurzame energie
<i>Nanomaterialen. Carbon nanobuisjes vervangen metalen</i>	Energiebesparing		R&D	Nog grote onzekerheden

Tabel 4.5 *Aspecten van de diverse technologieën (vervolg)*

	Doelstof	Andere emissies	Voor of na 2020	Opmerkingen
<b>Verbranding met lage NO<sub>x</sub>-uitstoot</b>				
<i>Gasturbines met katalytische branders</i>	Vrijwel geen NO <sub>x</sub>		voor demo	Demo bij kleine gasturbine
<i>Stralingsbranders 10 tot 25 ppm NO<sub>x</sub> in gasstook bij kleinere ketels</i>	Weinig NO <sub>x</sub>		voor	Duurder dan gewone branders
<i>Gebruik van ultra low NO<sub>x</sub> burners voor gasstook</i>	Weinig NO <sub>x</sub>		voor	
<i>Gebruik van ultra low NO<sub>x</sub> burners voor oliestook</i>	NO <sub>x</sub>		voor	Willen we nog wel oliestook
<b>Rookgasreiniging voor NO<sub>x</sub></b>				
<i>Katalytische absorptiesystemen voor NO<sub>x</sub>-reductie bij gasturbines</i>	Weinig NO <sub>x</sub>	NH <sub>3</sub>	voor	
<i>Hoog rendement SCR-installaties voor NO<sub>x</sub>-verwijdering</i>	Weinig NO <sub>x</sub>	voor		
<i>SCR-installaties voor NO<sub>x</sub>-verwijdering met aanwezige methaan</i>	Weinig NO <sub>x</sub>	CH <sub>3</sub>	voor/R&D	Nog in ontwikkeling
<i>NO<sub>x</sub>-adsorptiekatalysator voor lean burn gasmotoren</i>	Weinig NO <sub>x</sub>	NH <sub>3</sub>	voor/R&D	
<i>SCR-installaties voor NO<sub>x</sub>-verwijdering met behulp van LPG</i>	Weinig NO <sub>x</sub>	NH <sub>3</sub>	voor/R&D	Nog in ontwikkeling
<b>Reductie van NMVOS</b>				
<i>Laminerende films in plaats van verven (NMVOS-reductie)</i>	NMVOS		voor	
<i>Plasma technieken voor NMVOS-verwijdering</i>	NMVOS		voor/R&D	
<i>Betere lekdetectie met lasertechnologie voor NMVOS-reductie</i>	NMVOS		kan nu al	
<i>Verfterugwinning bij het spuiten door een waternevel (NMVOS-reductie)</i>	NMVOS		voor	Beperkt potentieel
<i>Vernietiging NMVOS en gevaarlijke stoffen met vloeibaar zout (ionic liquid)</i>	NMVOS		R&D	Toepassing nog onzeker
<b>Zwavelreductie-opties</b>				
<i>Flowpac bubbelbad SO<sub>2</sub>-water &gt;99% (alternatief voor FGD)</i>	SO <sub>2</sub>		voor	nieuw of retrofit
<i>H<sub>2</sub>S verwijdering uit stortgas en biogas met SELOX</i>	SO <sub>2</sub>		voor	Beperkt potentieel
<i>Zwavel verwijderen uit olie en gasstromen voor brandstofcellen</i>	SO <sub>2</sub>		voor	
<b>Reductie van de emissie van fijn stof</b>				
<i>Stof verwijdering met Indigo Agglomerator</i>	PM <sub>10</sub>		voor	Levert dit in NL wel wat op
<b>Reductie van de emissie van zware metalen</b>				
<i>Stof en kwik verwijdering met COHPAC &amp; TOXECON</i>	PM <sub>10</sub> en kwik	Andere metalen	voor	Is er hier een kwik probleem?
<i>Verwijderen van kwik in gas met actieve koolstof en metaal oxide</i>	kwik	Andere metalen	voor	Is er hier een kwik probleem?
<i>Verwijderen van kwik in kolencentrales met goedkope koolstof.</i>	kwik	Andere metalen	voor	Is er hier een kwik probleem?

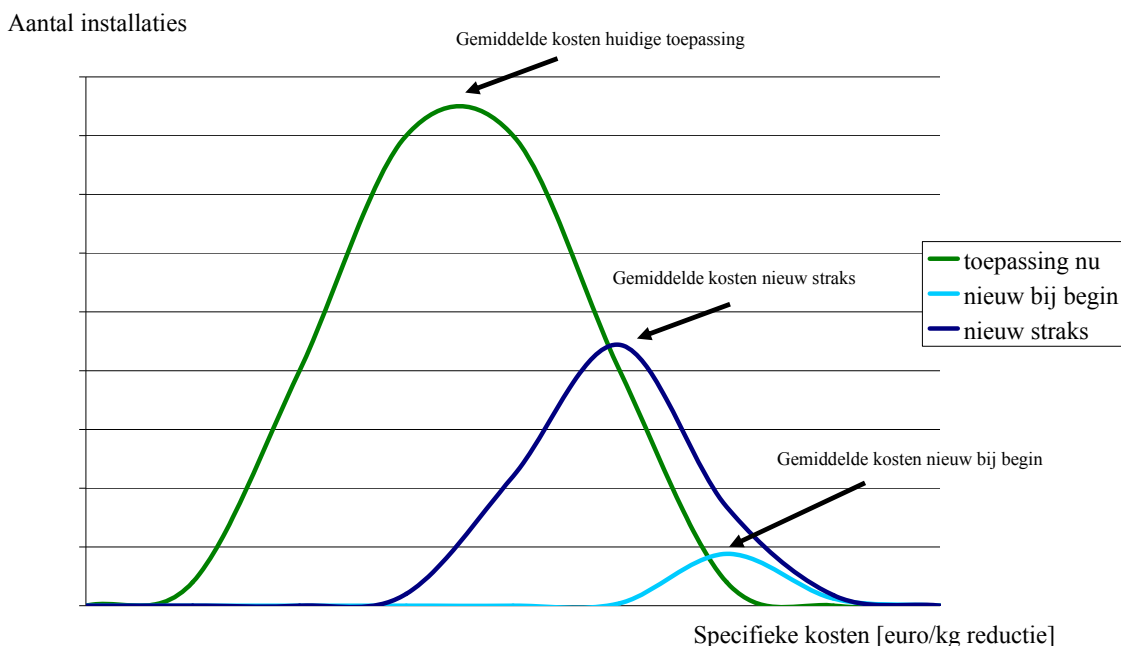
Tabel 4.6 *Aspecten van de diverse technologieën (vervolg)*

	Doelstof	Andere emissies	Voor of na 2020	Opmerkingen
Reductie van methaanemissies				
<i>Methaankatalysator</i>	CH <sub>4</sub>	wellicht ook NO <sub>x</sub>	voor/R&D	Nog in ontwikkeling
Reductie van CO <sub>2</sub> -emissies				
<i>CO<sub>2</sub>-verwijdering uit rookgas met calcium oxide</i>	CO <sub>2</sub>		voor	Is dit wel beter dan andere?
<i>CO<sub>2</sub>-verwijdering uit rookgas door sterke koeling</i>	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub> en PM <sub>10</sub>	voor	Kost ook veel energie
Overige 'end of pipe' reductie-opties				
<i>Titaandioxide voor verwijdering van stikstofoxiden uit de buitenlucht</i>	NO <sub>x</sub> concentratie		voor	Lokaal betere lucht
<i>Aanbrengen constructie die elektrostatische stof filtert bij wegen.</i>	PM <sub>10</sub> concentratie		R&D	Werkt dit? Lokaal betere lucht
<i>Olivine als optie voor CO<sub>2</sub>-opslag</i>	CO <sub>2</sub> uit de lucht		voor	Milieueffecten?, Vraagt mondiale schaal



## 4.2 Enkele drempels bij de toepassing van een nieuwe technologie

Voor extra emissiereducerende maatregelen zal de overheid door scherpere normen of op een andere manier bespreekbaar moeten maken dat nieuwe emissiereducerende technieken van groot belang zijn. Hierbij gaat het om kosten per kg vermeden emissie die hoger liggen dan wat nu gemiddeld gebruikelijk is en zelfs regelmatig hoger dan waar nu vaak de grens getrokken wordt. De overheid kan hierbij eventueel faciliterend optreden en een bijdrage leveren in de kosten. Ook al gaat het om bestaande technieken, toch kan bij een nieuwe toepassing de schaal-grootte een andere zijn dan nu gebruikelijk.



Figuur 4.1 *Schets van kosten bij nieuwe toepassing bestaande reductietechnieken*

In Figuur 4.1 is een schets gegeven met fictieve cijfers over hoe de invoering van een bestaande reductietechniek op een nieuwe plek en de specifieke reductiekosten met elkaar samenhangen. Allereerst is er de bestaande toepassing van de reductietechniek die een gemiddelde kosteneffectiviteit heeft. Bij de invoering van de techniek op een andere plaats (nieuwe sector of kleinere installaties) zullen bij een verkenning van de kosten vaak hogere kosten per kg vermeden emissie worden gevonden, dan nu gebruikelijk. Als de techniek in het betreffende marktsegment echter vaker wordt toegepast, zullen de kosten gaan dalen. Omdat bij de invoering van beleidsmaatregelen vaak kosteneffectiviteitsoverwegingen een rol spelen mag verwacht worden dat de nieuwe toepassing uiteindelijk toch wat duurder is dan de huidige. Geconstateerd wordt dat er op het gebied van kosteneffectiviteit een soort drempel kan liggen waar men eerst overheen moet. Zoals in Figuur 4.1 aangegeven kunnen de kosten aanvankelijk buiten de huidige range liggen. Op termijn liggen ze lager, maar gemiddeld toch wat hoger dan nu gebruikelijk.

Op het gebied van nieuwe processen en energiebesparing is de situatie was complexer. Ook hier speelt het feit dat het vaker toepassen van een techniek tot lagere kosten leidt. Bij energiebesparing is er de terugverdiendtijd die vaak een drempel oplevert. Uiteindelijk wordt het wel terugverdiend, maar men doet de investering liever op een plek waar op korte termijn meer 'winst' lijkt te behalen. Ook vergt het binnen het bedrijf vaak werktijd, van juist die medewerkers die het al druk hebben, om de energiebesparing op te pakken.

Bij nieuwe processen is het belangrijkste probleem, dat dit vaak vanuit een bestaande installatie benaderd wordt<sup>4</sup>. De keus is dan om door te gaan met de oude installatie, die het nog doet, maar wellicht hoge variabele kosten heeft in de vorm van onderhoud, energie etc. of een nieuwe faciliteit te bouwen met op termijn lagere kosten. Als de nieuwe faciliteit zich binnen bijvoorbeeld vijf jaar moet terugverdienen blijkt de hiervoor noodzakelijke snelle afschrijving niet op te wegen tegen de lagere variabele kosten van de nieuwe faciliteit. Ofwel de verwachte winst is in de eerste paar jaar hoger bij het doorgaan met de oude installatie dan bij de nieuwe. Deze korte termijn winstverwachting levert een forse drempel op bij de vernieuwing van bedrijfsinstallaties. Ook gaat het om grotere investeringen dan bij alleen energiebesparing of een end of pipe reductietechniek. Niet alle bedrijven hebben hiervoor voldoende financieringsruimte. Een ander aspect is dat een nieuwe faciliteit het risico heeft, dat het door 'kinderziektes' onverwacht extra tijd kan kosten, voordat het proces geheel volgens plan verloopt. Daar staat echter ook tegenover dat een nieuwe faciliteit ook nieuwe perspectieven biedt voor optimalisatie en verder verbetering. Vaak blijken nieuwe faciliteiten na enkele jaren en beperkte aanpassingen een hogere capaciteit of een nog betere efficiëntie te hebben. Per saldo vindt de procesvernieuwing bij het bedrijfsleven langzamer plaats dan uit een lange termijn economisch perspectief wenselijk is.

---

<sup>4</sup> Bij geheel nieuwe bedrijfslocaties of bij het samenvoegen van bedrijven op 1 locatie met een veel grotere productiecapaciteit is de 'bestaande' installatie geen optie, maar wordt direct in nieuwe installaties gedacht. Omdat daar veel uitbreidingsnieuwbouw plaatsvindt zijn bepaalde type fabrieken in Zuid Oost Azië (China) en sommige ontwikkelingslanden inmiddels moderner dan in West Europa.

## 5. Reductiemogelijkheden per sector

### 5.1 In welke sector zitten de hoogste emissies?

In Hoofdstuk 4 zijn een groot aantal technieken geïnventariseerd. In dit hoofdstuk zal bekeken worden hoe dit zich verhoudt met de emissies en reductiedoelstellingen. Hierbij zal in eerste instantie gekeken worden naar de mogelijkheden bij de grootste emissiebronnen. In Tabel 3.2 zijn de emissies per sector aangegeven. In de onderstaande Tabel 5.1 is dit nader ingeperkt tot de belangrijkste veroorzakers per stof. In dit rapport wordt alleen de industrie- en energiesector besproken. De subtotaal van deze sector zijn separaat in de tabel opgenomen.

Tabel 5.1 *Relatieve bijdrage per sector in 2006*

[%]	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	NM-VOS	PM <sub>10</sub>
Industrie en energie								
Energiesector	28	5		13	15		4	
Raffinaderijen	6				50		6	5
Chemische industrie	9		37	4	6	1	5	
Basismetalenindustrie					11			5
Voedings- en genotmiddelenindustrie								7
Bouwmaterialenindustrie								
Overige industrie							13	
Subtotaal	53	7	38	26	88	2	34	29
Overige sectoren								
Landbouw		54	56	4		90		23
Handel, Diensten, Overheid							12	
Huishoudens	10			4		6	19	9
Milieudienstverlening		36						
Overige								
Mobiele bronnen excl. zeevaart	23			61	10		29	33
Totaal	100	100	100	100	100	100	100	100
Pm zeevaart				38	98			19

De emissie van CO<sub>2</sub> is direct gekoppeld aan het brandstofverbruik. In de energiesector is dit relatief gezien nog iets hoger omdat hier ook veel kolen verbruikt worden die een hoge CO<sub>2</sub>-emissiefactor hebben. De emissie van methaan (CH<sub>4</sub>) komt vooral uit de landbouwsector en de milieudienstverlening (afvalstortplaatsen). De bijdrage van de energiesector komt vooral voort uit olie- en gaswinning en gastransport. De emissies van lachgas (N<sub>2</sub>O) komt ook vooral uit de landbouwsector (grondgebruik). In de chemische industrie komt de bijdrage vooral uit de productie van salpeterzuur.

De emissie van NO<sub>x</sub> wordt vooral veroorzaakt door verbrandingsprocessen. De transportsector levert hierbij een belangrijke bijdrage, die de komende decennia verder gaat dalen door de verdere en verbeterde toepassing van uitlaatgaskatalysatoren. Voor de energiesector en chemische industrie gaat het om verbrandingsemissies. Voor de emissies van SO<sub>2</sub>, die al fors gedaald zijn ten opzichte van 30 jaar terug, gaat het vooral om verbrandingsemissies en voor een beperkt

deel om zogenaamde procesemissies. De emissie van ammoniak (NH<sub>3</sub>) komt vooral uit de veehouderij en nauwelijks uit de industrie.

De emissie van NMVOS is zeer divers. Het gaat hierbij om emissies van onvolledige verbranding, verdampingsemissies (opslagtanks, pijpleidingsystemen), gebruik van oplosmiddelen (verf, spiritus, wasbenzine), gebruik van consumenten producten (shampoo, deodorant) en procesemissies. Bij deze emissie speelt de overige industrie een belangrijke rol. De emissie van PM<sub>10</sub> is een verzameling van verschillende soorten fijn stof. Heel fijn stof (PM<sub>2,5</sub>) komt vrij bij verbrandingsprocessen. In de tabel vooral zichtbaar bij mobiele bronnen. Ook de huishoudens heeft forse emissies veroorzaakt door houtverbranding. In de landbouw gaat het om veeteelt (stallen) en van het bewerken (etc.) van het land. De fijn stofemissie van de industriese sector wordt vooral veroorzaakt door procesemissies.

## 5.2 Technische reductiemogelijkheden per sector

### 5.2.1 Kooldioxide (CO<sub>2</sub>) uitstoot

Bij de energie- en industriese sector zijn er drie subsectoren die een groot aandeel in de emissies hebben. Bij deze sectoren zijn in Tabel 5.2 een aantal technische reductiemogelijkheden aangegeven.

In de energiesector zijn het vooral de elektriciteitscentrales die de emissie veroorzaken. Besparing op de elektriciteitsvraag of productie van elektriciteit uit duurzame bronnen hebben hier een directe invloed op de hoeveelheid fossiele brandstoffen die in de centrales verbruikt worden en zo ook op de CO<sub>2</sub>-emissie. Als toch fossiele brandstoffen gebruikt worden kan besloten worden om de CO<sub>2</sub> af te vangen en de diepe ondergrond op te slaan in lege gasvelden of waterhoudende lagen (CCS; carbon capture and storage). Dit kan bij bestaande type centrales worden toegepast. Ook kan men er voor kiezen om het ontwerp zodanig aan te passen dat CCS optimaal toegepast kan worden (hiervoor zijn in de tabel twee meer innovatieve technieken opgenomen). Tenslotte is het mogelijk om met een zo hoog mogelijke energierendement elektriciteit op te wekken, bijvoorbeeld met hoge temperatuurbrandstofcellen in combinatie met WKK of een gasturbine. Het gaat hierbij maar om een selectie uit een groot aantal technische mogelijkheden.

Tabel 5.2 *Relatieve bijdrage aan de CO<sub>2</sub>-emissie per sector en reductietechnieken*

Sector	Aandeel in CO <sub>2</sub> -uitstoot [%]	Emissiereductietechnieken
Energiesector	28	Energiebesparing elektriciteit andere sectoren Opwekking elektriciteit uit duurzame bronnen CO <sub>2</sub> -afvangst en -opslag (CCS) Kolenvergasser/CCS met waterstofopslag en flexibele STEG Oxi-fuel verbranding in gasturbine met membranen en CCS Combinaties met Hoge temperatuurbrandstofcel (SOFC)
Raffinaderijen	6	CO <sub>2</sub> -afvangst en -opslag (CCS) Energiebesparing door membraan scheiding Gebruik waterstof uit duurzame elektriciteit
Chemische industrie	9	CO <sub>2</sub> -afvangst en -opslag (CCS) Efficiency verbeteringen bij chemische reactie Energiebesparing door membraan scheiding Heat Integrated distillation Ammonia productie uit (duurzame) elektriciteit

In de raffinaderijen zijn grote verbrandingsinstallaties aanwezig en soms geconcentreerde CO<sub>2</sub>-stromen. In principe is toepassing van CCS hier ook een mogelijkheid. Ook energiebesparing

kan tot vermindering van het verbruik leiden, bijvoorbeeld door het toepassen van membranen. Tenslotte wordt er ook nog waterstof verbruikt in de raffinaderijen die gemaakt is uit fossiele brandstof. Hoewel hier de nodige kosten aan verbonden zijn kan dit ook CO<sub>2</sub>-emissievrij uit water en duurzame elektriciteit gemaakt worden.

Ook in de chemische industrie zijn er grote verbrandingsinstallaties en een aantal afvalgasstromen waar CCS toepasbaar is. Verder kan de efficiency verbeterd worden door verbeteringen van de efficiency van chemische reacties of het verbeteren van het energieverbruik voor scheidingsprocessen bijvoorbeeld door de toepassing van membranen en technieken als Heat Integrated distillation. Ook hier zijn er processen die waterstof gebruiken, zoals bijvoorbeeld de ammoniakproductie, die ook naar waterstof uit duurzame elektriciteit over kunnen stappen.

### 5.2.2 Methaan (CH<sub>4</sub>) uitstoot

Nederland heeft drie belangrijke bronnen van methaan. In de landbouwsector gaat het om methaan uit mest en uit de vergisting in de darmen van het (rund)vee en in de milieudienstverlening over de methaanuitstoot uit stortplaatsen (Maas, 2008).

De methaanuitstoot bij stortplaatsen is al in belangrijke mate verminderd door het winnen van stortgas, het afdekken van de stortplaatsen en het affakkelen. Volgens (Spek, 2007) kan dit laatste vanaf methaangehaltes van 15%. Dat er nog steeds methaan uitgestoten wordt komt door de methaan die vrijkomt op het deel van de stort waar men nog aan het storten is, maar ook doordat er plekken zijn waar methaan vrijkomt in lagere concentraties. Getracht kan worden om in de toplaag van de stort via natuurlijke processen dit methaan te oxideren of gas met een laag methaangehalte te gebruiken als verbrandingslucht. Technisch gezien zou bij deze lage concentraties ook de methaankatalysator toegepast kunnen worden of andere oxidatiesystemen die voor gasmotoren of de methaanhoudende ventilatielucht van ondergrondse kolenwinning zijn ontwikkeld (Litto, 2004), (Somers, 2008), (Schultz, 200%). Met het oog op verontreinigingen in het gas, hebben (zonder gasreiniging) hierbij systemen zonder katalysator wellicht de voorkeur.

Tabel 5.3 *Methaanuitstoot van de energiesector*

Energiesector	1990 [kton]	1990 [%]	2007 [kton]	2007 [%]
Olie- gaswinning continentaal plat	46	57	12	33
Transport en distributie olie en gas	18	22	17	50
Opwekking elektriciteit	1	2	0	1
Olie- gaswinning land	15	18	5	15
Totaal	80	100	35	100

De methaanuitstoot die in de statistiek staat uit de sector energie- en industrie komt vooral uit de energiesector en dan met name de gaswinning en transport. De emissies van olie- en gaswinning zijn al aanzienlijk afgenomen, zie Tabel 5.4, met name door eventueel vrijkomende methaan (de hoofdcomponent van aardgas) zoveel mogelijk af te fakkelen. Ook wordt afblaasgas gecompri-meerd en opnieuw in het systeem gebracht en wordt stikstof gebruik om afblaasleidingen schoon te maken. Naar verwachting gaat de emissie de komende jaren door maatregelen nog verder afnemen. (FO Industrie, 2008). Een milieujaarverslag van een grote chemische locatie laat zien dat ook diffuse emissies verminderd kunnen worden door goede lekdetectie en reparatie (Chemelot, 2008).

Tabel 5.4 *Relatieve bijdrage aan de CH<sub>4</sub>-emissie per sector en reductietechnieken*

Sector	Aandeel in CH <sub>4</sub> -uitstoot	Emissiereductietechnieken
Energiesector	5%	Affakkelen in plaats van ventileren Lekdichtheid gasnet verbeteren Betere lekdetectie met lasertechnologie voor NMVOS-reductie
Gasmotoren in de glastuinbouw	Groeiend	Methaankatalysator

Voor de volledigheid zijn ook de gasmotoren uit de glastuinbouw toegevoegd. Deze worden gebruikt om zowel warmte als elektriciteit op te wekken. Met de grote toename van deze motoren de afgelopen jaren en de toename van het vermogen van de individuele installaties (een deel van de grotere motoren hebben hogere methaanemissies) is dit een snel stijgende emissiebron.

### 5.2.3 Lachgas (N<sub>2</sub>O) uitstoot

De Nederlandse emissie van N<sub>2</sub>O komt voor het grootste deel door het gebruik van landbouwgrond. Toch speelt ook de chemische industrie een belangrijke rol, zie Tabel 5.5. De N<sub>2</sub>O-emissies van de chemische industrie zijn afkomstig uit de salpeterzuur- en caprolactanproductie, zie Tabel 5.6 (Maas, 2008).

Tabel 5.5 *Relatieve bijdrage aan de N<sub>2</sub>O-emissie per sector en reductietechnieken*

Sector	Aandeel in N <sub>2</sub> O-uitstoot	Emissiereductietechnieken
Chemische industrie	5%	Verwijdering van N <sub>2</sub> O met katalysatoren uit het afgas

Tabel 5.6 *Bronnen van de N<sub>2</sub>O-emissie van de chemische industrie*

Energiesector	2006 [kton]	2006 [%]	2006 [Mton CO <sub>2</sub> -eq]
Salpeterzuurproductie	18,0	89	5,60
Caprolactanproductie	2,1	11	0,77

De twee Nederlandse producenten van salpeterzuur (DSM en Yara) zijn inmiddels toegetreden tot het CO<sub>2</sub>-emissiehandelssysteem. In dit systeem krijgen ze jaarlijks 1,13 Mton aan emissierechten toebedeeld (periode 2008-2012). Dit komt neer op een reductie van 80% ten opzichte van de oorspronkelijke emissie van 5,5 Mton/jaar. In 2006 meldt DSM dat een aantal bedrijven en instituten geïnvesteerd hebben in het ontwikkelen van geschikte katalysatoren voor de reductie van N<sub>2</sub>O in het salpeterzuurproces. Op dat moment hebben zelfs een aantal leveranciers de eerste voorzichtige stappen gezet om deze technologie commercieel aan te bieden op de markt. In feite worden twee typen reductietechnieken aangeboden, te weten een katalysatorsysteem in de NH<sub>3</sub>-brander, dat werkt bij relatief hoge temperatuur respectievelijk een katalysatorsysteem in het eindgas dat werkzaam is in een lagere temperatuurrange (Chemelot, 2006). In 2008 blijkt DSM aanzienlijke vorderingen te hebben bereikt. Bij de twee grootste installaties is de emissie tot nul teruggebracht en bij de twee andere is deze met 60 tot 80% gereduceerd (TW, 2008). De emissie van lachgas uit de caprolactaminstallaties is afkomstig van diverse bronnen in het productieproces. Volgens het monitoringsprotocol voor de NIR (MNP/SenterNovem, 2008) zijn er nog geen maatregelen beschikbaar om deze lachgasemissie te beperken. Wel voert de caprolactamproducent (DSM) onderzoek uit naar de effecten en bruikbaarheid van een aantal reductie-ideeën.

#### 5.2.4 Stikstofoxiden (NO<sub>x</sub>) uitstoot

De NO<sub>x</sub>-emissie in Nederland komt vooral uit de transportsector. In de energie- en industrie zijn de energiesector en de chemische industrie de belangrijkste emissieveroorzakers, zie Tabel 5.7.

Omdat de NO<sub>x</sub>-emissie voor een belangrijk deel ook samenhangt met de verbranding van fossiele brandstoffen is het emissiepatroon enigszins vergelijkbaar met dat van CO<sub>2</sub>. Er is dan ook interactie tussen CO<sub>2</sub>-beleid en NO<sub>x</sub>-emissies. In de energiesector geldt, net als bij CO<sub>2</sub>, dat elektriciteitsbesparing en duurzame energie (maar dan alleen uit zonne-energie, windenergie of waterkracht en geen biomassa) ook tot NO<sub>x</sub>-emissiereductie leidt. Voor de toepassing van CCS, geldt dat dit door de extra energie die dat vraagt meestal tot wat hogere NO<sub>x</sub>-emissie leidt. Wordt echter gewerkt met verbranding van zuiver zuurstof (oxi-fuel) dan is de NO<sub>x</sub>-emissie wel lager. Het effect van CCS op NO<sub>x</sub> varieert dus. Ook kan nog opgemerkt worden dat het CO<sub>2</sub>-beleid (met name de CO<sub>2</sub>-emissiehandel) de concurrentiepositie van de Nederlandse centrales kan verbeteren, en zo via extra elektriciteitsexport de NO<sub>x</sub>-emissie in Nederland kan verhogen. De wijzigingen in de NO<sub>x</sub>-emissie zijn een gevolg van het CO<sub>2</sub>- en klimaatbeleid en niet andersom. Als het alleen gaat om de NO<sub>x</sub>-uitstoot is het effectiever om maatregelen te treffen die zich primair op het verminderen van deze emissie richten.

Voor de energiesector gaat het primair om verbrandingsemissies van fossiele brandstof en biomassa. Het is hier mogelijk om technieken te gebruiken die van zichzelf een veel lagere NO<sub>x</sub>-emissie hebben zoals brandstofcellen of katalytische branders. In de huidige elektriciteitsvoorziening gaat het echter vooral om gasturbines en kolencentrales. Bij de eerste is men afhankelijk van de Lage NO<sub>x</sub>-verbrandingskamers die door fabrikanten geleverd kunnen worden, en is de Nederlandse marge beperkt tot secundaire maatregelen zoals katalytische absorptiesystemen of SCR (selectieve katalytische reductie met ammoniak, maar ook aan andere reductiemiddelen wordt gewerkt). Bij kolencentrales kan men zich richten op een zo hoog mogelijk rendement van de aanwezige SCR-installatie, of via de vergassingstechnologie de stap maken naar de gasturbine (KV-STEG; kolenvergasser met een stoom en een gasturbine).

Tabel 5.7 *Relatieve bijdrage aan de NO<sub>x</sub>-emissie per sector en reductietechnieken*

Sector	Aandeel in NO <sub>x</sub> -uitstoot [%]	Emissiereductietechnieken
Energiesector	13	Gebruik brandstofcellen Katalytische absorptiesystemen voor NO <sub>x</sub> -reductie bij gasturbines Hoog rendement SCR-installaties voor NO <sub>x</sub> -verwijdering
Chemische industrie	4	Gebruik van ultra low NO <sub>x</sub> burners voor gasstook Katalytische absorptiesystemen voor NO <sub>x</sub> -reductie bij gasturbines Hoog rendement SCR-installaties voor NO <sub>x</sub> -verwijdering Combinaties met Hoge temperatuurbrandstofcel (SOFC)

Voor de chemische industrie gaat het primair om verbrandingsemissies van fossiele brandstof en biomassa. Daarnaast gaat het ook voor een beperkt deel (circa 30%) om procesemissies onder andere van de carbon black en de magnesium oxide productie. In 1995 werd er nog een aanzienlijke emissie veroorzaakt door de salpeterzuurfabrieken. Door toepassing van SCR lijkt deze inmiddels te zijn vermindert (Vlugt, 2002), (Yara, 2006). Ten aanzien van de procesemissies geldt dat bekeken kan worden of de NO<sub>x</sub>-vorming door bijvoorbeeld aanpassingen van gebruikte katalysatoren kan worden verminderd. Anders is er nog de opties van rookgasreiniging met SCR of met absorptiesystemen. Dit geldt ook voor bijvoorbeeld de zware metaalindustrie. Een optie die voor de procesemissie in de glasindustrie toegepast wordt is om met pure zuurstof te verbranden (oxi-fuel).

Voor de verbrandingsemissies ligt het voor de hand om zoveel mogelijk lage NO<sub>x</sub>-branders te gebruiken of te vervangen door ultra lage NO<sub>x</sub>-branders. Omdat hier ook gasturbines aanwezig is na de toepassing van lage NO<sub>x</sub>-verbrandingskamers nog de mogelijkheid voor secundaire maatregelen zoals katalytische absorptiesystemen of SCR. Deze secundaire maatregelen kunnen ook bij andere installaties als fornuizen, ovens en drogers toegepast worden, waar primaire maatregelen met ultra lage NO<sub>x</sub>-branders onvoldoende opleveren. Tenslotte kan gekozen worden voor zeer schone WKK met een hoog rendement in de vorm van solid oxide brandstofcellen (SOFC).

### 5.2.5 Zwaveldioxiden (SO<sub>2</sub>) uitstoot

In de energiesector is de SO<sub>2</sub>-emissie vooral afkomstig van het stoken van kolen. Hier ligt het voor de hand om bij de huidige rookgasontzwavelingsinstallatie (FGD) de technische grenzen van de reductie (en van een betrouwbare bedrijfstijd) op te zoeken. Volgens de literatuur zou ook de toepassing van Flowpac tot zeer hoge reducties kunnen leiden. Bij nieuwe kolencentrales zou de toepassing van kolenvergassing tot lage SO<sub>2</sub>-emissies kunnen leiden.

Tabel 5.8 *Relatieve bijdrage aan de SO<sub>2</sub>-emissie per sector en reductietechnieken*

Sector	Aandeel in SO <sub>2</sub> -uitstoot [%]	Emissiereductietechnieken
Energiesector	15	Flowpac bubbelbad SO <sub>2</sub> -water >99% (alternatief voor FGD) Stoppen met oliestook
Raffinaderijen	50	Rookgasontzwavelingsinstallaties
Chemische industrie	6	Afvalgas ontzwavelingsinstallaties
Basismetaleindustrie	11	Afvalgasontzwavelingsinstallaties

Bij de raffinaderijen wordt nog olie gestookt wat binnen enkele jaren wordt afgebouwd. Ook zijn er nog gasstromen met veel zwavel die nog niet gereinigd worden voordat ze verstoekt worden, en leveren ook de fakkels nog de nodige emissies. Zowel bij bepaalde kraakinstallaties (FCC) en nog achter de zwavelfabrieken (Claus plants) zou overwogen kunnen worden om additionele maatregelen te nemen zoals rookgasontzwavelingsinstallaties of daarmee vergelijkbare maatregelen.

In de chemische industrie en de basismetaleindustrie gaat het vooral om procesemissies. Toepassing van 'rookgasontzwaveling' op de betreffende gasstroom kan ook hier worden overwogen. In een aantal gevallen, bijvoorbeeld bij de carbon black productie, kan wellicht naar een grondstof met minder zwavel worden overgestapt of bij toepassing van rookgasontzwaveling naar een goedkopere grondstof met iets meer zwavel.

### 5.2.6 Ammoniak (NH<sub>3</sub>) uitstoot

De ammoniakemissie van de sector industrie en energie is ten opzichte van de veeteelt zeer beperkt. Ongeveer 1% van de emissie komt uit de chemische industrie waarvan dan weer de helft uit de kunstmestproductie. De industriële emissie zou sinds 1990 met 60% gedaald zijn. Gezien de zeer sterk wisselende cijfers per bedrijf (met name in 1990 en 1995 lijken hier grote fouten in te zitten) op de site van de emissieregistratie is niet duidelijk hoe betrouwbaar deze reductieomvang is. Volgens de database van het Rainsmodel van IIASA ([www.iiasa.ac.at](http://www.iiasa.ac.at)) kan de industriële emissie van ammoniak gereduceerd worden met NH<sub>3</sub>-striptoren en -absorbers. Deze worden ook in Nederland geleverd ([www.task.be](http://www.task.be)). Om deze toe te kunnen passen is wel een geconcentreerde gasstroom nodig. Bij diffuse emissies, moeten andere maatregelen genomen worden. In de veeteelt wordt voor ammoniak reductie uit stallen onder andere gebruik gemaakt van biologische scrubbers (biofiltration) waarin de ammoniak in nitraat wordt omgezet.



Tabel 5.9 *Relatieve bijdrage aan NH<sub>3</sub>-emissie per sector en reductietechnieken*

Sector	Aandeel in NH <sub>3</sub> - Emissiereductietechnieken uitstoot [%]	
Chemische industrie	1	Striptorens en absorbers

### 5.2.7 Uitstoot van vluchtige koolwaterstoffen exclusief methaan (NMVOS)

Tabel 5.10 *Relatieve bijdrage aan de NMVOS-emissie per sector en reductietechnieken*

Sector	Aandeel in NMVOS-uitstoot [%]	Emissiereductietechnieken
Energiesector	4	PM
Raffinaderijen	6	Betere lekdetectie met lasertechnologie voor NMVOS-reductie Betere lekdetectie met lasertechnologie voor NMVOS-reductie
Chemische industrie	5	Plasma technieken voor NMVOS-verwijdering Laminerende films in plaats van verven (NMVOS-reductie) Plasma technieken voor NMVOS-verwijdering
Overige industrie	13	Betere lekdetectie met lasertechnologie voor NMVOS-reductie

Een belangrijke bron van NMVOS-emissies zijn de zogenaamde diffuse emissies. Dit zijn de emissies die uit leidingsystemen komen langs de gebruikte pakkingen bij koppelingen, afsluiters en pompen. Hoe eerder deze emissies ontdekt worden (en hoe groot ze zijn) hoe beter er reductie plaats kan vinden. Op plaatsen waarvan bekend is dat emissies vrijkomen, zoals opslagtanks met drijvende daken of plekken waar ventilatielucht vrijkomt, kunnen specifieke maatregelen op de betreffende emissies worden getroffen. Een optie is om dit af te zuigen, te verzamelen en dan te vernietigen. Ook kan eventueel de lucht met NMVOS gebruikt worden als verbrandingslucht voor installaties. Ook absorptiesystemen met actieve kool zijn wellicht een mogelijkheid. Voordelen van de aanpak van NMVOS-emissies zijn er ook in de vorm van verbetering van de veiligheid, luchtkwaliteit en geuroverlast.

De overige industrie blijkt een grote bron van NMVOS-emissies te zijn. Voor een belangrijk deel wordt dit veroorzaakt door het verven en lakken, dat daar plaatsvindt. In gasstromen met hoge concentraties kan terugwinning een optie zijn. In andere gevallen kan met de NMVOS via verbranding vernietigen. Omdat het vaak om een diffuse emissie gaat, verspreid over een grote ruimte, zal significante reductie niet altijd goed mogelijk zijn.

### 5.2.8 Uitstoot van fijn stof

De emissie van fijn stof is in wezen een verzameling van wel kleine maar ook sterk verschillende deeltjes. Verbranding levert vaak erg fijne deeltjes op. In gewicht vallen deze wel mee, maar ze hebben per kg wel een grotere schadelijkheid. In de emissieoverzichten van PM<sub>10</sub> zijn het juist de grotere deeltjes die het uitstootbeeld (dat gebaseerd is op gewicht van de deeltjes en niet op de schadelijkheid) bepalen. Zo ontbreekt bij de belangrijke bronnen de energiesector, met veel ultra fijn stof, maar is de voedings- en genotmiddelende sector, met veel grovere deeltjes, wel aanwezig.

Voor de emissies van fijn stof is de voornaamste reductiemethode het toepassen van doekfilters. Afhankelijk van de kwaliteit kunnen doekfilters met een zeer hoog rendement fijne deeltjes afvangen en met een matig tot redelijk rendement de ultra fijne deeltjes (< PM<sub>2.5</sub>). Naast doekfilters zijn er ook andere filters, zoals keramische filters. Bij diffuse emissies, die hier veelvuldig voorkomen, zal dit echter niet altijd mogelijk zijn. Bij het afzuigen van een diffuse emissie uit een productiehal zal men bovendien eerder geneigd zijn om de ingaande lucht te filteren dan de uitgaande lucht.

Ook het toepassen van het wassen van de uitlaatgaslucht met water, kan de emissie aanzienlijk reduceren. Indien het gewenst is om ook de ultra fijne deeltjes (< pm<sub>2.5</sub>) met een hoog rendement af te vangen kunnen eventueel membraanfilters, bijvoorbeeld op basis van teflon, worden gebruikt (Pranghofer, 2007).

Tabel 5.11 *Relatieve bijdrage aan de PM<sub>10</sub>-emissie per sector en reductietechnieken*

Sector	Aandeel in PM <sub>10</sub> - uitstoot [%]	Emissiereductietechnieken
Raffinaderijen	5	Stoppen met oliestook Doekfilters Keramische filters
Basismetaleindustrie	5	Doekfilters Keramische filters
Voedings- en genotmiddelenindustrie	7	Doekfilters

### 5.2.9 Uitstoot van zware metalen en kwik

De emissie van zware metalen loopt grotendeels gelijk met die van fijn stof. Reductiemaatregelen bij fijn stof zullen deze emissie, voor zover dit niet vluchtige metalen betreft, ook reduceren. Zoals al eerder in dit rapport aangegeven zijn de concentraties van zware metalen als arseen, cadmium, nikkel en kwik in de Nederlandse buitenlucht laag. Voor kwik zijn de concentraties in lucht nu al zo laag zijn dat er geen milieu- en gezondheidsrisico's verwacht worden (Manders, 2007). Eventuele maatregelen maken gebruik van actieve kool, zie Tabel 5.12.

Tabel 5.12 *Reductiemogelijkheden voor vluchtige zware metalen*

Emissiereductietechnieken
Stof en kwik verwijdering met COHPAC & TOXECON
Verwijderen van kwik in gas met actieve koolstof en metaal oxide

Een voorbeeld van de reductie van zware metalen is het in 2005 gesloten convenant met de crematoria om de uitstoot van kwik (uit amalgaanvullingen) van ca 100 kg/jaar met 90% te verminderen. In 2005 hadden 10 nieuwe installaties hiervoor al filters met actieve kool. In het convenant is afgesproken dat de overige 50 dit ook doen voor 2012. Dit vergt een investering van circa € 25 mln (Scholtens, 2005). Volgens informatie rond dit convenant zou 20% van de Nederlandse kwikuitstoot naar de lucht uit crematoria komen.

## 6. Conclusies

### 6.1 Nog forse reducties nodig maar technisch haalbaar

In het Nationaal Milieubeleidsplan 4 (NMP4) zijn streefdoelen geformuleerd voor de emissiereductie in 2030 ten opzichte van 1990. Het doel hiervan is een milieukwaliteit waarin circa 95% van de natuur in Nederland duurzaam wordt beschermd. Daarnaast mogen er op termijn geen milieugerelateerde gezondheidseffecten meer optreden. In de loop van de tijd zijn er al veel maatregelen genomen. In 2005 zijn de meeste emissies, behalve voor broeikasgassen, ten opzichte van 1990 dan ook gedaald. Kijkend naar de emissies in 2005, zijn uit oogpunt van luchtverontreiniging, nog forse reducties nodig om de NMP4 doelen te bereiken: NO<sub>x</sub> 65%-80%; NMVOS 31%-71%; NH<sub>3</sub> 59%-77%; SO<sub>2</sub> 39%-62%; PM<sub>10</sub> 75%-87%. Om het 2030 doel uit het NMP4 te halen voor klimaatverandering zijn nog reducties van 40 tot 60% nodig.

De komende decennia zullen een aantal emissies als gevolg van het ingezette en voorgenomen beleid dalen (o.a. NO<sub>x</sub> en CO<sub>2</sub>). In andere gevallen kan de economische groei de daling beperken. Bij geen van de in dit rapport bekeken stoffen zal de emissie automatisch dalen tot een duurzame niveau. Er zijn nog aanzienlijke additionele reducties nodig.

Ten behoeve van deze studie is een groot aantal technieken geïnventariseerd die op dit moment in ontwikkeling zijn. Het gaat hierbij om zowel integrale, procesgeïntegreerde als nageschakelde reductietechnieken en productietechnieken. Ook zijn er nog bestaande technieken beschikbaar die ook op andere plaatsen, met wellicht wat hogere kosten per kg emissiereductie, kunnen worden toegepast. In hoofdlijnen kan uit de verkenning geconcludeerd worden dat het technisch gezien mogelijk is om in de sector energie en industrie de in het NMP4 aangegeven reductiepercentages te realiseren. Nieuwe reductietechnieken en productietechnieken zijn hierbij een essentieel onderdeel van het reductiepad.

Er zijn voldoende voorbeelden van nieuwe technologie die succesvol is opgepakt door de industrie en die tot aanzienlijke emissiereducties leiden. Door aanpassing van de ovens bij de productie van primair aluminium is de uitstoot van perfluorkoolwaterstoffen (PFK's) sterk afgenomen. Het gebruik van katalysatoren in de salpeterzuurfabrieken dringt de emissies van lachgas (N<sub>2</sub>O) aanzienlijk terug en verbeteringen op het gebied van ontzwavelingskatalysatoren voor hydrotreating in de raffinaderijen maken het mogelijk om vrijwel zwavelvrije diesel te produceren.

Komen deze technieken vanzelf op de markt? Belangrijk is dat de overheid met het bedrijfsleven (breed als sectorspecifiek) in gesprek gaat over het toepassen van reductietechnieken en productietechnieken. Een belangrijk aandachtspunt waar de overheid zeker een belangrijke rol in heeft, is om het bedrijfsleven te wijzen op de 'natuurlijke momenten'. Hiermee wordt bedoeld dat het moment waarop ingrijpende veranderingen en renovaties nodig zijn, aangegrepen wordt om die technologie te kiezen waarmee de grootste milieuwinst geboekt kan worden. En hierbij zal dan niet meer puur gekeken worden naar de specifieke vervanging van technieken, maar zal dit integraler bekeken worden onder andere door de terugverdientijd van de technieken te koppelen aan de levensduur en exploitatieperiode van gebouwen en installaties. Het toepassen van koude en warmte opslag is hierbij een goed voorbeeld. De overheid kan hierbij eventueel faciliterend optreden en een bijdrage leveren aan de kosten.

Het globale implementatietraject verschilt per type:

- Bestaande reductietechnieken in een nieuwe toepassing moeten eerst gedemonstreerd<sup>5</sup> worden en daarna via ‘regelgeving’ geïmplementeerd.
- Nieuwe reductietechnieken moeten eerst voldoende ontwikkeld worden, daarna gedemonstreerd en daarna via ‘regelgeving’ geïmplementeerd.
- Nieuwe productie processen hebben een extra drempel omdat de investeringen veel groter zijn dan het bijplaatsen van een reductietechniek. Bestaande installaties, die nog voldoende functioneren, moeten wellicht in het geheel worden vervangen. Alleen in nieuwbouwsituaties kan direct met de nieuwe technologie begonnen worden. Dit soort situaties komt echter weinig voor in Nederland.

## 6.2 Mogelijke aangrijpingspunten per stof en sector

### *CO<sub>2</sub>-uitstoot*

Bij de reductie van de CO<sub>2</sub>-uitstoot vervullen energiebesparing en het gebruik van duurzame bronnen de hoofdrol. Een derde meer grootschalige techniek, die ook een forse bijdrage aan de reductie bij grote emissiebronnen kan leveren, is CO<sub>2</sub>-afvang en -opslag (CCS). Deze techniek is nog in ontwikkeling maar kan in Nederland erg belangrijk worden. CCS krijgt ook internationaal al veel aandacht. In relatie tot energiebesparing dienen ook de activiteiten op het gebied van restwarmte (en warmtebesparing) genoemd te worden. Wellicht dat industriële energiebesparing nog extra aandacht zou moeten krijgen (demonstratie en kennistransfer). Op het gebied van windenergie heeft Nederland een ‘goudkust’ voor de deur liggen. In 2030 kan hier een enorme hoeveelheid betaalbare duurzame elektriciteit opgewekt worden. Bij goede wind veel meer dan Nederland en omliggende landen direct kunnen gebruiken. Onderzocht zou moeten worden in hoeverre dit overschot in Nederland zelf opgeslagen kan worden (voor later gebruik) en of er geen waterstof (in combinatie met opslag) van gemaakt kan worden voor gebruik als industriële grondstof. Energiebesparing moet vooral uit reductie van de vraag naar energie komen. Indien er een zekere vraag naar energie, in de vorm van warmte of elektriciteit, is kan nog extra bespaard worden door deze energie efficiënt te produceren. Bijvoorbeeld door minder brandstof te gebruiken om een kWh elektriciteit op te wekken. Ook hier liggen technische mogelijkheden. Hierbij kan gedacht worden aan hoge temperatuur brandstofcellen in combinatie met WKK of bijvoorbeeld een fornuis.

De sectoren met de grootste CO<sub>2</sub>-uitstoot zijn de energiesector, de raffinaderijen en de chemische industrie. In Tabel 6.1 zijn per sector de belangrijkste reductiemogelijkheden aangegeven. Bij energiebesparing en duurzame energieopwekking gaat het vooral om uitbreiding van de toepassing; nieuwe technologische ontwikkelingen zijn hier een steun in de rug. De toepassing van CCS vraagt grote investeringen. In Nederland worden CCS nu met demonstratieprojecten voorbereid.

---

<sup>5</sup> Het is nationaal, maar zeker ook internationaal, niet mogelijk om regelgeving te implementeren als dit technieken vergt die onvoldoende vaak gedemonstreerd zijn.

Tabel 6.1 *Technieken voor CO<sub>2</sub>-emissiereductie bij sectoren met grootste uitstoot*

Sector	Aandeel in de Ned. uitstoot [%]	Emissiereductietechnieken
Energiesector	28	Energiebesparing elektriciteit andere sectoren Opwekking elektriciteit uit duurzame bronnen CO <sub>2</sub> -afvangst en -opslag (CCS) Kolenvergasser/CCS met waterstofopslag en flexibele STEG Oxi-fuel verbranding in gasturbine met membranen en CCS Combinaties met hoge temperatuurbrandstofcel (SOFC)
Raffinaderijen	6	CO <sub>2</sub> -afvangst en -opslag (CCS) Energiebesparing door membraan scheiding Gebruik waterstof uit duurzame elektriciteit
Chemische industrie	9	CO <sub>2</sub> -afvangst en -opslag (CCS) Efficiency verbeteringen bij chemische reactie Energiebesparing door membraan scheiding Energiebesparing door Heat Integrated distillation Ammonia productie uit (duurzame) elektriciteit

#### *CH<sub>4</sub>-uitstoot*

De methaanuitstoot komt in Nederland vooral uit de veeteelt. In de sector energie- en industrie komt er methaan vrij uit de gaswinning en -transport en uit afvalstortplaatsen. Er is al veel gedaan in deze sectoren om de methaanuitstoot te verminderen, en het ligt voor de hand om dit te intensiveren, zie Tabel 6.2. Wellicht dat bij de afvalstortplaatsen nog gekeken kan worden naar het afbreken van lage concentraties methaan. Een nieuwe CH<sub>4</sub>-bron zijn de gasmotoren, die onder andere grootschalig in de glastuinbouw gebruikt worden om energie op te wekken. Er is hier dringend behoefte aan een werkende katalysator om het onverbrande methaan, dat nog in het uitlaatgas zit, af te breken. Mogelijk dat een procesgeïntegreerde oplossing ook soelaas hiervoor biedt, zeker nu achter elke gasmotor nagenoeg standaard een SCR geplaatst moet gaan worden.

Tabel 6.2 *Technieken voor CH<sub>4</sub>-emissiereductie bij sectoren met grootste uitstoot*

Sector	Aandeel in de Ned. uitstoot [%]	Emissiereductietechnieken
Energiesector	5	Affakkelen in plaats van ventileren Lekdichtheid gasnet verbeteren Betere lekdetectie met lasertechnologie voor NMVOS-reductie
Gasmotoren in de glastuinbouw	Groeiend	Methaankatalysator

#### *N<sub>2</sub>O-uitstoot*

Het derde broeikasgas waar naar gekeken is, is N<sub>2</sub>O. De uitstoot van lachgas komt vooral uit het grondgebruik in de landbouw en maar voor 5% uit de (chemische) industrie. De industriële emissie bij salpeterzuur is inmiddels fors verminderd. In overleg met het bedrijfsleven en met overheidsfinanciering zou naar de grootste bron die dan overblijft, de emissie bij caprolactam productie, gekeken kunnen worden. Een demonstratieproject kan hier ook als doel hebben om hier het internationale niveau van Best Beschikbare Techniek (BBT) scherper te stellen. Een andere optie is alle industriële N<sub>2</sub>O in het Europese CO<sub>2</sub>-emissiehandelssysteem te brengen.

### *NO<sub>x</sub>-uitstoot*

De uitstoot van NO<sub>x</sub> hangt in de sector energie- en industrie sterk samen met het brandstofverbruik. De sectoren met de grootste NO<sub>x</sub>-uitstoot zijn dan ook de energiesector en de chemische industrie, zie Tabel 6.3. De reductie van de NO<sub>x</sub>-uitstoot heeft zich tot nu toe gericht op vermindering van de NO<sub>x</sub>-vorming bij verbranding door bijvoorbeeld lage NO<sub>x</sub>-branders en op rookgasreiniging met SCR (met NH<sub>3</sub> als reductiemiddel) bij kolencentrales. Op het gebied van rookgasreiniging is er in Nederland weinig ervaring met katalytische absorptiesystemen. Ook SCR met gebruik van koolwaterstoffen of SCR toepassing bij kleinere installaties zouden onderwerp van onderzoek of demonstratie kunnen zijn. Dit geldt ook voor de nieuwe generatie ultra lage NO<sub>x</sub>-branders of voor brandstofcellen waarbij nagenoeg geen NO<sub>x</sub> gevormd wordt. De maatregelen zijn weinig sectorspecifiek. Dit betekent dat ultra lage NO<sub>x</sub> branders die het goed doen in de chemie ook toegepast kunnen worden voor reductie van NO<sub>x</sub>-emissies bij de raffinaderijen, petrochemie of voedingsmiddelenindustrie. Ook NO<sub>x</sub>-procesemissies dienen voldoende aandacht te krijgen<sup>6</sup>.

Tabel 6.3 *Technieken voor NO<sub>x</sub>-emissiereductie bij sectoren met grootste uitstoot*

Sector	Aandeel in de Ned. uitstoot [%]	Emissiereductietechnieken
Energiesector	13	Gebruik brandstofcellen Katalytische absorptiesystemen voor NO <sub>x</sub> -reductie bij gasturbines
Chemische industrie	4	Hoog rendement SCR-installaties voor NO <sub>x</sub> -verwijdering Gebruik van ultra low NO <sub>x</sub> burners voor gasstook Katalytische absorptiesystemen voor NO <sub>x</sub> -reductie bij gasturbines Hoog rendement SCR-installaties voor NO <sub>x</sub> -verwijdering Combinaties met Hoge temperatuurbrandstofcel (SOFC)

### *SO<sub>2</sub>-uitstoot*

In 2005 was de raffinagesector nog verantwoordelijk voor de helft van de Nederlandse SO<sub>2</sub>-uitstoot. Onder andere door de afbouw van het stoken van olie is dit inmiddels veranderd. Bij diverse industriële sectoren zijn er nog gasstromen van processen, die via een schoorsteen geloosd worden en die nog aanzienlijke SO<sub>2</sub>-hoeveelheden bevatten. Net als nu bij kolencentrales het geval is zou (rook)gasontzwaveling bij deze industriële procesemissies kunnen worden toegepast, zie Tabel 6.4. Wellicht vergt dit wel eerst demonstratieprojecten. In de elektriciteitssector zou gekozen kunnen worden voor rookgasontzwaveling bij kolencentrales met veel zeer hoge verwijderingsrendementen. Een voorbeeld hiervan is de geclaimde hoge reductie van het Flowpac systeem. Hier is in Nederland nog geen ervaring mee.

Tabel 6.4 *Technieken voor SO<sub>2</sub>-emissiereductie bij sectoren met grootste uitstoot*

Sector	Aandeel in de Ned. uitstoot [%]	Emissiereductietechnieken
Energiesector	15	Flowpac bubbelbad SO <sub>2</sub> -water >99% (alternatief voor FGD)
Raffinaderijen	50	Stoppen met oliestook Rookgasontzwavelingsinstallaties
Chemische industrie	6	Afvalgas ontzwavelingsinstallaties
Basismetaleindustrie	11	Afvalgasontzwavelingsinstallaties

<sup>6</sup> Het NO<sub>x</sub>-handelssysteem biedt hierbij de mogelijkheid om eventuele knelpunten op te lossen. Op dit moment is er een overschot aan emissierechten (bedrijven regelen het liever zelf, dan dat ze in moeten kopen). Door de bouw van nieuwe schone elektriciteitscentrales, kan er ook na 2012 weer een nieuw overschot ontstaan.

### *NH<sub>3</sub>-uitstoot*

De uitstoot van ammoniak komt nagenoeg alleen uit de landbouwsector. In de chemische industrie zijn een aantal processen, die samen 1% van de NH<sub>3</sub>-uitstoot veroorzaken. Wellicht dat met de betreffende industriële bedrijven de plaatsing van een ammoniakstripper of -absorber gesproken kan worden

### *NMVOS-uitstoot*

De bronnen van NMVOS-emissie zijn heel divers en ook voor een groot gedeelte gelegen buiten de sector energie en industrie. Een deel van de industriële emissie heeft met installaties en de bijbehorende leidingssystemen te maken. Het met een vaste regelmaat meten van de werkelijke emissies en lekreparatie, zou stand der techniek moeten zijn. Daarnaast komt op een aantal plaatsten het NMVOS via afzuigsystemen in sterk verdunde vorm vrij. Hier zou men zich kunnen richten op systemen die in staat zijn om lage concentraties aan NMVOS af te breken. Ten aanzien van NMVOS uit reguliere bronnen (verf- en oplosmiddelgebruik) is wellicht een nieuw programma vergelijkbaar met KWS2000 nodig. Veel reductiemogelijkheden zijn al wel bekend (ADL, 2008).

Tabel 6.5 *Technieken voor NMVOS-emissiereductie bij sectoren met grootste uitstoot*

Sector	Aandeel in de Ned. uitstoot [%]	Emissiereductietechnieken
Energiesector	4	PM
Raffinaderijen	6	Betere lekdetectie met lasertechnologie voor NMVOS-reductie
Chemische industrie	5	Betere lekdetectie met lasertechnologie voor NMVOS-reductie
Overige industrie	13	Plasma technieken voor NMVOS-verwijdering Laminerende films in plaats van verven (NMVOS-reductie) Plasma technieken voor NMVOS-verwijdering Betere lekdetectie met lasertechnologie voor NMVOS-reductie

### *Fijn stof/PM<sub>10</sub>-uitstoot*

Een deel van de emissie van fijn stof uit de industriële sector komt 'gecontroleerd' vrij via schoorstenen en afzuigsystemen. Per subsector zou bekeken kunnen worden in hoeverre doekfilters de emissies zouden kunnen beperken en wat eventuele belemmeringen zijn, zie Tabel 6.6. Hierbij kan verwezen worden naar het actieplan fijn stof en BBT. Twee belangrijke aandachtspunten zijn dat niet elke type fijn stof per gram even schadelijk is en dat ook behoort rekening gehouden te worden met het ultrafijne stof (dat in doekfilters afhankelijk van de kwaliteit matig tot redelijk wordt afgevangen). Om ultrafijn stof te verwijderen kunnen eventueel ook membraanfilters gebruikt worden.

Tabel 6.6 *Technieken voor PM<sub>10</sub>-emissiereductie bij sectoren met grootste uitstoot*

Sector	Aandeel in de Ned. uitstoot [%]	Emissiereductietechnieken
Raffinaderijen	5	Stoppen met oliestook Doekfilters Keramische filters
Basismetaleindustrie	5	Doekfilters Keramische filters
Voedings- en genotmiddelenindustrie	7	Doekfilters

### *Zware metalen- en kwikuitstoot*

De uitstoot van niet vluchtige zware metalen naar de lucht loopt grotendeels gelijk met fijn stof uitstoot. Reductie van de fijn stof reduceert direct ook de uitstoot van deze zware metalen. Alleen vluchtige zware metalen, zoals kwik, gaan door de stoffilters heen. Via een combinatie van filters en injectie van actieve kool, zoals bij COHPAC & TOXECON kan dit kwik verwijderd worden. Ook kunnen filterbedden van actieve koolstof en metaal oxide gebruikt worden om kwik te verwijderen. Met het oog op de lokale milieusituatie kan aan bedrijven gevraagd worden om de technisch reeds voldoende beschikbare maatregelen te nemen. Wellicht dat demonstratie van de techniek binnen Nederland een onderdeel van deze aanpak kan vormen.

## **6.3 Nieuwe processen noodzakelijk op langere termijn**

Op een aantal plaatsen in de Nederlandse industrie zijn installaties aanwezig die nu voor een relatief grote milieubelasting zorgen en waarvan men weet dat dit ook in de toekomst, ondanks extra 'end op pipe' maatregelen, niet gaat veranderen. Ook op andere plekken zullen namelijk maatregelen genomen moeten worden. Wellicht dat door een andere opzet van het productieproces of door een 'complete' vernieuwing wel een substantiële stap gezet kan worden. Dit vergt echter een lange termijn visie en opzet rond de sector en een planmatige benadering waarin ook technologieontwikkeling een rol kan hebben. Voor een aantal sectoren, zoals de Raffinaderijen, de zware metaalindustrie en de Carbon Black productie, zou zo een lange termijn visie gemaakt moeten worden voor de 2030 situatie: wat is een wenselijk milieuoptimaal beeld, welke productieprocessen zouden dan compleet vervangen moeten zijn, hoe zouden we daar moeten komen en wat kan de (Europese) overheid hierbij betekenen? Gezien het IMO besluit over bunkerbrandstoffen (die uiterlijk in 2015-2020 tot ingrijpende wijzigingen leidt) is het gewenst dat voor de raffinaderijsector hier al op korte termijn een lange termijn visie voor wordt ontwikkeld.



## Referenties

- Chemelot (2006): *Chemelot Milieuplan 2006-2010*. Chemelot, Geleen, 2006, <http://www.chemelot.nl/>
- Chemelot (2008): *Chemelot Milieujaarsverslag 2007*. Chemelot, Geleen, 2008, <http://www.chemelot.nl/>
- Daniëls, B.W., A.J. Seebregts, P. Kroon, P. (2008): *Trendanalyse luchtverontreiniging. De effecten van het werkprogramma Schoon en Zuinig op de uitstoot van luchtverontreinigende stoffen*. ECN-E--08-002, ECN, Petten, juni 2008.
- FO industrie (2008): *Uitvoering intentieverklaring Olie- en gaswinningsindustrie Sommatierapport BMP-4*. R070912d. Facilitaire Organisatie Industrie, Den Haag, 14 maart 2008
- Litto, R., R. E. Hayes, B. Liu (2004): *Catalytic Combustion for Reduction of Fugitive Methane Emissions from Natural Gas Compressor Stations*. Proceedings of the 7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies; Sep. 5, 2004; pp. 329-336; Vancouver, Canada.
- Maas, C.W.M., H.H.J. Vreuls, et. al. (2008): *Greenhouse Gas Emissions in the Netherlands 1990-2006; National Inventory Report 2008*. MNP report 500080009, MNP/SenterNovem/TNO/CBS, Bilthoven, april 2008
- Manders, A.M.M., R. Hoogerbrugge (2007): *Heavy metals and benzo(a)pyrene in ambient air in the Netherlands; A preliminary assessment in the framework of the 4th European Daughter Directive*. RIVM Report 680704001/2007, RIVM, Bilthoven, 2007
- MNP/SenterNovem (2008): *Protocol 8116 Caprolactam, t.b.v. NIR 2008. uitgave maart 2008; 2B5: N<sub>2</sub>O-emissie bij caprolactamproductie*. Ministerie van VROM Protocollen broeikasgasmonitoring t.b.v. NIR 2008, Maart 2008, [http://www.broeikasgassen.nl/documents/2B5\\_N<sub>2</sub>O\\_caprolactam\\_NIR2008.pdf](http://www.broeikasgassen.nl/documents/2B5_N2O_caprolactam_NIR2008.pdf)
- Peek, C.J. (2007): *Emissies van prioritaire stoffen naar lucht in Nederland 1990-2005; Consequenties herziening stoffenlijst*. MNP-publicatienummer 500080010, MNP, Bilthoven, 2007, [http://www.emissieregistratie.nl/erpubliek/documenten/Lucht%20\(Air\)/Notitie%20Prioritaire%20Stoffen%201990-2005,%20PBL,%20aug%202008.pdf](http://www.emissieregistratie.nl/erpubliek/documenten/Lucht%20(Air)/Notitie%20Prioritaire%20Stoffen%201990-2005,%20PBL,%20aug%202008.pdf)
- Pranghover, G.G. (2007): *PM<sub>2.5</sub> Emissions from Industrial Sources; Control by Means of High Efficiency ePTFE Membrane Filter Laminates*. DustConf 2007, Maastricht, 22-23 april 2007 <http://www.dustconf.com/CLIENT/DUSTCONF/UPLOAD/S8/PRANGHOF.PDF>
- RIVM (2001): *Bouwstenen voor het NMP4, Aanvulling op de Nationale Milieuverkenning 5*. RIVM rapportnr. 408129022, RIVM, Bilthoven, 2001
- Scholtens, B. (2005): *Kwik uit crematoria minder de lucht in*. Volkskrant, 31 maart 2005
- Somers, J.M., H. L. Schultz (2008): *Thermal Oxidation of Coal Mine Ventilation Air Methane (VAM)*. 12th U.S./North American Mine Ventilation Symposium, Reno, Nevada, USA, June 9-11, 2008
- Schultz, H.L., et.al. (2005): *Mitigation of Methane Emissions from Coal mine Ventilation Air*. Western States Coal Mine Methane Recovery and Use Workshop, Grand Junction, Colorado April 19-20, 2005, [http://www.epa.gov/cmop/docs/cmm\\_conference\\_apr05/lee\\_schultz\\_richard\\_mattus.pdf](http://www.epa.gov/cmop/docs/cmm_conference_apr05/lee_schultz_richard_mattus.pdf)

- Spek, H. van der (2006) *Handreiking methaanreductie stortplaatsen*. SenterNovem, Utrecht, 2006 [http://www.SenterNovem.nl/mmfiles/HandreikingStortgaswinning\\_tcm24-221682.pdf](http://www.SenterNovem.nl/mmfiles/HandreikingStortgaswinning_tcm24-221682.pdf)
- TW (2008) *Sterke daling lachgasemissie*. Technisch weekblad 14 juni 2008
- Vlugt, A. van der (2002): *Inventarisatie stand der techniek in vergunningen*. L35, Infomil, Den Haag, oktober 2002
- VROM (2001): *Een wereld en een wil: werken aan duurzaamheid; Nationaal Milieubeleidsplan 4*. Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, Den Haag, september 2001
- Yara (2006): *Een eeuw jong 1905-2005 Publieksverslag*. Yara Sluiskil, 2006

## Internet sites

- <http://www.emissieregistratie.nl> (emissiecijfers per sector en bedrijf)
- [http://www.mnp.nl/en/dossiers/Transboundaryairpollution/Dutch\\_Policy\\_Research\\_Programme\\_on\\_Air\\_and\\_Climate.html](http://www.mnp.nl/en/dossiers/Transboundaryairpollution/Dutch_Policy_Research_Programme_on_Air_and_Climate.html) (BOLK programma)
- [http://www.task.be/luchtzuivering\\_co.htm](http://www.task.be/luchtzuivering_co.htm) (verkoper NH<sub>3</sub> verwijderingsinstallaties)
- [http://www.iiasa.ac.at/~rains/doc/manual/enem.htm#Control%20NH<sub>3</sub>](http://www.iiasa.ac.at/~rains/doc/manual/enem.htm#Control%20NH3) (Rains-model over NH<sub>3</sub>)

## Bijlage A Overzicht van technologieën

### A.1 Nieuwe procesgeïntegreerde technologieën per sector

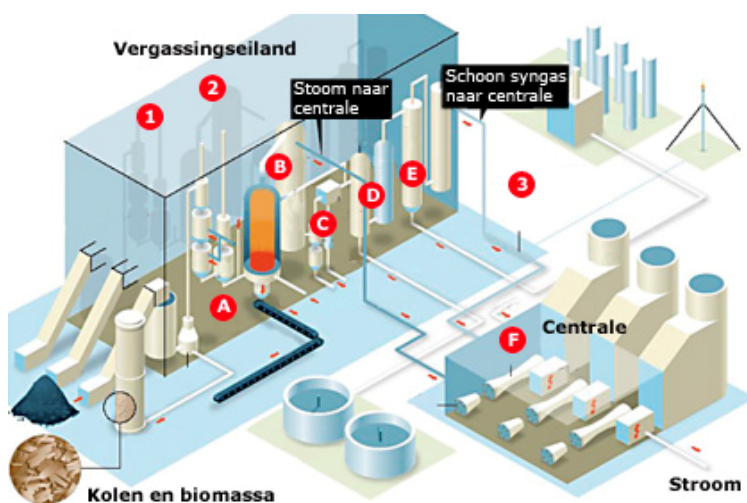
In deze bijlage zullen een groot aantal technieken kort worden gepresenteerd ('long list'). Uit deze 'long list' zou een 'short list' samengesteld kunnen worden van technologieën die nader uitgezocht kunnen worden. In het kader van dit onderzoek is uiteindelijk geen 'short list' samengesteld. Wel zijn in Bijlage C alvast drie technologieën, die in aanmerking komen voor de 'short list', nader uitgewerkt. Hoewel er wel naar gekeken is, is besloten om de productie van duurzame energie in ieder geval buiten beschouwing te laten, bij de samenstelling van een eventuele 'short list'.

#### A.1.1 Elektriciteitsproductie

Voor deze paragraaf is onder andere gebruik gemaakt van een overzicht van opkomende (emerging) technieken rond grootschalige verbrandingsinstallaties ( $>500 \text{ MW}_{\text{th}}$ ) dat in het kader van de UN ECE protocollen over grensoverschrijdende luchtverontreiniging is opgesteld (EGTEI LCP, 2008). Grote centrales hebben een lange levensduur van 25 tot 40 jaar (kolencentrale met leeftijdsverlenging). Dit betekent dat nieuwe technieken slechts langzaam in de Nederlandse elektriciteitssector zullen penetreren.

##### *Kolenvergasser STEG (IGCC)*

Op dit moment wordt elektriciteit uit kolen meestal gemaakt, door met de kolen stoom te maken en dit door een stoomturbine te sturen. Een andere optie is om de kolen te vergassen en dan het gas in een gasturbine te verbranden (en elektriciteit te winnen uit de gasexpansie) en met de resterende warmte nog stoom te maken (voor elektriciteitsproductie met een stoomturbine). De combinatie van gasturbine en stoomturbine staat bekend als STEG en is al jaren de standaard techniek bij nieuwe gascentrales. Het huidige rendement van een kolenvergasser gevolgd door een gasturbine en een stoomturbine (KV-STEG) kan van 43%, het rendement van de enige Nederlandse KV-STEG in Buggenum, toenemen naar 50% in 2015. Voordeel van deze centrales is de lage  $\text{SO}_2$ - en fijn stof uitstoot ten opzichte van conventionele kolencentrales. Ook leent het KV-STEG principe zich goed voor  $\text{CO}_2$ -verwijdering tussen de vergasser en de gasturbine. De toepassing van  $\text{CO}_2$ -verwijdering en opslag kan commercieel beschikbaar komen rond 2020 (EGTEI LCP, 2008).



Figuur A.1 Opbouw van nieuwe KV-STEG centrale van de NUON

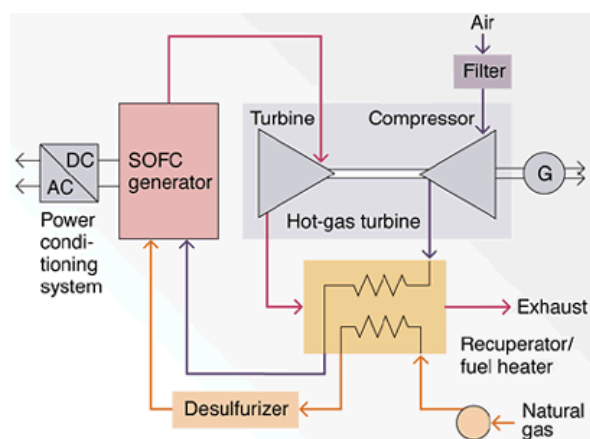
Bron: [www.nuon.com](http://www.nuon.com)

### *Kolenvergasser met waterstofopslag en flexibele STEG*

Ten opzichte van de KV-STEAG biedt dit concept aanzienlijk meer flexibiliteit. De vergasserstap, waar de grootste kapitaalslasten liggen, wordt in continu in bedrijf gehouden. Het gevormde gas wordt na reiniging omgezet in CO<sub>2</sub> en waterstof. De CO<sub>2</sub> wordt ondergronds opgeslagen en de waterstof gaat de STEAG-installatie in (of eventueel een brandstofcel). Indien er op dat moment onvoldoende vraag is naar extra elektriciteit (bijvoorbeeld omdat er veel windenergie geproduceerd wordt) wordt de waterstof voor later gebruik opgeslagen. Omdat er ook waterstof uit de opslag beschikbaar is, kan de STEAG-installatie een veel groter vermogen krijgen. Een 250 MW<sub>e</sub> KV-STEAG die 7000 uur draait, wordt zo vervangen door een flexibel in te zetten installatie van 550 MW<sub>e</sub> die 3000 uur draait en die zich uitstekend laat combineren met windenergie. Als het hard waait wordt alle waterstof opgeslagen. Bij windstil weer, wordt naast de vergasser ook gebruik gemaakt van waterstof uit de opslag.

### *Hoge temperatuurbrandstofcel (SOFC) met nageschakelde gasturbine*

Een mogelijkheid om zeer hoge elektrische rendementen te bereiken (70% of meer) is de combinatie van twee elektriciteitsproducerende installaties. Met het rookgas uit een hoge temperatuur brandstofcel (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC) kan nog prima een gasturbine aangedreven worden. Rendementen die hiermee met kleinschalige installaties bereikt kunnen worden gaan - op papier- die van de beste grootschalige STEAG-installaties te boven. In Nederland wordt dit concept onder andere door gasturbine fabrikant Heron genoemd. Bronnen: (Jansen, 1996), (EECT, 2008), ([www.netl.doe.gov](http://www.netl.doe.gov)).

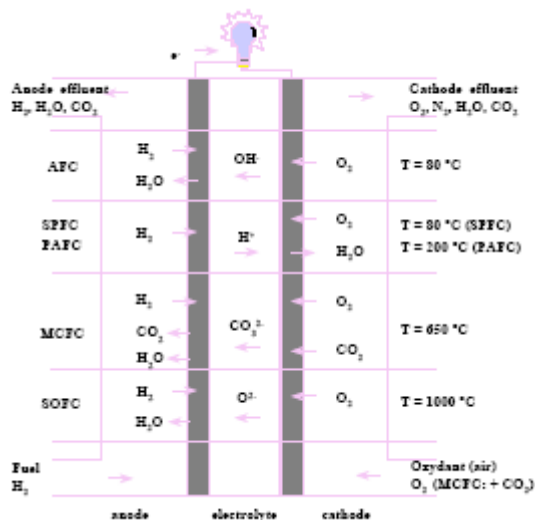


Figuur A.1 *Schema van brandstofcel met geïntegreerde gasturbine*

Bron: Jansen, 1996.

### *Hoge temperatuurbrandstofcel (SOFC) in WKK*

Voor industriële fornuizen is de temperatuur van het rookgas dat uit een gasturbine komt vaak te laag om met een hoog rendement te gebruiken. Een oplossing kan het gebruik van de SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) zijn, die rookgas met een veel hogere temperatuur levert. Hiermee zou een nieuw potentieel aan WKK in de industrie ontsloten kunnen worden. Bovendien hebben brandstofcellen een zeer lage NO<sub>x</sub>-uitstoot.



Figuur A.2 De verschillende typen brandstofcellen

Bron: ECN, 1999.

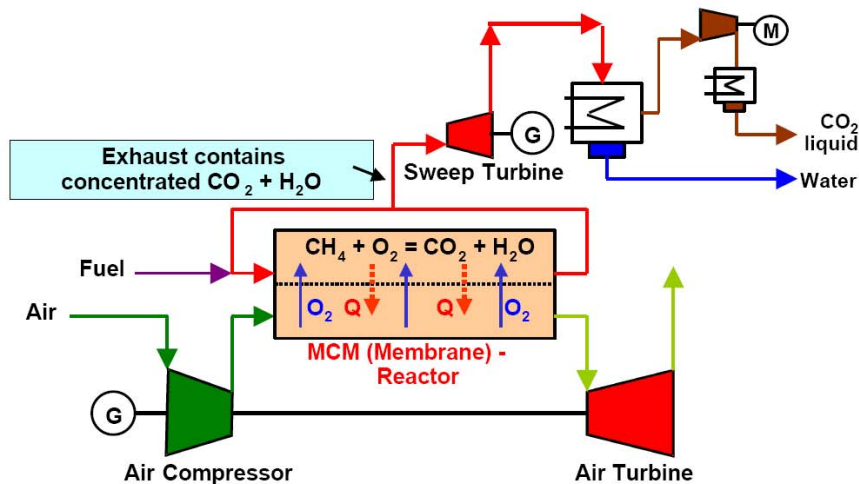
### *Oxi-fuel verbranding (verbranden met pure zuurstof)*

Het grote voordeel van oxi-fuel verbranding is dat de uitlaatgassen na afkoeling vooral uit CO<sub>2</sub> bestaan. Deze CO<sub>2</sub> kan dan direct ondergronds opgeslagen worden. Wel is voor de verbranding pure zuurstof nodig waarvan de productie, bijvoorbeeld via cryogene luchtscheiding (afkoeling tot ver onder de 0 °C), wel de nodige energie vergt. Ook ontstaan er zeer hoge vlamtemperaturen die echter verminderd kunnen worden door rookgasrecirculatie. Een tweede aspect is dat er nagenoeg geen stikstofoxiden gevormd worden. De huidige stand van zaken is dat installaties van 10-50 MW gepland zijn richting 2010, demonstratie plants van 100-500 MW verwacht worden rond 2015 en commerciële beschikbaarheid van de technologie verwacht wordt rond 2020 (EGTEI LCP, 2008). Oxi-fuel verbranding wordt al veel toegepast bij de productie van glas waar juist hoge vlamtemperaturen nodig zijn en waar zo de hoge NO<sub>x</sub>-uitstoot fors wordt gereduceerd.

In het Schotse Renfrew wordt aan een pilotproject gewerkt (Oxycoal 2) om de techniek op een 40 MW schaal toe te passen zowel ten behoeve van nieuwe als oude kolencentrales (Energieportal, 2008).

### *Oxi-fuel verbranding in gasturbine met membranen*

In het kader van het Europese onderzoeksprogramma FP5 (Project Reference: ENK5-CT-2001-00514) is gekeken naar de mogelijkheid om membranen voor luchtscheiding te combineren met een gasturbine (FP5, 2005). Zo wordt een zuivere CO<sub>2</sub>-stroom gevormd, die direct geschikt is voor CO<sub>2</sub>-opslag (AZEP). Berekeningen laten zien dat de rendementsdaling slechts 4 procentpunt is vergeleken met 10 procentpunt in andere situaties. Omdat er bij de verbranding geen stikstofaanwezig is, daalt ook de NO<sub>x</sub>-emissie fors, naar verwachting tot minder dan 1 ppm. Bronnen: (Griffin, 2005), (Sundkvist, 2001).



Figuur A.3 *Gasturbine met CO<sub>2</sub>-afscheiding via membraan*

Bron: Sundkvist, 2001.

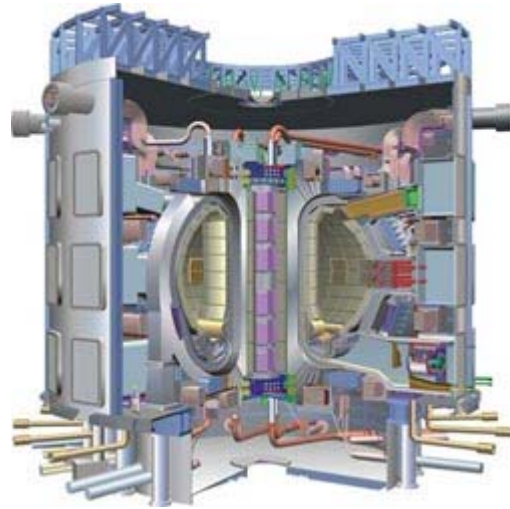
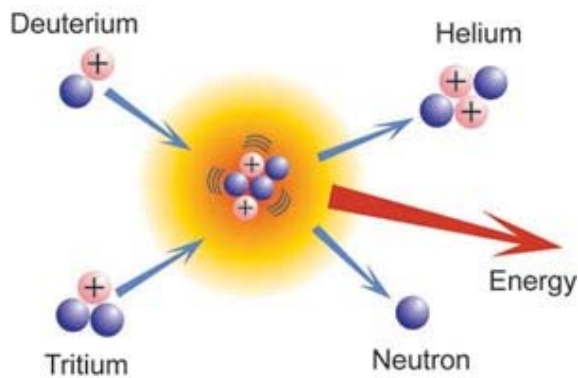
### *Verbetering conventionele centrales*

De ontwikkeling van nieuwe technologieën betekent niet dat de ontwikkeling van bestaande stil staat. Bij nieuwe conventionele kolencentrales zijn de rendementen al toegenomen van 40% tot 45% (door hogere stoomtemperaturen). In 2020 kan dit voor nieuwe eenheden naar 50% zijn opgelopen. Voor gascentrales levert de combinatie van een gasturbine met een stoomturbine (STEG) bij nieuwe eenheden van 400 MW een elektrisch rendement van 58%. In 2015 kan dit zijn opgelopen naar 62%. Op lange termijn (2035) kan dit nog naar 70% oplopen (EGTEI LCP, 2008). De nieuwste gasturbines hebben emissies beneden de 20 mg NO<sub>x</sub>/Nm<sup>3</sup> (bij 15% O<sub>2</sub>; 17 g/GJ brandstof).

### *Kernfusie*

Kernfusie is het samensmelten van de kernen van verschillende atomen, waarbij een ander element wordt gevormd. Wanneer atomen van lichte elementen zoals waterstof samensmelten, wordt hierbij iets van de massa omgezet in energie. Bij waterstof is dit ongeveer 0,67%. Fusieprocessen doen zich in de zon voor. Al decennia lang wordt onderzoek gedaan of dit ook op aarde te realiseren is. Bij de kernfusie, die voor ogen staat, worden een deuteriumkern (waterstof met 1 neutron) en een tritiumkern (waterstof met 2 neutronen) omgezet in een heliumkern, energie, en een neutron. Op dit moment zijn er voorbereidingen om in Cadarache (Frankrijk) een International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) te bouwen. Deze reactor kost € 5 mld en zal naar verwachting in 2016 in bedrijf komen en 500 MW produceren. Dit betekent niet dat kernfusie dan een techniek is die emissievrij en tegen een redelijke prijs elektriciteit kan produceren. De bouwers van ITER geven op hun site aan dat nog niet duidelijk is wanneer dit punt bereikt zal worden. Bronnen: ([www.iter.org](http://www.iter.org)), ([www.nl.wikipedia.org](http://www.nl.wikipedia.org)).



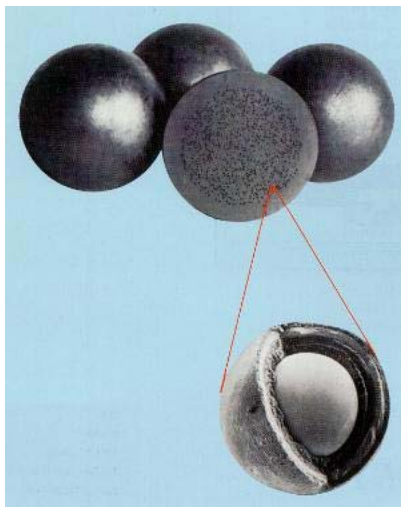


Figuur A.4 *Principe van fusie en de ITER-reactor*

Bron: [www.iter.org](http://www.iter.org)

### *Hoge temperatuur kernreactor*

Bij een hoge-temperatuurreactor (HTR) is de uranium ‘brandstof’ opgeborgen in ballen in plaats van staven. Doel van dit type kernreactor is het bereiken van een hoog potentieel voor inherente veiligheid. De HTR-ontwikkeling vindt plaats in Nederland (bij NRG) en in Zuid Afrika. De centrale wordt niet alleen voor elektriciteitsproductie ontwikkeld, maar kan ook warmte leveren, bijvoorbeeld aan een ethyleenkraker. Met de nieuwe reactor wordt het probleem van het afval niet opgelost ([www.nrg.eu/](http://www.nrg.eu/)).



Figuur A.5 *HTR-brandstofballen. Uraniumkorrels ingebed in vier coatings.*

Bron: [www.nrg.eu/](http://www.nrg.eu/)

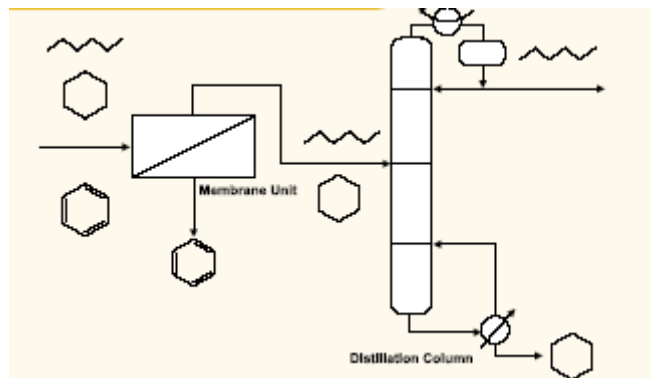
## A.1.2 Raffinaderijen

### *Hydrotreating met in vloeistof opgeloste waterstof (IsoTherming)*

Om oliestromen te ontzwavelen of te stabiliseren worden deze in de hydrotreating met waterstof behandeld. De niet gereageerde waterstof (het grootste deel) wordt bij de uitgang weer opgevangen, gecomprimeerd en teruggevoerd naar de invoer. De beperkende factor in de reactiesnelheid is de overdracht van waterstof. Een nieuw proces van o.a. Dupont (IsoTherming™ Hydroprocessing Technology Process) werkt met een vloeibare waterstofstroom, waardoor niet de waterstof overdracht maar alleen nog de reactiesnelheid bepalend is. Dit heeft een aantal voordelen. Bronnen: ([www2.dupont.com](http://www2.dupont.com)), (Pereira, 2007).

### *Energiebesparing door membraan scheiding bij raffinaderijen*

Membraanscheiding, kan, volgens (OIT, 2000b) in raffinaderijen op sommige plekken tot 20% energiebesparing leiden, zie ook (Dorgan, 2003). In Figuur A.6 is het principe aangegeven van het scheiden van aromaten en alkanen. In de eerste stap worden met een membraan de aromaten afgescheiden. In de destillatiestap worden daarna de cyclische alkanen gescheiden van de rest.



Figuur A.6 Voorbeeld van hybridescheiding met membraan en destillatie

Bron: OIT, 2000b.

### *Gebruik van Ionische vloeistof als 'oplosmiddel' bij alkylatie*

Ionische vloeistoffen, ook wel gesmolten zouten genoemd, hebben intrigerende eigenschappen. Langzamerhand vinden onderzoekers voor die eigenschappen allerlei interessante toepassingen (<http://en.wikipedia.org/>). Behalve als oplosmiddel voor effectievere chemische reacties kunnen zij ook worden gebruikt als stuwstof voor raketten, als smeermiddel in vliegtuigmotoren en als immersievloeistof in de mineralogie. In de vorm van een dunne film zijn ze bruikbaar als membraan in nieuwe typen brandstofcellen. Voorbeeld in de raffinage industrie is het alkylatie proces. Bronnen: (Abdul-sada, 1997), ([www.freepatentsonline.com](http://www.freepatentsonline.com)), (Brouw, 2007).

### *Membranen voor waterstofwinning uit gasstromen*

In de raffinaderijen en in de chemie zijn er gasstromen die een beperkte hoeveelheid waterstof bevatten. Hoewel waterstof veel waardevoller is (het is een dure grondstof, die uit aardgas gemaakt moet worden) dan het andere restgas, wordt het soms gewoon verbrand. Een optie is om dit waterstof door membranen op te vangen. Gangbaar is polyimide maar ook een nieuw membraan uit koolstof levert goede resultaten op (90% terugwinning met een zuiverheid van 95%) (Grainger, 2007).

## A.1.3 Kunstmestproductie

Klimaatbeleid in de kunstmestproductie richt zich met name op twee stromen. Bij de productie van ammonia voor kunstmest komt een redelijk zuivere CO<sub>2</sub>-stroom vrij. In principe is dit een goed bruikbare stroom voor CCS (CO<sub>2</sub>-afvang en -opslag). Een andere broeikasgasemissie van kunstmestchemie is de N<sub>2</sub>O-emissie. Inmiddels zijn er katalysatoren ontwikkeld, en worden ook in Nederland toegepast, die deze emissie aanzienlijk (met 70 tot 90%) terug kunnen dringen (Ingels, 2007).

### *Ammonia productie uit (duurzame) elektriciteit*

Op dit moment wordt ammoniak, onder andere in de kunstmestindustrie, gemaakt uit aardgas. Met het gebruik van nafta in de petrochemie en kolen/cokes in de zware metaalindustrie vormt dit de belangrijkste vorm van het gebruik van fossiele brandstof als grondstof in de industrie. Het aardgas levert de benodigde waterstof voor ammoniak; het stikstof komt uit de lucht. Een deel van de koolstof in het aardgas wordt (in de vorm van CO<sub>2</sub>) gebruikt om de ammoniak aan te koppelen en zo ureum te maken; de rest komt vrij als CO<sub>2</sub>-emissie. In plaats van de waterstof



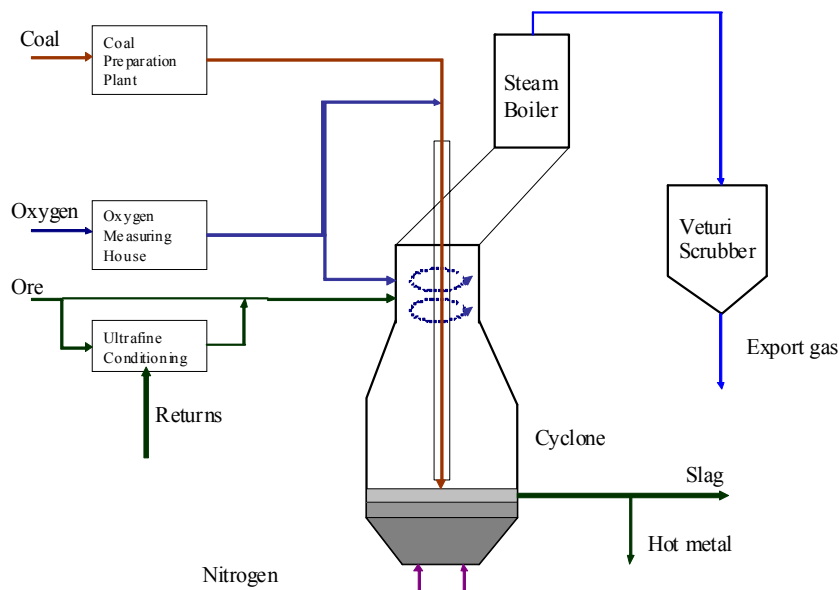
uit aardgas kan ook waterstof uit elektrolyse gebruikt worden. De benodigde elektriciteit kan bijvoorbeeld geleverd worden door een windturbinepark. Op die manier kan ‘duurzame’ ammoniak gemaakt worden zonder CO<sub>2</sub>-emissie en zonder gebruik van fossiele energie. Dit proces is eerder toegepast bij de Vemork waterkrachtcentrale in Noorwegen (Boersma, 2008).

#### A.1.4 Zware metaalindustrie

In principe is het mogelijk om bij de hoogovens CO<sub>2</sub>-afvang en -opslag (CCS) toe te passen, zie bijvoorbeeld het ULCOS project (Jitsuha, 2007). Hier worden echter twee andere opties bekeken.

##### *Cyclone converter furnace ijzerproductie*

De productie van ruwijzer met de Cyclone Converter Furnace (CCF) in plaats van met een hoogoven heeft veel voordelen. Door het ontbreken van de energie-intensieve voorbewerking van kolen en erts, in respectievelijk de cokesproductie de sintering, is de productie van ruwijzer met de CCF energetisch efficiënter dan met een Hoogoven. Ook zijn door het ontbreken van de cokesoven en het sinteringsproces de luchtvervuilende emissies lager. Bij CCF worden de kolen samen met pure zuurstof boven ingevoerd, zie Figuur A.7. Het fijn gemalen ijzererts wordt net onder een tweede zuurstofinlaat de installatie ingebracht. De vrijkomende hitte wordt gebruikt om stoom op te wekken. Doordat de CCF zuivere zuurstof nodig heeft, biedt het proces potentieel belangrijke voordelen bij toepassing van CO<sub>2</sub>-afvang door een hoger koolstofgehalte van de restgassen. Theoretisch kan dit nog verder opgevoerd worden door met export gas het toegevoerde stikstof te vervangen. De CCF kan naar schatting rond 2015 beschikbaar zijn (Daniëls, 2006).



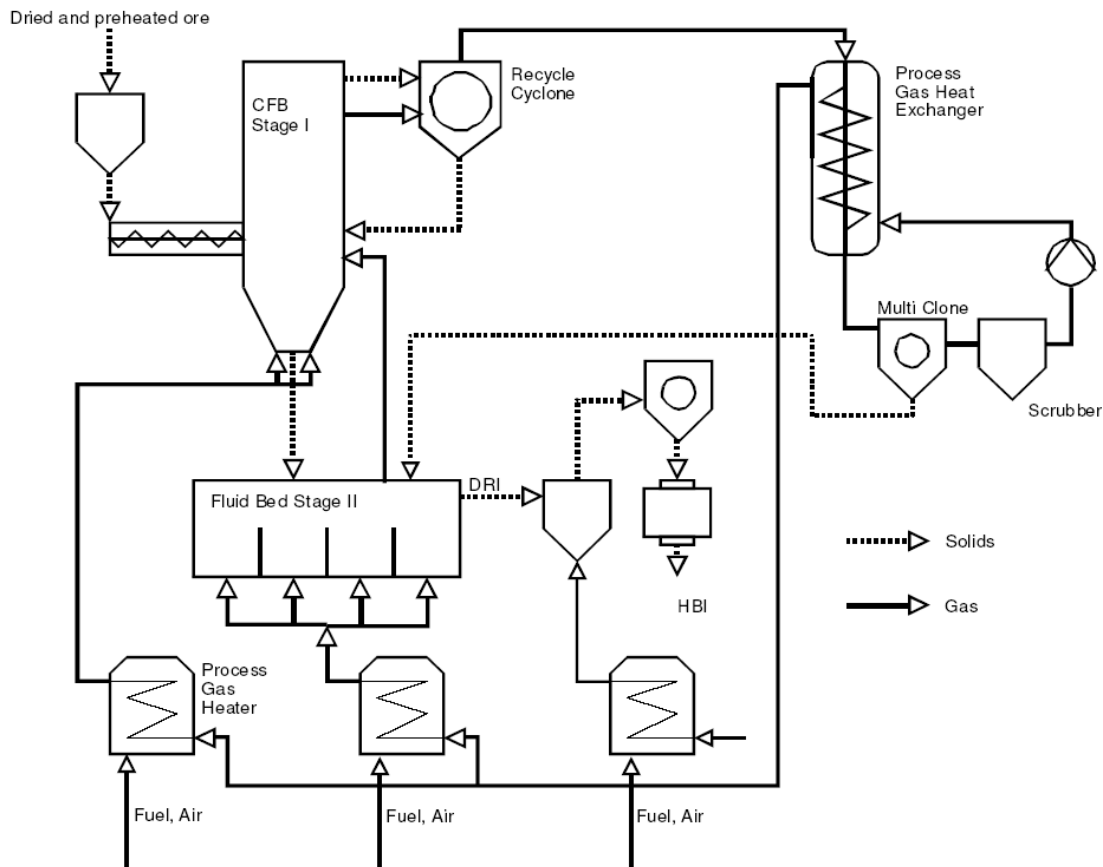
Figuur A.7 *Schema van ijzerproductie met een Cyclone Converter Furnace*

Bron: Daniëls, 2002.

##### *Cicored proces, ijzer maken met waterstof*

Een methode om direct staal te maken uit ijzererts is het Cicored proces. Dit zou in Nederland een overgang op een alternatieve staalproductieroute met zich mee brengen, die wel een vergelijkbare productkwaliteit oplevert. De combinatie Cicored en elektrostaaloven kan de huidige combinatie van cokesoven, sinterfabriek, hoogoven en oxystaaloven vervangen. De overgang op

Circored betekent daarmee een forse verandering van de huidige productiestructuur. Omdat Circored aardgas gebruikt in plaats van kolen en cokes, zijn de CO<sub>2</sub>-emissies lager dan bij de op hoogovens gebaseerde staalproductie. Het proces zet het aardgas eerst om waterstof, en kan dus eventueel ook rechtstreeks waterstof gebruiken, waardoor de CO<sub>2</sub>-emissies nog verder omlaag kunnen. CO<sub>2</sub>-afvang is ook een optie. Omdat de gassen de installatie meerdere keren passeren, kan ook een CO<sub>2</sub>-afvangproces gebruikt worden met een laag afvangrendement. De gassen komen immers meerder keren langs. Ook de overige emissies zullen flink lager zijn. Een Cicored fabriek is in werking op Trinidad, waar het gebruik maakt van het waterstofrestproduct van een lokale raffinaderij (Manning, 2001), (Daniëls, 2006).



Figuur A.8 Schema van ijzerproductie via het Cicored proces

Bron: Daniels, 2002

### A.1.5 Papierindustrie

Bij energiebesparing in de papierindustrie ligt de toepassing van warmte krachtkoppeling (WKK) voor de hand. Ook het gebruik van oud papier als grondstof is een zeer belangrijke reductieoptie. Beide worden al grootschalig toegepast. Meer recent wordt er gekeken naar het gebruik van reststromen voor bio-energieproductie (Mensink, 2007).

#### *Papierproductie zonder water*

In het kader van EnergieTransitie Ketenefficiency wordt ook naar de papier- en kartonindustrie gekeken, zie ([www.senterNovem.nl](http://www.senterNovem.nl)), (Kop, 2007). De papier- en kartonindustrie is verantwoordelijk voor 4 à 5% van het primaire energieverbruik in de Nederlandse procesindustrie, maar ziet ook potentieel voor forse reducties (tot 50%) in het energiegebruik. Er zijn een zestal innovatieprogramma's geïdentificeerd. Zoals het implementeren van 'best practices', reststromen voor duurzame energie en de biorefinery. Het vijfde programma 'without water' lijkt het meest relevant voor dit rapport. Voor de productie van papier wordt veel water ingezet om houtvezels

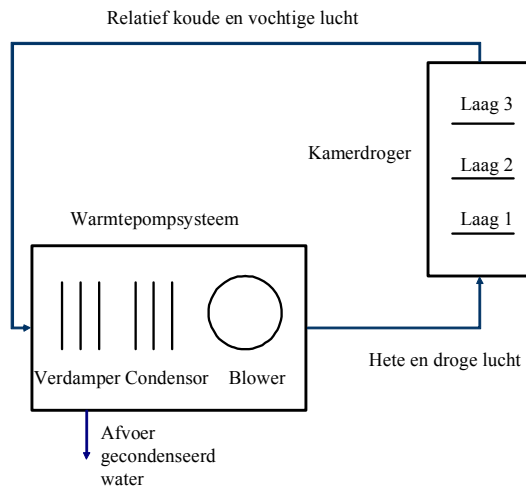
op te lossen tot zogeheten papierpulp. Bij het proces waar de pulp weer gedroogd wordt, wordt de meeste energie verbruikt (48%) ([www.kcpk.nl](http://www.kcpk.nl)). Als papier met minder water kan worden geproduceerd, kan dus veel energie worden bespaard. In de papierindustrie worden nu diverse mogelijkheden zichtbaar om bij het droogproces energie te besparen. Toekomstige stappen zijn de vervanging van alle energie-intensieve procesonderdelen, waaronder de vervanging van water door bio-ethanol of zelfs door superkritische CO<sub>2</sub>. In het programma ‘Without Water’ wordt gezocht naar doorbraaktechnologieën en de haalbaarheid daarvan voor de Nederlandse papier- en kartonindustrie.

### *Houtchips voor papier voorbehandelen met enzymen*

Het malen van houtchips voor het produceren van papier kost veel elektriciteit. Volgens (Alisma, 2001) is 25% van de 7,7 PJ elektriciteitsverbruik gekoppeld aan pulp preparation. Het toevoegen van enzymen aan de te malen houtchips kan dit verbeteren (Viforr, 2008). Een recente studie in het kader van het Europese Ecotarget project komt met een besparing van 20% of meer. Het onderzoek naar de beste enzymen en methode loopt echter nog. De methode om de enzymen toe te voegen is eerst het hout onder druk brengen, daarna het hout in de oplossing met enzymen te brengen en tenslotte de druk weer verlagen (dan wordt de enzym oplossing het hout in geperst).

### *Drogen met warmtepompen*

Een schatting uit Groot Brittannië concludeert dat 20% van het energieverbruik gekoppeld is aan drogen. Een mogelijkheid om hier energie te besparen is het gebruik van warmtepompen.



Photograph of Continuous Bed Dryer

Figuur A.9 *Schema van warmtepompsysteem en foto van opstelling*

Bron: USASK.

Bij een ideaal droogproces wordt de latente warmte uit de drooglucht teruggewonnen en met behulp van een warmtepomp opgevaardeerd tot een niveau waarop deze warmte nuttig gebruikt kan worden binnen het droogproces, zie Figuur A.9. Op deze manier wordt water in dampvorm onttrokken en vervolgens weer gecondenseerd, waardoor de verdampingswarmte van het water per saldo niet meer hoeft worden opgebracht. Het primair energieverbruik van een gesloten warmtepompsysteem is dan ook aanmerkelijk lager dan van een conventionele open droger. Waarden van ca 1200 kJ - 1500 kJ per kg onttrokken water zijn mogelijk. Omdat de kosten van de aandrijvende elektriciteit hoger zijn dan van aardgas, is het economische voordeel beperkt of zelfs negatief indien de C.O.P. (rendement) niet groot genoeg is. Bronnen: (<http://homepage.usask.ca>), (Lee, 2007).

### A.1.6 Industriële energiebesparing in de chemie

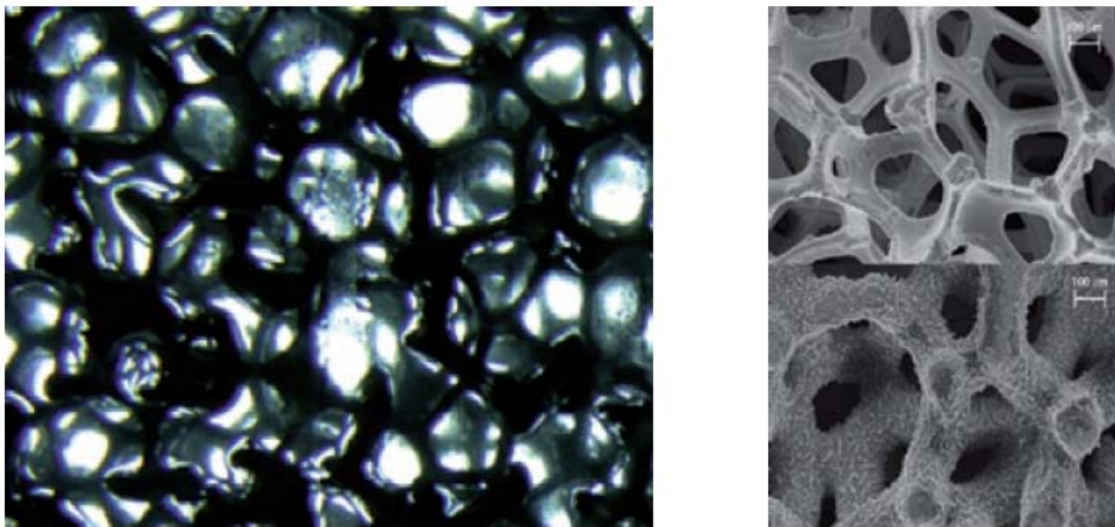
In 2008 zijn door het Platform Ketenefficiency een groot aantal industriële technologieën geïnventariseerd. Deze inventarisatie omvat 72 'process intensification' technieken waarvan er van 46 een uitgebreidere beschrijving is opgesteld (IP, 2008). Appendix 1 van het IP-rapport beschrijft deze technologieën. De onderverdeling van de technologieën is als volgt:

- Structured devices: Non-reactive; Reactive.
- Hybrid: Non-reactive; Reactive.
- Energy transfer: Rotating; Impulse; Electromagnetic.
- Dynamic.
- Other Supercritical.

Uit deze lijst van technologieën (zie Bijlage B) is een deel hier overgenomen. Om het lange termijn potentieel te schetsen is hierbij met name gekozen voor technieken die 10 of meer jaar van de markt staan en tenminste een 'medium' energiebesparing opleveren.

#### *Katalytische schuim reactoren (besparing pompenergie)*

In de meeste reactoren met een vaste katalysator wordt deze gevuld met deeltjes, die doen denken aan het broodbeleg vruchtenhagel, met een groot oppervlak waarop de katalysator is aangebracht. Een nieuwe optie is om een hard schuim te gebruiken (sponsachtig materiaal, dat niet zacht maar hard is) en daar de katalysator op aan te brengen. Voordeel is dat er een groot oppervlak beschikbaar is en dat het veel minder energie kost om het gas of de vloeistof door het katalysatorbed te pompen. Als een metaalachtig schuim gebruikt wordt kan de reactor ook nog eens beter warmte afvoeren. Nadelen zijn wel de hogere investeringskosten en het feit dat het oppervlak uiteindelijk beperkt is ten opzichte van zeer poreuze katalysatormaterialen. Een variant die al wel toegepast wordt bij autokatalysatoren zijn de monolitic reactoren. Het besparingpotentieel wordt in (IP, 2008) op medium geschat. De techniek is in onderzoek bij TU Eindhoven en Twente (IP, 2008)

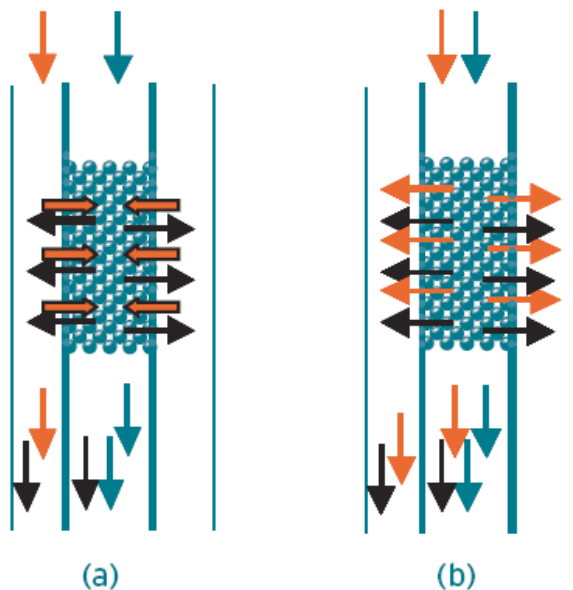


Figuur A.10 Grote open ruimtes in het schuim waarop zich de katalysator bevindt  
Bron: IP, 2008.

#### *Membraanreactoren (niet Selectief)*

Een membraan kan gemaakt zijn van kunststof of keramiek (op een drager die de stevigheid levert) en heeft zulke kleine gaatjes (of eigenschappen) dat bepaalde moleculen er wel en andere er niet door kunnen. Er zijn membraanreactoren die selectief het gevormde reactieproduct afvoeren en zo in de reactor een hogere omzetting kunnen bereiken. Niet selectieve membranen zijn echter goedkoper. Deze kunnen gebruikt worden om 1 stof over de hele reactor gespreid toe te voeren zodat hoge concentraties hiervan in de reactor vermeden worden. Een andere optie,

die nog verder weg is, is om de katalysator met het membraan te integreren (IP, 2008). Het besparingspotentieel wordt in (IP, 2008) op medium geschat.



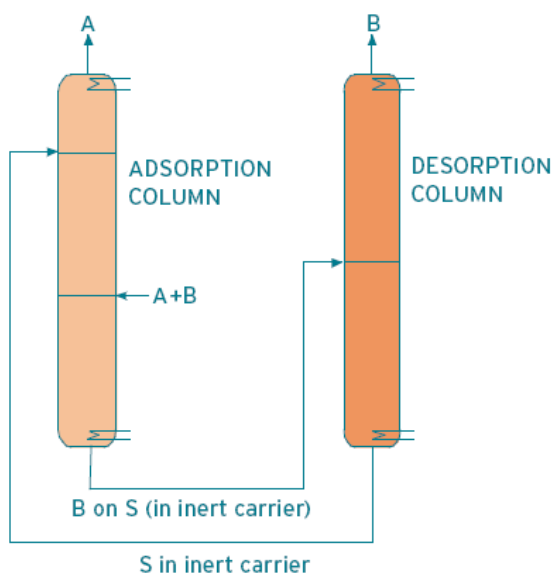
Twee principes. Bij (a) wordt op voeding gestuurd. Bij (b) op de afvoer van het product

Figuur A.11 *Principe van membraanreactoren*

Bron: IP, 2008.

### *Adsorptive distillation*

Het scheiden via destillatie van vloeistoffen die ongeveer hetzelfde kookpunt hebben of samen een azeotroop vormen is erg moeilijk. Toevoeging van een derde stof (in Figuur A.12 de stof S) maakt het mogelijk om dit eenvoudiger (en met minder energieverbruik) te scheiden. De derde stof moet bij dit proces selectief één van de stoffen kunnen absorberen (in een eerste kolom). In de tweede kolom kan dan via destillatie de opgenomen stof van het adsorptiemiddel worden gescheiden. De techniek kan ook gebruikt worden om vloeistoffen te zuiveren. (IP, 2008). Het besparingspotentieel wordt in (IP, 2008) op medium geschat.



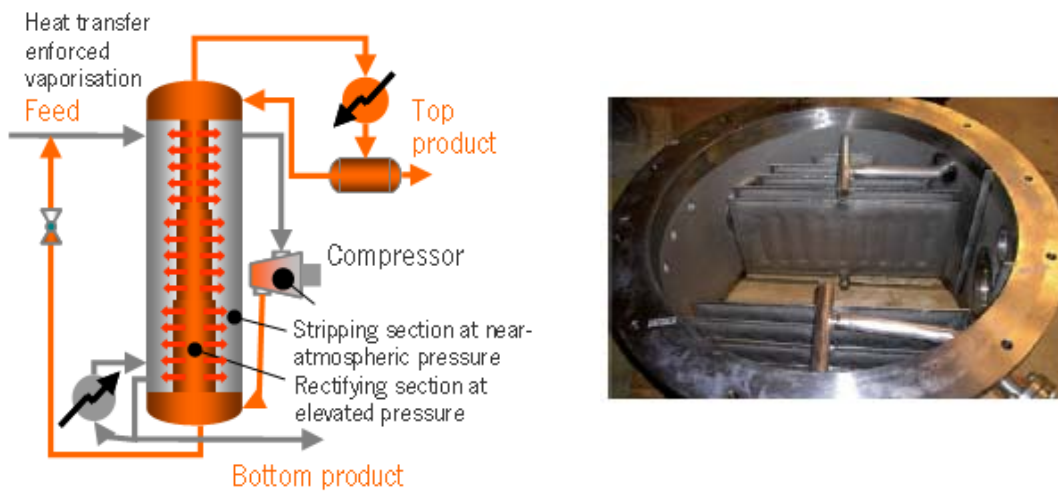
Figuur A.12 *Scheiding van de azeotropen A en B via adsorptive distillation*

Bron: IP, 2008.



### Heat Integrated distillation

In een normale destillatiekolom is er sprake van 1 scheidingsproces met 1 vloeistof die naar beneden loopt en 1 gastroom die omhoog loopt. Aan de onderkant van de kolom moet continue warmte worden toegevoerd en aan de bovenkant moet continue worden gekoeld om het scheidingsproces op gang te houden. In deze nieuwe ontwikkeling worden verticale scheidingswanden geplaatst, waardoor er meerdere scheidingsprocessen parallel aan elkaar plaats kunnen vinden, bijvoorbeeld voor het verder zuiveren van de gescheiden vloeistoffen (dit spaart extra destillatiekolommen uit). Via de scheidingswand kunnen beide processen warmte uitwisselen. Er zijn twee varianten in ontwikkeling: Dividing-Wall Columns en Heat-Integrated Distillation Columns (HIDiC). De eerste optie is al ver gevorderd met marktpenetratie en bezig om standaard techniek te worden in de chemie. De economische voordelen op het gebied van energie en investeringkosten zijn in de orde van 30%. Bronnen: (IP, 2008), ([www.psenterprise.com](http://www.psenterprise.com)).



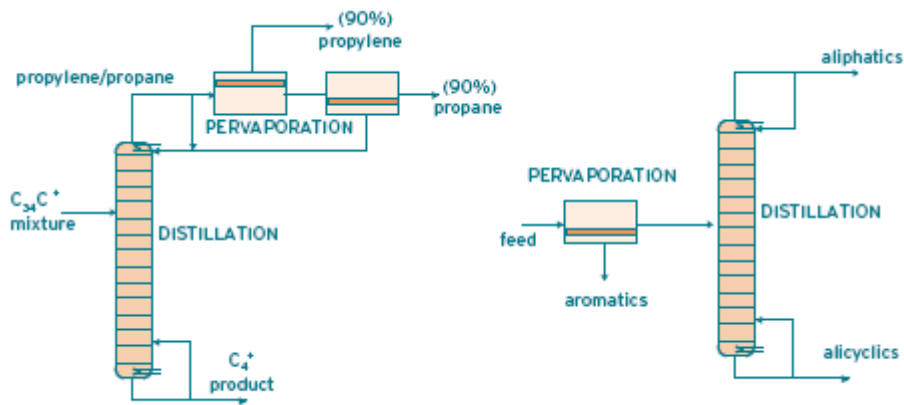
Figuur A.13 HIDiC-schema en foto van ingebouwde warmtewisselaars in pilot installatie

### Membraanhybride scheidingsprocessen

Hier kunnen vier verschillende scheidingsprocessen worden onderscheiden die in divers stadia van ontwikkeling zijn (IP, 2008). Aan de eerste drie wordt een medium besparing toegerekend:

- Membraan kristallisatie: De verdampte vloeistof condenseert op het membraan en gaat daarna als vloeistof door het membraan, waar het aan de andere kant uitkristalliseert (toepassing bijvoorbeeld voor scheiding van eiwitten) (nog 10-15 jaar ontwikkeling nodig).
- Membraan distillatie: De verdampte vloeistof komt bij het hydrofoob (waterafstotend) membraan. Niet polaire stoffen kunnen het membraan passeren en aan de andere kant condenseren (nog 5-10 jaar ontwikkeling nodig).
- Pervaporation. Ook hier passeert het gas het membraan. Wegens de onvoordelige opschaling kan dit beter gecombineerd worden met een destillatieproces (nog <5 jaar ontwikkeling nodig).
- Membraan extractie. Dit wordt gebruikt om de opgeloste stof van het oplosmiddel te scheiden. De bekendste toepassing is waterzuivering, waarbij het vuil niet door het membraan heen gaat, maar het water wel.

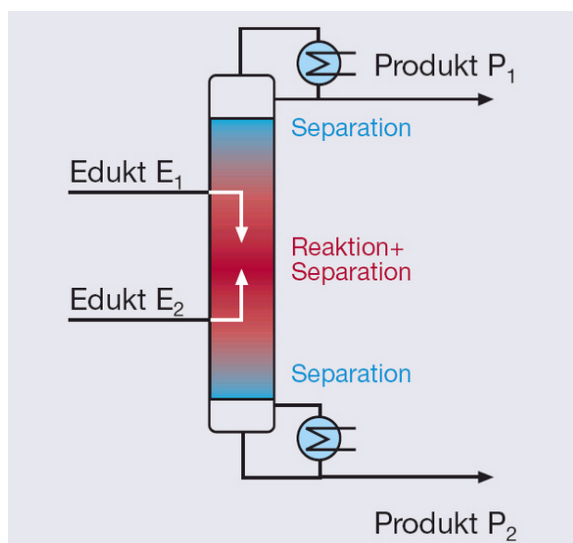
Als voorbeeld kan een Pervaporatie membraan voor drogen oplosmiddelen genoemd worden. Nederlandse universiteiten en ECN hebben een organisch/anorganisch membraan ontwikkeld dat stabiel is en bijvoorbeeld gebruikt kan worden om 5% water uit n-butanol te halen (Castricum, 2008). Pervaporatie wordt onder andere door Sulzer op de markt gebracht ([www.sulzerchemtech.com](http://www.sulzerchemtech.com)).



Figuur A.14 *Schema van Pervaporatie*  
Bron: IP, 2008.

### *Reactieve extractie*

Bij chemische reacties kan het direct afscheiden van het gevormde product, bij evenwichtreacties, de omzetting bevorderen. Dit kan het aantal zuiveringstappen en recycling van productstromen verminderen. Ook neemt de hoeveelheid afval af. Een methode om dit te bevorderen is extractie. Na de reactie scheiden de producten zich af (eventueel met behulp van een extra toegevoegd extractiemiddel). Dit wordt al lang toegepast voor het scheiden van metalen en recent in de farmacie voor het maken van zuivere isomeren. Verdere ontwikkeling voor andere processen is de komende 5 tot 10 jaar mogelijk (IP, 2008). Het besparingpotentieel wordt in (IP, 2008) op medium geschat.

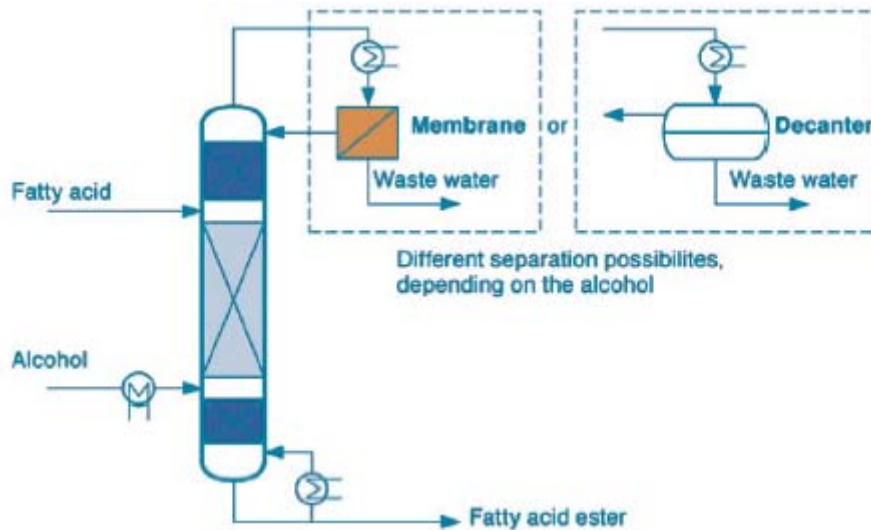


Figuur A.15 *Principe reactieve extractie*  
Bron: Bayer, 2005.

### *Reactieve destillatie ondersteund met membranen*

Bij chemische evenwichtreacties kan het direct afscheiden van het gevormde product, de omzetting bevorderen. Dit vermindert het aantal zuiveringstappen en recycling van productstromen. Een optie is om een reactie die plaatsvindt in een destillatiekolom te ondersteunen met pervaporatie. Dit is nuttig als er sprake is van een azeotroop, die gewone destillatie onmogelijk maakt. Een andere optie is om een extra stof toe te voegen (Entrainer-based reactive distillation) die de vluchtigheid van één van de stoffen verhoogt; deze extra stof loopt dan wel in de energiehuishouding mee. Verdere ontwikkeling voor andere processen is de komende vijf tot tien jaar mo-

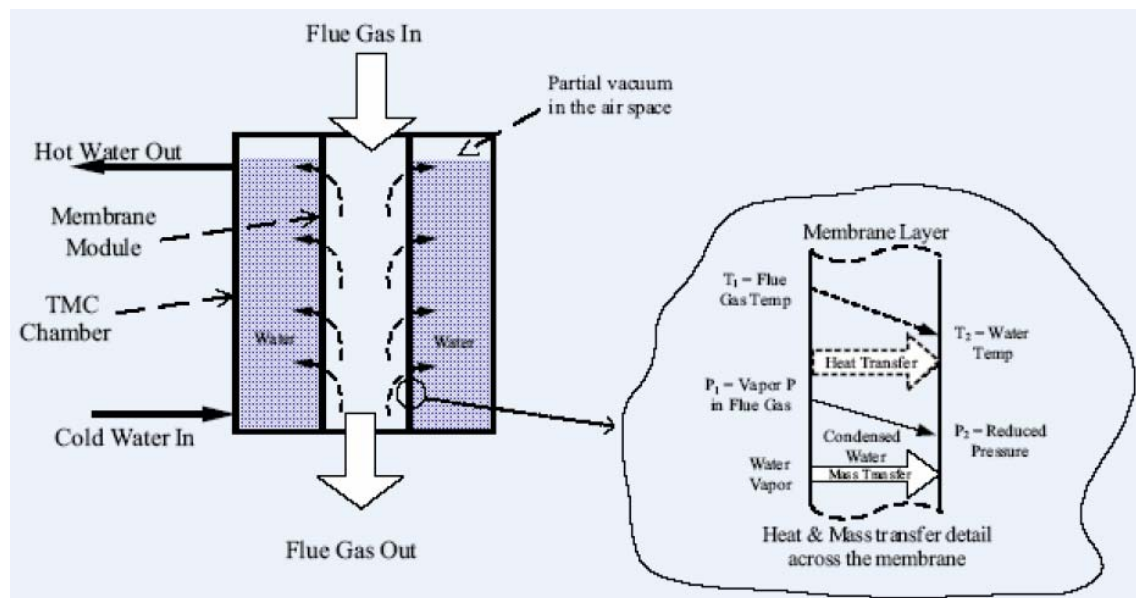
gelijk (IP, 2008). Het besparingpotentieel wordt in (IP, 2008) op hoog geschat. Onderzoek vindt onder andere bij de Universiteit van Amsterdam plaats (Dimian, 2004).



Figuur A.16 Voorbeeld van membraan geassisteerde reactieve destillatie  
Bron: IP, 2008.

### Condenswater en energierugwinning uit rookgas met membranen

Bij lage temperaturen werken warmtewisselaars niet zo goed. Bovendien hebben ze grote oppervlakte nodig. Het gebruik van membranen die het water doorlaten en aan de andere kant laten condenseren is veel efficiënter. In de USA loopt hier een onderzoeksprogramma over. Voornaamste opstakel zijn de membranen en hoe het zit met de vervuiling ervan (Dorgan, 2003).



Figuur A.17 Werking van waterdoorlatend membraan voor energierugwinning  
Bron: Dorgan, 2003.

### A.1.7 Industriële energiebesparing via betere chemische reacties

Op het gebied van industriële reactoren vinden nog steeds ontwikkelingen plaats. Enkele daarvan zijn in deze paragraaf nader toegelicht.



### *Roterende gepakte bedden*

Op dit moment stroomt bij reacties de vloeistof of gas vaak over een gepakt (katalysator)bed dat stilstaat. Door dit gepakt bed te laten roteren kan de warmte-uitwisseling met het bed verbeteren en ook de menging op miniatuurschaal verbeterd worden. Hierdoor kan bijvoorbeeld een fijnere katalysator gebruikt worden (groter reactieoppervlak). Reacties kunnen daardoor selectiever worden, wat een betere productkwaliteit oplevert (IP, 2008). Het besparingpotentieel wordt in (IP, 2008) op medium geschat.



Figuur A.18 Roterend bed voor zuurstofverwijdering uit zeewater in de offshore

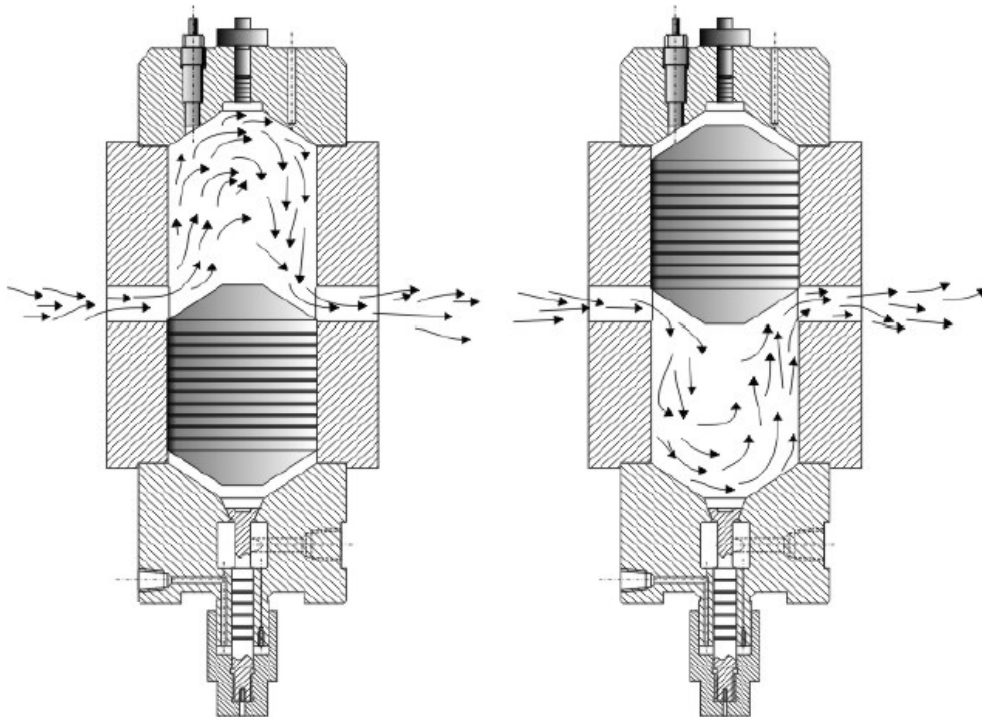
Bron: IP, 2008.

### *Reactoren met ultrageluid.*

Hoe beter de menging bij een reactie hoe selectiever de reactie kan zijn. Een manier om de menging op microschaal te bevorderen is het gebruik van ultrasound (Hydrodynamic Cavitation Reactors). Dit staat nog in de kinderschoenen (IP, 2008). Het besparingpotentieel wordt in (IP, 2008) op medium geschat doordat mildere reactiecondities gebruikt kunnen worden.

### *Reactoren met compressie en drukpulsen.*

Dit is een geheel nieuw principe voor gasreacties, wat zonder katalysator werkt bij zeer hoge temperaturen ( $>1500$  °C). Een 'vrije' zuiger comprimeert (en verhit) het gas tot de reactie optreedt. De reactie-energie verwarmt het gas verder en drukt de zuiger weer omlaag, en comprimeert zo gas in een tweede compartiment aan het andere eind van de zuiger. Voordeel is dat het gas niet van te voren verwarmd hoeft te worden en dat de reactie-energie direct gebruikt wordt (voor de compressie). Voordat deze technologie toegepast kan worden moet er nog wel veel gebeuren (reactor ontwerp en controle, materialen etc.). Het besparingpotentieel wordt in (IP, 2008) op hoog geschat. Onderzoek hieraan vindt onder andere bij de Universiteit Twente plaats (UT Nieuws, 2008).



Figuur A.19 *Principe van een Pulsed Compression Reactor*  
Bron: Kuiper, 2007.

#### *Gebruik van microgolven in reacties*

Microgolven worden in magnetrons gebruikt om producten op te warmen. Het blijkt dat deze microgolven ook chemische reacties kunnen beïnvloeden. Een reactie van methaan tot C<sub>2</sub>-verbindingen vindt bij microgolven bij een 250 °C lagere temperatuur plaats. Zowel voor homogene katalyse in de vloeistoffase als heterogene katalyse wordt een beperkte besparing haalbaar geacht over meer dan 10 jaar (IP, 2008).

#### *Gebruik van licht in reacties*

Bij fotochemische reacties is het licht dat de reactie op gang brengt en als katalysator fungeert. Onderzoek richt zich op zichtbaar licht en ultraviolet licht. De opname van licht brengt een molecuul in een hogere energietoestand die het mogelijk maakt om bepaalde reacties aan te gaan. Inmiddels wordt het principe wel toegepast, maar nog niet op grote schaal bij bulkproducten. Omdat de reactie op veel lagere temperatuur (en met hoge selectiviteit) plaatsvindt wordt het besparingpotentieel in (IP, 2008) op hoog geschat. Er zijn nog wel een groot aantal problemen, die moeten worden opgelost voordat grootschalige toepassing plaats kan vinden, zoals de doordringdiepte van het licht, de lichtbron en de efficiency.

#### *Microreactors voor nauwkeurige productie fijnchemie*

Volgens Professor Schouten van de Technische Universiteit in Eindhoven zal in de toekomst microreactortechnologie tot verlaging van de milieubelasting in de fijnchemie en de farmaceutische industrie leiden. Reacties in kleinere reactoren zijn veiliger en efficiënter (en energiezuiniger) en zouden het grondstofgebruik binnen 5 tot 10 jaar met een factor 2 tot 5 terug kunnen dringen (doel programma Green & Smart Proces Technologies van STW).

### A.1.8 Voedingsmiddelen industrie

#### *Hogedruk behandeling in plaats van steriliseren bij voedingsmiddelen*

De traditionele hittebehandeling om levensmiddelen te pasteuriseren of te steriliseren heeft een aantal nadelen. De technieken zorgen immers wel voor de gewenste houdbaarheid, maar dit

voordeel gaat vaak ten koste van kwaliteitskenmerken zoals smaak, textuur of uitzicht. Door het UHT-proces, waarbij levensmiddelen via een doorstroomsysteem gedurende enkele seconden bij hoge temperaturen worden behandeld, is dit wel verbeterd, maar dit kan alleen voor vloeibare voedingsmiddelen. Een alternatief is om de voedingsmiddelen even onder hoge druk (drie tot zeventienduizend bar) te brengen. Ook deze techniek heeft nog enkele grote beperkingen. Ze kan enkel in batchprocessen en maar voor een beperkt aantal voedingsmiddelen worden ingezet. Wereldwijd zijn er al 55 levensmiddelenproducenten die van deze nieuwe methode te gebruiken (K.U. Leuven, 2007). Producent is o.a. EPSI ([www.epsi-highpressure.com](http://www.epsi-highpressure.com)). Binnen de EU loopt sinds 2006 het onderzoekprogramma NovelQ ([www.novelq.org](http://www.novelq.org)) voor innovatie in de voedingsmiddelenindustrie.



Figuur A.20 *Hoge druk autoclaaf*

Bron: K.U. Leuven.

### A.1.9 Industriële Materialenproductie

#### *Bioplastic*

Inmiddels wordt in de USA 1% van alle kunststoffen gemaakt uit biograndstoffen. Aangezien het hier om een technologielijst gaat is verder niet uitgezocht wat dit precies kan betekenen voor de Nederlandse petrochemie. Volgens een artikel van de RUU kan dit ook voor Nederland milieuvoordeel opleveren.

#### *Combinatie van kunststof met goedkopen nano vulmaterialen*

Door kunststoffen, die eenmalig gebruikt worden en daarna verbrand worden, op te vullen met vulstoffen (bijvoorbeeld nanodeeltjes van klei) kan wellicht een besparing op grondstof (en kosten) bereikt worden. De RUU heeft hier onderzoek naar gedaan.

#### *Algen als leverancier voor chemische grondstoffen*

In Borculo in de Achterhoek is sinds 2001 een algenkwekerij gevestigd. In met plastic beklede sloten van 30 cm diep water en met een temperatuur van 15 tot 25°C kweekt het bedrijf Ingrepo de algen *Chlorella* in 3 dagen oogstrijp. De gekweekte algen zijn rijk aan eiwitten en antioxidanten en hebben een gunstige vetzuursamenstelling. De algen worden ontwaterd en gedroogd aan derden geleverd, die het verwerken in vruchtensappen en diervoeders. Andere toepassingen die voor algen genoemd worden zijn als grondstof voor geneesmiddelen, kleurstoffen, bioplastics en olie. Bronnen: (Boutsma, 2007), (Tolsma, 2008), ([www.ingrepro.nl](http://www.ingrepro.nl)). Natuurlijk kunnen ook andere biomassa stormen gebruik worden als chemische grondstof.

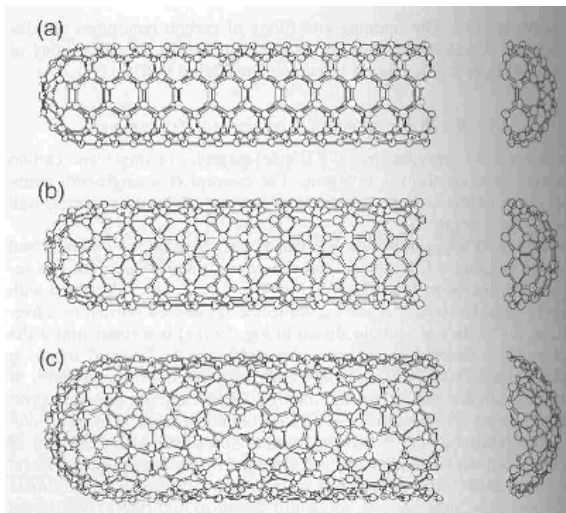


Figuur A.21 Een algenkwekerij in bedrijf

Bron: [www.ingrepro.nl](http://www.ingrepro.nl).

### *Nanomaterialen. Carbon nanobuisjes vervangen metalen*

Sinds 1991 is bekend dat koolstofatomen samen een buisje kunnen vormen. Een koolstof nanobuis is op te vatten als een opgerolde laag grafiet, met een patroon van zeshoeken en vijfhoeken dat hol is van binnen en waarbij de lengte tienduizenden malen groter kan zijn dan de diameter. Koolstof nanobuisjes hebben veel interessante eigenschappen waardoor zij geschikt zijn voor een breed scala aan toepassingen, onder andere in nanotechnologie, elektronica, optica en nieuwe materialen. Omdat het per kg veel sterker is dan staal kan het bijvoorbeeld in vliegtuigen gebruikt worden (Kaczor, 2008). Dit levert energiebesparing op. Koolstof nanomaterialen zijn echter op dit moment nog wel erg energie-intensief om te maken, in de orde van 2 tot 100 keer meer energie-intensief dan aluminium (Kushnir, 2008). Er is inmiddels discussie ontstaan over mogelijke negatieve gezondheidseffecten van dit soort buisjes (vergelijkbaar met asbest?) (Moor, 2008), (Berger, 2008)



Figuur A.22 Nanobuisjes

Bron: [www.arch.mcgill.ca](http://www.arch.mcgill.ca).

## A.2 Nieuwe technologieën voor emissiereductie

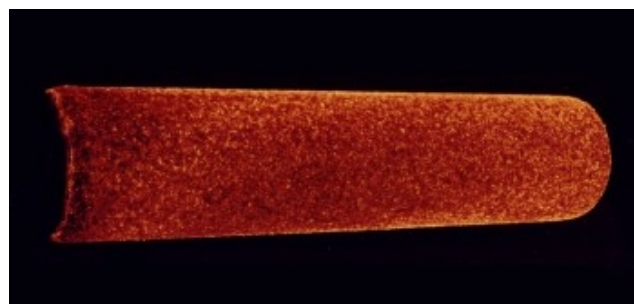
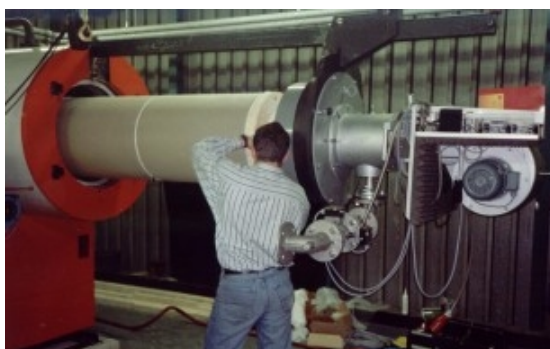
### A.2.1 Verbranding met lage NO<sub>x</sub>-uitstoot

#### *Gasturbines met katalytische branders*

Door een katalysator te gebruiken kan verbranding al bij lagere temperatuur plaatsvinden. Omdat hiermee hoge temperaturen vermeden kunnen worden heeft een gasturbine met katalytische verbranding een hele lage NO<sub>x</sub>-uitstoot. De stand van zaken is dat er op pilot schaal een 1,5 MW<sub>e</sub> turbine is en een 170 MW<sub>e</sub> gasturbine in ontwikkeling is (EGTEI LCP, 2008). Het DOE onderzoeksprogramma in de USA uit 2003 richt zich op een NO<sub>x</sub>-uitstoot van minder dan 3,5 g/GJ (DOE, 2003). Er is op dit moment 1 aanbieder van een 1 MW katalytische brander, Kawasaki, die beneden de 5 g/GJ (<3 ppm) zit (Energy Nexus Group, 2002).

#### *Stralingsbranders 10 tot 25 ppm NO<sub>x</sub> in gasstook bij kleinere ketels*

Stralingbranders geven een rood-oranje kleur en werken bij een lagere temperatuur (maar wel boven de 680 °C) dan gewone branders. Emissies van 25 ppm NO<sub>x</sub> (0% O<sub>2</sub>; 12,3 g/GJ) worden gerapporteerd. Met een verlaging van het vermogen per oppervlakte eenheid en een hogere luchtvermaat kan zelfs 10 ppm bereikt worden. In de VS zijn Alezeta Corp en Global Environmental Solution producenten. Figuur A.23 laat een dergelijke brander zien voor een 900 kW ketel. In Australië heeft Bowin van deze technologie een patent. In België is een metaalvezelbrander (Acotech) ontwikkeld, die vergelijkbare emissies kan bereiken (Kemna, 2007, pag 57). Naast de mogelijkheden om het vermogen van de brander te regelen, is speciaal de maximum branderbelasting van belang. Hoe lager de belasting is, hoe groter moet de verbrandingsruimte worden om de gewenste hoeveelheid warmte over te dragen (Kemna, 2007, pag 60)<sup>7</sup>. Ook in Nederland zijn in de jaren '90 al demonstratieprojecten met dit soort branders uitgevoerd.



Figuur A.23 Infraroodbrander met < 20 mg NO<sub>x</sub>/kWh

Bron: [www.dreizler.com](http://www.dreizler.com).

#### *Gebruik van ultra low NO<sub>x</sub> burners voor gasstook*

In 2013 zal het niveau in het NO<sub>x</sub>-emissiehandelssysteem (PSR) op 37 g/GJ brandstof liggen. Dit is bij droog rookgas en 3% O<sub>2</sub> gelijk aan 62 ppm of 130 mg/nm<sup>3</sup>. Door de vlam voldoende goed te mengen en hierbij gebruik te maken van reeds afgekoeld rookgas kunnen zeer lage emissieniveaus bereikt worden. De vorming van NO<sub>x</sub> wordt hiermee sterk onderdrukt. Voor de NO<sub>x</sub>-vorming uit de stikstof, die al in organische verbindingen in de brandstof zit, bijvoorbeeld bij zware stookolie, moeten echter additionele maatregelen genomen worden. De NO<sub>x</sub>-vorming uit deze gebonden stikstof (de zogenaamde brandstof-NO<sub>x</sub>) laat zich niet simpel door een lagere vlamtemperatuur reduceren. Hieronder staan enkele voorbeelden van ultra lage NO<sub>x</sub>-branders, die op internet te vinden zijn:

- Infurnox burner van John Zink bij raffinaderij < 20 ppm (3% O<sub>2</sub>).
- Testfornuis op gas met veel waterstof 9 tot 10 ppm.
- Ultra-low NO<sub>x</sub> burner (low-swirl burner; LSB) 5 ppm.

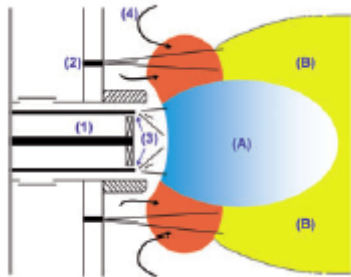
<sup>7</sup> Hetzelfde rapport meldt een emissie <15 ppm NO<sub>x</sub> voor katalytische branders. (Kemna, 2007, pag 58).



- Stork Double Register & Low Calorific Gas Burner; 5 tot 100 MW (10 mg/nm<sup>3</sup>).
- De Delta-NO<sub>x</sub> ULN (site Coen) haalt 7,5 ppm.
- M-PAKT<sup>®</sup> Ultra < 9ppm (ontwikkeld in het EERE programma; doel van EERE is om op termijn beneden de 2 ppm uit te komen).

Bronnen: ([www.johnzink.com/](http://www.johnzink.com/)), (<http://texasiof.ces.utexas.edu/>), ([www1.eere.energy.gov/](http://www1.eere.energy.gov/)), ([www.stork-thermeq.nl/](http://www.stork-thermeq.nl/)), ([www.coen.com/](http://www.coen.com/)), ([www.maxoncorp.com/](http://www.maxoncorp.com/)).

Een voorbeeld van een ultra lage NO<sub>x</sub>-brander is zichtbaar in Figuur A.24. Bij deze Stork brander wordt de brandstof (2) los van de lucht (1) toegevoerd. Voor het bereiken van de ontstekingszone (A) wordt de brandstof met rookgas uit de vuurhaard gemengd. In zone B vindt bij lagere temperatuur het grootstel deel van de verbranding plaats.



Figuur A.24 Ultra lage No<sub>x</sub>-gasbrander

Bron: Stork.

#### *Gebruik van ultra low NO<sub>x</sub> burners voor oliestook*

In 2013 ligt het niveau in het NO<sub>x</sub>-emissiehandelssysteem (PSR) op 37 g/GJ ongeacht de gebruikte brandstof. Dit is bij 3% O<sub>2</sub> gelijk aan 62 ppm of 130 mg/nm<sup>3</sup>. Door de vlam voldoende goed te mengen en hierbij gebruik te maken van reeds afgekoeld rookgas kunnen zeer lage emissieniveaus bereikt worden. De vorming van NO<sub>x</sub> kan hiermee sterk onderdrukt worden. Voor stikstof die al in organische verbindingen in de brandstof zit, bijvoorbeeld bij zware stookolie en huisbrandolie, moeten echter additionele maatregelen genomen worden. Aangezien het hier om een technologielijst gaat is verder niet uitgezocht wat de laatste stand van onderzoek is.

Stork Double Register & Low Calorific Gas Burner haalt op zware stookolie 150 mg/nm<sup>3</sup>. Maar wellicht zijn er al andere fabrikanten die tot lagere waarden komen ([www.stork-thermeq.nl/](http://www.stork-thermeq.nl/)).

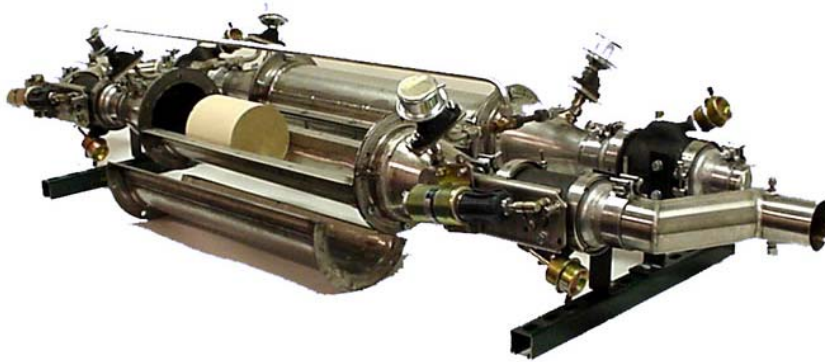
## A.2.2 Rookgasreiniging voor NO<sub>x</sub>

### *Katalytische absorptiesystemen voor NO<sub>x</sub>-reductie bij gasturbines*

Het gepatenteerde system SCONOx van Emerachem uit Knoxville, Tennessee, dat de NO<sub>x</sub>-emissie tot minder dan 2,5 ppm reduceert (vermoedelijk 4,3 g/GJ) ([www.emerachem.com](http://www.emerachem.com)), is een alternatief voor selectieve katalytische reductie (SCR) met ammoniak. SCONOx verwijdert ook bijna alle koolmonoxide (CO) (Energy Nexus Group, 2002). Eerst wordt de NO en de CO geoxideerd tot NO<sub>2</sub> en CO<sub>2</sub>, waarna alle NO<sub>2</sub> op het oppervlak geabsorbeerd wordt. In 2002 wordt gesproken over een duur systeem met een relatief groot volume, dat elke 6 tot 12 maanden 1 tot 2 dagen stilgelegd moet worden voor regeneratie. Volgens de site van (EmeraChem<sup>8</sup>)

<sup>8</sup> Tekst van de EmeraChem internetsite: The next generation of SCONOx is a multi-pollutant technology in a single system that significantly reduces NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, CO, VOC, and PM for air emission requirements. The U.S. EPA declared this technology 'the Lowest Achievable Emission Rate' (LAER) for NO<sub>x</sub> abatement, establishing the standard against which all future emission reduction means will be measured. EMx is the most effective Ammonia Free Reduction (AFR) technology available today for gas turbine (GT), reciprocating engines (IC), and industrial/utility boilers (IB).

kan de nieuwste versie van het systeem inmiddels de emissie van  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ , CO, VOC en PM bij gasturbines tot minder dan 1 ppm (alle stoffen) reduceren.

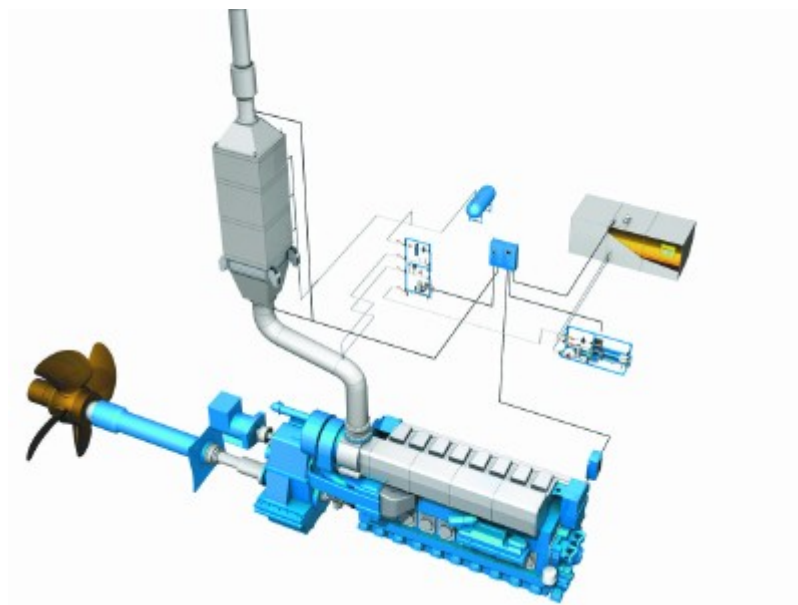


Figuur A.25 Absorptiesysteem van EmerChem voor motor

Bron: [www.emerachem.com](http://www.emerachem.com).

#### *Hoog rendement SCR-installaties voor $\text{NO}_x$ -verwijdering*

Voor dieselmotoren haalt Wärtsilä al een maximale  $\text{NO}_x$ -verwijdering van 97% (Wärtsilä, 2004). Ook op andere plaatsen worden rendementen genoemd van boven de 95%. Aangezien het hier om een technologielijst gaat is verder niet uitgezocht wat de laatste stand van techniek is en hoe bijvoorbeeld een oxidatiekatalysator kan bijdragen aan het bereiken van hogere rendementen zonder hoge ammoniakemissie.



Figuur A.26 Scheepsmotor met SCR

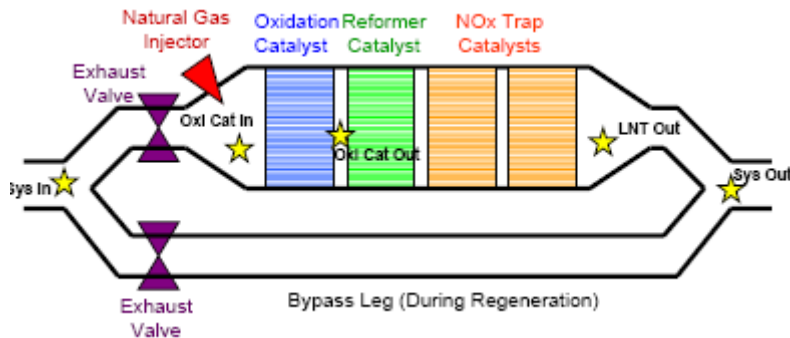
Bron: Tremuli, 2008.

#### *SCR-installaties voor $\text{NO}_x$ -verwijdering met aanwezige methaan*

Op dit moment wordt vooral ammoniak (eventueel gemaakt uit ureum) gebruikt als reductiemiddel in SCR-installaties. Bij gasmotoren wordt, onder andere door TNO, onderzoek gedaan aan het gebruik van het reeds in de brandstof aanwezige methaan om het  $\text{NO}_x$  te reduceren. Probleem is wel dat methaan weinig reactief is (Umit, 2005).

### *NO<sub>x</sub>-adsorptiekatalysator voor lean burn gasmotoren*

Door het Oak Ridge National Laboratory wordt onderzoek gedaan naar katalysatoren die de NO<sub>x</sub>-emissie van gasmotoren tot 0,1 g/bhp-hr (ca 40 g/GJ) terug kunnen dringen. Hun systeem maakt gebruik van alkali (Li, Na, K,...) of aardalkali metalen (Ca, Mg, Mn,...) die de passerende NO<sub>x</sub> adsorberen. Als de adsorptie katalysator vol is, wordt methaan geïnjecteerd, en over een reformer katalysator in waterstof omgezet. Deze waterstof breekt in de adsorptiekatalysator (met de daar aanwezige platina) de aanwezig NO<sub>x</sub> af. De katalysator leverancier is EmeraChem (zie ook Paragraaf A.2.2). De adsorptie duurt 30-120 seconden, de regeneratie 1-10 seconden. De gemiddelde NO<sub>x</sub>-verwijderingsgraad is 94% (Parks, 2005), (Parks, 2001). Probleem is wel dat de adsorptiekatalysator ook zwavel opneemt. Ook wordt gesproken over methaanuitstoot.



Figuur A.27 De adsorptiekatalysator

Bron: Parks, 2005

### *SCR-installaties voor NO<sub>x</sub>-verwijdering met behulp van LPG*

Op dit moment wordt vooral ammoniak (eventueel gemaakt uit ureum) als reductiemiddel in SCR installaties. Er kunnen echter ook andere stoffen gebruik worden als reductie. Hierbij kan men denken aan bijvoorbeeld LPG, maar ook andere koolwaterstofverbindingen (diesel) zijn denkbaar. Dit kan een kostenvoordeel opleveren ten opzichte van het gebruik van ureum. Er is ook onderzoek waarbij met koolmonoxide in plaats van ammoniak gewerkt wordt (Fan, 2006).

## A.2.3 Reductie van NMVOS

### *Laminerende films in plaats van verven (NMVOS-reductie)*

In plaats van het aanbrengen van verf op objecten kan ook gebruik gemaakt worden van plastic films. Deze toepassing wordt al gebruikt in de automobiellindustrie bij het aanbrengen van een deklaag op deuren. Deze technieken zouden volgens (ADL, 2008) een reductie tot 98% kunnen opleveren van de betreffende NMVOS-emissies.

### *Plasma technieken voor NMVOS-verwijdering*

Bij industriële gasstromen kan in het afvalgas met behulp van wisselstroom een plasma worden gecreëerd bij relatief lage temperaturen (30-120°C). In dit plasma reageert de aanwezige NMVOS vervolgens met zuurstof tot CO<sub>2</sub> en waterdamp. Deze techniek is tot nu toe vooral toegepast voor de reductie van geuremissies. Ten opzichte van thermische oxidatie is deze techniek zeer compact en consumeert minder energie. De verwachting is dat deze techniek ook goedkoper zal zijn dan thermische oxidatie of adsorptie. Een efficiëntie van 97-99,9% in VOS-reductie is gemeten (ADL, 2008).



#### *Betere lekdetectie met lasertechnologie voor NMVOS-reductie*

Bij de raffinaderijen, in de chemie en in de sector HDO (Handel, Diensten en Overheid) worden onderhoudsprogramma's en lekkages doorgerekend met kengetallen voor de NMVOS-emissie en vindt de effectbepaling niet met NMVOS emissiemetingen plaats. Er kan hierdoor een aanzienlijk verschil ontstaan tussen de papieren emissie en de werkelijke emissie. In de praktijk is het namelijk heel moeilijk om te bepalen waar nu precies de grote lekken zitten. Door een goede meting en adequate reparatie zou de emissie kunnen worden terugdrongen, en is een verdere reductie van NMVOS-emissies mogelijk. Een nieuwe technologie op dit gebied is het gebruiken van een lekkage- en reparatieprogramma wat met behulp van laser technologie realtime in staat is om lekkages te detecteren. Deze techniek is nog niet op grote schaal geïnstalleerd (ADL, 2008).

#### *Verftherugwinning bij het spuiten door een waternevel (NMVOS-reductie)*

In afgesloten verfcabines kan zogeheten overspray optreden. Deze overspray kan door middel van een waternevel uit de lucht neergeslagen worden. Door later  $\text{SiO}_2$  deeltjes toe te voegen aan het watermengsel kan de verf worden teruggewonnen (ADL, 2008).

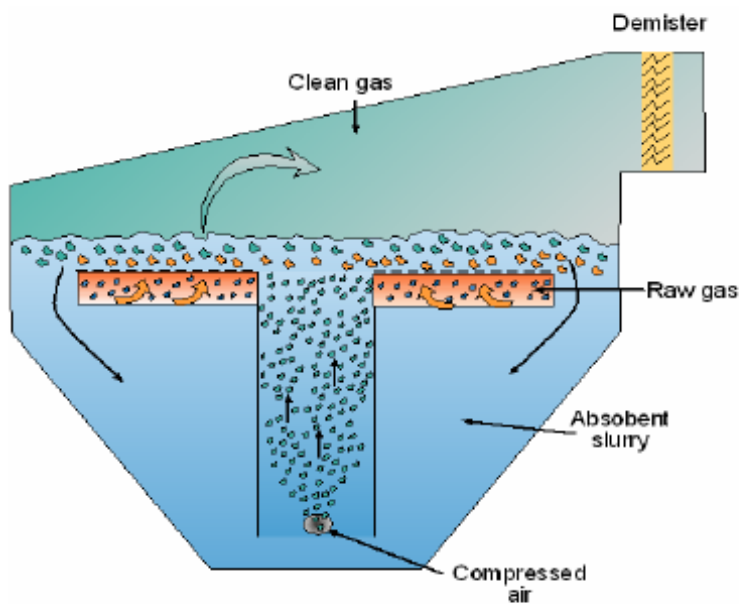
#### *Vernietiging NMVOS en gevaarlijke stoffen met vloeibaar zout (ionic liquid)*

Bij het bewerken van hout of het maken van papier komen terpenen, formaldehyde en methanol vrij. Op dit moment worden deze afgezogen en met toevoeging van aardgas verbrand in de zogenaamde regeneratieve thermal oxidizers (RTOs and RCOs). Een andere optie is deze te laten absorberen door ionische vloeistof (ionic liquid; RTIL). Dit zijn organische zouten, die bij kamertemperatuur nog vloeibaar zijn en een zeer lage vluchtigheid hebben (Milota, 2007).

### **A.2.4 Zwavelreductie-opties**

#### *Flowpac bubbelbad $\text{SO}_2$ -water >99% (alternatief voor FGD)*

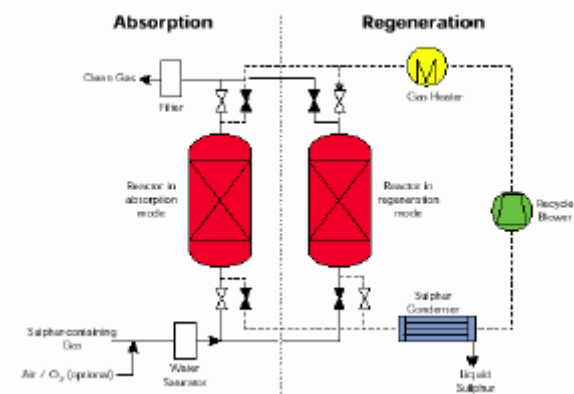
In de meest gebruikte rookgasontzwavelingsinstallaties (FGD) bij kolencentrales wordt de natte kalkslurry over het omhoog stromende rookgas gesproeid. In de FLOWPAC-absorber van Karlshamn in Sweden gaat dit anders en laat men het rookgas van de kolencentrale door een absorberende slurry borrelen. De slurry wordt verpompt met belletjes van perslucht. Vandaar dat de techniek ook wel met pomploze water wordt aangeduid (turbulent bed absorber or pumpless scrubber). In een studie naar  $\text{CO}_2$ -opslag wordt aan deze water emissieniveaus van minder dan  $10 \text{ mg/nm}^3$  ( $3,6 \text{ g SO}_2/\text{GJ}$ ) gekoppeld. De  $\text{SO}_2$ -afvangstpercentages liggen boven de 99% (voor de standaard FGD noemt dezelfde studie 95%) (EGTEI LCP, 2008).



Figuur A.28 *Het Flowpac system*  
Bron: Féraud, 2006.

### *H<sub>2</sub>S verwijdering uit stortgas en biogas met SELOX*

In 2005 is door Gastec gewerkt met subsidie van Nieuw Energie Onderzoek (NEO) aan een proces om H<sub>2</sub>S uit biogas en stortgas te verwijderen (SenterNovem, 2006). Dit Selox-proces gebruikt een regenererbare katalysator (vast bed). Het SELOX-proces heeft een laag energieverbruik en is flexibel ten aanzien van veranderingen in de samenstelling en hoeveelheid stort- of biogas. Het proces levert vloeibaar zwavel als eindproduct en zuivert van maximaal 2000 ppm tot 3 ppm. Volgens de NEO site wil Gastec naar concentraties van 7000 ppm, zodat het proces ook in bijvoorbeeld de papierindustrie toegepast kan worden.



Figuur A.29 *Het SELOX-proces*  
Bron: Ungureşan, 2005.

### *Zwavel verwijderen uit olie en gasstromen voor brandstofcellen*

Brandstofcellen hebben last van zwavel. Een Ni/NiO-absorptiemateriaal kan zwavel effectief verwijderen tot niveaus beneden de 0,2 ppm. Bronnen: (Rheinberg, 2008), (Hernandez, 2008).

## A.2.5 Reductie van de emissie van fijn stof

### *Stofverwijdering met Indigo Agglomerator*

De Indigo Agglomerator zorgt ervoor dat kleine stofdeeltjes aan elkaar gaan klonten en daardoor beter af te vangen zijn. Gesproken wordt over een reductie van 80% van het aantal PM<sub>2.5</sub> deeltjes. Het principe is aan de hand van de bekeken beschrijvingen niet direct duidelijk. Het lijkt erop dat het klonten gestimuleerd wordt in een elektrisch veld, maar of er ook sprake is van een hulpstof is niet duidelijk. De installatie is geplaatst bij 5 buitenlandse kolengestookte centrales (2006). In (EGTEI LCP, 2008) wordt gesteld dat het er op lijkt dat de agglomerator alleen toegepast wordt op installaties zonder rookgasontzwaveling. In de Window Creek power Station wordt echter wel een proef gedaan bij een natte wasser. Bronnen: (Truces, 2006), (Indigo, 2006). Per saldo is op basis van de bekeken informatie niet vast te stellen of deze techniek ook in Nederland significant potentieel heeft.

## A.2.6 Reductie van de emissie van zware metalen

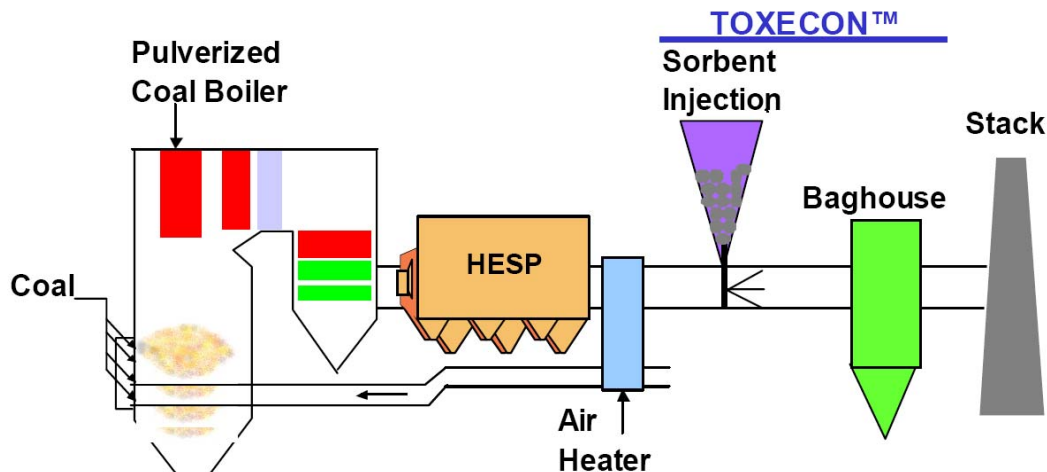
### *Stof en kwik verwijdering met COHPAC & TOXECON*

Inmiddels is er 1700 MW<sub>e</sub> aan kolen- en afvalverbranding aan COHPAC (Compact Hybrid Particulate Collector) geïnstalleerd (<http://hamon-researchcottrell.com/>). Bij COHPAC gaat het om een doekfilter die een hoger gasdebiet toelaat dan gebruikelijk en die geplaatst wordt bij een reeds aanwezig elektrofilter (ESP), zie Figuur A.29. Om ook kwik te kunnen verwijderen is de TOXECON toevoeging ontwikkeld. De demonstratie op volle schaal van TOXECON wordt voorbereid in een centrale in Alabama. In de combinatie van beide installatie worden drie technieken gecombineerd namelijk elektrofilter, doekfilter en adsorptiemiddel. In het rookgaskanaal komt eerst een elektrofilter (ESP) en daarna een doekfilter. De derde techniek is de toevoeging van een absorptiemiddel dat tussen beide filters wordt geïnjecteerd en schadelijke stof, zoals kwik, op kan nemen, zie Figuur A.30. Bronnen: (Bustard, 2003), (Miller, 2003) (WE Energies, 2006). Ook andere stoffen kunnen zo verwijderd worden (EGTEI LCP, 2008). Met actieve kool als absorptiemiddel wordt meer dan 90% kwikverwijdering gemeld.



Figuur A.30 COHPAC-naplaatsing of integratie met het elektrofilter

Bron: Miller, 2003.



Figuur A.31 *Schema voor toepassing TOXECOM kwikverwijdering*  
Bron: GE Energies, 2006.

#### *Verwijderen van kwik in gas met actieve koolstof en metaal oxide*

Het nadeel van kwikverwijdering met actieve koolstof is dat er vast afval overblijft. Vandaar dat er ook naar recycling gekeken wordt. Na opname van het kwik door de koolstof kan deze weer worden teruggewonnen door te verhitten tot 400 °C. Om dit goed te laten verlopen wordt de actieve kool (AC) vooraf geïmpregneerd met stoffen zoals  $\text{Co}_3\text{O}_4$  (AC-Co),  $\text{MnO}_2$  (AC-Mn) of  $\text{CuCoO}_4$  (AC-CC). Onderzoek hierna vindt in China plaats (Mei, 2008). Ander onderzoek richt zich op het verbeteren van de opname van kwik door de actieve kool door toevoeging van jodium (via KI) of chloor (via HCl) (Lee, 2008).

#### *Verwijderen van kwik in kolencentrales met goedkope koolstof.*

Bij een onderzoek in Groot Brittannië zijn een groot aantal afvalmaterialen verkoold, waarna gekeken is of deze ook goed kwik op konden nemen. Doel hierbij is kostenreductie. Als beste kwam koolstof naar voren, dat uit een bepaalde papier afvalstroom gemaakt was (Sun, 2007). Op dit moment wordt voor kwikverwijdering onder andere actieve kool gebruikt die door Norit speciaal voor dit doel gemaakt is ([www.norit-ac.com](http://www.norit-ac.com)).

### A.2.7 Reductie van methaanemissies

#### *Methaankatalysator*

Gemiddeld emitteren aardgasmotoren 2% van het gasverbruik als onverbrande methaan. Dit levert een zodanige emissie aan broeikasgassen op, dat de  $\text{CO}_2$ -winst van gasmotoren in WKK installaties halveert. Om het methaan om te zetten is momenteel een tweetal katalysatoren beschikbaar, een zandbedkatalysator en een na-oxidatiesysteem. De belangrijkste knelpunten zijn de zwavel in het aardgas en de stabiliteit van methaan. Bij hoge temperaturen (700 °C) wordt het methaan wel omgezet, maar het op temperatuur houden van de katalysator kost veel energie en leidt tot extra  $\text{CO}_2$ -emissies. Een betere methaankatalysator kan aan deze bezwaren tegemoet komen. Door Knook Energy Solutions International BV in Hoofddorp wordt momenteel aan zo een katalysator gewerkt (zie ook Bijlage C, waar dit wordt gecombineerd met een SCR) (SenterNovem, 2008).

## A.2.8 Reductie van CO<sub>2</sub>-emissies

In het kader van het Beleidsgerichte Onderzoeksprogramma Lucht en Klimaat (BOLK, zie [www.mnp.nl](http://www.mnp.nl)) zijn door TNO en UCE (Harmelen, 2008) verschillende CO<sub>2</sub>-verwijderingsopties in kaart gebracht:

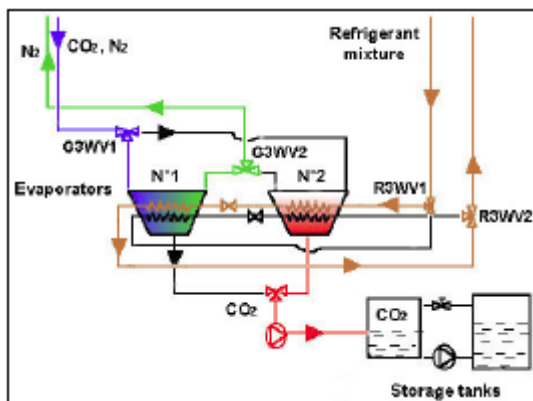
- CO<sub>2</sub>-verwijdering uit het rookgas met amines.
- CO<sub>2</sub>-verwijdering voordat er verbranding plaatsvindt, bijvoorbeeld bij KV-STEG installaties (zie Bijlage C).
- CO<sub>2</sub>-verwijdering via sterke koeling van het rookgas.
- Oxi-fuel verbranding met pure zuurstof (zie Bijlage C).

### *CO<sub>2</sub>-verwijdering uit rookgas met calcium oxide*

Er wordt veel onderzoek gedaan naar de beste stoffen om CO<sub>2</sub> uit rookgas te halen. Het gaat hierbij vaak om organische verbindingen, zoals amines. Er wordt echter ook naar het anorganische calcium oxide gekeken. In de eerste stap wordt de CO<sub>2</sub> uit het rookgas opgenomen door het calcium oxide, (dan ontstaat calciumcarbonaat). In de tweede stap wordt de calciumcarbonaat verhit en komt de CO<sub>2</sub> weer vrij. Een verwijderingsprijs van maar 15 €/ton CO<sub>2</sub> wordt haalbaar geacht (Abanades, 2007). Een anders anorganische stof, die voor CO<sub>2</sub>-afvang onderzocht wordt, is hydrotalciet: Mg<sub>6</sub>Al<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)(OH)<sub>16</sub>·4(H<sub>2</sub>O).

### *CO<sub>2</sub>-verwijdering uit rookgas door sterke koeling*

Alstom uit Zweden is bezig met een CCS<sup>9</sup>-techniek door anti-sublimatie (AnSU) waarin de rookgassen door koeling van gasvormige naar vaste toestand gebracht worden. De verwachte reductiekost liggen in de orde van 25 €/ton CO<sub>2</sub> voor een 660 MW installatie (de totale investering voor het CCS-deel van deze installatie is € 220 miljoen). De techniek bestaat uit reeds commercieel beschikbare onderdelen. Rond dit ARMINES proces wordt met industriële partners gesproken over een pilot-installatie. De techniek vereist wel een voorafgaande NO<sub>x</sub>-verwijdering. Het rookgas wordt sterk afgekoeld waardoor uiteindelijk de CO<sub>2</sub> als vaste stof achterblijft. Tussen de eerste en tweede koelingstap worden zware metalen en SO<sub>2</sub> verwijderd. Het slim gebruik van warmtewisselaars beperkt het energieverlies. Het energieverlies van de installaties voor CCS ligt in de orde van 20-30%; de CO<sub>2</sub>-stroom is erg schoon (>99,9% CO<sub>2</sub>, rest N<sub>2</sub>) De techniek is niet toepasbaar voor gascentrales wegens de te lage CO<sub>2</sub>-concentratie in de rookgassen, maar zou wel in de industrie (ijzer en staal) kunnen worden toegepast.



Figuur A.32 *Het ARMIDE proces*

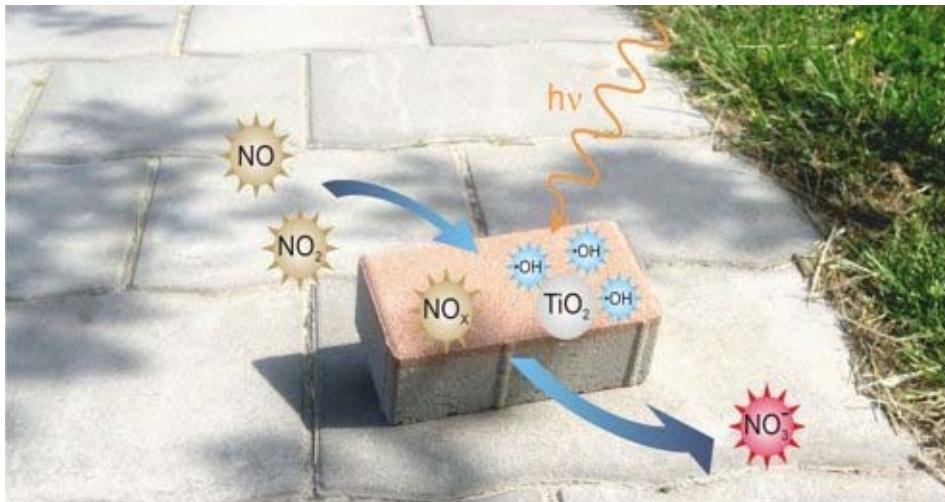
Bron: Clodic, 2005.

<sup>9</sup> Carbon Capture and Storage; CO<sub>2</sub>-afvang en -opslag.

## A.2.9 Overige 'end of pipe' reductie-opties

### *Titaandioxide voor verwijdering van stikstofoxiden uit de buitenlucht*

In Hengelo is eind 2008 een experiment gestart waarbij straatstenen bedekt zijn met een dun laagje titaandioxide. Deze titaandioxide zet met behulp van zonlicht stikstofoxide (NO<sub>2</sub>) om in nitraat en kan, volgens laboratorium proeven, zo een 30 tot 40% van de NO<sub>x</sub> uit de lucht verwijderen. De bedoeling is om te kijken of deze reductie bij de toepassing in de buitenlucht ook daadwerkelijk optreedt. De straatstenen zijn 30 tot 40% duurder. Titaandioxide is volgens Prof. Jos Brouwers van de universiteit van Twente onschadelijk voor de mens en heeft bovendien nog andere gunstige eigenschappen. Japanse onderzoekers vroegen in 1997 als eerste patent aan op de toepassing van fotokatalytisch titaandioxide. Inmiddels wordt het ook al sporadisch toegepast in dakpannen en geluidswallen. Bronnen: (Dikkenberg, 2008), ([www.utwente.nl](http://www.utwente.nl)).



Figuur A.33 Schema van Nox-afbraak door straatstenen

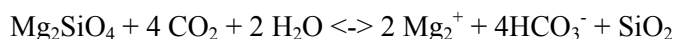
Bron: [www.utwente.nl](http://www.utwente.nl).

### *Aanbrengen constructie die elektrostatische stof filtert bij wegen*

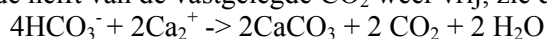
In juni 2008 meldt het ministerie van VROM op de hoogte te zijn van BAM en TU Delft om fijn stof uit de buitenlucht te halen (VROM, 2008). Fijne draden (met een hoge spanning) boven een drukke weg moeten het stof elektrostatisch laden, waarna het naar metalen gearde schermen langs de weg getrokken wordt. en hier neerslaat. De minister meldt dat er een haalbaarheidsstudie loopt en daarna wellicht besloten wordt om er in een tunnel een praktijkproef mee uit te voeren om te kijken of het idee ook in de praktijk werkt en hoeveel stof het dan kan verwijderen.

### *Olivine als optie voor CO<sub>2</sub>-opslag*

Het mineraal olivine (Magnesium ijzer silicaat; (Mg,Fe)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>) is één van de meest voorkomende mineralen in de wereld en is in staat om CO<sub>2</sub> te binden, bijvoorbeeld via de onderstaande reactie:



Per ton olivine kan 1,25 ton CO<sub>2</sub> gebonden worden. Het olivine kan na winning worden fijn gemalen en bijvoorbeeld in de kustwateren verspreid worden om zo CO<sub>2</sub> uit de lucht op te nemen. De opname gaat niet zo snel. De volledige omzetting van het olivine poeder kost tientallen decennia. De gevormde bicarbonaat is een normale component van zeewater, zodat niet direct een grote verstoring plaatsvindt ([www.wonderseamarinaequarium.nl](http://www.wonderseamarinaequarium.nl)). De huidige olivine winning van 4 mln ton zou fors moeten toenemen. CO<sub>2</sub>-reductiekosten komen uit op 12 tot 60 €/ton CO<sub>2</sub>. (Veld, 2008). Als het bicarbonaat met calcium omgezet wordt in calciumcarbonaat komt echter de helft van de vastgelegde CO<sub>2</sub> weer vrij, zie de volgende reactie:





## A.3 Duurzame elektriciteitsopwekking

Een methode om CO<sub>2</sub>- en andere emissie te reduceren is het uitbreiden van de duurzame elektriciteitsproductie. Duurzame elektriciteit vermindert de uitstoot van centrales op fossiel energie. Bovendien biedt milieuvriendelijke elektriciteit ook de mogelijkheid om milieuwinst te boeken door op plaatsen waar nu nog fossiele energie gebruikt wordt voor verwarming of aandrijving deze door elektriciteit te vervangen. Hierbij kan aan warmtepompen gedacht worden (in combinatie met warmte en koude opslag voor verwarming en koeling, maar ook aan elektrische auto's of drogen met infrarood licht in plaats van met verwarmde lucht.

### A.3.1 Productie technieken

Op dit moment wordt er hard gewerkt aan de verbetering van windturbines, zowel op land als op zee. Ook wordt er gewerkt aan kleine wind turbines die in de gebouwde omgeving geplaatst kunnen worden. Deze lopende ontwikkelingen, die al ruim voor 2020 geïmplementeerd worden, zijn verder niet in de overzichten opgenomen.

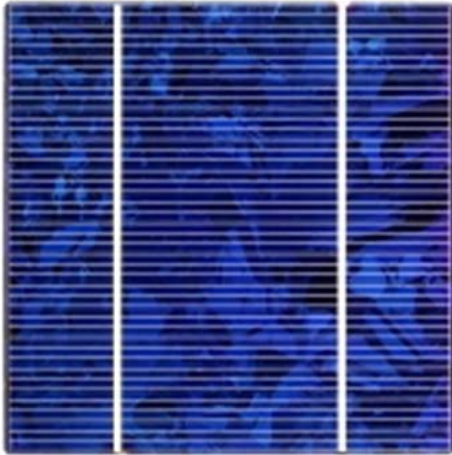


Figuur A.34 Windturbines op land en op zee

Bron: [www.spaarhetgein.nl](http://www.spaarhetgein.nl) en [www.energieportal.nl](http://www.energieportal.nl).

### *Simpele zonnecellen met veel hoger rendement 14 -> 23%*

Zonnecellen krijgen steeds hogere rendementen van 14% nu tot bijvoorbeeld 23% (gehaald met goedkope materialen bij de Technische Universiteit van Eindhoven). Bronnen: (ScienceDaily, 2008a), ([www.zonnepanelen-info.nl](http://www.zonnepanelen-info.nl)). Ook bij de commercieel verkochte panelen vinden er nog steeds verbeteringen plaats. Begin 2009 werd in Nederland met multikristalijn silicium een paneelrendement van 16,3% bereikt. Het oude wereldrecord van 15,5% werd hiermee verbeterd. In de tweede helft van 2009 komen deze panelen op de markt (ECN, 2009).



Figuur A.35 Foto van een zonnecel

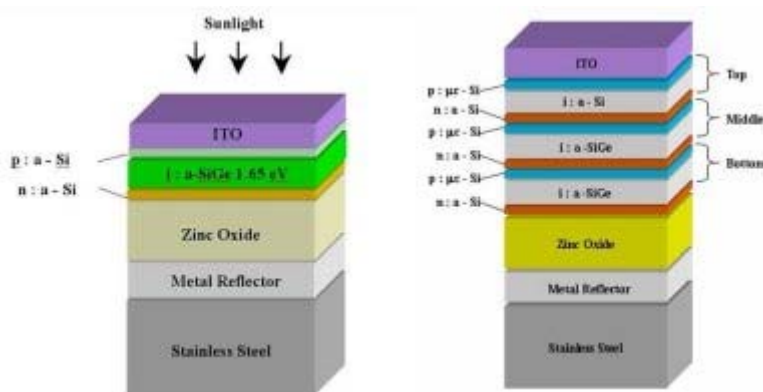
Bron: [www.germes-online.com](http://www.germes-online.com).

### Gestapelde zonnecellen (40% rendement)

Met gestapelde zonnecellen zijn onder laboratorium condities rendementen van 39 tot 40% gehaald. Het gaat hierbij om dure materialen die naast toepassingen in de ruimte wellicht toegepast kunnen worden in systemen die het zonlicht eerst concentreren. Hieronder een aantal rendementen met het bijbehorende onderzoeksinstituut:

- 39,7% Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE in Freiburg.
- 40,7% Boeing-Spectrolab. DOE funding (noemt 8 tot 10 \$ct/kWh).
- 40,8% U.S. DOE National Renewable Energy Laboratory (NREL).

Bronnen: Sourcedaily, 2006, 2008b, 2008c.



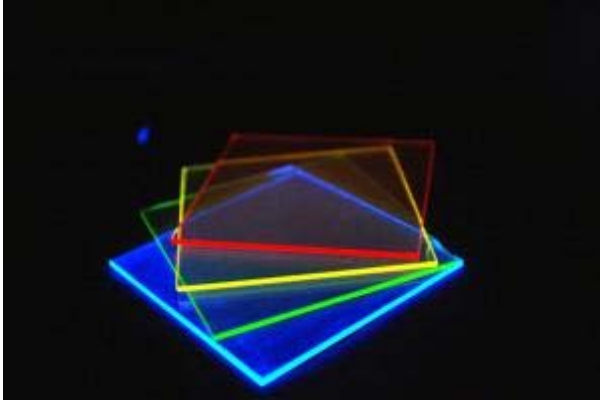
Figuur A.36 Gewone zonnecel en een (triple) gestapelde zonnecel

Bron: [www.mwoesolar.com](http://www.mwoesolar.com).

### Doorzichtige materialen spiegelen zonlicht naar randen

Bij de toepassing van zonnecellen vormt de prijs een belangrijk obstakel. Goedkopere zonnecellen zijn wellicht ook te maken met behulp van materialen die zonlicht eerst concentreren. Een voorbeeld hiervan is een soort doorzichtig kunststof die zonlicht deels afvoert naar de zijkant waar specifieke zonnecellen dit licht in elektriciteit om kunnen zetten. De betreffende kunststof is onder andere in ontwikkeling bij het Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Boston (Connor, 2008).





Figuur A.37 Kunststoffen die zonlicht concentreren naar de randen

Bron: [www.independent.co.uk](http://www.independent.co.uk).

### *Systemen voor elektriciteitsproductie met thermische zonne-energie*

In Nederland wordt thermische zonne-energie toegepast om in woningen in een deel van het vraag naar warmwater te voorzien. Ook voor de verwarming van zwembaden en in enkele andere toepassingen is het terug te vinden. De zoninstraling is echter niet voldoende om direct hoge temperaturen te bereiken voor bijvoorbeeld de productie van stoom, die een stoomturbine (en een elektriciteitsgenerator) aan kan drijven. Hiervoor moet het zonlicht eerst met spiegels worden geconcentreerd. Dit kan door het zonlicht met spiegels op één punt te concentreren (waar de stoomgenerator zit) of op een geïsoleerde buis (met water/stoom). Door concentratie van het zonlicht kunnen zo temperaturen bereikt worden die elektriciteitsproductie mogelijk maken. De techniek is nog in ontwikkeling, maar een aantal van dit soort systemen zijn al in woestijnachtige gebieden geplaatst. Door een deel van de warmte overdag op te slaan, kan beter aangesloten worden bij de elektriciteitsvraag. Een actuele lijst van projecten is te vinden op wikipedia (<http://en.wikipedia.org/>).



Figuur A.38 Zonne-energiecentrale te Almeria in Spanje

Bron: [www.outilssolaires.com](http://www.outilssolaires.com).

### *Onderwatermolens (beperkt potentieel in Nederland)*

Op plekken met een sterke waterstroming kunnen onderwatermolens geplaatst worden. Een 1.2 MW onderwatermolen met een rotordiameter van 16 meter is in April 2008 bij Strangford Narrows, geplaatst. De locatie is circa 400 meter uit de kust. De SeaGen, zoals de turbine heet, moet 18 tot 20 uur per dag stroom leveren (De Ingenieur, 2008), zie ook Figuur A.38.

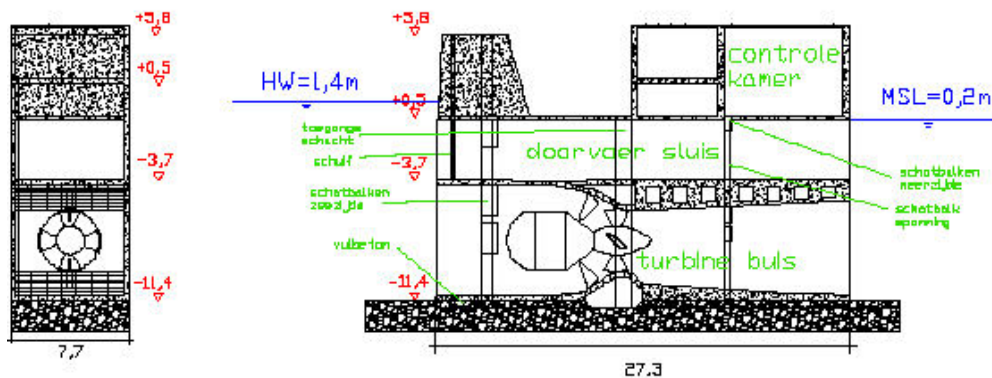


Figuur A.39 De SeaGen getijdeturbine van 1,2 MW

Bron: [www.seageneration.co.uk/](http://www.seageneration.co.uk/).

### Turbines bij IJsselmeer en in getijdenstromen

Voor plaatsen waar rivieren in zee uitmonden (IJsselmeer) en op plekken met getijdenwerking (beperkt potentieel in Nederland) zijn turbines in ontwikkeling. Een studie van de TU Delft naar getijdenenergiewinning in de Grevelingen geeft aan dat het mogelijk is om een vermogen van 30 tot 105 MW (70 tot 186 turbines) te installeren met een jaarlijks elektriciteitsproductie van 0,14 tot 0,3 TWh (0,1 tot 0,3% van het Nederlandse elektriciteitsverbruik) (Duijvendijk, 2008).

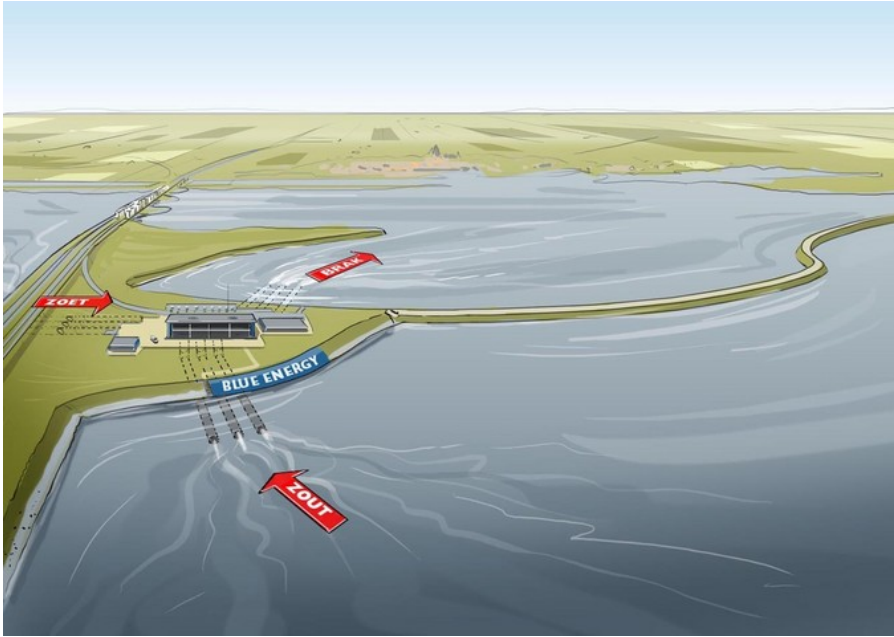


Figuur A.40 Schema voor waterkrachtturbine op getijdewerking

Bron: Duijvendijk, 2008.

### Osmose centrale haalt energie uit verschil zout en zoetwater

Osmose centrales kunnen energie winnen uit verschil in zoutgehalte tussen zoet- en zoutwater. Het zoute water kan het zoete water namelijk door een membraan heen trekken waarna dit zoute water onder druk komt te staan en een turbine aan kan drijven. Er zijn verschillende plaatsen waar dit soort installaties geplaatst kunnen worden, bijvoorbeeld op de afsluitdijk of bij een nog aan te leggen zeewaterleiding naar de dode zee. In 2007 heeft Stakraft aangegeven een klein 2 tot 4 kW proefinstallatie te willen bouwen in Hurum bij een papierfabriek. Bronnen: (Technisch Weekblad, 2007), ([www.wetsus.nl/](http://www.wetsus.nl/)).

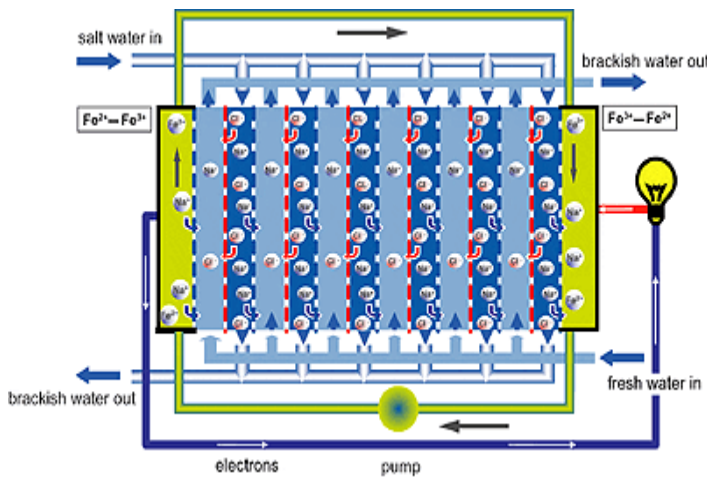


Figuur A.41 *Schema van een Osmosecentrale*

Bron: [www.refdag.nl/](http://www.refdag.nl/).

### *Blauwe energie uit verschil zout- en zoetwater*

Zoet- en zoutwater kunnen ook een potentiaalverschil veroorzaken. Over een ionselectief membraan (3) dat zee- en rivierwater van elkaar scheidt, kan een membraanpotentiaal van ongeveer 80 mV ontstaan. Dit kleine spanningsverschil wordt verhoogd door het in serie plaatsen van de compartimenten. Het totale spanningsverschil wordt daardoor groter en kan gebruikt worden om elektriciteit te genereren. In Nederland wordt door Wetsus (centre of excellence for sustainable water technology) in Leeuwarden onderzoek gedaan aan deze techniek onder de naam Blue energy-proces ([www.wetsus.nl](http://www.wetsus.nl)).



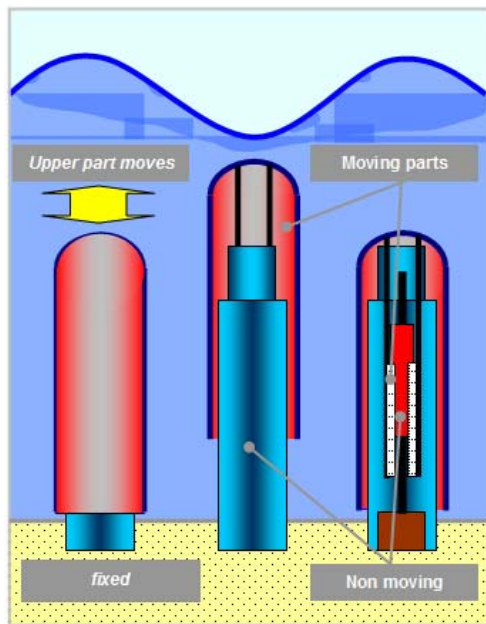
Figuur A.42 *Principe van het blue energy proces*

Bron: [www.wetsus.nl](http://www.wetsus.nl).

### *Energie uit oceaandeining (golfenergie)*

Uit de golfbeweging van water kan energie gewonnen worden. Door de lage energiedichtheid (beperkte aantal kW dat per meter kustlijn) zijn er grote installaties nodig die bovendien stormbestending moeten zijn. De Archimedes Waveswing werkt niet op golven, maar heeft de constante onderwater deining (Ocean Swell, zie o.a. (<http://en.wikipedia.org/>) nodig van grote ocea- aan. Doordat de volledige installatie meters onder de zeespiegel zit, heeft deze bovendien wei-

nig last van stormen. Nederland was oorspronkelijk betrokken bij de ontwikkeling, maar dat de techniek niet in Nederland kan worden toegepast vormde uiteindelijk een probleem. De producent AWS Ocean Energy Ltd is nu in Scotland gevestigd ([www.awsocan.com](http://www.awsocan.com)). Er zijn nu Plannen voor Demonstratie van 250 kW in 2009 en commerciële toepassing in 2011.



Figuur A.43 Principe van energiewinning uit oceaandeining

Bron: <http://my.fit.edu/>.

### *Biomassa waterplanten kweek voor energieopwekking*

Volgens een studie van Ecofys (Florentinus, 2008) is er wereldwijd meer dan 6 mln PJ potentieel voor energie winning uit gekweekte waterplanten (met name algen). Dit is circa 2000 keer zoveel als Nederland jaarlijks aan energie gebruikt. Hiervan zou 90.000 PJ op land gekweekt kunnen worden, 145.000 PJ bij kusten (tot 100 km) en de rest van het potentieel is op de open zee.



Figuur A.44 Grootschalige algenkweek

Bronnen: <http://green-fab.com>, Decker, 2008.

### *Waterstof productie uit afvalwater*

Bij de WUR in Wageningen is onderzoek gedaan aan het omzetten van organische verbindingen uit afvalwater in waterstof om te zetten. Dit gebeurt via een nieuwe techniek biocatalyzed electrolysis. Dit gebeurt door een electrochemisch actief micororganisme te stimuleren met een kleine hoeveelheid elektriciteit. Bij het produceren van de waterstof wordt het afval in het water



afgebroken. De techniek levert meer waterstof uit afvalwater op dan andere technieken (Rozendal, 2007). In 2009 werd bij de Pennsylvania State University ontdekt dat een bepaalde bacterie onder deze omstandigheden zeer energie-efficiënt methaan kan maken.

### A.3.2 Opslagsystemen

Duurzame energie komt beschikbaar op het moment dat de zon schijnt of de wind waait. Dit loopt maar gedeeltelijk parallel met de vraag naar energie. Om meer duurzame energie in te kunnen zetten (en zo meer fossiele brandstof te vervangen), zal de rol van opslagsystemen in de toekomst toenemen.

#### *Redox flow batterijen voor elektriciteitsopslag*

De productie van elektriciteit uit zon en wind hangt van het weer en de zoninstraling af. Een manier om de duurzame elektriciteitsproductie met de vraag te matchen is elektriciteitsopslag. Dit kan met waterkracht (maar dan is wel een groot hoogte verschil nodig), gepreste lucht (ondergrondse ruimtes nodig, minder goed rendement), accu's (duur) en eventueel de waterstofroute. Een andere optie is het gebruik van redox flow batterijen. Dit is het beste te omschrijven als een accu, waarbij de elektriciteit in de vloeistof wordt opgeslagen tussen de elektroden. Deze vloeistof wordt van de ene grote tank, door de accu gepompt (hier laat hij op, of staat zijn elektriciteit af) naar de andere tank. Hoe groter de tanks hoe groter de opslagcapaciteit voor elektriciteit.

De status van Redox flow op basis van vanadium is:

- Risø in Denemarken onderzoeken 15 kW samen met windenergie (Zuidema, 2008).
- VRB power (Canada) levert in combinatie met diesel generatoren (Zuidema, 2008).
- Sumitoma (Japan) sinds 1988 1,5 MW (4 uur) noodstroom systeem (Zuidema, 2008).

#### *Elektriciteitsopslag in de vorm van waterkracht*

Als in Nederland elektriciteit in de vorm van waterkracht wordt opgeslagen is er minder elektriciteit (internationaal) te transporteren en zijn er dus minder hoogspanningsleidingen nodig. Bovendien levert een Nederlandse opslag binnenlandse werkgelegenheid op en draagt het bij aan de stabilisatie van de Nederlandse elektriciteitsvoorziening. Voor het opslaan van elektriciteit in de vorm van waterkracht is echter hoogteverschil nodig. Er zijn diverse opties beschikbaar. Hierbij wordt niet alleen gedacht aan het aanleggen van verhoogde meren (plan Lievense), maar ook aan systemen, waarbij diep onder de grond een ruimte gemaakt wordt die als tweede waterbassin kan fungeren. Bij een overschot aan elektriciteit pompt men water omhoog uit dit ondergrondse bassin. Bij een tekort laat men via waterkracht turbines er weer water inlopen.

#### *Waterstofproductie via hoge temperatuur elektrolyse*

Elektriciteit kan ook via de waterstofroute opgeslagen worden. Bij een overschot van elektriciteit wordt met behulp van elektrolyse waterstof gemaakt (en opgeslagen). Bij een tekort wordt de waterstof met een brandstofcel weer in elektriciteit omgezet. Aan de rendementsverbetering van elektrolyse wordt gewerkt. Hierbij wordt onder andere gekeken naar elektrolyse bij hogere temperatuur. Dit levert een beter omzettingsrendement op van elektriciteit in waterstof. Voor de warmte zou dan van thermische zonne-energie gebruik gemaakt kunnen worden.

#### *Hoge temperatuur warmteopslag*

Gesmolten zouten maken het mogelijk om ook warmte van hogere temperatuur, bijvoorbeeld van een zonthermische centrale (waar dit onderzocht wordt) of van WKK langer tijd op te slaan. Hiermee kan ook de industriële WKK wellicht meer ingezet worden voor de pieken in de elektriciteitsvoorziening.

## A.4 Referenties

- Abanades, J.C. (2007): *Cost structure of a postcombustion CO<sub>2</sub> capture system using CaO*. Environmental Science and Technology, Volume: 41, Issue: 15, augustus 2007.
- Abdul-sada, A. (1997): *Alkylation of aromatics using organic aluminium halide - alkyl halide catalyst system*. Patent US5994602, 22 oktober 1997.
- ADL (2008): *Verkenning Milieutechnologieën NMVOS, Ammoniak en Fijn stof*. Eindrapport. Arthur D. Little Benelux N.V., Rotterdam, April 2008.
- Alsma, E.A. (2001): *Icarus-4 Sector study for the paper and board industry and the graphical industry*. Report nr. NWS-E-2001-02, Universiteit Utrecht, Utrecht centre for Energy research, (UCE), Utrecht July 2001, <http://copernicus.geog.uu.nl/uce-uu/downloads/Icarus/Paper.pdf>.
- Bayer (2005): *Reaktivrektifikation, Reaktivextraktion, Membranreaktoren*. Datenblatt, Bayer Technology Services, Leverkusen, Oktober 2005, [http://www.bayer-technology.com/uploads/media/0308\\_300dpi.pdf](http://www.bayer-technology.com/uploads/media/0308_300dpi.pdf).
- Berger, M. (2008): *Nanotechnology - not that green?* Nanowerk LLC, Posted: October 22 2008. <http://www.nanowerk.com/spotlight/spotid=7853.php>.
- Boersma, G. (2008): *Ammoniak maken met windenergie* Technische weekblad, 25 oktober 2008.
- Boutsma (2007): *Het algenalternatief*. Technisch weekblad, 14 juli 2007.
- Brouw, P op den (2007): *Ionische vloeistoffen: meer dan ideale oplosmiddelen*. 29 oktober 2007, <http://www.twanetwerk.nl/default.ashx?DocumentId=9493>.
- Bustard, C.J., et. al. (2003): *Results of Activated Carbon Injection for Mercury Control upstream of a COHPAC Fabric Filter*. Hamon Research-Cottrell, Somerville, U.S.A. Presented at Mega Symposium, May 2003, <http://hamon-researchcottrell.com/COHPACTMandTOXECONTM.asp>.
- Castricum, H.L (2008): *Breakthrough in pervaporation membrane for dehydration of solvent streams*. ECN-V--08-015, ECN, Petten, 2008 Jun 15.
- Clodic, D., et. al. (2005): *CO<sub>2</sub> capture by anti-sublimation Thermo-economic process evaluation*. (Ecole des Mines de Paris, ALSTOM Power Environment France/Sweden) Paper presented at the 4th Annual Conference on Carbon Capture & Sequestration, May 2-5, 2005, Alexandria (VA), USA, <http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/05/carbon-seq/Tech%20Session%20Paper%2024.pdf>.
- Connor, S. (2008): *New windows double as solar panels*. The Independent, Friday, 11 July 2008, <http://www.independent.co.uk/news/science/new-windows-double-as-solar-panels-865592.html>.
- Daniëls, B.W., (2002): *Transition Paths towards CO<sub>2</sub> Emission Reduction in the Steel Industry*. Proefschrift, Rijksuniversiteit Groningen. 18 november 2002.
- Daniëls, B.W., J.C.M. Farla (coörd.) (2006): *Optiedocument energie en emissies 2010/2020*. ECN-C--05-105/MNP 7730001038, ECN & MNP, Petten/Bilthoven, maart 2006.
- Daniëls, B.W., A.J. Seebregts, P. Kroon, (2008): *Trendanalyse luchtverontreiniging. De effecten van het werkprogramma Schoon en Zuinig op de uitstoot van luchtverontreinigende stoffen*. ECN-E--08-002, ECN, Petten, juni 2008.
- De Ingenieur, (2008): *Getijdenturbine: Plaatsing eerste commerciële installatie in Noord-Ierland*. De ingenieur, 23 mei 2008.
- Decker, K. de, (2008): *Leave the algae alone*. Low-tech Magazine. April 2008 <http://www.lowtechmagazine.com/2008/04/algae-fuel-biof.html>.

- Dikkenberg, B. van den (2008): *Wegdek 'zuivert' uitlaatgassen*. Reformatorisch dagblad, 2 september 2008.
- Dimian, A.C. (2004): *Entrainer-based reactive distillation for the synthesis of fatty acid esters* (APC.6256). STW Project nummer: apc6256, Universiteit van Amsterdam, 2004, <http://www.stw.nl/Projecten/A/apc/>.
- DOE (2003): *Facts Sheet: Catalytic Combustor for Fuel Flexible Gas Turbine (DE-FC26-03NT41891)* National Energy Technology Laboratory (NETL), USA, 2003, [http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/turbines/refshelf/summaries/41891\\_SWPC\\_Catalytic%20Combustor\\_Factsheet\\_Rev01\\_04-24.pdf](http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/turbines/refshelf/summaries/41891_SWPC_Catalytic%20Combustor_Factsheet_Rev01_04-24.pdf).
- Dorgan R.J., et.al. (2003): *Energy Saving Separations Technologies for the Petroleum Industry*. Chemical Engineering and Petroleum Refining Dept., Colorado School of Mines, Golden, Colorado, March 27, 2003, [http://www1.eere.energy.gov/industry/petroleum\\_refining/pdfs/separations\\_final\\_report.pdf](http://www1.eere.energy.gov/industry/petroleum_refining/pdfs/separations_final_report.pdf).
- Duijvendijk, H. van (2008): *Tidal power from the Grevelingen Lake*. TU Delft, 2 juli 2008. <http://www.tudelft.nl/live/pagina.jsp?id=3b25a551-adeb-45f7-8184-d55328cb038d&lang=en>.
- ECN (2009): *ECN behaalt wereldrecord rendement met innovatief zonnepaneel*. Persbericht, ECN, Petten, 28 april 2009.
- EECT B.V. (2008): *Openbaar Eindrapport Regeling EOS': Project: Gasturbinesysteem met hoge temperatuur brandstofcellen*. Projectnummer: NEOH01009. SenterNovem. 15 november 2008.
- EERE (2007): *Advanced Membrane Separation Technologies for Energy Recovery; New Transport Membrane Condenser Recovers Energy and Water from Industrial Process Streams*. U.S. Department of Energy, EERE, November 2007, [http://www1.eere.energy.gov/industry/imf/pdfs/advanced\\_membrane\\_separation.pdf](http://www1.eere.energy.gov/industry/imf/pdfs/advanced_membrane_separation.pdf).
- EGTEI LCP (2008): *EGTEI expert sub-group on Emerging Technologies/Techniques on Large Combustion Plants >500 MW<sub>th</sub> up to 2030*. (LCP2030 sub-group) Draft Final Report. ADEME, Cedex (France), July 2008.
- Energieportal (2008): *Air products levert zuurstof voor pilot oxyfuel-technologie*, 2 november 2008, <http://www.energieportal.nl/Nieuws/Emissie/Air-Products-levert-zuurstof-voor-pilot-met-oxyfuel-technologie-4275.html>.
- Energy Nexus Group (2002): *Technology Characterization: Gas Turbines. Prepared for: Environmental Protection Agency Climate Protection Partnership*. Energy Nexus Group, Arlington, Virginia, February 2002, [http://www.epa.gov/chp/documents/tech\\_turbines.pdf](http://www.epa.gov/chp/documents/tech_turbines.pdf).
- EVN (1999): *Energieverslag 1998*. ECN, Petten, 1999.
- Fan, Z., et. al. (2006): *NO<sub>x</sub> Control with Ammonia-Free SCR (AF-SCR)*. Foster Wheeler North America Corp, R&D Center, Livingston, 2006, [http://www.fwc.com/publications/tech\\_papers/files/TP\\_SCR\\_06\\_01.pdf](http://www.fwc.com/publications/tech_papers/files/TP_SCR_06_01.pdf).
- Féraud, A., L. Marocco, T. Howard (2006): *CASTOR Study on Technological Requirements for Flue Gas Clean-Up Prior to CO<sub>2</sub>-Capture*. ALSTOM Power & E.ON UK Power Technology, Nottingham, UK. In: 8th international conference on greenhouse gas control technologies, Trondheim, Norway, 19-22 Jun 2006. Oxford, UK, Elsevier Ltd., paper 01\_05\_06.PDF, 6p. CD-ROM, 2006, <https://events.adm.ntnu.no/ei/viewpdf.asp?id=24&file=d%3A%5CAmlink%5CEVENTWIN%5Cdocs%5Cpdf%5C950Final00648%2Epdf>.
- Florentinus, A., et. al. (2008): *Worldwide Potential of Aquatic Biomass*. Ecofys Bio Energy Groep, Utrecht, May 2008.

FP5 (2005): *FP5 Project Record 102. Advanced zero emission power plant (AZEP)*. 7 juni 2005, [http://cordis.europa.eu/data/PROJ\\_FP5/ACTIONeqDndSESSIONeq112362005919ndDOCeql02ndTBLeqEN\\_PROJ.htm](http://cordis.europa.eu/data/PROJ_FP5/ACTIONeqDndSESSIONeq112362005919ndDOCeql02ndTBLeqEN_PROJ.htm).

Grainger, D. (2007): *Development of carbon membranes for hydrogen recovery*. Thesis/Dissertation, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Trondheim (Norway), 15 september 2007.

Griffin, T., et. al. (2005): *Advanced Zero Emissions Gas Turbine Power Plant*. J. Eng. Gas Turbines Power, Volume 127, Issue 1, January 2005.

Harmelen, T. van, et..al. (2008): *The impacts of CO<sub>2</sub> capture technologies on transboundary air pollution in the Netherlands*. TNO Built Environment and Geosciences, Utrecht, Mei 2008, <http://www.rivm.nl/bibliotheek/digitaaldepot/Captureinventoryreport.pdf>.

Hernandez, S, et. al. (2008): *Desulfurization processes for fuel cells systems*. International Journal of Hydrogen Energy; Journal Volume: 33, 2008 Jun 15.

Indigo (2006): *Indigo Particle Agglomerators Reduce Mass and Visible Emissions on Coal Fired Boilers in the USA*. Indigo Technologies Volume 1, Issue 2 December 2006, <http://www.indigotechnologies.com.au/>.

Ingels, R. (2007): *Technology transfer and mitigation of climate change: The fertilizer industry perspective*. IEA workshop on energy efficiency and CO<sub>2</sub> reduction Paris 1 October 2007.

Jansen, D.; M. Mozaffarian, M., N. van Schie, N. (1996): High temperature fuel cells, a competing technology for gas turbines?: if you can't beat them, join them! ECN-RX--97-063, Paper presented at the second international fuel cell conference, 5-8 February 1996, Kobe, Japan, 1996.

Jitsuvara (2007): *Feed back report - Iron & Steel Sector*. IEA Workshop in the Framework of the G8 Dialogue on Climate Change, Clean Energy and Sustainable Development IEA , 1 October 2007.

K.U. Leuven (2007): *Nieuwe techniek op rand van doorbraak; Hoge druk resulteert in ongekende kwaliteit en houdbaarheid*. Persbericht K.U. Leuven, 2007, <http://www.biw.kuleuven.be/persberichten/fiches/FI-0704.pdf>.

Kaczor, B. (2008): *10 times lighter but 500 times stronger than steel, 'buckypaper' could transform planes, cars*. Chicago Tribune, October 18, 2008, <http://www.chicagotribune.com/technology/ats-ap-tec-buckypaperoct18,0,951219.story>.

Kemna, R., et. al. (2007): *Preparatory Study on Eco-design of CH Boilers; Task 4 Reprot (FINAL) Technical Analysis (incl. System Model)*. Van Holsteijn en Kemna BV, Delft, 30 september 2007.

Kop, L. (2007): *Papier- en kartonindustrie halveert energiegebruik*. Utilities, januari 1007.

Knoopers, R. (2008): *Van grootschalig naar kleinschalig*. Technisch Weekblad, 26 april 2008.

Kroon, P., et.al. (1998): *Extra Energiebesparing Nader Onderzocht. Achtergronddocument bij de Energiebesparingsnota 1998*. ECN-C—98-098, ECN, Petten, november 2008.

Kuiper, J.A.M. (2007): *University of Twente. The Ideal Energy Mix for the Next Century*. 23 november 2007, [http://www.impact.utwente.nl/Activities/Opening%20Meander%20\(Dutch\)/inleiding.pdf](http://www.impact.utwente.nl/Activities/Opening%20Meander%20(Dutch)/inleiding.pdf).

Kushnir, D., B. A. Sandén (2008): *Energy Requirements of Carbon Nanoparticle Production*. Journal of Industrial Ecology, Volume 12, Number 3, <http://www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/fulltext/121421838/PDFSTART>.

Lee, S.J., et. al. (1994): *Removal of gas-phase elemental mercury by iodine- and chlorine-impregnated activated carbons*. Atmospheric environment. 2004, vol. 38, 19994.



- Lee, K.H., et. al. (2007): *Drying Performance Simulation for the Basic Design of a Heat Pump Dryer*. Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers. B, Volume: 31, Issue: 10, 2007 Oct 15.
- Maas, C.W.M., H.H.J. Vreuls, et. al. (2008): *Greenhouse Gas Emissions in the Netherlands 1990-2006; National Inventory Report 2008*. MNP report 500080009, MNP/SenterNovem/TNO/CBS, MNP Bilthoven, april 2008.
- Manders, A.M.M., R. Hoogerbrugge (2007): *Heavy metals and benzo(a)pyrene in ambient air in the Netherlands; A preliminary assessment in the framework of the 4th European Daughter Directive*. RIVM Report 680704001/2007, RIVM, Bilthoven, 2007.
- Manning, C.P., R.J. Fruehan: (2001): *Emerging Technologies for Iron and Steelmaking*. JOM, 53 (10) (2001), pp. 20-23, <http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/0110/Manning-0110.html>.
- Mei, Z. (2008): *Removal and recovery of gas-phase element mercury by metal oxide-loaded activated carbon*. Journal of hazardous materials, 2008, vol. 152.
- Mensink, M. (2007): *Speaking the same language; The way forward in tracking industrial Energy efficiency and CO<sub>2</sub> Emissions*. Tracking Industrial Energy Efficiency and CO<sub>2</sub> Emissions: The Way Forward. IEA, Paris, 1st and 2nd of October 2007.
- Miller, R., et. Al. (2003): *Effective use of both COMPAC<sub>tm</sub> and TOXECON<sub>tm</sub> Technologies as the 'Technology of the Future' for Particulate and Mercury Control on Coal Fired Boilers*. Hamon Research-Cottrell, Somerville, New Jersey, To be presented at the 2003 International Power-Gen Conference. Las Vegas, Nevada, 2003.
- Milota, M.R., K. Li, (2007): *VOC and HAP recovery using ionic liquids*. Oregon State University, 2007 May 29.
- Moor, W. de: (2008): *Gevaar nanobuisjes mogelijk vergelijkbaar met asbest*. <http://tweakers.net/nieuws/53562/gevaar-nanobuisjes-mogelijk-vergelijkbaar-met-asbest.html>, woensdag 21 mei 2008.
- OIT (2000a): *Gas Imaging for advanced leak detection*. Petroleum Project Fact Sheet. Office of Industrial Technologies, Energy Efficiency and Renewable Energy U.S. Department of Energy. Washington, Januari 2000, [http://www1.eere.energy.gov/industry/petroleum\\_refining/pdfs/leakdetect.pdf](http://www1.eere.energy.gov/industry/petroleum_refining/pdfs/leakdetect.pdf).
- OIT (2000b): *Energy-saving separation technology for the petroleum industry*. Petroleum Project Fact Sheet. Office of Industrial Technologies, Energy Efficiency and Renewable Energy U.S. Department of Energy. Washington, December 2000, [http://www1.eere.energy.gov/industry/petroleum\\_refining/pdfs/separtech.pdf](http://www1.eere.energy.gov/industry/petroleum_refining/pdfs/separtech.pdf).
- Parks, J., D. Ferguson, J. M. E. Storey (2001): *NO<sub>x</sub> Reduction with Natural gas for lean Large-bore Engine Applications using lean NO<sub>x</sub> trap Aftertreatment*. Oak Ridge National Laboratory, Knoxville, 2001, <http://www.ornl.gov/~webworks/cp/pr/y2001/rpt/122012.pdf>.
- Parks, J., J. Tassitano., J. M. E. Storey (2005): *Lean NO<sub>x</sub> Trap Catalysis: NO<sub>x</sub> Reduction for Lean Natural Gas Engine Applications*. 2nd Annual Advanced Stationary Reciprocating Engines Conference, Diamond Bar, CA, March 15-16, 2005.
- Peek, C.J. (2007): *Emissies van prioritaire stoffen naar lucht in Nederland 1990-2005; Consequenties herziening stoffenlijst*. MNP-publicatienummer 500080010, MNP, Bilthoven, 2007, [http://www.emissieregistratie.nl/erpubliek/documenten/Lucht%20\(Air\)/Notitie%20Prioritaire%20Stoffen%201990-2005,%20PBL,%20aug%202008.pdf](http://www.emissieregistratie.nl/erpubliek/documenten/Lucht%20(Air)/Notitie%20Prioritaire%20Stoffen%201990-2005,%20PBL,%20aug%202008.pdf).
- Penetrante, B (2000): *Exhaust aftertreatment using plasma-assisted catalysis*. UCRL-JC-137288, Clean Fuels 2000, San Diego, CA (US), 02/07/2000--02/09/2000.
- Pereira, C.J. (2007): *Breakthrough Hydroprocessing Technology for the Upgrading and Refining Industry*. [http://www.choa.ab.ca/documents/08-June10\\_bio.pdf](http://www.choa.ab.ca/documents/08-June10_bio.pdf).

- PI (2008): *European Roadmap for Process Intensification*. Action Group Process Intensification (PI) EnergieTransitie Platform Ketenefficiency, SenterNovem, 2008  
[http://www.senternovem.nl/innovatietrajectchemie/roadmap\\_procesintensificatie/index.asp](http://www.senternovem.nl/innovatietrajectchemie/roadmap_procesintensificatie/index.asp).
- Rheinberg, O. van, et. al. (2008): *Selective removal of sulphur in liquid fuels for fuel cell applications*. Fuel; Journal Volume: 87; Journal Issue: 13/14, 2008 Oct 15.
- RIVM (2001): *Bouwstenen voor het NMP4, Aanvulling op de Nationale Milieuverkenning 5*, RIVM rapportnr. 408129022, RIVM, Bilthoven, 2001.
- Rozendal, R.A. (2007): *Hydrogen production through biocatalyzed electrolysis*. Thesis/Dissertation, Wageningen University WUR, Wageningen, 2007 Oct 24.
- Sciencedaily (2006): *New World Record Achieved In Solar Cell Technology*. ScienceDaily (Dec. 7, 2006), <http://www.sciencedaily.com/releases/2006/12/061206123954.htm>.
- Sciencedaily (2008a): *New World Record For Efficiency For Solar Cells; Inexpensive To Manufacture*. ScienceDaily, 17 mei, 2008,  
<http://www.sciencedaily.com/releases/2008/05/080514154702.htm>.
- Sciencedaily (2008b): *New European Record Efficiency For Solar Cells Achieved: 39.7%*. ScienceDaily, 25 september 2008,  
<http://www.sciencedaily.com/releases/2008/09/080924085202.htm>.
- Sciencedaily (2008c): *Solar Cell Sets World Efficiency Record At 40.8 Percent*, ScienceDaily, 30 september 2008, <http://www.sciencedaily.com/releases/2008/09/080929220900.htm>.
- SenterNovem (2006): *Project SELOX (Gastec)*. EOS (Energie Onderzoek Subsidies), Utrecht, 1 juni 2006  
[http://www.senternovem.nl/eos/infotheek/projectencatalogus/projecten/eos\\_nieuw\\_energieonderzoek/duurzame\\_energie\\_2/energie\\_uit\\_biomassa/selox\\_\(gastec\).asp](http://www.senternovem.nl/eos/infotheek/projectencatalogus/projecten/eos_nieuw_energieonderzoek/duurzame_energie_2/energie_uit_biomassa/selox_(gastec).asp).
- Sun, C. (2007): *Development of low cost adsorbents for control of mercury (Hg) emissions from coal combustion*. international conference on coal science and technology, Nottingham (United Kingdom), 28-31 Aug 2007.
- Sundkvist, S.G., T. Griffin, N. P. Thorshaug (2001): *AZEP - Development of an Integrated Air Separation Membrane - Gas Turbine*. Second Nordic Minisymposium on Carbon Dioxide Capture and Storage, Göteborg, October 26, 2001,  
<http://www.entek.chalmers.se/~anly/symp/symp2001.html>.
- Technisch weekblad (2007): *Osmose stroom voor papierfabriek*. Technisch weekblad, 13 oktober 2007.
- Tolsma, H. (2008): *'Het is gewoon boeren'*. Technisch weekblad 21 juni 2008.
- Tremuli, P. (2008): *The Nitrogen Oxides Reducer*. Wärtsilä, In detail. issue no. 2/2008,  
[http://www.wartsila.com/Wartsila/global/docs/en/about\\_us/in\\_detail/2\\_2008/nitrogen-oxides-reducer.pdf](http://www.wartsila.com/Wartsila/global/docs/en/about_us/in_detail/2_2008/nitrogen-oxides-reducer.pdf).
- Truce, R., ed.al. (2006): *Enhanced fine Particle Collection using Indigo Agglomerator*. ICESPX, Cairns Australia, June 25-29 2006,  
<http://www.indigotechnologies.com.au/documents/M-TP11-ENHANCEDFINEPARTICLECOLLECTIONCairns06.pdf>.
- UT Nieuws (2008): *Russen in de race met chemische reactor; Spin off Econtech genomineerd voor Overijssel Innovation Award*. Jaargang: 43, Nr. 24, 4 September 2008 - ()  
[http://www.utnieuws.utwente.nl/new/?aeditie\\_id=1696](http://www.utnieuws.utwente.nl/new/?aeditie_id=1696).
- Viforr, S. (2008): *Enzymatic pre-treatment of wood chips for energy reductions at mechanical pulp production - A review*. (Deliverable 1.1.11 of the Ecotarget project). STFI-Packforsk AB Stockholm, Sweden, July 2008,  
<http://www.ecotarget.com/news/ECOTARGET%20Technical%20deliverables%20D1.1.11.pdf>.

Veld, H., G.D. Roskam, R., van Enk (2008): *Desk study on the feasibility of CO<sub>2</sub> sequestration by mineral carbonation of olivine*. TNO report 2008-U-R0776/B, TNO Subsurface and Grondwatersystemen, Utrecht, July 2008.

VROM (2008): *Brief van de minister van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer over de fijnstof-afvangmethode van BAM/TU Delft en de NoNox technologie*. Tweede Kamer, vergaderjaar 2007-2008, 30 196 en 31 209, nr. 34, Den Haag, 12 juni 2008.

Wärtsilä (2004): *Development of SCR technology for engine plants*. Technology in focus Energy News, Issue 18, February 2004  
[http://www.wartsila.com/Wartsila/global/docs/en/power/media\\_publications/energy\\_news/18/development\\_of\\_SCR\\_technology.pdf](http://www.wartsila.com/Wartsila/global/docs/en/power/media_publications/energy_news/18/development_of_SCR_technology.pdf).

WE Energies (2006): *TOXECON™ Retrofit for Mercury and Multi-Pollutant Control on Three 90-MW Coal-Fired Boilers; Preliminary Public Design Report*. Wisconsin Electric Power Company, Milwaukee, May 15, 2006.

Umit, P.I., et.al. (2005): *Dual Catalyst System for the Reduction of NO with CH<sub>4</sub> Under Lean Conditions*. Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Heterogeneous Catalysis Research Group. 2005 Review of DOE-ARES University Program Argonne National Lab - July 12, 2005.

Ungureșan, M.L., E.M. Pică, L. Jäntschi (2005): *Desulphurisation of waste gases from the industrial processes*. International Conference on Materials Science and Engineering BRAMAT 2005, Brasov, Romania, February 24-26, 2005,  
[http://ori.academicdirect.org/conferences/work\\_list.php?user=lori&id=83](http://ori.academicdirect.org/conferences/work_list.php?user=lori&id=83).

Zuideman, T. (2008): *Vanadiumbatterijen geschikt voor elektriciteitsopslag*. Technisch weekblad, 18 oktober 2008.

## A.5 Internet sites

[http://en.wikipedia.org/wiki/Ionic\\_liquid](http://en.wikipedia.org/wiki/Ionic_liquid) (over ionische vloeistoffen)

[http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_emerging\\_technologies](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_emerging_technologies) (nieuwe technieken waaronder nanobuisjes)

[http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_solar\\_thermal\\_power\\_stations](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_solar_thermal_power_stations) (lijst met installaties waar uit zonnearmte elektriciteit wordt gemaakt).

[http://en.wikipedia.org/wiki/Swell\\_\(ocean\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Swell_(ocean)) (over deining in de oceaan)

<http://green-fab.com/blog/2008/04/23/vertigro-produces-biofuel-from-algae-oil-extracts/> (algenkweek in vertikaal opgehangen plastic zakken)

<http://hamon-researchcottrell.com/> (leveranciers filters voor stof en kwikverwijdering)

<http://homepage.usask.ca/%7Epka525/HPdrying-frameset.htm> (voorbeeld warmtepompproger)

<http://homepage.usask.ca/~pka525/rightframe.htm> (voorbeeld warmtepompproger)

[http://my.fit.edu/~swood/OE\\_topic.html](http://my.fit.edu/~swood/OE_topic.html) (site over energiewinning uit oceanen)

<http://nl.wikipedia.org/wiki/Kernfusie> (informatie over kernfusie)

[http://nl.wikipedia.org/wiki/Koolstof\\_nanobuis](http://nl.wikipedia.org/wiki/Koolstof_nanobuis) (site over nanobuisjes)

[http://texasiof.ces.utexas.edu/texasshowcase/pdfs/presentations/c1/seebold\\_waibel.pdf](http://texasiof.ces.utexas.edu/texasshowcase/pdfs/presentations/c1/seebold_waibel.pdf) (low NO<sub>x</sub> gasbrander)

<http://www.awsocan.com/PageProducer.aspx> (producent archimedes Waveswing)

[http://www.coen.com/i\\_html/deltanoxuln.html](http://www.coen.com/i_html/deltanoxuln.html) (low NO<sub>x</sub> gasbrander)

<http://www.ecotarget.com/> EU project milieuvriendelijker papierindustrie

<http://www.emerachem.com/product/emx/> (katalytische absorptiesystemen voor NO<sub>x</sub>)

<http://www.emissieregistratie.nl> (emissiecijfers per sector en bedrijf)

[http://www.energieportal.nl/images/nieuws/406\\_offshore\\_windturbines.jpg](http://www.energieportal.nl/images/nieuws/406_offshore_windturbines.jpg) (offshore windturbines)

<http://www.epsi-highpressure.com/index.htm> (producent drukapparatuur voor sterilisatie)

<http://www.freepatentsonline.com/EP0693045.html> (over ionische vloeistoffen en alkylatie)

[http://www.germes-online.com/direct/dbimage/50234171/Solar\\_Cell.jpg](http://www.germes-online.com/direct/dbimage/50234171/Solar_Cell.jpg) (foto zonnecel)

<http://www.independent.co.uk/news/science/new-windows-double-as-solar-panels-865592.html> (kunststoffen die zonlicht naar de rand concentreren voor zonnecellen)

<http://www.ingrepro.nl/website/> (industriële algen productie)

<http://www.iter.org/> (internetsite van de ITER kernfusiereactor)

[http://www.johnzink.com/products/burners/pdfs/tp\\_ultra\\_lownox\\_burners.pdf](http://www.johnzink.com/products/burners/pdfs/tp_ultra_lownox_burners.pdf) (low NO<sub>x</sub> gasbrander)

<http://www.kcpk.nl/plone/bumaga/> (kenniscentrum papier en karton)

<http://www.kcpk.nl/plone/bumaga/diensten/brilijant/?searchterm=water> (Briljant project energiebesparing in de papierindustrie)

[http://www.maxoncorp.com/Directory/product\\_detail/M-PAKT-Ultra-Low-NO<sub>x</sub>-Burner/76/](http://www.maxoncorp.com/Directory/product_detail/M-PAKT-Ultra-Low-NOx-Burner/76/) (low NO<sub>x</sub> gasbrander)

[http://www.mnp.nl/en/dossiers/Transboundaryairpollution/Dutch\\_Policy\\_Research\\_Programme\\_on\\_Air\\_and\\_Climate.html](http://www.mnp.nl/en/dossiers/Transboundaryairpollution/Dutch_Policy_Research_Programme_on_Air_and_Climate.html) (BOLK onderzoeksprogramma)

<http://www.mwoesolar.com/products.html> (gestapelde zonnecel)

<http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/fuelcells/hybrids.html> (Solid Oxide Fuel Cell Hybrid System for Distributed Power)

<http://www.norit-ac.com/english/> (producent van actieve kool voor kwikverwijdering)

<http://www.novelq.org/Default.aspx> (EU programma innovatie voedingsmiddelen industrie)

[http://www.nuon.com/nl/Images/Nuon-Magnum-centrale\\_tcm164-83882.jpg](http://www.nuon.com/nl/Images/Nuon-Magnum-centrale_tcm164-83882.jpg) (nieuwe kolenvergasser STEG centrale)

<http://www.nrg.eu/htr/index.html> (informatie van NRG over de hoge temperatuur kernreactor)

<http://www.outilssolaires.com/pv/prin-centrale.htm> (zonne-energiecentrale met spiegels)

<http://www.psenterprise.com/gproms/applications/separation/hidic.html> (HIDiC destillatie))

<http://www.refdag.nl/media/foto/2008/54981-a.jpg> (schema osmose centrale)

<http://www.seageneration.co.uk/> (producent getijdenturbine)

[http://www.senternovem.nl/energietransitieke/transitiepaden/duurzame\\_papierindustrie/index.asp](http://www.senternovem.nl/energietransitieke/transitiepaden/duurzame_papierindustrie/index.asp) (informatie over transitieproject papierindustrie)

<http://www.spaarhetgein.nl/overig.html> (foto windturbines op land)

[http://www.stork-thermeq.nl/UserFiles/file/PDF/downloads/Stork\\_Low\\_NO<sub>x</sub>\\_2007\\_LR.pdf](http://www.stork-thermeq.nl/UserFiles/file/PDF/downloads/Stork_Low_NOx_2007_LR.pdf) (lage NO<sub>x</sub> oliebrander)

[http://www.stork-thermeq.nl/UserFiles/file/PDF/downloads/Stork\\_Low\\_NO<sub>x</sub>\\_2007\\_LR.pdf](http://www.stork-thermeq.nl/UserFiles/file/PDF/downloads/Stork_Low_NOx_2007_LR.pdf) (low NO<sub>x</sub> gasbrander)

<http://www.sulzerchemtech.com/en/desktopdefault.aspx/tabid-145> (Leverancier Pervaporatie)

<http://www.utwente.nl/nieuws/pers/Straatstenen.doc/> (straatstenen die NO<sub>x</sub> afbreken)

<http://www.wetsus.nl/> (organisatie waar onder andere Osmose energie wordt onderzocht)

[http://www.wonderseamarineaquarium.nl/b.014\\_calcium.html](http://www.wonderseamarineaquarium.nl/b.014_calcium.html) (rol van Calcium en CO<sub>2</sub> in zeewater)

<http://www.zonnepanelen-info.nl/zonnecellen/> (informatie over zonnecellen)

[http://www1.eere.energy.gov/industry/about/pdfs/combustion\\_fy2004.pdf](http://www1.eere.energy.gov/industry/about/pdfs/combustion_fy2004.pdf) (low NO<sub>x</sub> gasbrander)

[http://www1.eere.energy.gov/industry/combustion/pdfs/NO<sub>x</sub>.pdf](http://www1.eere.energy.gov/industry/combustion/pdfs/NOx.pdf) (low NO<sub>x</sub> gasbrander)

[http://www2.dupont.com/Clean\\_Technologies/en\\_US/products/stratco/iso\\_therming.html](http://www2.dupont.com/Clean_Technologies/en_US/products/stratco/iso_therming.html)  
(diesel IsoTherming™ Hydroprocessing Technology)

## Bijlage B      Technologielijsten

### B.1    Process intensification studie

De ‘Process Intensification’ studie (PI, 2008)<sup>10</sup> bevat een groot aantal technieken waarvan een aantal in deze rapportage zijn opgenomen. Voor de volledigheid is hier de complete lijst opgenomen.

#### *Structured devices non-reactive*

- 1.1.1 Advanced plate-type heat exchangers
- 1.1.2 Advanced shell-and-tube heat exchangers
- 1.1.3 Structured internals for mass transfer operations
- 1.1.4 Static mixers

#### *Structured devices Reactive*

- 1.2.1 Structured catalyst-based reactors: Catalytic foam reactors; Monolith reactors; Millisecond (gauze) reactors; Other catalytic structures (e.g. KATApAK)
- 1.2.2 Microreactors (including Micromixers)
- 1.2.3. Membrane reactors (non-selective)
- 1.2.4 Static mixers-reactors.

#### *Hybrid non reactive*

- 2.1.1 Adsorptive distillation
- 2.1.2 extractive crystallization
- 2.1.3 extractive distillation
- 2.1.4 Heat-integrated distillation
- 2.1.5 Membrane hybrid systems: Membrane absorption/stripping; Membrane adsorption; Membrane crystallization; Membrane distillation; distillation - pervaporation systems; Membrane extraction

#### *Hybrid Reactive*

- 2.2.1 Hex Reactors
- 2.2.2 Membrane reactors (selective, catalytic)
- 2.2.3 Reactive adsorption: Simulated moving bed reactors; Rotating annulus chromatographic reactor; Gas-solid-solid trickle flow reactor
- 2.2.4 Reactive condensation
- 2.2.5 Reactive extraction
- 2.2.6 Reactive absorption
- 2.2.7 Reactive crystallization/precipitation
- 2.2.8. Reactive distillation: Reactive distillation; pervaporation-assisted reactive distillation
- 2.2.9 Other reactive: Reactive comminution; Reactive extrusion

#### *Energy transfer Rotating*

- 3.1.1 Centrifugal adsorption technology
- 3.1.2 Centrifugal Liquid-Liquid Contactors
- 3.1.3 Rotating packed Beds (incl. Rotating Foam Reactor)
- 3.1.4 Rotor-stator mixers
- 3.1.5 Spinning disc Reactor
- 3.1.6 Viscous heating devices

#### *Energy transfer Impulse*

- 3.2.1 ejector (Venturi) -based reactors
- 3.2.2 Hydrodynamic cavitation reactors

---

<sup>10</sup> PI (2008): *European Roadmap for Process Intensification*. Action Group Process Intensification (PI), Energie Transitie Platform Ketenefficiency, SenterNovem, 2008.  
[http://www.senternovem.nl/innovatietrajectchemie/roadmap\\_procesintensificatie/index.asp](http://www.senternovem.nl/innovatietrajectchemie/roadmap_procesintensificatie/index.asp)

- 3.2.3 impinging streams reactor
- 3.2.4 pulsed compression reactor
- 3.2.5 Sonochemical reactors
- 3.2.6 Ultrasound-enhanced crystallization
- 3.2.7 Ultrasound-enhanced phase dispersion / mass transfer
- 3.2.8 Supersonic shockwave for phase dispersion: Supersonic gas-liquid reactors; Supersonic gas-solid reactors

*Energy transfer electromagnetic*

- 3.3.1 electric field-enhanced operations: extraction & dispersion; Heat transfer; Mixing; Other
- 3.3.2 induction/ohmic heating
- 3.3.3 Microwave-enhanced operations: drying; (pre)heating; Separations (Reactions: non-catalytic or homogeneously catalyzed; Reactions: Heterogeneous catalytic; Reactions: polymerization and polymer processing)
- 3.3.4 photochemical reactors
- 3.3.5 plasma (GlidArc) reactors

*Dynamic dynamic*

- 4.1.1 Oscillatory Baffled Reactors
- 4.1.2 Reverse flow reactor operation
- 4.1.3 pulsing operation of multiphase reactors
- 4.1.4 pulse combustion drying

*Other Supercritical*

- 5.1.1 Supercritical reactions
- 5.1.2 Supercritical separations
- 5.1.3 Cryogenic separations

## B.2 Lijst met doorbraak technologieën uit 1997

In 1997 is bij ECN een lijst opgesteld van doorbraaktechnieken. Deze bijlage geeft deze lijst zoals op basis van sectorverkenningen voor de vijf meest energie-gebruikende industriële sectoren is opgesteld. Het betreft zowel sector-specifieke technologieën als zogenoemde ‘cross-cutting’ technologieën. Voor iedere technologie staat de toepassingssector vermeld met de volgende codering:

- Voeding & Genot (V&G)
- Papier & Karton (P&K)
- Chemie (C)
- Bouwmaterialen (B)
- Basismetaal (BM).

Om de basislijst overzichtelijk te houden is een indeling gemaakt naar technologieclusters.

Technologie cluster: Scheiden/Filtreren & Drogen

- mechanische damprecompressie (V&G, C)
- membranen (V&G, C)
- vriesdrogen/-kristallisatie (V&G, C)
- omgekeerde osmose (V&G)
- condi-cycloon (V&G)
- wervelbeddrogers (V&G, B)
- drogen met oververhitte stoom (V&G, P&K, B)
- diffusie ontwatering (V&G)
- mechanisch ontwateren (V&G, P&K)
- drogen met afgassen gasturbine (V&G)
- impulsdrogen (P&K)
- condensing belt drogen (P&K)



- microgolfdrogen (B)
- integratie van meerdere scheidingskolommen in één systeem (C)
- verbeterde destillatie (C)
- scheiding door adsorptie/absorptie (C)
- vloeistof-vloeistof en superkritische extractie (C).

#### Technologiecluster: Ovens & Fornuizen

- Infrarood verwarming (V&G)
- microgolf verwarming (V&G)
- zuurstofverrijking of oxy-fuel (B, BM)
- roet in vlammen (B)
- keramische stralingsbrander (B)
- hoge snelheidsbranders (B, BM)
- hoge-temperatuur warmtekrachtkoppeling (C)
- geleidend keramiek voor nafta kraakfornuis (C)
- hoge-druk verbranding in nafta kraakfornuis (C)
- verhoogde poederkoolinjectie hoogovens (BM)
- plasmatechnologie (BM)
- inerte kathodes/anodes aluminiumproductie (BM).

#### Technologiecluster Warmteterugwinning

- wervelbedvoorverwarming (B)
- thermochemische recuperatie (B)
- hoge-temperatuur warmtewisselaars (B, C)
- (Hoge temperatuur) warmtepompen
- warmteterugwinning uit slakken (BM).

#### Technologiecluster Cross-Cutting

- warmtekrachtkoppeling
- hoge efficiency gasturbines
- Organic Rankine Cycle
- variabele toerentalregeling
- geavanceerde compressoren
- geavanceerde motoren
- vermogenselectronica
- procesintegratie
- procesintensificatie
- vestiging-integratie
- procesregelingen/-optimalisatie/-planning/-logistiek.

#### Technologiecluster: Nieuwe Processen

- sterilisatie met ultraviolette straling (V&G)
- sol-gel proces (B-glas)
- toevoegingen die smeltpunt verlagen (B-glas)
- toevoegingen bij klinkerproductie (B-cement)
- nieuwe maaltechnieken (V&G-mengvoeder, B-cement)
- continue kristallisatie (V&G-suiker)
- oxidatieve koppeling van methaan i.p.v. nafta kraken (C)
- methanolroute voor alkenen (C)
- nieuwe grondstoffen (kolen, biomassa) i.p.v. naftakraken (C)
- geavanceerde reformer bij ammoniakproductie (C)
- nieuwe reactoren voor ammoniakproductie (C)



- katalysatoren voor ammoniakproductie (C)
- geavanceerde membraan elektrolyse cellen voor chloorproductie (C)
- continuproces voor SiC (C)
- nieuwe procesroute (CCF, Corex) voor staal (BM)
- dungieten bij staal (BM)
- nieuwe procesroute (AlCoA b.v) voor aluminium (BM)
- ketenanalyse (bv. Aluminium)
- biochemische procesroute (C)
- geavanceerde katalysatoren (C).

### B.3 Nieuw Energie Onderzoek (NEO) projecten.

In Nederland loopt het programma Energie Onderzoek Subsidie. Hieruit wordt subsidie gegeven aan ‘conceptueel of fundamenteel onderzoek’ en ‘onderzoek en ontwikkeling’. Een deel van deze projecten heeft betrekking op technieken die in dit rapport aan de orde komen.

Hieronder volgen eerst de 175 projecten van ‘conceptueel of fundamenteel onderzoek’ waaraan tot nu toe subsidie is verleend<sup>11</sup>.

- Zenit: Geconcentreerd zonlicht
- Zelf-organiserende, protongeleidende polymere membranen voor de brandstofcel
- Ontwikkeling van een infrastructuur voor waterstof in Nederland
- Ontwikkeling van de vaste oxide brandstofcel (SOFC)
- Waterkracht lens bestaande uit golfopwekker, golfconcentrator en een golfenergieconversie-systeem
- Waterstofreiniging met innovatief absorptieproces
- Woningen als energieleverend systeem
- Stroompieken in het elektriciteitsnet voorkomen
- Super schoon opwekking van schone energie uit fossiele dragers
- Verbeterde hydrolyse van lignocellulose
- Thermoakoestische systemen voor het opwaarderen van industriële restwarmte
- Transitie Roadmap Energie Infrastructuur Nederland - 1
- Vergassen van natte biomassa in superkritisch water
- Vergassing van biomassa en reiniging van het geproduceerde gas
- Thermo-akoestisch door zonne-energie aangedreven koelsystemen
- Thermogalvanische cel: ionic liquids als elektrolyt om warmte (restwarmte, zonnwarmte) om te zetten in elektriciteit.
- TORTECH - Torrefactie als sleuteltechnologie voor de productie van (vaste) brandstoffen uit biomassa en afval
- Simultane productie van biocrude en pyrolyseolie
- Stabiliteit en beheersbaarheid van het toekomstige landelijke elektriciteitsnet
- Spark Discharge Generation: productie van nanopoeiders van metalen en legeringen
- Stabiele netten bij een sterk gedecentraliseerde elektriciteitsopwekking
- Sneloplaadbare Li/S batterij met hoge energiedichtheid
- SNG productie door middel van superkritische vergassing van biomassa
- Spherical continu variabele transmissie (CVT)
- Synergie tussen regionale planning en exergie (SREX)
- Thermochemische opslag van zonnwarmte
- Warmteterugwinning uit de totale afvalwarmtestroom van de woning

<sup>11</sup> EOS omvat ook nog 74 projecten in het kader van ‘demonstratie in de praktijk’ en 38 in het kader van ‘experiment en toepassing in de markt’ die hier niet zijn opgenomen (stand van zaken eind 2008), <http://www.senternovem.nl/eos/infotheek/projectencatalogus/index.asp>

- Verhoging warmteoverdracht van aardgasbranders met atmosferisch plasma
- Voor lichttransmissie geoptimaliseerd afdek materiaal voor zonnecollectoren
- Anorganische membranen voor chemische scheidingsprocessen
- Active Building Albedo Management (ABAM)
- Biobutanol: nieuw bioproces voor omzetting lignocellulose in CO<sub>2</sub>-neutrale transportbrandstoffen, energie en chemicaliën
- Een nieuw type membraan voor de PEM-brandstofcel
- Een nieuwe energiezuinige technologie voor de afvangst van CO<sub>2</sub> bij de elektriciteitsproductie
- Eloxidizer: Nieuw proces voor CO verwijdering ten behoeve van brandstofcellen
- E-lighter: batterij waarin brandstof in elektriciteit wordt omgezet
- Elektriciteitstransport per schip
- Een compleet nieuwe procestechnologie voor de chemische industrie
- Een mogelijk nieuwe oplossing voor teerproblemen bij vergassing van biomassa
- Een Perslucht-Warmte-Krachtinstallatie
- Een doorbraaktechnologie voor hogetemperatuurprocessen in de chemische industrie
- Duurzame projectontwikkeling gebaseerd op duurzaam bouwen, renoveren en wonen na 2015
- Emporium zonnewoning: energieberekening en bouwcomponenten (Wansdronk)
- Emissievrije trein - E-train
- Een snel productieproces voor microkristallijne zonnecellen
- Een nieuw anorganisch membraan voor pervaporatie op temperaturen tot 150 °C
- Energie besparen in de gebouwde omgeving met 'smart agents'
- Gecombineerde afvang van CO<sub>2</sub> en SO<sub>2</sub> uit rookgassen
- Gas aangedreven warmtepomp voor woningbouw: het Stirling - Rankine proces
- Fundamenteel onderzoek voor een nieuwe productietechnologie van zonnepanelen
- Foamglas superisolatie
- Exergetische Systeembenadering - voor efficiënte, mensvriendelijke en betaalbare inzet van energie in de gebouwde omgeving
- Ethanolproductie uit (ligno)cellulosehoudend materiaal
- Energiebesparing bij transport over de weg
- Energiebesparend destilleren met een Heat Integrated Distillation Column (HIDiC)
- Energiebesparing op macroschaal door energiezuinige gevelwarmtepompen
- GAIPHO 1 en 2: grootschalige productie van waterstof uit biobrandstoffen
- Energie-efficiënt scheiden van azeotropen
- Febatrans continue variabele transmissie
- Energie-efficiënte ammoniakproductie met keramische membranen
- Gepulste reformer (Universiteit Twente) - 2002
- Gelokaliseerde palladium nanoclusters voor waterstofzuivering
- Gekleurd silicium voor goedkope fotonische cellen
- Groene Methanol
- Groene zonnecollectoren
- Goedkope redox flow-systemen voor grootschalige elektriciteitsopslag
- Gira-Si! Feasibility Study: zuiveringsmethode van silicium voor zonnecellen
- MAGIC: Elektrisch geleidende folies voor flexibele zonnecellen
- Levensduurbepalende factoren van een PEM-brandstofcel
- Haalbaarheid zongedreven ammoniak AKM gaswarmtepomp voor de Nederlandse gebouwde omgeving
- KWO-BUS (Warmte Opslag in een vertakt distributie systeem)
- Lange termijn sorptie opslag via een damp in een dragermateriaal
- Kosteneffectief voorschakelen van een brandstofcel (Booster cell)
- Kwaliteit van de spanning in het toekomstige elektriciteitsnet

- Katalysatoren voor de CO<sub>2</sub>-vrije productie van energie met membraan- en sorbentreformers
- Innovatief venstersysteem met hoogrendement warmteabsorptie (A&F Innovations)
- Innovative chemical hydride based hydrogen storage for future energy supply systems
- Innovatief katalytisch verbrandingsproces zonder CO<sub>2</sub>-emissie
- Haalbaarheidsonderzoek Energetische Stedenbouw
- Kleinschalige electriciteitgenerator met hoog rendement: HRSolidPower
- Kleine compressor (haalbaarheidsonderzoek)
- Integrale benadering van ontwikkelingen in de energie-infrastructuur
- INNWIND: Nieuwe ontwerptools voor windturbines
- Industriële waterstofproductie met behulp van membraantechnologie
- Hybrideketel - Bouw, test en verbetering van een laboratorium-prototype
- HR oplossingspomp voor gasgestookte absorptiewarmtepompen
- Hydro-deoxygeneren van bio-olie voor de productie van hernieuwbare transportbrandstoffen
- Haalbaarheidsonderzoek: alternatieve (energiebesparende) processen voor productie van kalkzandsteen
- Hoogwaardige grondstoffen en producten uit lignine (LignoValue)
- HIGHPO-project: onderzoek nieuwe combinatie van materialen voor verhoging van energiedichtheid van herlaadbare batterijen
- Heliotec: zonne-energie met photovoltaïsche cellen en thermo-elektrische generator
- Haalbaarheidsonderzoek: productiemogelijkheden energiebesparende baksteen op basis van granietslib
- H2UV: onderzoek waterstof-atomen voor het opwekken van XUV-straling
- Haalbaarheidsonderzoek PV Wireless
- ICT voor intelligent netwerkmanagement
- Betere benutting lichtspectrum in zonnecellen door kwantumkniptechnologie met halfgeleiders
- Biobrandstofcel
- Bioethanol uit biosyngas
- Biomass to Green Gas (BioGG)
- Bio-Oil upgrading by reactive distillation using alcohol and a solid acid catalyst
- Bio-ethanol uit bietsuikerpulp: de pectine-uitdaging
- Atoomlaagdepositie van protectiecoatings op nanopoeiders in een wervelbedreactor ten behoeve van kathodematerialen voor Li-ionbatterijen
- Betaalbare technologie voor CO<sub>2</sub>-afvang
- Nieuwe elektriciteitscentrale
- Nieuwe droogcilinder voor papier (TRice) - 2003
- Nieuwe productieprocessen voor de chemische industrie op basis van microgolftechnologie
- Nieuwe lichtverstrooiingstechnieken voor dunnefilmzonnecellen
- Onderzoek naar de verhoging van het elektrisch rendement van stoomcycli
- Olivrije tweefasen ammoniak (water)compressor
- Ontkoling van rookgassen met een nieuw absorptieproces: DECAB
- Nieuwe kleinschalige opslagsystemen voor waterstof
- Nieuwe toekomst voor verbrandingsmotoren
- Op weg naar zeer goedkope zonnecellen
- Op weg naar goedkopere, betere en milieuvriendelijker dunnefilmzonnecellen
- Op weg naar concurrerende PEM-brandstofcellen
- Parabolamp: verbetering rendement van metaal-halogenide lampen
- Passieve koeling middels schakelbare isolatie
- Verbetering efficiency Proton Exchange Membrane Fuel Cells PEMFC
- Op zoek naar fundamentele kennis over dunnefilmzonnecellen van silicium
- Opwerking van slachtafval tot brandstof voor toepassing in stationaire dieselmotor
- Op zoek naar fundamenteel nieuwe koeltechnologieën

- Optimalisatie industriële warmtehuishouding via chemisorptieprocessen (OPTISORP)
- Ontwerprichtlijnen en managementtools voor een hoogrendement kolen/biomassacentrale
- Opslag van waterstof in bakpoeder
- Opslag waterstof als gashydraat
- Mee- en bijstoken van biomassa in elektriciteitscentrales
- Meerjarenprogramma Energie in Gebouwde Omgeving
- Milde sterilisatie van levensmiddelen met elektrische pulsen
- Methaanwinning uit grondwater om methaanemissie te voorkomen
- RIGOUREUS renoveren met integrale renovatieconcepten
- Self-Assembled Nanogestructureerde Elektrode voor de PEM-brandstofcel (SANE-PEMFC)
- SELOX katalytische ontzwaveling van H<sub>2</sub>S uit stort- en biogas
- Silicon-based superlattices with spectrum-selective absorbers (SELECT)
- NECST: Waterstof in brandweerbranche en verzekeringswezen
- Multi Temperature Single Circuit
- NECST: Bioenergie uit waterstof en methaan in Wageningen
- New hydride-forming materials: challenges towards a new generation of high energy density Nickel-MetalHydride batteries
- Nieuwe componenten en intelligente beheersystemen voor het elektriciteitsnet van de toekomst
- NECST: Verliesarme turbine
- NECST: Winnox-gasbrander voor gasturbines
- NECST: Lastafhankelijke ventilatie - Climarad
- NECST: Productie van Substitute Natural Gas (SNG), ofwel ‘groen aardgas’
- N-ergy, microbiologische coproductie van N-chemicals en ethanol uit biomassafracties
- NECST: Energiezuinig opslagsysteem voor warm tapwater met warmtepomp
- NECST: CO<sub>2</sub>-verwijdering uit lucht bij alkalische brandstofcel
- NECST: Compacte thermo-akoestische warmtepomp
- Mobiele thermische behandeling groenvoedergewassen
- NECST: Toepassing oliewater voor teerverwijdering uit biomassastookgas
- Zongedreven airconditioning met lucht gekoeld absorptiesysteem
- TORTECH - Torrefactie als sleuteltechnologie voor de productie van (vaste) brandstoffen uit biomassa en afval
- PV Suprise (metalen als licht-absorber)
- Proof of principle of free piston pulsed engine-generator
- Productie van waterstof uit biomassa door redoxreacties (HYDROX)
- PowerTEG - Ontwikkelen van een hoogrendement thermo-elektrische generator
- Powershift automated manual transmission=AMT: Efficiëntere automaat in auto's
- Planten maken stroom (proof of concept)
- Productie van zeer zuiver waterstof in een gefluidiseerd-bedreactor
- Reforming van koolwaterstoffen naar waterstof
- Productie waterstof door middel van biogekatalyseerde elektrolyse
- Rendementsverhoging van silicium zonnecellen
- Regels voor een betrouwbare en duurzame elektriciteitsproductie
- Redox flow accu met reversibele luchtelektrode
- Reverse Electro Dialysis (RED)-stack membranen voor energie uit zout en zoet water
- QD-PV, met downconversie naar een hoger zonnecelrendement
- Productie van ethanol en andere brandstofalcoholen uit organische zuren in plaats van suikers
- DeLight - licht als nieuwe energiedrager
- CS-PTO Onderzoeks- en Ontwikkelingsproject hulpinrichtingen op vrachtwagens
- Co-raffinage van biomassa in bestaande olieraffinaderijen
- Closed mixed medium cycle: microcentrale voor elektriciteits- en warmteproductie

- Directe methanisering van biomassa in superkritiek water voor de productie van SNG/CNG
- Desolventisen (oplosmiddelverwijdering) met oververhitte oplosmiddeldamp
- Blue Energy fase 1: ionenwisselende membranen (zoet en zout water)
- Dunnefilmzonnecellen op rollen goedkoop plastic of papier
- Constant speed power take-off (CS-PTO) nieuwe CVT-concepten
- Directe injectie vloeibare en gasvormige gassen.

Verder zijn er nog een negental projecten op het gebied van onderzoek en ontwikkeling:

- Vergaande zuivering van aardgas als grondstof voor LNG en waterstofgas
- Warmtekracht op basis van een PEM-brandstofcel voor de utiliteitsbouw
- Een intelligent systeem voor energiebeheer in de gebouwde omgeving
- Een diesel-elektrische generator die ruim 40 procent zuiniger is
- Energie uit het potentiaalverschil tussen zout en zoet water
- Licht op Groen: openbare verlichting op basis van leds
- Halvering van de kostprijs van zonnecellen van kristallijn silicium
- Bio-ethanol uit het schroot van graangewassen
- Prefab elementen voor laagtemperatuurverwarming.

## Bijlage C Drie uitgewerkte technologie sheets

Een drietal veelbelovende technieken zijn in deze bijlage in factsheets nader uitgewerkt. Zaken die in de factsheets aan de orde komen zijn:

- Naam.
- Relevante branches.
- Richt de technologie zich op voor of na 2020.
- Principe en beschrijving van de techniek met waar mogelijk illustraties.
- Huidige status technologie (Fundamenteel onderzoek, Labexperimenten, Toegepast (zo jaar waar) onderzoek of Pilot, Demo, of Marktintroductie).
- De verwachte technische prestaties en vooruitzichten (indien relevant referentie technologie waar deze mee vergeleken kan worden).
- Voor- en nadelen (incl. milieu-informatie).
- Economische informatie (indien beschikbaar), ook gevoeligheid voor bijvoorbeeld energieprijzen.
- Knelpunten en onzekerheden.
- Niet technische aspecten. Omgevingsfactoren, Barrières Ontwikkeltraject.
- Wie zijn er mee bezig (actoren).
- Referenties.

Technologieontwikkeling is geen Nederlandse of Europese zaak, maar vindt op wereldschaal plaats. Van belang is dus niet alleen te weten welke technologie perspectiefrijk is, maar wie daar in de zin van ontwikkeling, demonstratie of toepassing mee bezig is. Relevant is hierbij ook of hier ook overheden bij betrokken zijn. Via wederzijdse contacten vanuit Nederland met buitenlandse betrokkenen kan dan de toepassing in Nederland versneld of bevorderd worden. Vandaar dat dit ook als apart onderdeel op de sheet is opgenomen

### C.1 Factsheet SCR-installaties voor NO<sub>x</sub>-verwijdering

#### *Naam*

In deze bijlage wordt de Selectieve katalytische reductie (SCR) installatie voor NO<sub>x</sub>-verwijdering door reactie met aanwezige methaan of synthese gas, eventueel met een nageschakelde methaan katalysator, nader beschreven. Het gebruik van methaan (CH<sub>4</sub>) voor NO<sub>x</sub>-verwijdering heeft als voordeel dat de uitstoot van methaan afneemt en dat geen reductiemiddel als ammoniak (NH<sub>3</sub>) hoeft worden toegevoegd. Specifiek wordt ingegaan op de ontwikkelingen bij ECN in de periode 2002-2006 en de samenwerking en kennisontwikkeling in 2004 en 2005 met Gasunie Engineering & Technologie (Pieterse, 2002, 2004a, 2004b, 2006, 2007).

#### *Relevante branches*

- Gasmotoren, toegepast voor warmte krachtinstallaties (WKK) zowel in de gebouwde omgeving als in de glastuinbouw, door energiebedrijven en particulieren. Hier wordt energie omgezet in warmte en elektriciteit. Typisch wordt met een dergelijke WKK zo'n 25% energie bespaard ten opzichte van gescheiden opwekking, terwijl in de glastuinbouw ook de CO<sub>2</sub> nuttig wordt ingezet voor het 'bemesten' van planten.
- De groeiende markt van aardgasvoertuigen en vaartuigen.
- Recent bestaat er ook interesse bij energieleveranciers; elektriciteitscentrales die NH<sub>3</sub>-SCR gebruiken of hiervoor in aanmerking komen bestuderen de mogelijkheid methaan (de voornaamste component van aardgas) of synthese gas (CO+H<sub>2</sub>; bijvoorbeeld gemaakt uit onvolledige verbranding methaan ofwel aardgas) te gebruiken voor reductie van NO<sub>x</sub>.

### *Richt de technologie zich op voor of na 2020*

De verwachting is dat methaan-SCR, methaanverbrandingskatalyse en syngas-SCR van NO<sub>x</sub> voor 2020 rijp voor marktintroductie zijn, mits op korte termijn onderzoek ter optimalisatie van de technologieën wordt geïnitieerd.

### *Principe en beschrijving van de techniek met waar mogelijk illustraties.*

De ontwikkeling van methaan/syngas -SCR-katalysatoren richt zich op een katalysator die al bij relatief lage temperaturen NO<sub>x</sub> verwijdert (NO<sub>x</sub> wordt omgezet in N<sub>2</sub>) met behulp van de eveneens in het rookgas aanwezige koolwaterstoffen. Dit kan voornamelijk methaan zijn maar ook (geïnjecteerd) synthese gas. In het geval van gasmotoren vindt er gelijktijdige verwijdering van NO<sub>x</sub> én CH<sub>4</sub>, maar ook van andere koolwaterstoffen, aldehyden en CO, plaats zonder toevoeging van de hulpstoffen ureum of ammoniak. De kracht van het concept is de eenvoud: een hoogwaardige katalysator pakt alle relevante ongewenste stoffen in het gasmotorrookgas aan zonder verdere hulpbronnen en appendages. De benodigde energie voor de katalyse wordt gehaald uit het rookgas. De temperatuur (en samenstelling) van het rookgas op de betreffende locatie bepaald of het raadzaam is synthese gas of methaan als reductiemiddel voor NO<sub>x</sub> te gebruiken. Activering van methaan vergt een rookgastemperatuur die hoger is dan 350 °C terwijl synthese gas juist al bij temperaturen vanaf 150 °C als reductiemiddel werkzaam is. Uiteraard heeft (het 'geslipte'<sup>12</sup>) methaan sterk de voorkeur voor NO<sub>x</sub> verwijdering bij de gangbare 350-500 °C uitlaatgas temperatuur van gasmotoren.

Als belangrijke motivatie geldt de vervanging van de nu gebruikelijke hulpstoffen ammoniak/ureum in SCR-katalysatoren door onschadelijke en goedkope koolwaterstoffen. De voorgestelde ontwikkeling van methaan/syngas-SCR-katalysatoren voor rookgasreiniging bij gasmotoren is een spin-off van de eerdere succesvolle ontwikkeling door ECN van HC-SCR-technologie (inclusief directe decompositie) voor bestrijding van het broeikasgas N<sub>2</sub>O in de salpeterindustrie.

Samenvattend combineren de methaan/syngas-SCR-katalysatoren dus een aantal zeer aantrekkelijke eigenschappen:

- Gelijktijdige verwijdering van NO<sub>x</sub>, CH<sub>4</sub>, CO, aldehyden en andere koolwaterstoffen, bij gebruik in gasmotoren.
- Geen hulpstoffen zoals ureum/ammoniak en bijbehorende appendages nodig, bij gebruik in gasmotoren.
- Eenvoudige (retro-fit) installatie: alleen een katalysator plaatsen (geen opslag voor een ureumoplossing en injectiesysteem nodig).
- Robuust principe: geen storingsgevoelige appendages of besturingssystemen.
- De selectiviteit van het SCR-proces voor CH<sub>4</sub> beschermt de katalysator impliciet tegen thermische schade ten gevolge van beperkte misfiring.
- Brede en wereldwijde toepasbaarheid: bij stationaire gasmotoren maar ook in (de snel groeiende markt van) aardgasvoertuigen en vaartuigen en mogelijk ook bij dieselmotoren en elektriciteitscentrales, kolenvergassers en afvalverbrandingsinstallaties.
- Gunstige marktprijs op basis van eenvoud, groot marktpotentieel en relatief goedkope katalysatoren.

Deze katalysatoren ontdoen gasmotor-WKK wellicht van de toenemende beperkingen van aantrekkende emissielimieten. Gasmotor-WKK kan zo haar grote bijdrage aan de besparing van primaire energie en de vermindering van CO<sub>2</sub>-uitstoot blijven leveren.

---

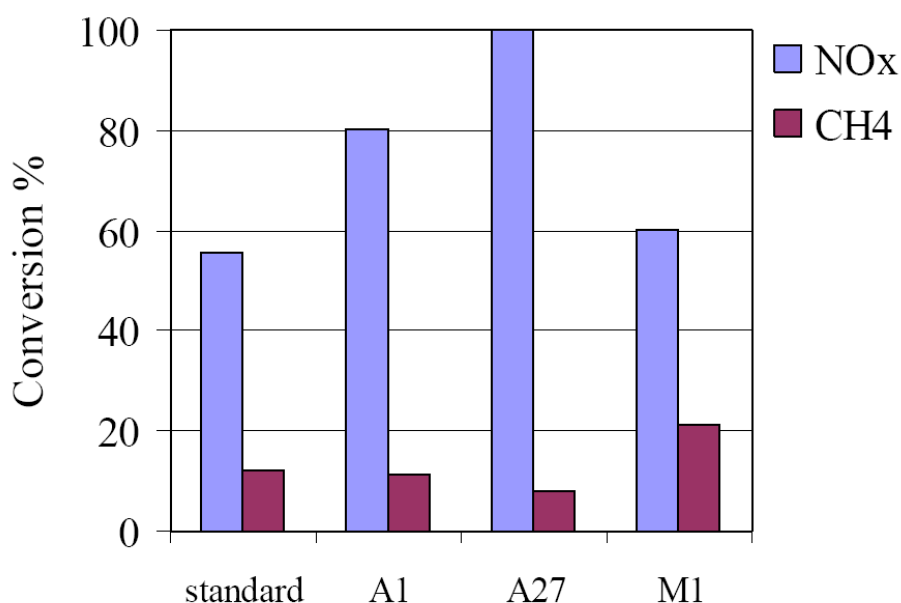
<sup>12</sup> Een deel van het aardgas waarop de gasmotor werkt, blijkt als onverbrand methaan in het uitlaatgas terecht te komen. Bij sommige gasmotoren kan dit wel om 2% of meer van de gebruikte brandstof gaan.

### Huidige status technologie

ECN werkte enkele jaren aan de ontwikkeling van een katalysator die bij relatief lage temperatuur  $\text{NO}_x$  kan verwijderen met methaan en synthese gas als reductant. Figuur C.1 geeft de  $\text{NO}_x$  en  $\text{CH}_4$ -omzetting bij 385 °C met een ECN-katalysator<sup>13</sup> in synthetisch rookgas afgestemd op veelvoorkomende rookgassenstellingen van verschillende gasmotoren in Nederland, zie Tabel C.1. De aanduiding A1, AS27 en M1 staan voor verschillende groepen gasmotoren en afstellingen die in Nederland gebruikt worden (Laat, 2001). Deze condities zijn vergeleken met een model rookgassenstelling (standaard). De ECN katalysatoren blijken te functioneren met wisselende rookgassenstelling en reeds bij relatief lage rookgastemperaturen (Pieterse, 2004).

Tabel C.1 Hoofdbestanddelen rookgas van verschillende gasmotoren in Nederland

Gasmotoren	standaard	A1	A27	M1
$\text{NO}_x^*$ (ppm)	500	239	117	234
$\text{CH}_4$ (ppm)	2500	1713	2259	881
$\text{H}_2\text{O}$ (vol.%)	5	10.9	10.6	12.8
$\text{O}_2$ (vol.%)	5	8.5	8.8	6.4
$\text{CO}_2$ (vol%)	0	5.7	5.6	6.7

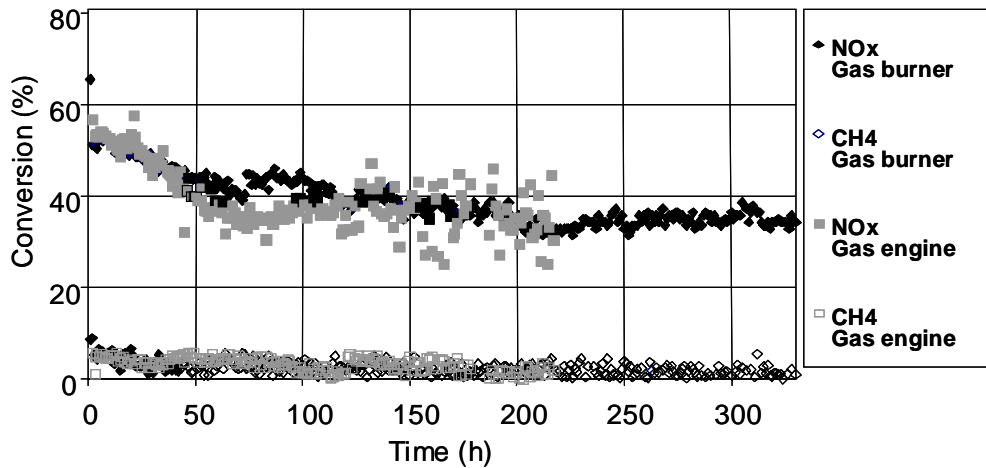


Figuur C.1 Verwijderingsefficiëncy bij diverse gassenstellingen van  $\text{NO}_x$  en methaan<sup>12</sup>

Samen met projectpartner Gasunie Research heeft ECN de stabiliteit van een katalysator in een zijstroom van 'echt' rookgas van gasmotoren (en een gasbrander) getest. Het belangrijkste resultaat is weergegeven in Figuur C.2. Gedurende enkele tientallen uren neemt de verwijderingsefficiëncy langzaam af. De oorzaak is de inwerking van zwavel op de katalysator afkomstig uit het aardgas en uit smeermiddel. Na deze periode wordt een stabiele verwijderingsefficiëncy waargenomen. De conversie van methaan is laag:  $\text{NO}_x$  wordt voor een belangrijk deel omgezet door hogere koolwaterstoffen (en mogelijk aldehyden en CO: allen worden ook volledig verwijderd).

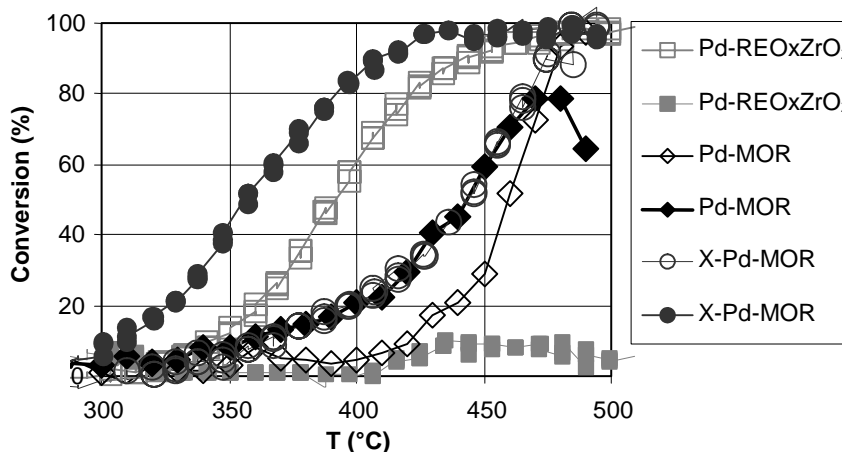
<sup>13</sup> Reactie met een promotor-metaal-zeoliet bij  $T_{\text{kat}}=385$  °C, W/F 4 mg/(ml/s) (W/F is het katalysator gewicht gedeeld door het passerende gasvolume).





Figuur C.2 Verwijderingsgraad als functie van de tijd bij een gasmotor en een gasbrander<sup>14</sup>

Indien hogere bedrijfstemperaturen behaald kunnen worden, zoals bij gasmotoren met een hoger vermogen het geval zal zijn, is de verwachting dat de verwijderingsefficiëncies van NO<sub>x</sub> en methaan sterk toe zullen nemen. Dit is geïllustreerd in Figuur C.3: de NO<sub>x</sub> en methaan conversie wordt weergegeven als functie van temperatuur. Hieruit volgt tevens dat de zeoliet MOR gebaseerde Pd katalysatoren een veel hogere NO<sub>x</sub>-conversie bewerkstelligen dan de zirconia gedragen Pd katalysator. De zirconia gedragen katalysator functioneert in het synthetische rookgas als een methaan verbrandingskatalysator: de methaan verwijderingsefficiëntie is hoog.



Figuur C.3 Temperatureffect op verwijderingsgraad NO<sub>x</sub> (gesloten symbolen) en methaan<sup>15</sup>

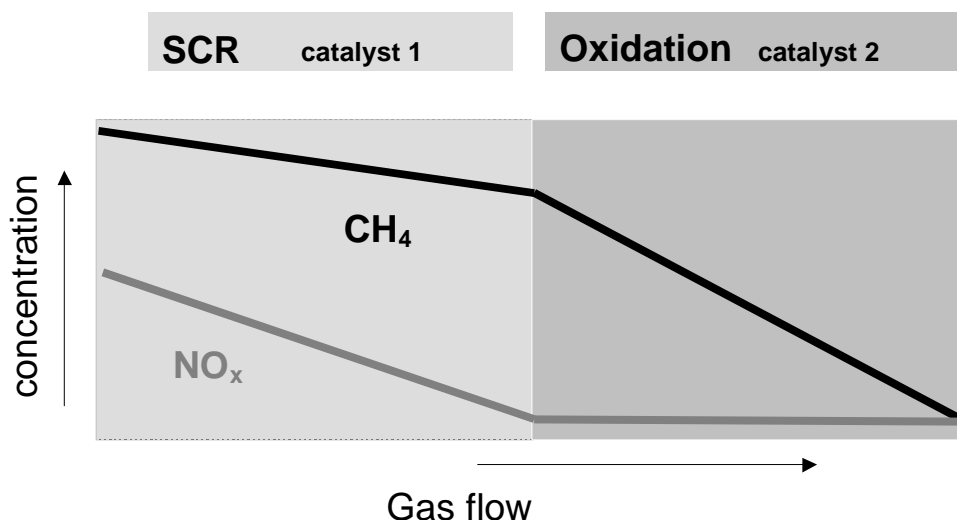
De methaan verwijderingsefficiëntie blijft ver achter bij de NO<sub>x</sub>-verwijderingsefficiëntie met de zeoliet gedragen methaan-SCR katalysatoren: selectieve katalysatoren voor SCR van NO<sub>x</sub> met methaan zijn doorgaans veel minder goed in het verbranden van methaan (met de surplus zuurstof in het rookgas). Immers, de reactiestoichiometrie van SCR voorspelt ook dat voor elk molecuul NO<sub>x</sub> dat reageert met methaan slechts een half molecuul methaan wordt omgezet. Gemiddeld emitteren aardgasmotoren 2% van het gasverbruik als onverbrande methaan. Dit levert een zodanige emissie aan broeikasgassen op<sup>16</sup>, dat de CO<sub>2</sub>-winst van gasmotoren in WKK-installaties halveert. Een hogere verwijderingsgraad van methaan is daarom wenselijk. Een mo-

<sup>14</sup> Reactie met een promotor-metaal-zeoliet bij  $T_{kat}$  ca. 385 °C versus uren in bedrijf: gasmotor (5KWe) en gasbrander (30KWe), 800 ppm methaan, 180 ppm NO<sub>x</sub>, 12 vol% H<sub>2</sub>O, 8 vol% O<sub>2</sub>, 60 ppm koolwaterstof (>C1), 9 ppm CO, 1 ppm SO<sub>2</sub>. W/F 12 mg/(ml/s).

<sup>15</sup> Omstandigheden: 500 ppm NO<sub>x</sub>, 2500 ppm CH<sub>4</sub>, 5% O<sub>2</sub>, 5% H<sub>2</sub>O, W/F 4 mg/(ml/s).

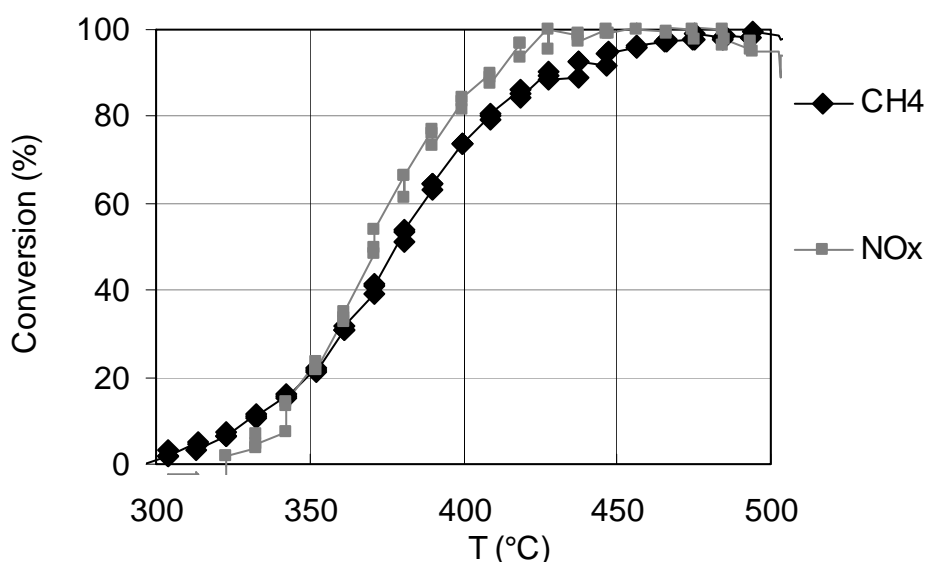
<sup>16</sup> Methaan is een veel sterker broeikasgas dan CO<sub>2</sub>.

gelijkheid om zowel  $\text{NO}_x$  als n methaan volledig om te zetten is weergegeven met het schema in Figuur C.4.



Figuur C.4 Methaan-SCR en methaanverbranding geplaatst in een seriele configuratie

Hiertoe wordt een (zeoliet) gebaseerde methaan-SCR katalysator in serie geplaatst met een methaan verbrandingskatalysator. Een beperkte hoeveelheid methaan zet de  $\text{NO}_x$  om in  $\text{N}_2$  met behulp van katalysator 1 en het resterende methaan wordt vervolgens verbrandt door katalysator 2. Het principe is getest en het resultaat is weergegeven in Figuur C.5. Zonder optimalisatie van de methaanverbrandingskatalysator worden zeer hoge verwijderingsefficiencies behaald. Beneden een temperatuur van ca.  $425\text{ }^\circ\text{C}$  is de verwijderingsefficiency verder te verhogen door een hogere W/F ratio (verhoging hoeveelheid katalysator). De methaan verbrandingskatalysator kan natuurlijk ook los van de methaan-SCR worden gebruikt.



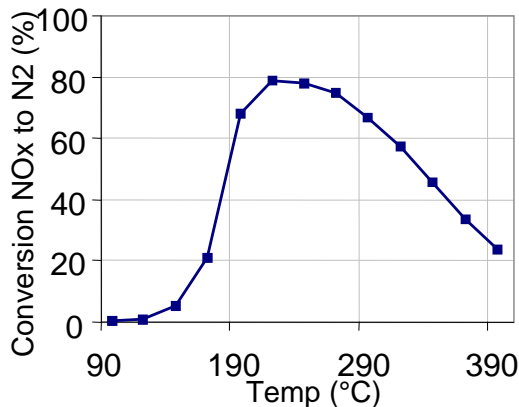
Figuur C.5 Hoge verwijdering door SCR en verbrandingskatalysator geplaatst in serie<sup>17</sup>

Hogere rookgastemperaturen verhogen de verwijderingsefficiencies en verkleinen het benodigde katalysatorvolume. Katalysator-deactivering wordt bij hogere temperaturen echter een probleem. Katalysator-deactivering bij hogere temperaturen moet daarom onderdeel zijn van een

<sup>17</sup> Condities: 500 ppm  $\text{NO}_x$ , 2500 ppm  $\text{CH}_4$ , 5%  $\text{O}_2$ , 5%  $\text{H}_2\text{O}$ ; W/F 3.5 mg/(ml/s).

eventueel vervolgonderzoek. Beperkt onderzoek bij ECN op dit onderwerp heeft al geleid tot aanwijzingen voor optimalisatie van de thermische stabiliteit van de katalysatoren.

Selectieve reductie van  $\text{NO}_x$  met Synthese gas wordt juist bij voorkeur bij lage temperatuur bedreven, bijvoorbeeld tussen 150 en 300 °C. Bij hogere temperaturen wordt het synthese gas namelijk volledig verbrandt zodat de SCR reactie niet kan verlopen. ECN heeft zeolietgedragen katalysatoren ontwikkelt die een hoge  $\text{NO}_x$ -verwijderingsefficiency hebben en geen waterstof en CO slip geven. Een voorbeeld van een resultaat is weergegeven in Figuur C.6. De katalysator in Figuur C.6 bevat minder dan 0.1 wt% palladium. Verdere verhoging van de  $\text{NO}_x$ -conversie van 80% in deze figuur naar 90+% is ook mogelijk.



Figuur C.6 Bij syngas neemt door hogere temperatuur op  $\text{NO}_x$ -verwijdering af<sup>18</sup>

#### *De verwachte technische prestaties en vooruitzichten*

De technische verwachting zijn hiervoor al in kaart gebracht. Een referentie/benchmark technologie is  $\text{NH}_3$ -SCR installatie met een gecombineerde oxidatiekatalysator voor gecombineerde  $\text{NO}_x$ , CO, etheen, enz..-verwijdering. Dus van ong. 140 g  $\text{NO}_x$ /GJ nu naar minus 80% is ong. 30 g/GJ end of-pipe. De absolute  $\text{NO}_x$ -reductie is dan gelijk voor de beide technologieën, blijft over wat het dan kost en hoe milieubelastend de technologieën zijn: methaan-SCR zal dan naar verwachting goedkoper uitvallen vanwege het ontbreken van de  $\text{NH}_3$ -voorzieningen en de dure oxidatiekatalysator (edelmetaal). De productiekosten van een methaan-SCR katalysator versus standaard-SCR katalysator zullen van dezelfde orde van grootte zijn. Bovendien vraagt de standaard-SCR een extra zware oxidatiekatalysator als ook significant  $\text{CH}_4$  verwijderd moet worden.  $\text{NH}_3$  is corrosief en belastend voor mens en milieu.

#### *Voor- en nadelen (incl. milieu-informatie)*

Actueel is de herziening van (de  $\text{NO}_x$ -emissie-eis in) voor gasmotoren in het BEES (staat nu op 140 g  $\text{NO}_x$ /GJ). Een concept hiervan met een aanscherping naar 30g/GJ is eind 2008 gepubliceerd (hierin wordt ook over beperking van de uitstoot van koolwaterstoffen, vooral methaan, van gasmotoren gesproken). Een forse aanscherping van de  $\text{NO}_x$  -emissie-eis voor gasmotoren is dus te verwachten. Dit is echter niet haalbaar zonder verlies aan motorprestaties dan wel inzet van dure rookgasreinigers; beide opties drukken zwaar op de rentabiliteit.

Naast  $\text{NO}_x$  is er zoals aangegeven op termijn ook emissiewetgeving inzake de  $\text{CH}_4$ -uitstoot door gasmotor-WKK te verwachten. En nu al is er een combi-eis voor de  $\text{NO}_x$  - en  $\text{CH}_4$ -emissie in de Groen-Label-Kas subsidie. Een sterk punt van het gepresenteerde concept voor  $\text{NO}_x$  en methaan reductie bij gasmotoren is dat het een 'kale katalysator' betreft zonder enige verdere hulpapparatuur, hulpstoffen of hulpenergie. Samenvattend zijn de voordelen:

- Gelijktijdige verwijdering van  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CH}_4$ , CO, aldehyden en andere koolwaterstoffen.

<sup>18</sup> Conditities: 1%  $\text{H}_2$ , 0.3% CO and 5%  $\text{O}_2$ , 10%  $\text{H}_2\text{O}$ ; W/F 6 mg/(ml/s)

- Geen hulpstoffen zoals ureum/ammoniak en bijbehorende appendages nodig.
- Geen kans op NH<sub>3</sub> slip: NH<sub>3</sub> slip is ongewenst want gevaarlijk en belastend voor het milieu.
- Eenvoudige (retro-fit) installatie: alleen een katalysator.
- Robuust principe: geen storingsgevoelige appendages of besturingssystemen.
- Brede en wereldwijde toepasbaarheid: bij stationaire gasmotoren maar ook in (de snel groeiende markt van) aardgasvoer- en vaartuigen en mogelijk ook bij dieselmotoren.
- Gunstige marktprijs op basis van eenvoud, groot marktpotentieel en relatief goedkope katalysatormaterialen.
- Uitkleden tot CH<sub>4</sub>-only katalysator mogelijk.
- Omvorming tot synthese gas - SCR katalysator mogelijk.
- Geen elektrische hulpenergie. Een concept van enkele Amerikaanse (en een Nederlandse) partijen betreft plasmatechnologie. Het nadeel van plasma is dat het al gauw minimaal 1% tot 1,5% van de elektrische output van de WKK-set consumeert. Dit betekent ook een verlaging van het elektrische rendement van de WKK-set met hetzelfde (relatieve) percentage.

Nadelen zijn:

- Het ECN-systeem is nog niet uitontwikkeld en er is bij onderzoek geen 100% zekerheid dat uiteindelijk een concurrerend product ontwikkeld wordt.
- Enkele jaren onderzoeksinvestering wenselijk ter optimalisatie van de katalysatoren voor wat betreft de thermische stabiliteit, verdere verhoging van de activiteit van de katalysatoren en optimalisatie van de methaan verbrandingskatalysator. Wenselijk is dat de optimalisatie inspanning zich ook richt op een minimalisatie van gebruikte edelmetalen in katalysator design, ofwel kostenefficiëntie.
- Onderzoek biedt geen zekerheid op succes.

#### *Economische informatie (indien beschikbaar), ook gevoeligheid voor bijvoorbeeld energieprijzen*

Hoewel complex qua ontwikkeling bieden de productiekosten van dergelijke zeoliet gedragen katalysatoren reëel uitzicht op acceptabele marktprijzen. Dit laatste wordt versterkt door het grote wereldwijde marktpotentieel inclusief de mogelijke toepassing in de snelgroeiende markt van aardgasvoertuigen en vaartuigen. Een lage-temperatuur-versie zou bovendien ook toepassing bij dieselmotoren mogelijk maken. Een lage-temperatuur-versie is tevens bruikbaar met synthese gas en interessant voor elektriciteitscentrales, kolenvergassers en afvalverbranders. Al met al wordt een omvangrijke afname markt voor deze materialen verwacht.

#### *Knelpunten en onzekerheden*

Enkele jaren onderzoeksinvestering is wenselijk ter optimalisatie van de katalysatoren voor wat betreft de thermische stabiliteit, verdere verhoging van de activiteit van de katalysatoren en optimalisatie van de methaan verbrandingskatalysator. Wenselijk is dat de optimalisatie inspanning zich ook richt op een minimalisatie van gebruikte edelmetalen in katalysator design, ofwel kostenefficiëntie. Onderzoek biedt geen garantie op succes. Belangrijk is het om te vermelden dat ook een deelresultaat al marktkansen heeft. Indien het onderzoek leidt tot een tot een CH<sub>4</sub>-only katalysator of een synthese gas - SCR katalysator is er al een duidelijk marktpotentieel.

#### *Niet technische aspecten. Omgevingsfactoren, Barrières Ontwikkeltraject*

Introductie van vernieuwende technologie staat of valt ook met de publieke acceptatie van de technologie. Vooral nog lijkt dit geen probleem te zijn. De energiekosten zullen niet significant hoger gaan uitvallen (relatief ten opzichte van andere maatregelen voor verlaging emissies) en de hier voorgestelde technologie leidt niet tot mogelijk onveilige situaties voor mens en omgeving.

#### *Wie zijn er mee bezig (actoren)*

- Hamon, C., Le Lamer O., Orio, N., US6063351, assigned to Gaz de France (methaan-SCR).
- Pieterse, J.A.Z., R.W. van den Brink, WO2004009220, assigned to ECN.

- Costa C.N., Efstathiou, A.M. (2004) ‘Transient Isotopic Kinetic Study of the NO/H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> Lean de-NO<sub>x</sub> Reaction on Pt/SiO<sub>2</sub> and Pt/La-Ce-Mn-O Catalysts’, J. Phys. Chem. B 108 (2004) 2620-2630 (2004). (syngas SCR).
- Knook Energy Solutions International BV (methaan verbrandingskatalysator).
- TNO (methaan-SCR met plasma technologie).

## C.2 Factsheet Oxy-fuel verbranding (verbranden met zuurstof)

### *Inleiding*

Oxy-fuel verbranding (verbranden met zuurstof) is een techniek die zich in het algemeen in het stadium van onderzoek, ontwikkeling en demonstratie (RD&D) bevindt. De techniek wordt al toegepast in de ijzer- en staalindustrie (hoogovens) en in de glasindustrie, maar niet met het oogmerk om CO<sub>2</sub> af te vangen en op te slaan (Carbon Capture and Storage, CCS). Bij glasproductie wordt oxy-fuel verbrandingstechnologie toegepast om hoge vlamtemperaturen te bereiken. Op deze wijze wordt in de glasindustrie een grote reductie van de NO<sub>x</sub>-emissie bereikt. Deze toepassing, naast die in de aluminiumindustrie en de ijzer- en staalindustrie, moet worden beschouwd als een element in de ontwikkeling van oxy-fuel verbranding gericht op CO<sub>2</sub>-afvang, -transport en -opslag.

Allereerst wordt in deze bijlage ingegaan op de technische karakteristieken van oxy-fuel verbranding voor CO<sub>2</sub>-afvang en -opslag bij (voornamelijk) poederkoolgestookte centrales. Daarna wordt stil gestaan bij het proces van demonstratie en commercialisering.

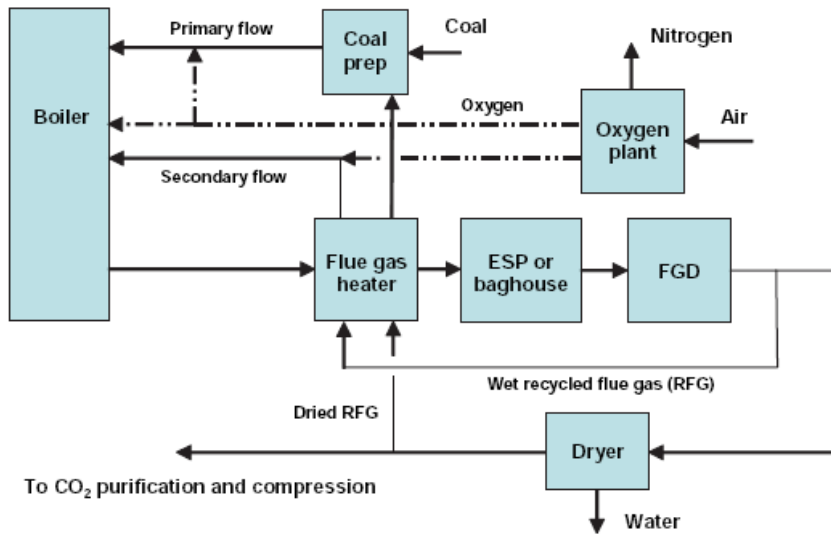
### *Technische karakteristieken*

Oxy-fuel verbranding (verbranden met zuurstof) is een van de opties om CO<sub>2</sub> af te vangen en op te slaan bij kolengestookte elektriciteitsopwekking. Toepassing is ook mogelijk bij gasgestookte elektriciteitsopwekking, maar leidt dan tot relatief hoge kosten per afgevangen ton CO<sub>2</sub>. Om die reden wordt oxy-fuel in combinatie met gasgestookte elektriciteitsopwekking alleen overwogen als de afgevangen CO<sub>2</sub> kan worden gebruikt voor ‘CO<sub>2</sub> Enhanced Gas Recovery’ (CEGR), bijvoorbeeld bij betrekkelijk kleine gasvelden die nog een resterende hoeveelheid gas bevatten.

Andere opties om CO<sub>2</sub> af te vangen bij kolengestookte centrales zijn ‘post-combustion’ op basis van een chemisch proces voor CO<sub>2</sub>-afscheiding bijvoorbeeld op basis van amines (MEA) of ‘chilled ammonia’, ontwikkeld door Alstom, EPRI (Electric Power Research Institute, VS), en Statoil (Aubertin, 2008; Rudy and Black, 2007), en ‘pre-combustion’ d.m.v. kolenvergassing STEG (Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC). Beide alternatieven bevinden zich ook in de stadia van onderzoek, ontwikkeling en demonstratie.

Bij oxy-fuel verbranding in combinatie met kolengestookte elektriciteitsopwekking vindt verbranding plaats in een aangepaste ketel met behulp van zuurstof. Om de verbrandingstemperatuur te beheersen, wordt rookgas gerecirculeerd (Figuur C.7). De techniek kan worden toegepast bij elektriciteitsopwekking met een poederkoolcentrale of een wervelbed verbrandingsinstallatie (Circulating Fluidised Bed Combustion, CFBC). De techniek leent zich zowel voor ‘retrofitting’ van bestaande kolengestookte centrales als voor nieuwbouw.

Verbranding met alleen zuivere zuurstof zou tot dusdanig hoge verbrandingstemperaturen leiden dat bestaande materialen gebruikt voor kolenketels hier niet tegen bestand zijn. Daarom wordt de zuurstof verdund met een slipstream van gerecirculeerd rookgas. De recirculatie kan gecombineerd worden met drogen en ontzwaveling (Flue Gas Desulphurisation, FGD). Het resultaat is dat het resterende rookgas (minus de slipstream) voornamelijk bestaat uit CO<sub>2</sub> en waterdamp (met sporen van stikstof, zuurstof en verontreinigingen). Na condensatie van de waterdamp wordt deze stroom van voornamelijk CO<sub>2</sub> gecompriëerd en gereinigd, waarna een zuivere CO<sub>2</sub>-stroom resteert die (na verdere compressie) als superkritische vloeistof kan worden getransporteerd en opgeslagen (geologische opberging in bijvoorbeeld aquifers, lege gasvelden).



Figuur C.7 *Generiek schema oxy-fuel verbranding*  
Bron: EPRI, 2008.

Oxy-fuel verbranding wordt in bench-scale en pilot installaties ontwikkeld door ketelbouwers - Alstom, Babcock & Wilcox (B&W), Doosan Babcock Energy (UK), Foster Wheeler, enz. - en andere partijen. De technologie (Figuur C.8) bevindt zich in het pilot stadium, zoals blijkt uit de installaties die thans zijn of worden gebouwd (Farzan et al 2007; Beasley, 2008; Farley, 2008):

- Een 30 MW<sub>th</sub> oxy-fuel testinstallatie bij de Clean Environment Development Facility (CEDF) voor CO<sub>2</sub>-afvang en -opslag van Babcock & Wilcox in Alliance, Ohio, V.S.
- Een 30 MW<sub>th</sub> oxy-fuel installatie van Alstom bij een bruinkoolcentrale van Vattenfall te Schwarze Pumpe, Duitsland, met een investering van € 80 miljoen, die in september 2008 in gebruik is genomen (Schimkat, 2007; [www.vattenfall.com/](http://www.vattenfall.com/)).
- Retrofitting van een 30 MW<sub>e</sub> kolengestookte centrale (unit 4, Callide A) van CS Energy in Queensland, Australië (Australisch/Japans project) met oxy-fuel verbranding - Figuur C.9 - met een totale investering van A\$ 200 miljoen (Australische dollars). De installatie voor luchtscheiding (98% O<sub>2</sub>) heeft een capaciteit van 660 t O<sub>2</sub>/dag ([www.csenergy.com.au/](http://www.csenergy.com.au/)).

#### O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> recycle (oxyfuel) combustion capture

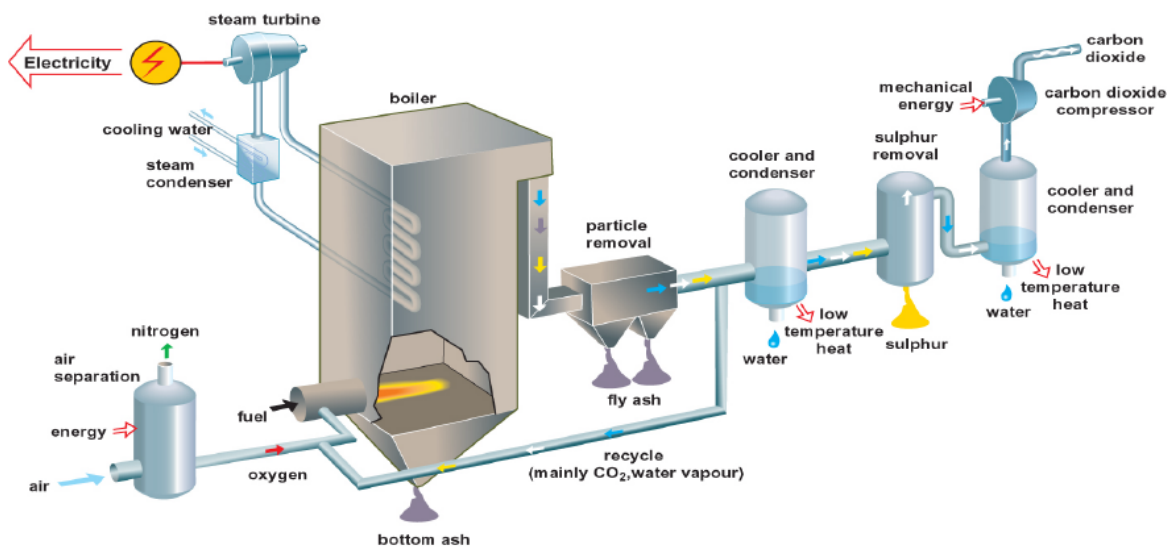


Figure courtesy of Vattenfall

Figuur C.8 *Schema oxy-fuel verbranding (Doosan Babcock Energy)*  
Bron: Farley, 2008.

Task	Calendar Year	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
<b>Stage 1 - Boiler refurb/retrofit</b>												
Project development		█										
Finalisation of contracts			█									
Site preparation				█								
Unit 4 refurbishment				█								
Operation in Air-firing Mode				█								
Site Construction of Oxyfuel retrofit/ASU/CPU					█	█	█	█	█	█		
Operation in Oxy-firing Mode							█	█	█	█		
<b>Stage 2 - Geological storage</b>												
Pre characterisation work - Data audits etc			█									
Site characterisation, well design and construction				█	█							
Field CO2 Injection works Construction					█	█	█	█	█			
Injection & monitoring							█	█	█	█		
<b>Stage 3 - Project conclusion</b>												
Post monitoring & rehabilitation + Commercialisation.										█	█	

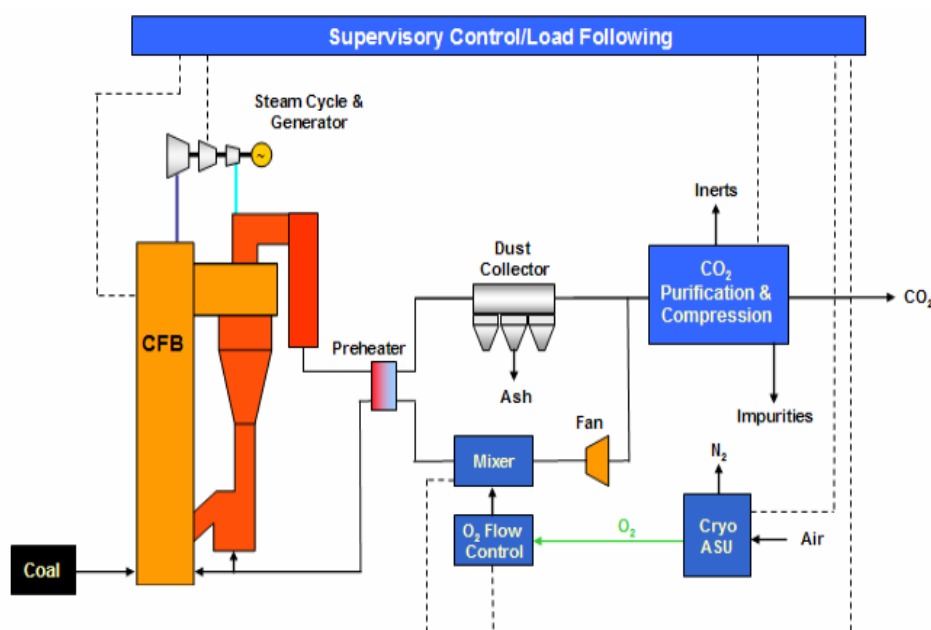
Figuur C.9 Projectschema oxy-fuel project CS Energy (Queensland)

Bron: Beasley, 2008.

Als oxy-fuel verbranding wordt gecombineerd met wervelbed verbranding op basis van kolen vinden de volgende modificaties plaats ten opzichte van poederkoolverbranding:

- Omdat zwavel onder toevoeging van kalksteen in het wervelbed (Circulating Fluidised Bed) wordt omgezet in  $\text{SO}_2$ , is geen aparte rookgasontzwaveling nodig. De resterende  $\text{SO}_2$  wordt (met  $\text{CO}_2$ ) verwijderd in een cryogene zuiveringstrap.
- Injectie van ammoniak voor  $\text{NO}_x$  reductie kan achterwege blijven, omdat de  $\text{NO}_x$  (met de resterende  $\text{SO}_2$ ) wordt verwijderd in de cryogene zuiveringstrap.
- De keteltemperatuur kan worden geregeld door circulerende vaste stoffen te koelen en door de hoeveelheid recirculerend rookgas aan te passen. Doordat er minder gas door de ketel stroomt dan bij verbranding met lucht kan de ketel kleiner worden ontworpen, wat besparingen op investeringskosten en de onderhoudskosten met zich meebrengt.

Figuur C.10 geeft een schema van oxy-fuel bij wervelbed verbranding (<http://mydocs.epri.com>).

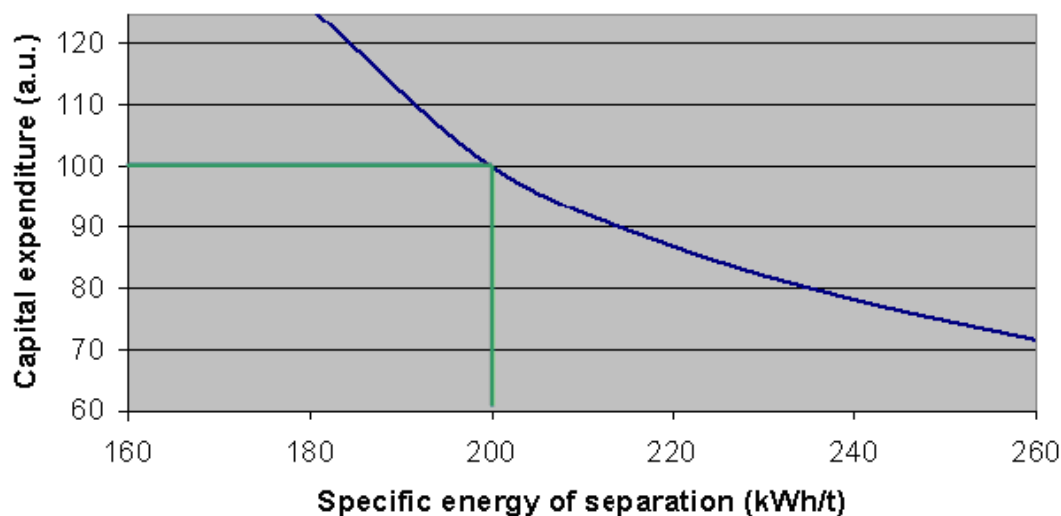


Figuur C.10 Schema oxy-fuel proces voor Circulating Fluidised Bed Combustion (CFBC)

De belangrijkste componenten bij oxy-fuel verbranding in een poederkool centrale zijn de zuurstofproductie op basis van luchtscheiding en de CO<sub>2</sub>-compressie.

Oxy-fuel verbranding vereist toepassing van luchtscheiding door middel van een Air Separation Unit, ASU. Deze techniek wordt tot nu toe niet toegepast bij kolencentrales. De hoeveelheid zuurstof voor oxy-fuel verbranding bij een poederkoolcentrale is dusdanig groot dat alleen toepassing van luchtscheiding op basis van cryogene destillatie in aanmerking komt. Ander technologieën zoals 'Pressure Swing Adsorption' (PSA), Vacuum Swing Adsorption (VSA) of polymere membranen kunnen niet commercieel worden toegepast op deze schaal en met de vereiste zuiverheid van zuurstof (>95%).

Optimalisatie voor oxy-fuel verbranding geeft aan dat door het verhogen van de investeringskosten met 25% het elektriciteitsgebruik met 10% afneemt. Omgekeerd geeft verlaging van de investeringskosten voor luchtscheiding met 15% een toename van het elektriciteitsgebruik (200 kWh/ton O<sub>2</sub>) met 10% (Farzan et al, 2007), zie Figuur C.11.

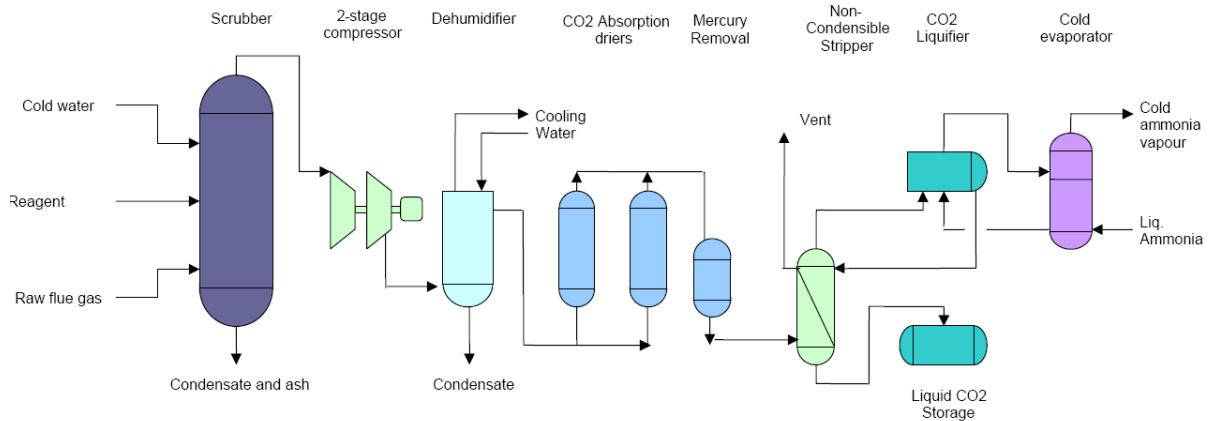


Figuur C.11 Relatie tussen investeringskosten voor luchtscheiding en energiegebruik

De CO<sub>2</sub>-compressie vindt plaats in de CO<sub>2</sub> 'Compression and Purification Unit' (CPU). Oxy-fuel verbranding vereist dat de verbrandingsgassen (exclusief de slipstream die worden gerecirculeerd) worden gekoeld tot ca. -56°C voor een partiële condensatie. De specificatie van de stroom CO<sub>2</sub> is van belang voor het ontwerp van de CO<sub>2</sub> CPU. Afhankelijk van de toepassing zoals 'Enhanced Oil Recovery' (EOR), opslag in een (diep gelegen) aquifer of 'Enhanced Coal Bed Methane' (ECBM) en de afstand van CO<sub>2</sub>-transport zullen de specificaties van de stroom CO<sub>2</sub> variëren.

Rookgas uit de ketel wordt gecomprimeerd tot een druk van ca. 30 bar, voorgekoeld en gedroogd. Dan volgt de cryogene sectie waar het rookgas gedeeltelijk wordt gecondenseerd in een of meerdere stappen om een productgas te verkrijgen dat voornamelijk uit CO<sub>2</sub> bestaat (voor transport en opslag) en een stroom van niet condenseerbare gassen zoals stikstof, Argon en zuurstof. Om een productgas te verkrijgen met een laag zuurstofgehalte, kan een destillatiekolom worden toegevoegd. Het productgas dat voornamelijk uit CO<sub>2</sub> bestaat wordt verder gecomprimeerd tot een superkritische vloeistof voor transport en (geologische) opslag, zie Figuur C.12 (Figuur 1.6).





Figuur C.12 *CO<sub>2</sub>-compressie en gasreiniging CS Energy Queensland*

Bron: Beasley, 2008.

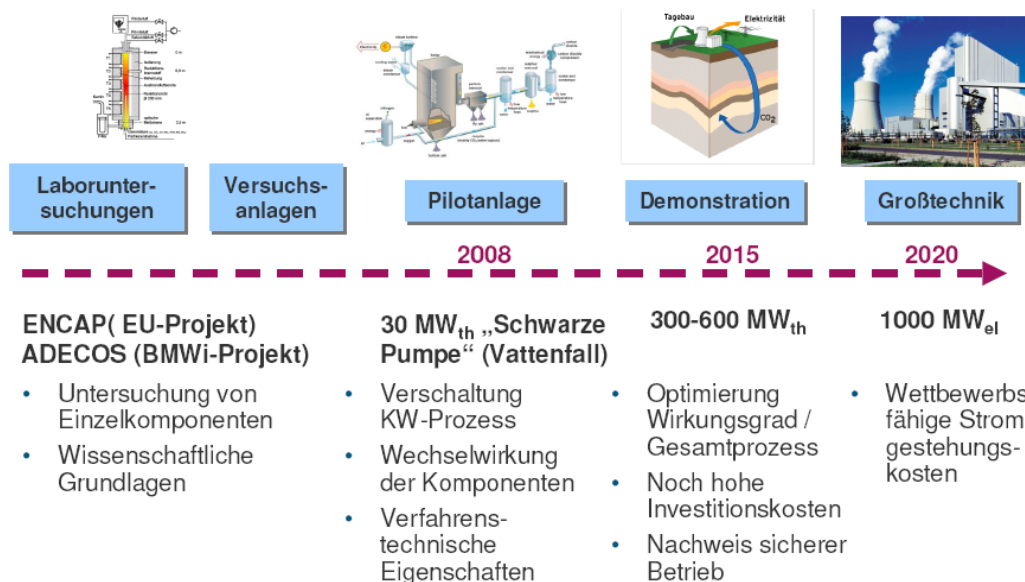
### Demonstratie en commercialisering

Bij voldoende ervaring met kleine demonstratie installaties van ca. 30 MW<sub>th</sub> of meer (Alstom, Babcock & Wilcox, B&W, Doosan Babcock Energy), wordt een demonstratie op commerciële schaal gerealiseerd, zoals door B&W en American Electric Power (AEP) (Farzan et al, 2007):

- Retrofitting van een kolengestookte eenheid (subkritische stoomparameters) van AEP.
- Schaalgrootte: 150 - 230 MW<sub>e</sub>.
- CO<sub>2</sub>-stroom 4,000 - 5,000 ton per dag.
- Geplande realisatie 2012 - 2015.

Alstom voorziet een ontwikkeling zoals getoond in Figuur C.13 (Schimkat, 2007), gebaseerd op:

- Integratie met het proces van elektriciteitsopwekking.
- Wisselwerking van componenten.
- Effecten op de bedrijfsvoering.



Figuur C.13 *Ontwikkeling oxy-fuel techniek voor kolengestookte elektriciteitsopwekking*

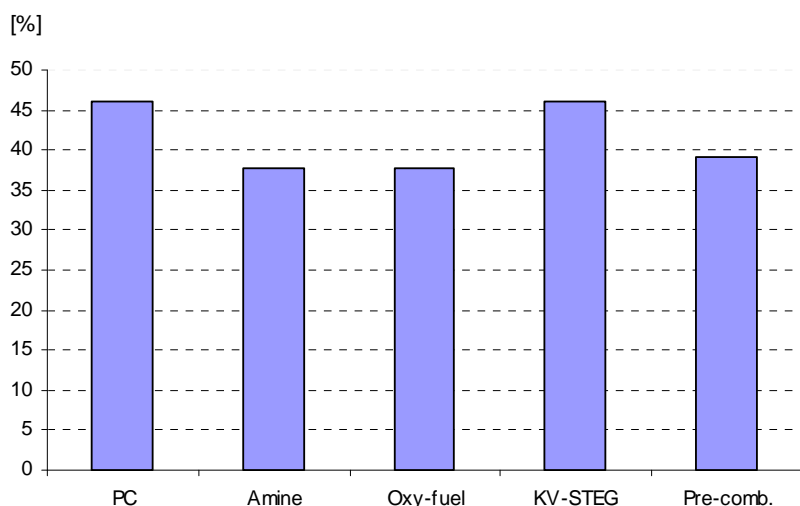
In het demonstratiestadium - 300-600 MW<sub>e</sub> omstreeks 2015 - ligt volgens Alstom het accent op:

- Optimalisatie rendement en proces van elektriciteitsopwekking.
- Bewijs van betrouwbare bedrijfsvoering.

Dezelfde planning geldt voor demonstratieprojecten zoals ‘Callide A unit 4’ van CS Energy in Queensland, Australië, en van Doosan Babcock Energy en Vattenfall in Janschwalde, Duitsland, (Farley, 2008). In het demonstratiestadium zijn de investeringskosten nog hoog. Als de technologie wordt gecommmercialiseerd (2020), dalen de investeringskosten verder (zie hierna).

SaskPower zal in Saskatchewan, Canada, in een public-private partnership met de Canadese overheid, bij kolengestookte ‘unit 3’ van de Boundary Dam centrale ‘retrofitting’ toe te passen van oxy-fuel verbranding met CO<sub>2</sub>-afvang en -opslag. Het 100 MW<sub>e</sub> demonstratieproject wordt in 2015 in bedrijf genomen en vergt een investering van C\$ 1,4 miljard (C\$ 758 miljoen voor rekening van Saskpower) (Canadese dollars), waarvan C\$ 1 miljard voor CO<sub>2</sub>-afvang op basis van oxy-fuel verbranding en C\$ 400 miljoen voor CO<sub>2</sub>-transport en -opslag. Afgevangen CO<sub>2</sub> (1 miljoen ton CO<sub>2</sub> per jaar) wordt gebruikt voor CO<sub>2</sub> Enhanced Oil Recovery (EOR) ([www.saskpower.com](http://www.saskpower.com)), (<http://sequestration.mit.edu/>), (<http://www.journalofcommerce>)

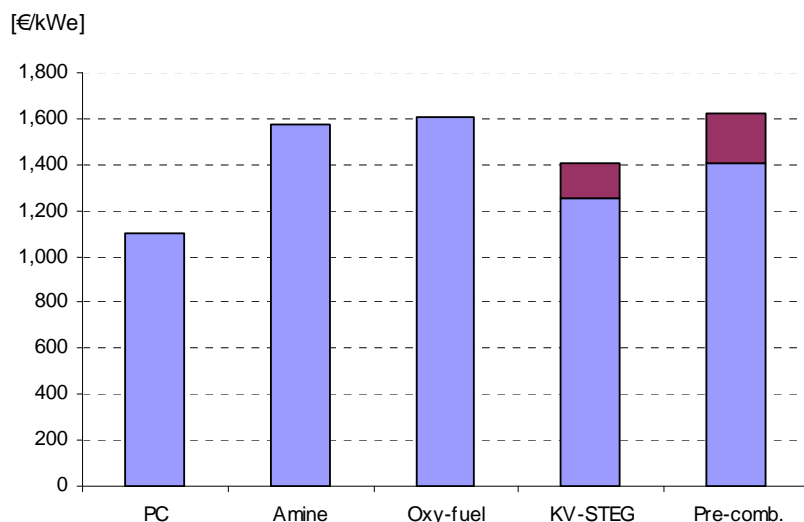
Wat betreft de kosten van diverse opties voor CO<sub>2</sub>-afvang bij kolengestookte centrales geven de onderstaande figuren een globaal inzicht in het opwekkingsrendement (Figuur C.14), de specifieke investeringskosten in 2020 (Figuur C.15) en de opwekkingskosten in 2020 (Figuur C.16) (Farley, 2007) (XCSA,2006).



Figuur C.14 Opwekkingsrendement van diverse kolengestookte elektriciteitsopties

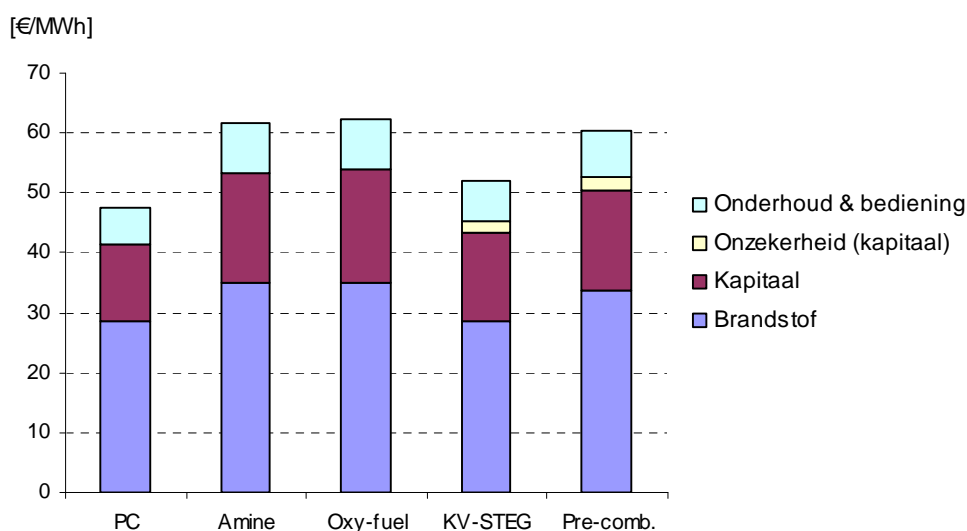
Noot: PC = Pulverised Coal (poederkool), pre-combustion = KV-STEG met CO<sub>2</sub>-afvang.

Aangenomen is dat het rendement zonder CO<sub>2</sub>-afvang 46% is en met CO<sub>2</sub>-afvang 37,9-39,1%.



Figuur C.15 *Specifieke investeringskosten van diverse kolengestookte elektriciteitsopties*

Noot: De kosten van KV-STEG en 'pre-combustion' zijn minder zeker en daarom met een marge aangegeven.



Figuur C.16 *Elektriciteitsproductiekosten van diverse kolengestookte elektriciteitsopties*

Noot: De kosten van KV STEG en 'pre-combustion' zijn minder zeker en daarom met een marge aangegeven. De kosten van kolen zijn geschat op \$91,5/t f.o.b. (Free On Board) Richards Bay (Zuid Afrika), transport \$13,5/t, totaal c.i.f. (Cost, Insurance, Freight) \$115/t  $\approx$  € 92/t (1 € = 1,25 US\$)  $\approx$  €3.66/GJ (6000kcal/kg).

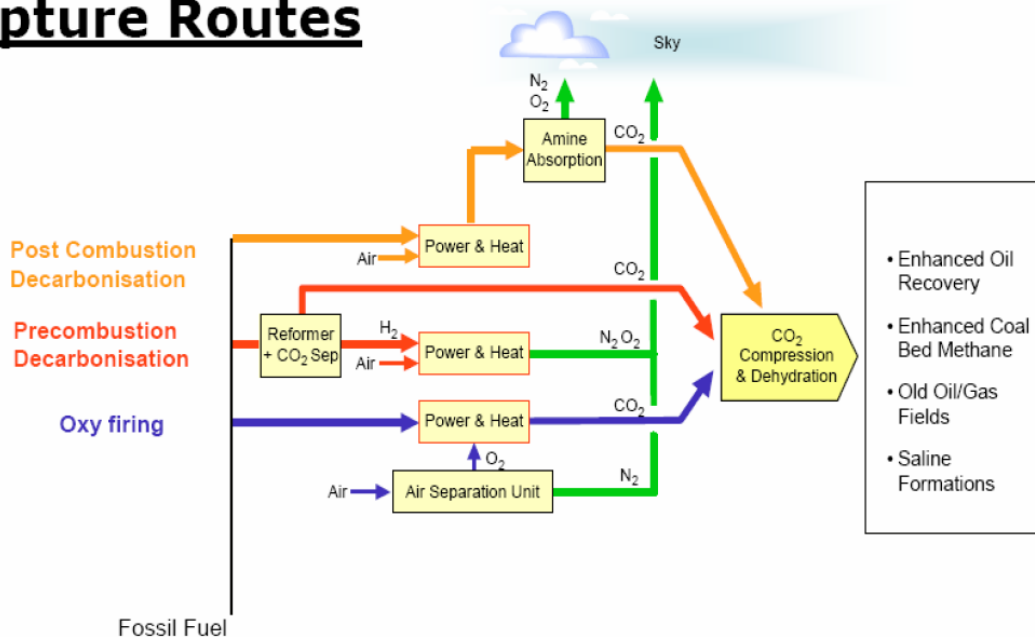
### C.3 Factsheet Kolenvergassing STEG (KV STEG)

#### *Inleiding*

Kolenvergassing STEG (KV STEG) - Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC - is een techniek van elektriciteitsopwekking, waarbij kolen - steenkool, bruinkool - en (zo mogelijk) biomassa worden vergast. Het gasmengsel - voornamelijk koolmonoxide, CO, en waterstof, H<sub>2</sub> - wordt gereinigd van H<sub>2</sub>S (reducerende omstandigheden) en het schone gas wordt verbrand in een STEG (STEG = Stoom En Gasturbine). De KV STEG wordt thans gecommercialiseerd. In Nederland, Spanje en de Verenigde Staten staan vier demonstratie eenheden op commerciële schaal. In Nederland is de 253 MW<sub>e</sub> KV STEG in Buggenum (NUON) in bedrijf sinds 1993.

De KV STEG technologie wordt als veelbelovend gezien. Niet alleen geeft deze techniek lage emissies van  $\text{SO}_2$  en  $\text{NO}_x$ , maar ook biedt zij perspectief op een hoog opwekkingsrendement. De KV STEG in Buggenum heeft een netto rendement van 43%. Tevens biedt de techniek de mogelijkheid om tegen relatief beperkte additionele kosten en met een relatief beperkt rendementsverlies  $\text{CO}_2$  af te vangen ten behoeve van geologische opslag. Deze karakteristiek hangt samen met het feit dat de kolen eerst in een gas worden omgezet waarna het van  $\text{CO}_2$  kan worden ontdaan met een fysisch wasproces. Bij een poederkoolcentrale met ‘post-combustion’ vindt  $\text{CO}_2$ -afvang plaats door middel van chemische wasprocessen, zoals met methyl diethanolamine, MDEA (Figuur C.17). Een KV STEG levert gereinigd gas op relatief hoge druk zonder stikstof. Vergassing vindt namelijk plaats met (95% zuivere) zuurstof in plaats van met lucht zoals bij een poederkoolcentrale.

## Capture Routes



Figuur C.17 Drie generieke routes voor  $\text{CO}_2$ -afvang en -opslag

Bron: GTI, 2004.

Verder kan een KV STEG in uren van lage elektriciteitsvraag syngas leveren voor een nabijgelegen chemische industrie of waterstof, ‘Substitute Natural Gas’ (SNG) voor injectie in het aardgasnet of methanol dan wel DME voor bijmenging bij motorbrandstoffen voor de transportsector. Als het aanbod van intermitterende duurzame energiebronnen zoals windenergie grote proporties aanneemt, is het ook mogelijk dat opslag in, en onttrekking van gereinigd kolengas aan, een zoutcaverne een mogelijkheid biedt om verschil in vraag en aanbod af te stemmen.

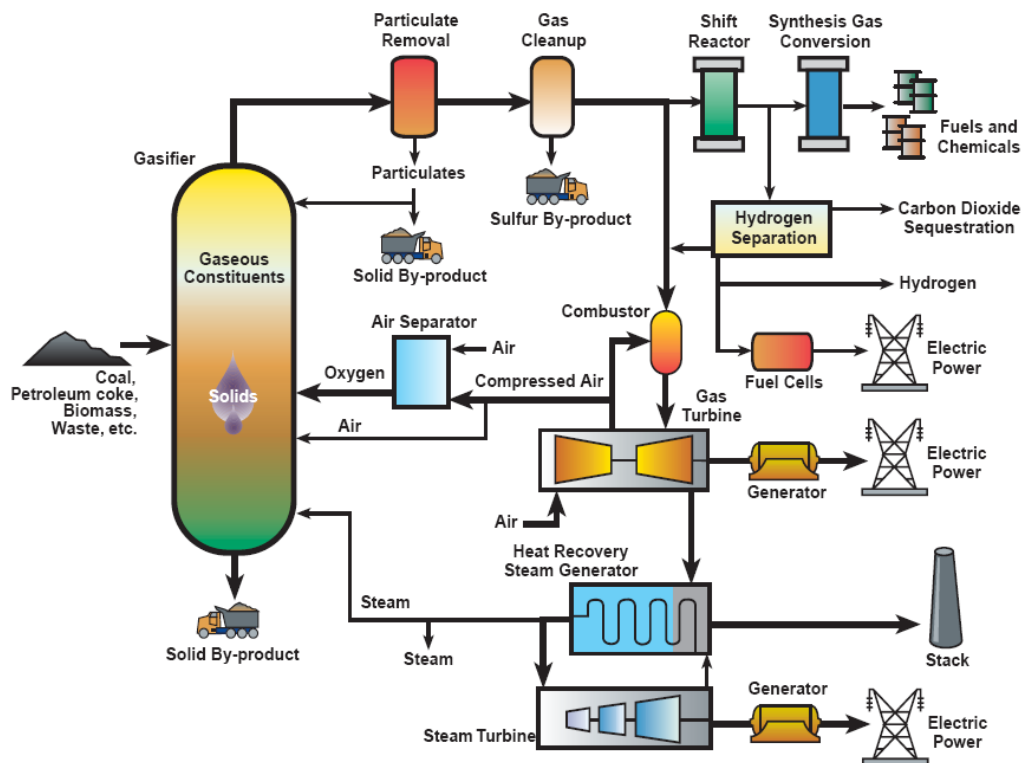
### Technische karakteristieken en toepassingen

De KV STEG is een innovatieve techniek van elektriciteitsopwekking op basis van kolen (of petroleumcokes, een optie die in Italië toepassing vindt), waarbij een vergasser wordt gecombineerd met gasreiniging op basis van technologie die bekend is bij raffinaderijen en een conventionele STEG (meestal een of twee gasturbines met een stoomturbine). De techniek bevindt zich sinds het begin van de 90’er jaren in het stadium van technisch-economische demonstratie. Een voorbeeld van een demonstratie KV STEG is de 253 MW<sub>e</sub> Willem-Alexander centrale in Buggenum. Deze heeft een ontwerprendement (vollast) van ca. 43%. De centrale is gebruikt voor het testen van het vergassen van kolen met diverse soorten biomassa. Van dit type KV STEG op basis van kolen zijn tot nu toe nog drie andere centrales van een vergelijkbaar vermogen gebouwd, een in Spanje (Puertollano) en twee in de Verenigde Staten, zie Tabel C.2 (EPA, 2006), (Fowler, 2008), (Swift, 2008).

Tabel C.2 Technische en emissieparameters van demonstratie KV STEG-centrales

KV STEG		NUON	Elcogas	Tampa Electric	Wabash River
Plaats		Buggenum	Puertollano	Florida	Indiana
Land		Nederland	Spanje	V.S.	V.S.
In bedrijf		1993/1994	1998/1999	1996	1995
Brandstof		Kolen/ biomassa	Kolen/ petcokes	Kolen/ petcokes	Kolen/ petcokes
Beschikbaarheid	[%]	≥80		≥85	≥70
<i>Ontwerpkarakteristieken</i>					
Gasturbine	[MW <sub>e</sub> ]	156	182	192	192
Stoomturbine	[MW <sub>e</sub> ]	128	135	121	104
Eigen gebruik	[MW <sub>e</sub> ]	31	35	63	34
Netto vermogen	[MW <sub>e</sub> ]	253	298	250	262
Netto rendement (LHV)	[%]	43,2	45,0	39,1	41,4
Kolengebruik	[ton/dag]	2000	2175	2270	2300
<i>Emissies</i>					
SO <sub>2</sub>	[g/kWh]	0,20	0,07	< 0,61	0,49
Ontzwavelingsgraad	[%]	> 99	99,9	> 98	> 98
NO <sub>x</sub>	[g/kWh]	0,32	0,40	0,24	0,49
	[ppmv @ 15% O <sub>2</sub> ]	< 10	< 10	15	25
Stof	[g/kWh]	0,005	0,02	< 0,02	< 0,05

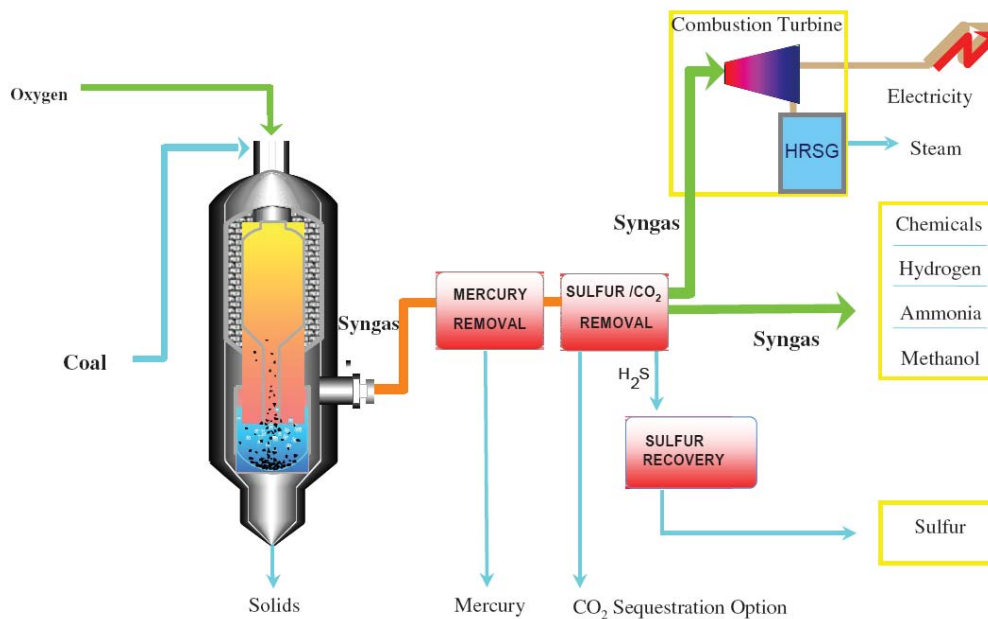
Figuur C.18 toont een aantal karakteristieken van een KV STEG, zoals de luchtscheiding (Air Separation Unit, ASU) die zuurstof levert voor de vergasser. Tegelijkertijd wordt stikstof geproduceerd, die bij het Shell vergassingsproces wordt gebruikt voor toevoeren van fijngemalen kolen naar de vergasser. Het processchema is vereenvoudigd en toont niet alle aspecten van integratie bij een KV STEG. In het geval van de KV installaties te Buggenum en Puertollano is de luchtscheiding geïntegreerd met de compressor van de gasturbine.



Figuur C.18 Generiek schema KV STEG

Bron: EPA, 2006.

Een belangrijk voordeel van een KV STEG in het tijdperk van klimaatpolitiek is de relatief beperkte additionele kosten en het beperkte energieverlies van CO<sub>2</sub>-afvang (Carbon Capture and Storage, CCS). Daarnaast wordt in veel gevallen studie gemaakt van de mogelijkheden van co-productie van syngas (voor de chemische industrie), waterstof en SNG (voor bijmenging in het aardgasnet), methanol enz.. Figuur C.19 geeft een overzicht van de laatstgenoemde opties.



Source: Clean Air Task Force.<sup>3</sup>

Figuur C.19 *Additional opties waaronder CO<sub>2</sub>-afvang bij een KV STEG*

Bron: COWS, 2007.

De doelstellingen wat betreft het rendement van geavanceerde typen kolencentrales zoals KV STEG zijn in de VS volgens (Stiegel et al, 2006):

- 45-50% (HHV)  $\approx$  47-52% (LHV) in 2010.
- 50-60% (HHV)  $\approx$  52-62% (LHV) in 2020.

De rendementen zijn zowel aangegeven ten opzichte van de bovenwaarde (HHV; higher heating value), waarbij ook de condensatie-energie van gevormd water is meegenomen, als de meer gebruikelijke onderwaarde of stookwaarde (LHV).

Tabel C.3 geeft een overzicht van KV STEG's die in het stadium van planning zijn, voornamelijk in de VS. De investeringskosten van een KV STEG zonder CO<sub>2</sub>-afvang zijn 15-20% hoger dan die van een poederkoolcentrale van vergelijkbaar vermogen (Sears, 2007, 2008), (EPRI, 2007), (www.citact.org). Het ontwerp rendement van de geplande KV STEG van Duke Energy te Edwardsport, Indiana, is minimaal 40% (LHV, zie voetnoot d). Het rendement van dit meest vergevorderde KV STEG project blijft dus ver verwijderd van de officiële doelstellingen volgens (Stiegel et al, 2006).

Tabel C.3 *Technische en emissieparameters van KV STEG projectn in de VS*

KV STEG (exploitant)		Duke Energy
<i>Generieke gegevens</i>		
Plaats		Edwardsport
Staat V.S.		Indiana
In bedrijf (voorzien)		zomer 2012
Brandstof		kolen
<i>Ontwerpkarakteristieken</i>		
Gasturbine	[MW <sub>e</sub> ]	
Stoomturbine	[MW <sub>e</sub> ]	
Eigen gebruik	[MW <sub>e</sub> ]	
Netto vermogen	[MW <sub>e</sub> ]	632
Netto rendement (LHV) <sup>d</sup>	[%]	≥ 40
Kolengebruik	[ton/dag]	
Beschikbaarheid	[%]	85
<i>Emissies</i>		
SO <sub>2</sub>	[g/kWh]	0,08
Ontzwavelingsgraad	[%]	99+
NO <sub>x</sub>	[g/kWh]	0,30
	[ppmv @ 15% O <sub>2</sub> ]	15
Stof	[g/kWh]	0,23
CO <sub>2</sub> -afvang		√
Type CO <sub>2</sub> -afvang		physical solvent
Toepassing CO <sub>2</sub>		EOR
<i>Economische kengetallen</i>		<i>(KV STEG zonder CO<sub>2</sub>-afvang)</i>
Investeringskosten	[M\$] <sup>a</sup>	2.350
Ontvangen subsidie	[M\$] <sup>b</sup>	133.5
Specifieke investeringskosten	[\$/kW <sub>e</sub> ] <sup>c</sup>	3.720 (3.500)
Verwachte belastingvoordelen	[M\$]	460
Specifieke investeringskosten incl. subsidie & tax incentives	[\$/kW <sub>e</sub> ] <sup>c</sup>	(2.780)

a \$ 2008 (oorspronkelijk in april 2007 begroot op 1985 M\$).

b \$ 2006.

c \$ 2008; tussen haakjes na aftrek ontvangen subsidie respectievelijk na aftrek subsidie en belastingvoordeel.

d Het ontwerpbrandstofgebruik is < 9000 Btu/kWh op basis van de bovenste verbrandingswaarde, wat overeenkomt met een netto rendement op onderste verbrandingswaarde van ca. 40% of meer.

## C.4 Referenties

Aubertin, J.-M. (2008): *Chilled Ammonia Process P4 Pilot Project Press Conference*. Alstom, Lyon, France, February 27, 2008.

<http://mydocs.epri.com/docs/CorporateDocuments/AlstomEPRIWe/PressPresentation.pdf>

Beasley, B. (2008): *Callide Oxyfuel Project*. Oxyfuel Project, presentatie Asia Pacific Partnership, 2 April 2008.

<http://www.asiapacificpartnership.org/JointTFmtg/CallideOxyfuel/CallideOxyfuel.pdf>

Braine, B. (2008): *Climate Change and Carbon Capture and Storage (CCS) Technology*.

American Electric Power (AEP), Expert Workshop on Financing CCS, USA, May 29, 2008. <http://www.co2captureandstorage.info/docs/Finance2/3%20Bruce%20Braine.pdf>

COWS (2007): *IGCC with Carbon Capture and Storage - Opportunities and Challenges for Labor*. COWS Center on Wisconsin Strategies, Wisconsin, USA, October 2007.

<http://www.cows.org/pdf/rp-igcc.pdf>



- EPA (2006): *IGCC & CCS Background Document*. Environmental Protection Agency (EPA), Washington, USA, June 19, 2006.  
[http://www.keystone.org/spp/documents/9\\_20revised\\_final%20IGCC%20Report%20%2024%2006.pdf](http://www.keystone.org/spp/documents/9_20revised_final%20IGCC%20Report%20%2024%2006.pdf).
- EPRI (2008): *Advanced Coal Power Systems with CO<sub>2</sub> Capture: EPRI's CoalFleet for Tomorrow Vision - A Summary of Technology Status and Research, Development, and Demonstrations*. Electric Power Research Institute (EPRI), Interim Report, September 2008. <http://mydocs.epri.com/docs/public/00000000001016877.pdf>.
- EPRI (2007): *Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) Design Considerations for High Availability. Volume 1: Lessons from Existing Operations*. Electric Power Research Institute (EPRI), Technical Update, March 2007. <http://mydocs.epri.com/docs/public/00000000001012226.pdf>.
- Farley, M. (2008): *A Clean Future for Coal Fired Power*. Doosan Babcock Energy, BCURA Coal Science Lecture Royal Institution, 13 October 2008.  
<http://www.doosanbabcock.com/live/documents/coal%20science.pdf>.
- Farley, M. (2007): *Capture Ready Advanced Supercritical Clean Coal Power Plant*. Doosan Babcock Energy, Coal Forum, 23 January 2007.  
<http://www.berr.gov.uk/files/file39922.pdf>.
- Farzan, H. et al (2007): *State of the Art of Oxy-Coal Combustion Technology for CO<sub>2</sub> Control from Coal-Fired Boilers - Are We Ready for Commercial Installation?* 32<sup>nd</sup> International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems (aka Clearwater Coal Conference), Clearwater, Florida, USA, June 10-15, 2007.  
<http://www.babcock.com/library/pdf/BR-1794.pdf>.
- Fowler, M. (2008): *Expert Report on Integrated Gasification Combined Cycle and Pulverized Coal Combustion in the Best Available Control Technology Analysis for the Dryfork Station Power Plant*. Coal Transition Project Clean Air Task Force, Boston, Massachusetts, for Powder River Basin Resources Council, Sheridan, Wyoming, USA, 29 April, 2008. <http://deq.state.wy.us/eqc/Docket/07-2801%20Dry%20Fork%20Station/Earthjustice.Exhibit%2013%20-%20Expert%20Report%20of%20Mike%20Fowler.pdf>.
- Gray, M.A. (2008a): *CO<sub>2</sub> Reduction Overview - AEP's Perspective on Reducing Carbon Dioxide Emissions*. Oklahoma City, Oklahoma, USA, June 14-18, 2008.  
<http://www.occeweb.com/MARC2008/MARC%20Presentations%20FINAL/Mark%20Gray.ppt>.
- Gray, M.A. (2008b): *New Base-Load Generation Meeting the Demand - AEP's Perspective on Meeting new Generation Demand while Reducing Carbon Dioxide Emissions*. American Electric Power (AEP), MORPC, Columbus, Ohio, September 11, 2008.  
[http://www.morpc.org/pdf/summit/MORPC1\\_Present\\_608.pdf](http://www.morpc.org/pdf/summit/MORPC1_Present_608.pdf).
- GTI (2004): *Review of CO<sub>2</sub> Capture Technology for Southwest Regional Partnership for Carbon Sequestration*. Gas Technology Institute (GTI), Des Plaines, Illinois, USA, October 29, 2004.
- Laat J.C. de, H. Hondeman (2001): *Kwaliteit van gasmotoren in Nederland*. ROB-project 3730060020, Gastec N.V., November 2001.
- Mazer, R. (2008): *Oxy-Coal Combustion Technology*. Energy Technology Forum, Washington, DC, USA, January 24, 2008.  
<http://www.energycommission.org/ht/action/GetDocumentAction/i/7779>.
- MNP (2008): *Greenhouse Gas Emissions in the Netherlands 1990-2006. National Inventory Report 2008*. MNP Report 500080009, www.pbl.nl, Netherlands Environmental Assessment Agency, 2008



- Pieterse, J.A.Z., S. Booneveld, F.A. de Bruijn (2002): *Durability of ZSM5- supported Co-Pd-catalysts in the reduction of NO<sub>x</sub> with methane*. Applied Catalysis B: Environmental 39, pag. 167-179, 2002.
- Pieterse, J.A.Z., R.W. van den Brink, S. Booneveld, F.A. de Bruijn, (2003): *Influence of zeolite structure on the activity and durability of Co-Pd-zeolite catalysts in the reduction of NO<sub>x</sub> with methane*. Applied Catalysis B: Environmental 46, pag. 239-250, 2003.
- Pieterse, J.A.Z., S. Booneveld, R.W. van den Brink, H. Top, J.E. Westing, F.Völlink, K. Hoving (2004a): *Gecombineerde methaan- en NO<sub>x</sub>-verwijdering bij gasmotoren; Oorzaken van katalysatordeactivering onder praktijkcondities*. ECN-C--04-100, ECN/Gasunie Research, augustus 2004.
- Pieterse, J.A.Z., S. Booneveld, R.W. van den Brink, F.A. de Bruijn, (2004b): *Stability of Zeolite Supported (promoted-) Pd Catalysts in the Reduction of NO<sub>x</sub> in Gas Engines Using Methane*. Studies and Surface science and Catalysis, 154, pag. 2522-2527, 2004.
- Pieterse, J.A.Z., H. Top, F. Völlink, J.E. Westing, K. Hoving, R.W. van den Brink, (2006): *Selective catalytic reduction of NO<sub>x</sub> in real exhaust gas of gas engines using unburned gas Catalyst deactivation and advances toward long-term stability*. Chemical Engineering Journal 120, pag 17, 2006.
- Pieterse, J.A.Z., S. Booneveld (2007): *Catalytic reduction of NO<sub>x</sub> with H<sub>2</sub>/CO/CH<sub>4</sub> over PdMOR catalysts*. Applied Catalysis B, Volume 73, pag. 327-325, 11 mei 2007.
- PowerClean (2004): *Fossil Fuel Power Generation state-of-the-art*. Report prepared by PowerClean R, D&D Thematic Network, European Commission, 30th July 2004. [http://www.irc.ee/6rp/valdkonnad/P6/energia/Powerclean\\_state\\_of\\_the\\_art\\_final.pdf](http://www.irc.ee/6rp/valdkonnad/P6/energia/Powerclean_state_of_the_art_final.pdf).
- Rudy, R., Black, S. (2007): *Chilled Ammonia Process Update*. EPRI/Alstom, Lyon, France, CO<sub>2</sub> Capture Network, May 24, 2007. <http://www.co2captureandstorage.info/docs/capture/10th%20cap%20network%20web%20files/K%20-%20Rhudy%20-%20Chilled%20Ammonia%20as%20solvent.pdf>.
- Schimkat, A. (2007): *CO<sub>2</sub>-freie Kraftwerke: Eine Option für die Zukunft?* Alstom, 6 November 2007. [http://www.tuev-nord.de/downloads/Schimkat-CO<sub>2</sub>-freie-Kraftwerke.pdf](http://www.tuev-nord.de/downloads/Schimkat-CO2-freie-Kraftwerke.pdf).
- Sears, R. (2008): *Duke Energy Indiana Edwardsport IGCC Project Update*. 2008 GTC Conference, Washington DC, USA, October 5-8, 2008. <http://www.gasification.org/Docs/Conferences/2008/16SEARS.pdf>.
- Sears, R. (2007): *Edwardsport IGCC Project Update*. Workshop on Gasification Technologies, Indianapolis, Indiana, V.S., June 13, 2007. <http://www.gasification.org/Docs/Workshops/2007/Indianapolis/11Stanley%20GTC%20Workshop%20June%202007.pdf>.
- Stiegel, G.J., Clayton, S., Der, V. (2006): *Gasification Technologies Project Portfolio - Version: June 2006 Draft*. National Energy Technology Laboratory (NETL), USA, June 2006. <http://www.asiapacificpartnership.org/PowerGenTF/DOE%20Documents/Gasification%20Technologyn%20Portfolio.pdf>.
- Swift, J.R. (2008): *Advanced Coal Utilization Options: IGCC and CCS*. Asia Clean Energy Forum Manila, Philippine, June 3-5, 2008. <http://www.adb.org/Documents/events/2008/ACEF/Session9-JSwift.pdf>.
- XCSA (2006): *Xstrata Coal South Africa and ARM Coal Site Visit*. Xstrata Coal South Africa (XCSA), 6 November 2006. [http://www.arm.co.za/im/files/presentations/2006/xstrata\\_armcoal\\_visit06nov06.pdf](http://www.arm.co.za/im/files/presentations/2006/xstrata_armcoal_visit06nov06.pdf).

## C.5 Internetbronnen

[http://www.vattenfall.com/www/CO2\\_en/CO2\\_en/Gemeinsame\\_Inhalte/DOCUMENT/388963co2x/401837co2x/P0275934.pdf](http://www.vattenfall.com/www/CO2_en/CO2_en/Gemeinsame_Inhalte/DOCUMENT/388963co2x/401837co2x/P0275934.pdf) (oxy-fuel installatie in Duitsland)

[http://www.csenergy.com.au/\\_CMSImages/csenergy/pdfs/080822Oxyfuel\\_diagram%20.pdf](http://www.csenergy.com.au/_CMSImages/csenergy/pdfs/080822Oxyfuel_diagram%20.pdf) (oxy-fuel installatie in Australië)

<http://mydocs.epri.com/docs/public/000000000001018112.pdf> (oxy-fuel bij wervelbed verbranding)

<http://www.saskpower.com/aboutus/news/?p=368> (Saskpower retrofit van oxy-fuel en CO<sub>2</sub>-opslag)

[http://sequestration.mit.edu/tools/projects/boundary\\_dam.html](http://sequestration.mit.edu/tools/projects/boundary_dam.html) (Saskpower retrofit van oxy-fuel en CO<sub>2</sub>-opslag)

<http://www.journalofcommerce.com/article/id26692> (Saskpower retrofit van oxy-fuel en CO<sub>2</sub>-opslag)

[http://www.citact.org/dukeigcc/pdfs/Indiana's\\_Choice\\_is\\_Clear\\_03-07.pdf](http://www.citact.org/dukeigcc/pdfs/Indiana's_Choice_is_Clear_03-07.pdf) (KV STEG voorstel Indiana)

<http://mydocs.epri.com/docs/public/000000000001018112.pdf> (oxy-fuel bij wervelbed verbranding)

[http://sequestration.mit.edu/tools/projects/boundary\\_dam.html](http://sequestration.mit.edu/tools/projects/boundary_dam.html) (Saskpower retrofit van oxy-fuel en CO<sub>2</sub>-opslag)

[http://www.citact.org/dukeigcc/pdfs/Indiana's\\_Choice\\_is\\_Clear\\_03-07.pdf](http://www.citact.org/dukeigcc/pdfs/Indiana's_Choice_is_Clear_03-07.pdf) (KV STEG voorstel Indiana)

[http://www.csenergy.com.au/\\_CMSImages/csenergy/pdfs/080822Oxyfuel\\_diagram%20.pdf](http://www.csenergy.com.au/_CMSImages/csenergy/pdfs/080822Oxyfuel_diagram%20.pdf) (oxy-fuel installatie in Australië)

<http://www.journalofcommerce.com/article/id26692> (Saskpower retrofit van oxy-fuel en CO<sub>2</sub>-opslag)

<http://www.saskpower.com/aboutus/news/?p=368> (Saskpower retrofit van oxy-fuel en CO<sub>2</sub>-opslag)

[http://www.vattenfall.com/www/CO2\\_en/CO2\\_en/Gemeinsame\\_Inhalte/DOCUMENT/388963co2x/401837co2x/P0275934.pdf](http://www.vattenfall.com/www/CO2_en/CO2_en/Gemeinsame_Inhalte/DOCUMENT/388963co2x/401837co2x/P0275934.pdf) (oxy-fuel installatie in Duitsland)