



Building Future



OGO-project 1.3
Opleiding Installatietechnologie
03-06-2005

Building Future

Visie op ontwikkelingen naar een energie-neutrale
Gebouwde omgeving



FUTURY wordt vertegenwoordigd door(v.l.n.r.):

B.G.C.C. Tuip
L.W.H.A. Pennings
J.V.F. Houben
R.C.G.M. Loonen

Voorwoord

Dit onderzoek is gedaan naar aanleiding van een opdracht van Technische Universiteit Eindhoven opleiding Installatietechnologie. Bij deze willen wij de staf installatietechnologie en elektrotechniek, en vooral M.A. van Houten, bedanken voor het mogelijk maken van dit onderzoek en voor de steun daarbij. Tevens willen we en J.W.G.L. Vossen bedanken voor het opdoen van ervaring in de praktijk.

Wij wensen u veel leer- en leesplezier.

Met vriendelijke groeten,

J.V.F. Houben
R.C.G.M. Loonen
L.W.H.A. Pennings
B.G.C.C. Tuip

De droom van Jeremy Leggett

"PV cells are becoming more efficient all the time.

You could store the energy they provide in advanced batteries or by making hydrogen for fuel cells of the kind car manufacturers are developing.

When your home is your power plant, generating electricity for your appliances and hydrogen for your heating and car, you no longer need to rely on utilities or oil companies."

Bron: New Scientist, 6 September 2003, 23

Samenvatting

Elektriciteitsverbruik

Anno 2005 verbruikt een eenpersoonshuishouden in Nederland gemiddeld 2500 kWh per jaar. Een tweepersoonshuishouden met 2 volwassenen waarvan 1 werkend verbruikt volgens het opgestelde gebruiksprofiel gemiddeld 2800 kWh per jaar. Een driepersoons huishouden, waarvan 2 volwassenen (1 werkend) en 1 kind, verbruikt gemiddeld 3200 kWh per jaar.

Een standaard wijk verbruikt anno 2005 gemiddeld 16000 MWh per jaar. Het consumentengedrag in Nederland lijkt meer in de richting van een groter energieverbruik te gaan dan in de richting van energiebesparing. In de analyse wordt uitgegaan van een maximaal haalbare energiebesparing en efficiencyverhoging van ca. 20% bij gestaag stijgende welvaart en bepaalde kostenveronderstellingen. Aangezien vrijwillige gedragsverandering niet lijkt te gebeuren, zouden verdere besparingen mogelijk kunnen zijn door financieel afdgewongen gedragsverandering.

Het verbruik in 2030 zal nog sterk toenemen. Uit onderzoek door verschillende instituten blijkt dat het energieverbruik door huishoudens in de toekomst met 1,5% per jaar zal stijgen. Het energieverbruik in de dienstsector zal naar verwachting stijgen met 2,3% per jaar.

Hieruit kan worden geconcludeerd dat het verbruik van de wijk wordt dan ongeveer op 23000 MWh per jaar in 2030.

Waterstof als energiebron

Bij de waterstofeconomie gaat het om méér dan het gebruiken van een chemische stof, het begrip duidt een inrichting aan van de industriële samenleving, waarbij waterstof een centrale rol als energiedrager overneemt van fossiele brandstoffen.

Een tweede reden voor de interesse in de waterstofeconomie is dat waterstof gebruikt kan worden als opslagsysteem voor elektriciteit: bij overvloed aan elektriciteit is wordt waterstof geproduceerd, die daarna bij gebrek aan elektriciteit daarin terug omgezet kan worden in een brandstofcel. Die elektriciteit kan dan gebruikt worden in woningen en gebouwen.

Warmtevraag

De warmtevraag in de gebouwde omgeving is met 60% van het totale energieverbruik de grootste post. Het is dan ook een must om dit proces rendabeler en energiezuiniger te maken. Het vervangen van de huidige Hr-ketel door H₂-CV-installatie kan hierin een belangrijke rol spelen. In combinatie met een katalytische brander wordt het verbrandingsproces nog efficiënter en rendabeler worden. Ook de centrale verwarming van de gebouwde omgeving kan geschieden via de H₂-CV-installaties. Een extra en ook efficiënte uitbreiding van de verwarming van woningen kan met behulp van WKO-opslag worden ingevuld.

(De)centrale elektriciteitsopwekking

Voor de opwekking van elektrische energie uit waterstofgas kan gebruik gemaakt worden van brandstofcellen, zowel op centraal als decentraal niveau, al naargelang de situatie. Voor elke situatie en doelstelling zijn verschillende typen brandstofcellen voor energieopwekking ter beschikking. Op wijkniveau kan voor elektriciteitsproductie en warmteproductie aan grote stacks gedacht worden. De DMFC en de SOFC zijn hiervoor zeer geschikt. Ter verhoging van de efficiency kan een STEG-centrale worden ingezet. Op

woningniveau moet vooral worden gedacht aan mobiele toepassing van brandstofcellen, dus in kleine voedingen van mobiele apparatuur.

Opslag

Voor de opslag van waterstof zijn verschillende mogelijkheden. De meest voor de hand liggende vorm is ondergrondse gasopslag. Als waterstof vooral wordt gebruikt om de elektriciteit uit zon en wind op te slaan, kan men denken aan de opslag in lege gasvelden. Eventueel kan men ook halflege gasvelden bijvullen met waterstof. Of men kan waterstof opslaan in diepe zoutlagen. Het voordeel is dat deze manier van waterstofopslag zou kunnen dienen om de wisseling der seizoenen te overbruggen. De vloeibare opslag en opslag met metaalhydride. Ook is voor opslag van grote hoeveelheden ondergrondse waterstofopslag de goedkoopste variant. Voor waterstofopslag op woon- en wijkniveau is ondergrondse opslag de beste oplossing

Transport

Waterstoftransport is mogelijk op verschillende manieren. Voor transport van grote hoeveelheden naar steden en woonhuizen is transport via leidingen de beste optie. Op deze manier kan er continu en de vraag worden voldaan. Een ander groot voordeel van deze vorm is dat grote delen van de bestaande aardgasleidingen gebruikt kunnen worden. Andere transport mogelijkheden zijn transport per truck en per trein.

Inhoudsopgave:

Voorwoord	3
Samenvatting	4
1 Inleiding	7
2 Oriëntatie	8
2.1 Onderzoek naar elektriciteitsverbruik.	8
2.1.1 Onderzoek naar energieverbruik van apparaten.	8
2.1.2 Energieverbruik bij verschillende huishoudens anno 2005.....	9
2.1.3 Onderzoek KWH stand bij verschillende huishoudens.....	12
2.1.4 Verbruik in een wijk anno 2005.....	15
2.1.5 Bezuinigingen op energie in de toekomst?.....	17
2.1.6 Tijdschema, trendbreuken en de technische consequenties....	19
2.2 Waterstof als elektriciteitsvoorziening	20
2.2.1 Productie van waterstof.....	20
2.2.2 De werking van de brandstofcel	24
2.2.3 Veiligheid	26
2.2.4 Waterstoftransport	27
2.2.5 Waterstofopslag	29
3 Energiemogelijkheden in de toekomst	30
3.1 Een beeld van het elektriciteitsverbruik 2030	30
3.2 Elektrische energievoorziening door waterstof in de toekomst.....	32
3.2.1 Waterstofproductie 2030.....	33
3.2.2 waterstoftransport	35
3.2.3 Opslag van waterstof	37
3.2.4 Centrale en decentrale opwekking van elektriciteit	39
4 Conclusies en aanbevelingen	49
Bijlagen	53
Bijlage 1; Vermogens.....	53
Bijlage 2; Sluipvermogens:	54
Bijlage 3; Tijdschema en trendbreuken en technische consequenties.	55
Bijlage 4; De verschillende typen brandstofcellen.....	63
Bijlage 5; opslag en transport	71

1 Inleiding

De toekomstige energievraag duurzaam ingevuld?!

Technologieën op het gebied van energiebesparing, energie efficiency en duurzame energie hebben de energieprestatie van gebouwen de afgelopen decennia sterk verbeterd. De kracht voor het ontwikkelen van betere energieprestaties is nog lang niet uitgeput.

Realisatie van nog betere energieprestaties kan worden bereikt door een transitie naar een duurzame energiehuishouding in de gebouwde omgeving te bewerkstelligen. De gebouwde omgeving is één van de sectoren waar veel energie wordt gebruikt, in totaal neemt de gebouwde omgeving ongeveer 35% van het totale Nederlandse energiegebruik voor zijn rekening.

Internationaal wordt door middel van het Kyoto-protocol gestreefd naar een reductie van de uitstoot van broeikasgassen. Vooral de reductie van broeikasgassen als koolstofdioxide (CO₂) en stikstofoxiden (NO_x) staan hoog op de agenda. Nederland erkent het Kyoto-protocol.

De onderzoeksinstituten TNO en ECN zijn al op het gebied van energie in de gebouwde omgeving de strategische samenwerking *Building Future* aangegaan om gezamenlijk een impuls te geven aan deze transitie op lange termijn. Deze transitie op de lange termijn heeft als doel om in 2030 de CO₂ emissie in de gebouwde omgeving minimaal te halveren.

In navolging van ECN en TNO wordt er in dit rapport een idee ontwikkeld hoe in deze eeuw energieneutraliteit in de gebouwde omgeving kan worden bereikt vooral door de toepassing van waterstof.

Rekening houdend met:

- Klimaatbeleid
- Stijgende comforteisen
- Nieuwe technologische doorbraken
- Trendbreuken

De vraag is: hoe een huis/wijk in de toekomst aan energie komt en hoe het energiegebruik kan zijn om bij te dragen aan het doel om in de toekomst comfortabel gezond en duurzaam te werken en te leven in de gebouwde omgeving met minimale energie- en milieubelasting?

In hoofdstuk 2 van dit rapport wordt de theorie behandeld. In hoofdstuk 3 de toepassing van waterstof in het jaar 2030 en het verwezenlijken van een energieneutraliteit. In hoofdstuk 4 staat de conclusie en aanbevelingen.

2 Oriëntatie

In dit hoofdstuk zal er een beeld gevormd worden van het huidige energiegebruik en van energiemogelijkheden in de toekomst. Eerst zal de hoofdvraag grotendeels beantwoord worden aan de hand van vijf deelvragen die in hoofdstuk 2.1 aan bod komen. Vervolgens zal waterstof, dat een grote rol zal gaan spelen in de toekomst, bekeken worden. In hoofdstuk 3 zullen vervolgens de toekomstige toepassingsmogelijkheden van waterstof aan bod komen.

2.1 *Onderzoek naar elektriciteitsverbruik*

Het elektriciteitsverbruik van een huishouden en een wijk hangt van verschillende factoren af. In de volgende deelhoofdstukken wordt een beeld ontwikkeld van het elektriciteitsverbruik anno 2005 ook zal er worden gekeken naar bezuinigingen op energie in de toekomst. In het volgende hoofdstuk wordt dit beeld verder uitgebreid naar het jaar 2030.

2.1.1 **Onderzoek naar energieverbruik van apparaten**

Welke apparaten verbruiken veel energie? Let op, energie = vermogen x tijd. In huis staan apparaten met een klein vermogen maar wel 24 uur per dag aan staan.

De hoeveelheid energie die apparaten verbruiken hangt af van het vermogen. Het vermogen van een apparaat wordt uitgedrukt in Watt.

Een gebruikelijke eenheid voor het weergeven van het energieverbruik is de kilowattuur (kWh). Dit is de tijd wat het apparaat aanstaat, maal het vermogen van het apparaat. Apparaten die veel stroom verbruiken zijn bijvoorbeeld een wasdroger, een koelkast of een waterbed. Je kunt deze apparaten niet alleen aan de hand van het vermogen met elkaar vergelijken, omdat sommige apparaten continu aanstaan, en andere zelden. Daarom is het beter het energieverbruik van apparaten te vergelijken met het kWh verbruik per jaar. Dit verbruik is echter afhankelijk van het gebruiksprofiel per persoon. Een ander belangrijke factor bij het energieverbruik is het sluipvermogen van een apparaat. Als de tv bijvoorbeeld in de stand-by stand staat, verbruikt deze ook een kleine hoeveelheid energie. Op jaarbasis kan dit echter flink oplopen. Uit onderzoek van de consumentenbond is gebleken dat 17% van het totale energieverbruik aan sluipverbruik verloren gaat.

Hieronder staat een overzicht van apparaten met het grootste energieverbruik op jaarbasis:

Apparaat	Verbruik kWh	Kosten per jaar (€ 0,18/kWh)
Elektrische boiler	1875	337,50
Waterbed	750	135
Verlichting	550	99
Koelkast	500	90
Wasdroger (150 wasbeurten)	500	90
Koken (elektrisch)	500	90
Vaatwasser	300	54
Wasmachine (150 wasbeurten)	200	36
Computer (10 uur per week)	180	32,4
Televisie	150	27
CV-pomp	150	27

Tabel 1 grootste energieverbruikers

In bijlage 1 staat een overzicht van de apparaten met hun bijbehorende vermogens. In bijlage 2 staat een overzicht van de apparaten met een groot sluipvermogen.

Deze vermogens zijn opgenomen in het model in Hoofdstuk 2.1.2; Energieverbruik bij verschillende huishoudens anno 2005 om het elektriciteitsverbruik per huishouden te bepalen

2.1.2 Energieverbruik bij verschillende huishoudens anno 2005

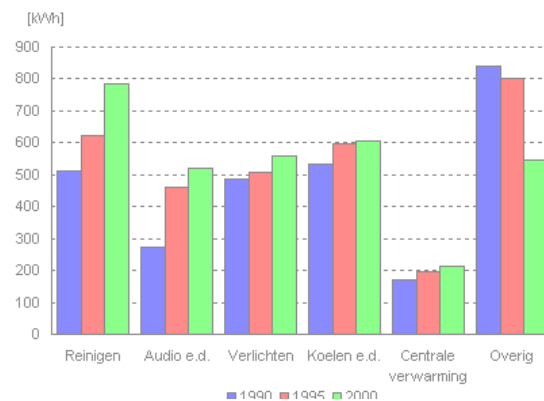
De ontwikkeling van het elektriciteitsverbruik wordt geanalyseerd op basis van het gemiddeld jaarlijks verbruik per huishouden. Voor deze analyse zijn gebruiksprofielen makkelijk in gebruik.

Verder wordt het energieverbruik per wijk opgesteld en hiervoor kunnen de mogelijke aspecten voor in de toekomst mee schetsen.

Om de tijden van verbruik te schatten zijn gezinsleden van de bepaalde huishoudens geraadpleegd.

Het elektriciteitsverbruik per huishouden is opgesplitst naar de volgende functies:

- Koelen/ vriezen
- Koken (fornuis, oven, magnetron, etc.)
- Reinigen (wasmachine vaatwasser enz.)
- Verlichting
- Klimaatbeheersing (c.v.-pomp)
- Warm tapwater
- Audio/video/communicatie en overig. (computer , tv etc.)
- Veiligheid



De gebruiksfuncties houden verband met een aantal apparaten. Verbruiken per apparaat kan worden gekoppeld aan jaarlijkse energieverbruik. Het gemiddeld huishoudelijk verbruik per apparaat wordt bepaald door de volgende zgn. apparaatfactoren:

- Penetratiegraad, (het aantal apparaten dat 100 huishoudens bezitten; deze kan boven de 100% liggen en is (meestal) een betere maat voor het verbruik.)
- Prestatie/ uitvoering/ capaciteit,
- Gebruikswijze/ intensiteit,
- Technische besparing

De waarde van deze factoren voor alle apparaten kan het verbruik per apparaat, per functie en per huishouden worden bepaald.

Ook wordt vaak het elektriciteitsverbruik van apparaten niet alleen ingezet voor primaire functies maar ook voor bijvoorbeeld, de stand-by functie dit zijn de secundaire functies, hiermee wordt in de gebruiksprofielen ook rekening gehouden.

Ook het gedrag van personen t.o.v. elektriciteitsverbruik levert een bijdrage aan het elektriciteitsgebruik.

Gebruiksgedrag beïnvloedt de duur van het gebruik, de wijze van gebruik (wasprogramma's) of de mate van gebruik (b.v. deel van de maximale capaciteit bij stofzuigers).

Het gedrag t.o.v. het elektriciteitsverbruik wordt onderscheiden in drie gedragen:

- Gebruiksgedrag (aangepast gebruik, duur van gebruik etc.)
- Aankoopgedrag (aankoop van duurzame consumptiegoederen)
- Indirect gedrag/ restricties (geen koppeling met consequenties voor elektriciteitsverbruik)

Uit het gebruikersgedrag en de apparaatfactoren kan het gemiddeld energieverbruik per functie in een huishouden worden opgesteld. Er zijn hiervoor in de gebruikersprofielen opgesteld met behulp van een excelbestand:

- Van een eenpersoonshuishouden,
- Van een tweepersoons huishouden,
- Van een driepersoons huishouden.

(Het lege Excelbestand is op diskette in de bijlage toegevoegd.)

Door vermogens en tijden per functie per huishouden in te vullen kan worden geconcludeerd anno 2005 dat een eenpersoonshuishouden in Nederland gemiddeld 2500 kWh per jaar verbruikt

Een tweepersoonshuishouden met 2 volwassenen waarvan 1 werkend verbruikt volgens het opgestelde gebruiksprofiel gemiddeld 2800 kWh per jaar

Een driepersoons huishouden, waarvan 2 volwassenen (1 werkend) en 1 kind, verbruikt volgens het model gemiddeld 3200 kWh per jaar

Hieronder is het verbruik in kWh per jaar per functie weergegeven in de tabel uit de opgestelde gebruiksprofielen.

◇ Eenpersoonshuishouden

Functie	Zomer	Herfst	Winter	lente	Totaal
Koelen/ vriezen	134	93	71	95	393
Koken (fornuis, oven, magnetron, etc.)	48	66	72	66	252
Reinigen (wasmachine vaatwasser enz.)	125	96	97	96	414
Verlichting	67	103	158	103	431
Klimaatbeheersing (c.v.-pomp)	78	58	113	58	307
Warm tapwater	51	48	58	48	205
Audio/video/communicatie en overig. (computer , tv etc.)	68	102	117	102	389
Veiligheid	39	39	39	39	156
Total	610	605	725	607	2547

Tabel 2 gebruiksprofiel eenpersoons huishouden

◇ Tweepersoons huishouden

Functie	Zomer	Herfst	Winter	lente	Totaal
Koelen/ vriezen	133	96	73	94	396
Koken (fornuis, oven, magnetron, etc.)	67	68	88	68	291
Reinigen (wasmachine vaatwasser enz.)	150	102	104	102	458
Verlichting	78	122	169	122	491
Klimaatbeheersing (c.v.-pomp)	89	67	125	67	348
Warm tapwater	54	45	63	45	207
Audio/video/communicatie en overig. (computer , tv etc.)	79	98	122	98	397
Veiligheid	39	39	39	39	156
Total	689	637	783	635	2744

Tabel 3 gebruiksprofiel tweepersoons huishouden

◇ Driepersoons huishouden

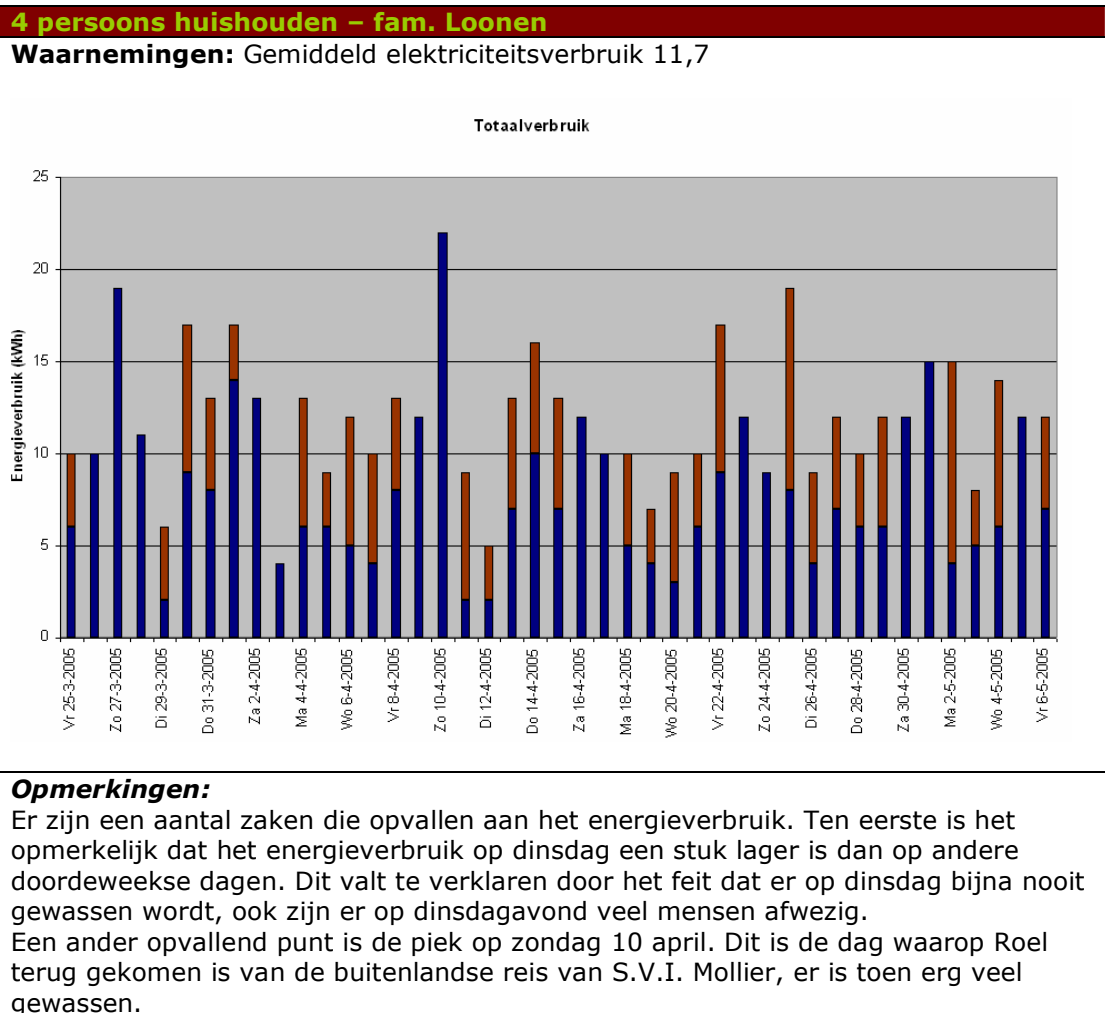
Functie	Zomer	Herfst	Winter	lente	Totaal
Koelen/ vriezen	174	130	118	130	552
Koken (fornuis, oven, magnetron, etc.)	68	78	92	78	316
Reinigen (wasmachine vaatwasser enz.)	191	134	139	134	598
Verlichting	78	133	169	133	513
Klimaatbeheersing (c.v.-pomp)	89	78	148	78	393
Warm tapwater	68	55	94	55	272
Audio/video/communicatie en overig. (computer , tv etc.)	72	89	103	89	353
Veiligheid	39	39	39	39	156
Total	779	736	902	736	3153

Tabel 4 gebruiksprofiel driepersoons huishouden

2.1.3 Onderzoek KWH stand bij verschillende huishoudens

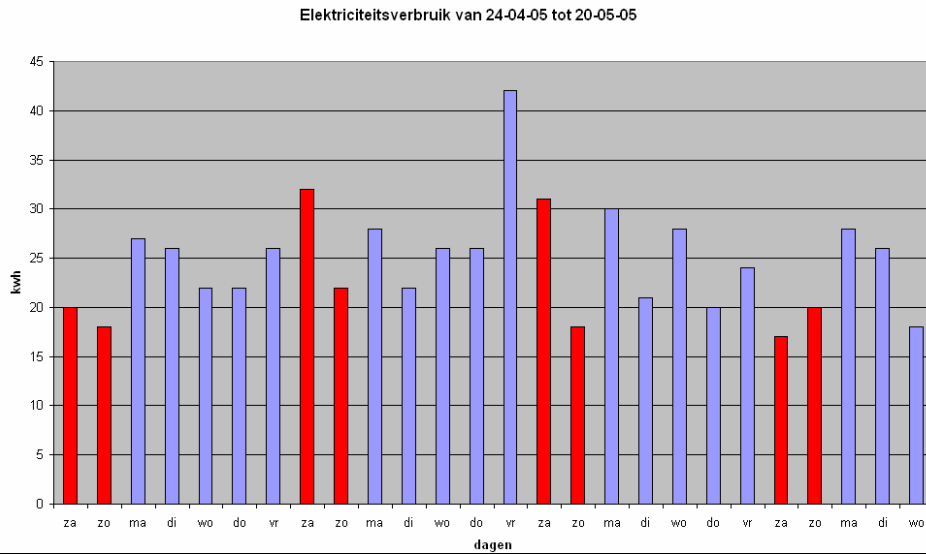
Om een goed beeld van het elektriciteitsverbruik en gedrag per huishouden te vormen is er een onderzoek ingesteld naar de meterstanden van verschillende huishoudens van een 4, 5 en een 6 persoonshuishouden.

Hieronder is in de staafdiagrammen te zien wat gemiddeld het elektriciteitsverbruik per dag per huishouden is daarbij staan ook opmerkingen over het gedrag en apparaten.



6 persoons huishouden – fam. Pennings

Waarnemingen: Gemiddeld elektriciteitsverbruik 24,6 kWh



Opmerkingen:

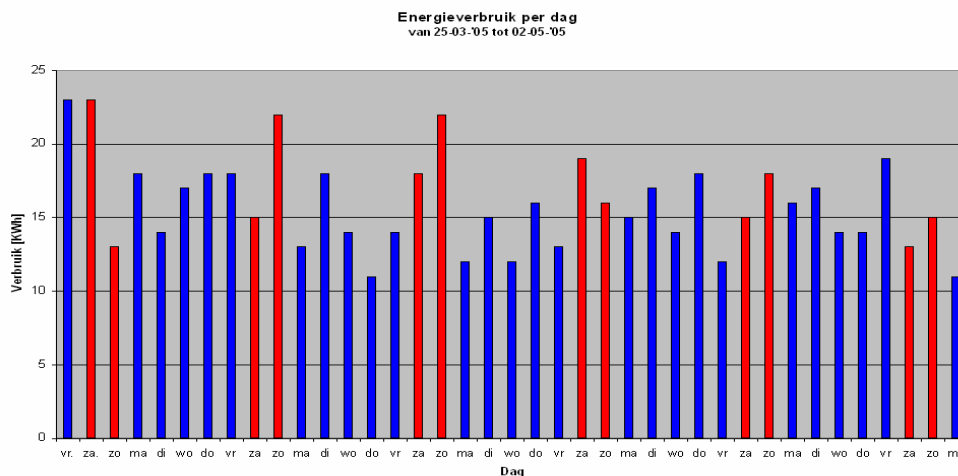
Over huishoudelijke apparaten: 2 elektrisch kookstellen 2 koelkasten in gebruik, tot 09-05-05 een waterbed.

Over het gedrag van bewoners: wasmachine: 2 tot 3 keer per dag.

Bij de piek van 42 kWh is de oven 3 uur in gebruik genomen, er is 3 uur gebruik gemaakt van het kookstel en frituurpan heeft aangestaan.

5 persoons huishouden – fam. Tuip

Waarnemingen: Gemiddeld elektriciteitsverbruik: 14,1 kWh per dag

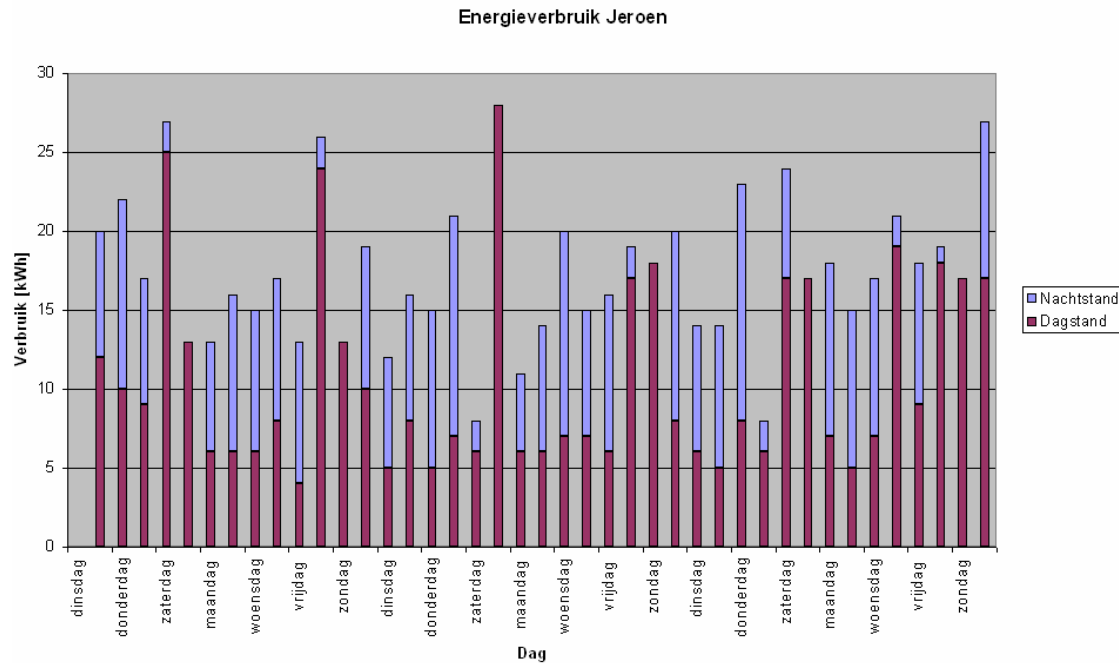


Opmerkingen:

Bijzonderheden apparaten: 2 diepvriezen, waterbed, geen elektrische kookplaat.

4 persoons huishouden – fam. Houben

Waarnemingen: Gemiddeld elektriciteitsverbruik: 17,5



Opmerkingen:

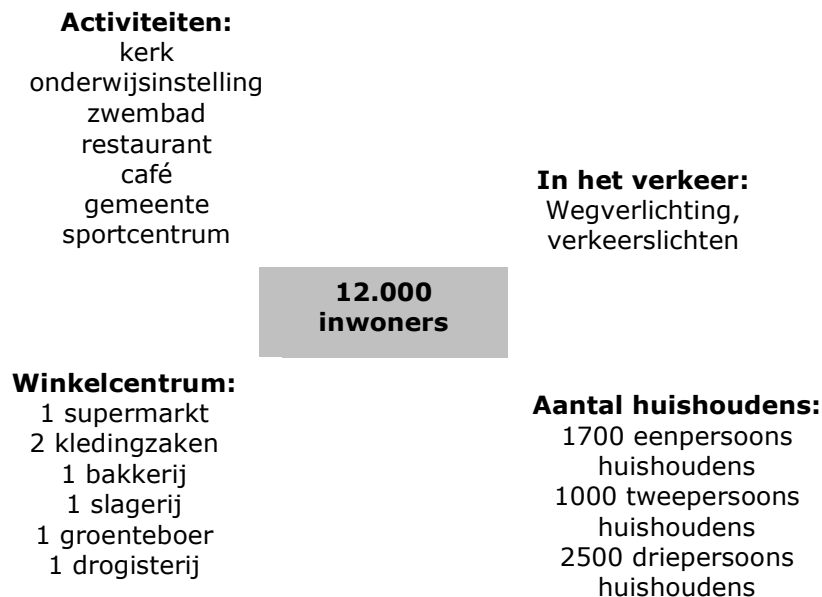
Van maandag tot vrijdag is een vrij gemiddeld verbruik te constateren. Op deze dagen is er overdag ook vrijwel niemand aanwezig in huis, dus het elektriciteitsverbruik ligt aan de lage kant. In de weekenden wordt meestal veel gewassen en meer gebruik gemaakt van de magnetron en ook van de frituurpan. De grote piek van 28 kWh overdag op de zondag (10 april) heeft dezelfde oorzaak als de piek bij de familie Loonen: Jeroen kwam terug van de studiereis met S.V.I. Mollier. Toen is ook veelvuldig gebruik gemaakt van de wasmachine, droger en strijkbout. Dit zorgt voor een verhoogde piek in het energieverbruik. Dus de meeste pieken worden veroorzaakt door de wasmachine, droger en ook door de combimagnetron en frituurpan. Ook wordt bij de familie Houben veel gebruik gemaakt van computers. Deze gebruiken gezamenlijk toch een behoorlijke hoeveelheid elektrische energie.

2.1.4 Verbruik in een wijk anno 2005

In dit hoofdstuk wordt een wijk geschetst en het elektriciteitsverbruik van een algemene wijk via gebruiksprofielen en informatiebronnen opgesteld.

Om het profiel op te stellen is eerst een beeld geschetst van een wijk, Om het aantal huishoudens te bepalen wordt rekening gehouden met individualisering en gezinsverdunding.

De gemiddelde gezinsgrote is anno 2005 gesteld op 2,31 personen per huishouden, het aantal alleenstaanden bedraagt momenteel ongeveer 33% van het aantal huishoudens. In het schema hieronder wordt een wijk geschetst met een inwonersaantal van 12.000 inwoners, waarbij ook rekening wordt gehouden met activiteiten, verkeer enz.



Figuur 1 beeld wijk

Het elektriciteitsverbruik van de huishoudens is te vinden in Hoofdstuk 2.1.2; Energieverbruik bij verschillende huishoudens anno 2005
 Het elektriciteitsverbruik van de andere instellingen en bezigheden zijn te vinden in het schema hieronder. Dit elektriciteitsverbruik hebben we gevonden in de literatuur, in het schema zijn de bronnen erbij vermeld.

Instellingen en bezigheden	Elektriciteitsverbruik	bron
1700 eenpersoons huishoudens	4250	
1000 tweepersoons huishoudens	2800	
2500 driepersoons huishoudens	8000	
kerk	5	Abdij Heeswijk
onderwijsinstelling	50	Het mozaïek te Heeswijk
zwembad	280	CBS
restaurant	8	Athena te Olland
café	4	
gemeentehuis	8	
sportcentrum	10	CBS
1 supermarkt	75	Jumbo supermarkt
2 kledingzaken	5	
1 bakkerij	3	Van Doomenick
1 slagerij	10	
1 drogisterij	3	
Wegverlichting, verkeerslichten e.d.	294	Smith, Seattle City Light, personal communication, 2003.
totaal	15791	

Figuur 2 elektriciteitsverbruik in een wijk

We kunnen hieruit concluderen dat een wijk met 12.000 inwoners in 2005 gemiddeld 16000 MWh aan elektriciteit per jaar verbruikt.

Het elektriciteitsverbruik is afhankelijk van een aantal factoren: Individualisering heeft bijvoorbeeld geleid tot kleinere huishoudens en meer afzonderlijke activiteiten van gezinsleden, daarnaast komen onder andere Inkomensontwikkeling, energieprijzen en totale kosten, woningbestand (factoren zoals oude woningen verbruiken meer als nieuwe) en energie-infrastructuur, vervangingstijdstip, aanwezigheidsgraad (afhankelijk van gezinsverdunding) besparingsbeleid en milieubewustzijn.

De wijk zal in de loop der jaren niet meer veel van beeld veranderen. Het energieverbruik gaat in de toekomst waarschijnlijk wel veranderen. In de volgende hoofdstukken gaan we daarom een beeld scheppen van het elektriciteitsverbruik van een huishouden en wijk in het jaar 2030.

2.1.5 Bezuinigingen op energie in de toekomst?

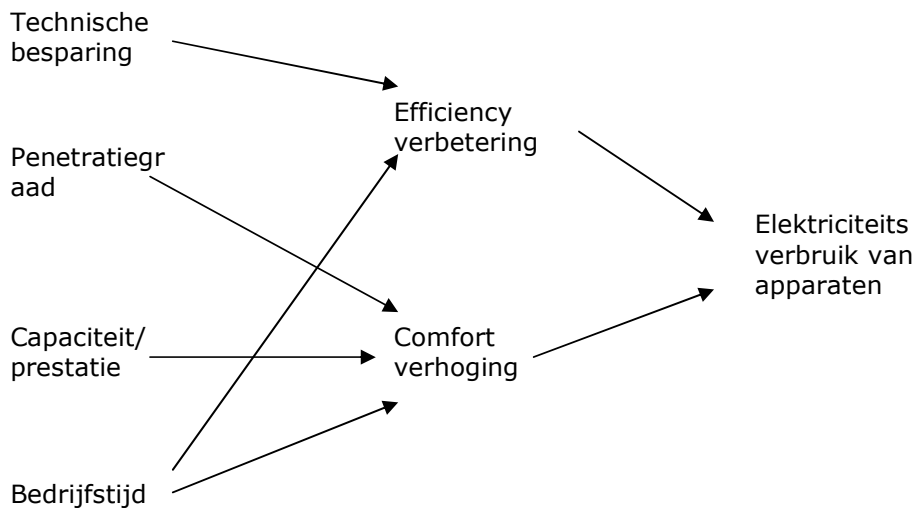
Energiebesparing heeft een hoog potentieel voor het reduceren van energieverbruik. Energiebesparing wordt als zeer wenselijk beschouwd in de analyse omdat het zowel voor de voorzieningszekerheid (de lange termijn beschikbaarheid van energie) als voor het reduceren van de CO₂-uitstoot een voordelige optie is. Energiebesparing kan plaatshebben in huishoudens (minder of zuiniger apparaten bijvoorbeeld), in de industrie (energie-efficiëntere processen) of in de woning- en kantoorbouw ("nul-energiewoningen").

De uiteindelijke kosten zijn vaak laag of kunnen zelfs binnen enkele jaren worden terugverdiend door de energieconsument. Echter, de investeringen die moeten worden gedaan zijn vaak relatief hoog en moeten bovendien niet in alle gevallen worden gedaan door degene die aan de besparing verdient. Er zijn zelfs situaties waarin niemand direct baat heeft bij besparing. Er is in het algemeen een gebrek aan bewustzijn over de kostenbesparingen die als gevolg van een lagere energierekening kunnen worden gehaald.

Verandering in het gemiddelde verbruik wordt bepaald door de volgende factoren:

- Toename van de penetratie van apparaten
- In-/extensiever gebruik
- Andere prestatie
- Technische verbetering van apparaten

In de volgende figuur is een schema weergegeven van de relatieve apparaatfactoren en effecten van verbruiksentwikkeling.



Figuur 3 besparingen

Ook de niet apparaatgebonden besparende ontwikkelingen zoals wassen bij lagere temperatuur met andere wasmiddelen, leveren een aanzienlijke bijdrage aan de verbruiksvermindering.

Het consumentengedrag in Nederland lijkt meer in de richting van een groter energieverbruik te gaan dan in de richting van energiebesparing. In de analyse wordt uitgegaan van een maximaal haalbare energiebesparing en efficiencyverhoging van ca. 20% bij gestaag stijgende welvaart en bepaalde - enigszins beperkte - kostenveronderstellingen. Aangezien vrijwillige gedragsverandering niet lijkt te gebeuren, zouden verdere besparingen mogelijk kunnen zijn door financieel afgedwongen gedragsverandering.

Aan de hand van het verloop van deze factoren zal moeten worden bepaald hoe het elektriciteitsverbruik in de toekomst zal veranderen. Ook is het verbruik afhankelijk van het gedrag van de gebruikers. Door een visie op het geheel wordt in de hoofdstukken hierna een gevoel ontwikkeld voor het elektriciteitsverbruik voor een huishouden en in een wijk in de toekomst.

2.1.6 Tijdschema, trendbreuken en de technische consequenties

Om inzicht te krijgen in het verloop van de ontwikkelingen en het elektriciteitsverbruik voor 2030 is er een tijdschema opgesteld en trendbreuken en technische consequenties aangegeven.

Trendbreuken

Er is grote behoefte is aan een betrouwbaar elektriciteitsnet.

In dit hoofdstuk worden het tijdschema en de trendbreuken rondom de elektriciteitsvoorziening behandeld en daarmee de bijkomende technische consequenties. Er zijn verschillende soorten trendbreuken te onderscheiden, namelijk:

- Maatschappelijke trendbreuken,
- Economische trendbreuken
- Technologische trendbreuken

In bijlage 3 is een tijdschema opgesteld over de belangrijke trendbreuken met de gevolgen daarvan. Hieronder is daar een samenvatting van te zien.

Al met al is te zien dat er in de afgelopen 74 jaar een heleboel technologische ontwikkelingen op het gebied van de energietechniek zijn geweest en dat een aantal daarvan een zeer sterke invloed op de hedendaagse energiemarkt heeft gehad en nog steeds heeft. Veruit de belangrijkste ontdekkingen en trendbreuken waren:

- De ontdekking van kernenergie [1930]
- De eerste toepassing van warmtepompen [1930]
- Oprichting eerste waterkrachtcentrale [1931]
- Recycling neemt een grote vlucht [1939]
- Plaatsing eerste windturbine ter opwekking van elektrische energie [1941]
- Oprichting eerste nucleaire reactor [1946]
- Uitvinding van de transistor [1948]
- Oprichting eerste huis dat volledig afhankelijk is van zonnewarmte [1948]
- Ingebruikname eerste gasturbine voor stroomopwekking [1949]
- Uit atoomenergie wordt voor het eerst elektrische energie opgewekt [1950]
- Uitvinding zonnecellen [1954]
- Eerste succesvolle toepassing van de brandstofcel [1965]
- Introductie van zonne-energie in Nederland [1970]
- De 20%-rendementsbarrière voor zonnecellen wordt doorbroken [1985]
- Introductie van het eerste elektrische vervoermiddel [1990]
- Energieproductie vindt steeds vaker decentraal plaats [2001]
- Forse stijging van het gebruik van groene stroom in Nederland [2003]

Verder in dit rapport wordt de productie van waterstof en brandstofcellen uitgewerkt.

2.2 Waterstof als elektriciteitsvoorziening

In hoofdstuk 2.2 zal dieper worden ingegaan op de mogelijkheden van waterstof. Zo zal de productie, de brandstofcel, de veiligheid, de opslag en het transport aan bod komen. In hoofdstuk 3 zal de toepassing van waterstof voor de toekomst verder uitgewerkt worden.

2.2.1 Productie van waterstof

Waterstof komt in de natuur niet voor als zuivere energiebron zoals aardolie of aardgas. Om waterstof te produceren moet het losgemaakt worden uit een verbinding. Daar is energie voor nodig. Deze energie kan op een duurzame en op een niet-duurzame manier verkregen worden.

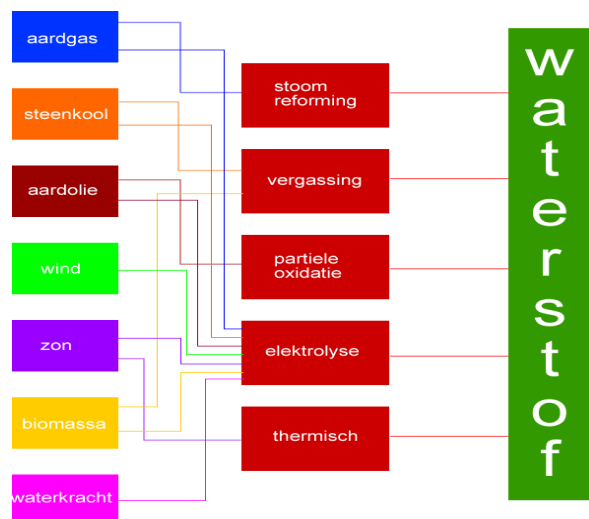
Jaarlijks wordt er wereldwijd ongeveer 500 m³ waterstof geproduceerd. Van de totale wereldwijde productie komt ongeveer 40% van chemische processen of raffinageprocessen waarbij waterstof als bijproduct vrijkomt.

Vrijwel alle vandaag de dag geproduceerde waterstof is voor industriële toepassing (zoals productie van glas of halfgeleiders of chemische omzettingen) en niet zozeer voor waterstof als energiedrager.

Bron	Hoeveelheid(m ³ /jaar)	Deel van het totaal
Aardgas	238	47,6%
Steenkool	153	30,6%
Aardolie	84	16,8%
Elektrolyse fossiel	19	3,8%
Elektrolyse duurzaam	6	1,2%
Totaal	500	100%

Figuur 4 productie van waterstof

In het schema hieronder is te zien op welke manieren, en met welke energiebronnen, we op dit moment, waterstof kunnen produceren.



Figuur 5 productie van waterstof

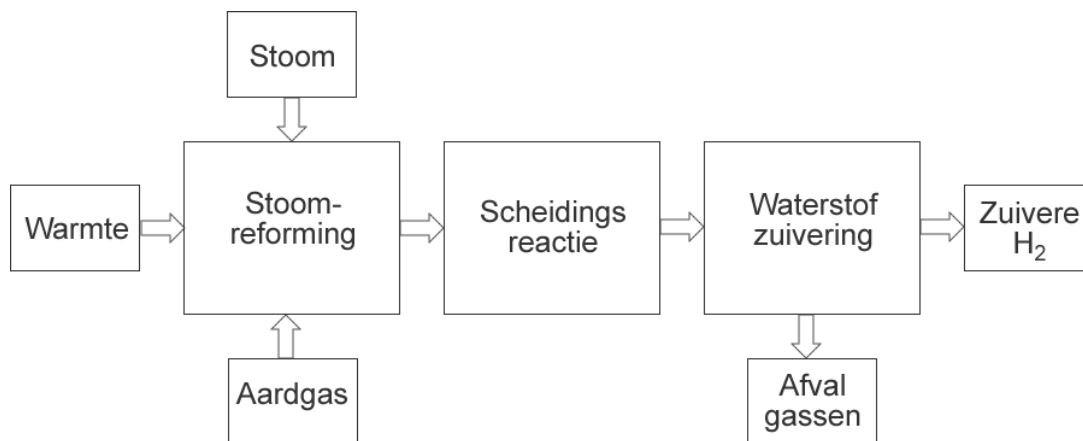
Stoom reforming van aardgas

Stoom en aardgas worden in een reactorvat op een temperatuur van zo'n 900 °C gebracht. Met behulp van nikkel als katalysator reageert de stoom met het aardgas tot koolstofmonoïoxide en waterstof.

In formulevorm: $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$

Het synthetische gasmengsel, bestaande uit aardgas, stoom, koolstofmonoïoxide, koolstofdioxide en waterstof wordt vervolgens naar een scheidingsreactor gebracht. Hier wordt nog een keer stoom toegevoegd om meer waterstofgas te verkrijgen. Deze reactie ziet er als volgt uit: $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$

Na deze reactie bestaat het gas al uit zo'n 75 – 80 % waterstofgas. Het gas kan nog gezuiverd worden, waarna het zo'n 99% waterstof bevat. Dit kan gedaan worden met de *pressure swing adsorption* (PSA)¹ methode of door gebruik te maken van palladium membranen.



Figuur 6

In de industrie wordt al op grote schaal gebruik gemaakt van dit proces, onder meer voor de productie van waterstof voor kunstmest. Ongeveer de helft van het op dit moment geproduceerde waterstof wordt door stoom reforming geproduceerd.

Steenkoolvergassing

Kolenvergassing vindt plaats door fijn gepoederd steenkool bij een temperatuur van ongeveer 1200 °C te laten reageren met zuurstof. Voordat het gas in de shiftsectie gaat worden asdeeltjes en zwavelverbindingen verwijderd. Het verdere proces verloopt hetzelfde als bij stoom reforming.

¹ Bij pressure swing adsorption wordt het gas onder verhoogde druk door een vat met actief kool geleid. CO₂ wordt geadsorbeerd door het actieve kool. Door vervolgens de druk in het vat sterk te verlagen komt de CO₂ weer vrij.

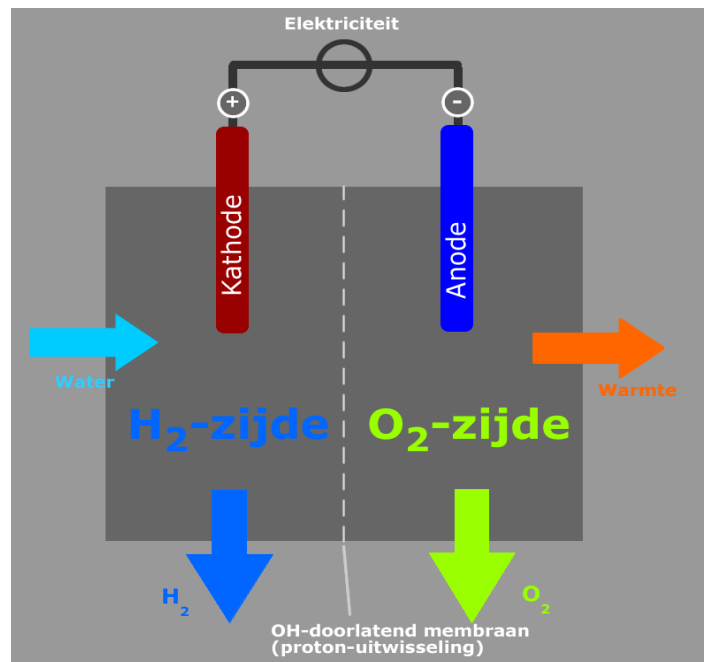
Partiële oxidatie van aardolie

Dit proces is ongeveer gelijk aan de vergassing van kolen. Het verschil is dat je nu te maken hebt met een vloeibare grondstof. Ook hoef je geen asdeeltjes af te vangen.

Het rendement van waterstof uit steenkool en aardolie is niet zo hoog als de productie van waterstof door stoom-reforming van aardgas. Dit komt doordat er meer CO₂ geproduceerd wordt en omdat er meer zuiveringstappen nodig zijn. Toch worden deze productietechnieken wel toegepast om niet alleen afhankelijk te zijn van aardgas.

Elektrolyse

Elektrolyse is een reactie waarbij water met behulp van elektriciteit wordt gesplitst in waterstof- en zuurstofatomen. Schematisch ziet de elektrolyse er als volgt uit:

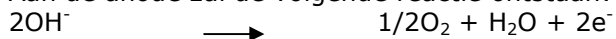


Figuur 7 brandstofcel

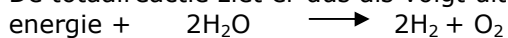
Aan de kathode zal de volgende reactie ontstaan:



Aan de anode zal de volgende reactie ontstaan:



De totaalreactie ziet er dus als volgt uit:



De energie die nodig is voor de elektrolyse kan gehaald worden uit fossiele en uit duurzame energiebronnen.

Je kunt de stroom uit het conventionele elektriciteitsnet gebruiken om water te elektrolyseren. Deze methode wordt nu nog het meest toegepast om waterstof te produceren door middel van elektrolyse. Om de CO₂-emissie zo goed mogelijk te beperken is het noodzakelijk om over te stappen op elektriciteit uit duurzame energiebronnen. Je kunt hierbij denken aan zonne-energie, waterkracht, biomassa en windenergie.

Waterkracht

Waterkracht zou, middels de elektrolyse van water, een grote hoeveelheid waterstof voor een waterstofeconomie kunnen produceren. De moeilijkheid is dat waterkracht veelal veraf gelegen is van de stedelijke gebieden. Vervoer van waterstof over honderden of duizenden kilometers is erg lastig.

Windenergie

De wind energie wordt door middel van windturbines omgezet in elektriciteit. Wind is overal beschikbaar en is onuitputtelijk, maar naast duidelijke voordelen kent windenergie enige inherente nadelen: locatie specifiek, seizoensafhankelijk, discontinue beschikbaarheid, lage capaciteit.

Zonne-energie

In een fotonvoltaïsche cel wordt zonlicht omgezet in elektriciteit. Bij dit proces wordt gebruik gemaakt van het fotonvoltaïsch effect waarbij met halfgeleiders een elektrische spanning wordt gegenereerd wanneer de zon schijnt. Waterstofproductie door elektrolyse van water d.m.v. zonne-energie is op dit moment vooral interessant op zonnrijke plaatsen waar fossiele bronnen schaars zijn en waar geen aansluiting is op het elektriciteitsnet.

Zonne-energie kan nog op twee andere manieren ingezet worden voor de productie van waterstof. In zonnearmtekrachtcentrales kan de warmte die wordt gegenereerd door zonnestraling worden opgevangen, met deze energie wordt water opgewarmd. Het opgewarmde water kan worden gebruikt om traditionele stoomturbines of stirling motoren aan te drijven.

Als het water een temperatuur van boven de 2000 °C bereikt vallen de watermoleculen uiteen in radicalen. Na afkoeling ontstaat dan H₂ en O₂.

Biomassa

Om uit biomassa elektriciteit op te wekken moet de biomassa verbrandt worden. De warmte die hierbij vrij komt wordt gebruikt om stoom te maken. Deze stoom drijft een stoomturbine of motor aan die via een generator elektriciteit maakt. Deze elektriciteit kan weer gebruikt worden voor de elektrolyse van water.

Uit biomassa kan ook rechtstreeks waterstof gemaakt worden. Dit proces lijkt veel op de stoom-reforming van aardgas. De biomassa wordt vergast waarna hetzelfde synthetische gas ontstaat als bij stoom-reforming. Na een reactie met stoom, scheiding en zuivering ontstaat de zuivere waterstof.

2.2.2 De werking van de brandstofcel

De werking van een brandstofcel is vergelijkbaar met die van een batterij. Er is een unit met twee zijden. De ene zijde bevat H₂-gas de andere zijde bevat O₂-gas. De H-zijde heeft een positieve lading, de O-zijde negatieve lading. Echter wordt in een brandstofcel energie opgewekt, in tegen stelling tot de batterij, waarin energie is opgeslagen. Door nu elektroden te plaatsen in de twee zijden en deze met een elektrolyt te verbinden ontstaat een elektronenstroom, wat dus een potentiaalverschil tot gevolg heeft. Kortom, er wordt elektriciteit opgewekt.

Bij een brandstofcel moeten de chemicaliën, het H₂-gas en het O₂-gas, toegevoegd worden. Daarmee is de brandstofcel voor hergebruik geschikt. De H₂-zijde en O₂-zijde worden gescheiden door een OH-doorlatend membraan. Onder begeleiding van een katalysator vindt het proces plaats. Het is in feite een omgedraaide katalysereactie waarbij warmte, water (stoom) en de gewilde elektrische energie vrijkomen:



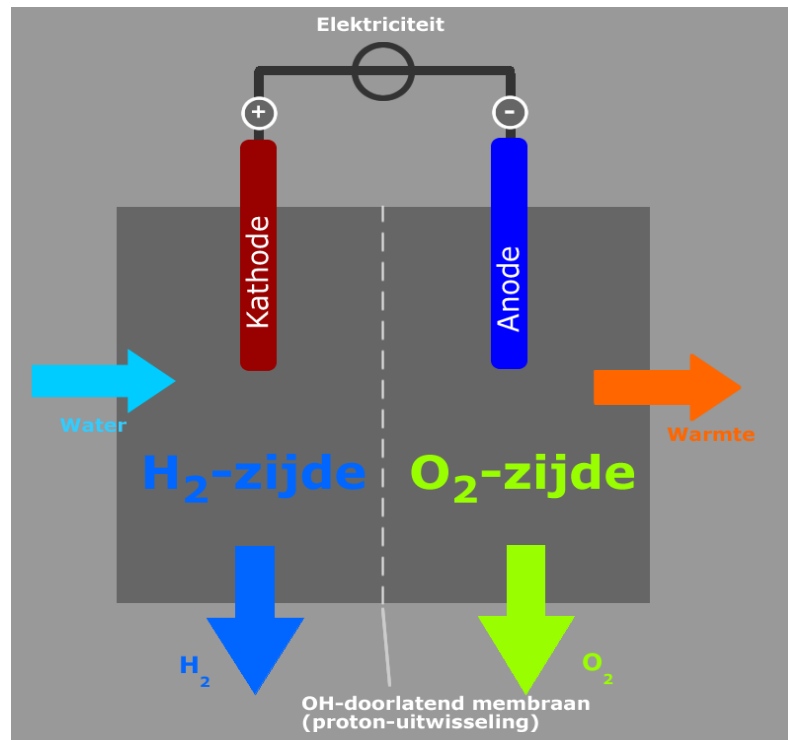
Figuur 8: het proces dat in de brandstofcel plaatsvindt

Één cel levert echter weinig potentiaalverschil op, vandaar dat een serie cellen aan elkaar gekoppeld wordt. Dit levert een zogenaamde 'stack' op. De geleverde voltage kan op deze wijze verhoogd worden. Op dit moment zijn ongeveer 8 verschillende typen brandstofcellen in omloop, we zullen ze kort bespreken (deze zijn in bijlage 4 weergegeven):

- Alkaline Fuel Cell (AFC)
- Direct Methanol Fuel Cell (DMFC)
- Molten Carbonate Fuel Cell (MFCF)
- Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC)
- Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)
- Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)
- Zink-lucht brandstofcel (ZAFC)
- Keramische Protonuitwisselende brandstofcel (PCFC)

De MFCF en SOFC werken bij hogere temperaturen tussen de 600 en 1000°C. En de andere 4 hebben operationele temperaturen tussen de 50 en 200 graden Celcius. Deze operationele temperaturen zullen in de toekomst omlaag gaan, omdat de brandstofcellen ook in koude landen, waar de temperaturen lager dan -20 graden Celcius kunnen zijn, ook inzetbaar moeten kunnen zijn.

Hieronder is de werking van de brandstofcel schematisch weergegeven:



Figuur 9: de werking van een brandstofcel

2.2.3 Veiligheid

Waterstof als brandstof verschilt in een aantal opzichten van aardgas. De verschillen tussen de beide gasen zijn echter klein en de risico's van aardgas zijn goed te beheersen. Volgens technici van TNO zijn de risico's van waterstof eveneens goed te controleren [TNO, 1975]. Weinig mensen echter kennen de voordelen en werkelijke risico's van waterstof.

Vergelijking waterstof met aardgas

De concentraties van waterstof in de lucht waarbij er explosiegevaar optreedt ligt tussen de 4% en 75%. Bij waterstofconcentraties van 4% tot 18% in lucht bestaat de kans op een explosieve verbranding met laminaire vlam, de zogenaamde deflagratie. Als de concentratie van waterstof in lucht groter wordt dan 18%, bestaat de kans op detonatie. Een detonatie is een explosie met een turbulent karakter, waarbij de drukverhoging de 30 bar kan overschrijden. De ontstekingsenergie die nodig is om een waterstof/lucht mengsel te laten exploderen ligt bij de 0,02 mJ. Deze ontstekingsenergie is te vergelijken met een elektrostatisch vonkje dat kan ontstaan bij synthetische kleren. Aardgas heeft een beperkte explosiegrens in lucht. Bij concentraties van 6 tot 15% aardgas in lucht kunnen explosies optreden. De detonatiegrens van aardgas loopt ongeveer gelijk aan de explosiegrens. De ontstekingsenergie nodig om een aardgas/lucht mengsel te laten ontploffen is 4,2 mJ.

Bij een eventuele laminaire lekkage uit een gelijke lekopening is het energieverlies van waterstof minder dan dat van aardgas. Het energieverlies voor waterstof bij gelijke overdruk scheelt een factor 0,46 ten opzichte van aardgas. (Bijlage 6 eigenschappen). Waterstof heeft een hogere verbrandingstemperatuur dan aardgas, maar de kans op brandwonden is bij waterstofvlammen minder dan bij aardgasvlammen, omdat de stralingswarmte gering is. Verder heeft waterstofgas geen geur en is het kleurloos. De vlamkleur van waterstof heeft eveneens geen kleur, dit in tegenstelling tot aardgas waar de vlam blauw/geel kleurt [TNO, 1975] [Bergsma, 1996]

Veiligheidsmaatregelen

Bepaalde voorzorgsmaatregelen moeten worden genomen om het gebruik van waterstof veilig te maken:

- Het gebruik van geschikt leidingmateriaal dat bestand is tegen waterstofverbrossing
- Het zorgvuldig solderen van de gasleidingen en het gebruik van waterstofbestendige koppelstukken.
- Het gebruik van goedgekeurde installaties, bijvoorbeeld door een waterstof keurmerk te introduceren.

Behalve deze maatregelen is het van belang dat waterstoflekkages vroegtijdig worden opgespoord in slecht geventileerde ruimtes. Speciale detectie-apparatuur kan in deze ruimtes worden aangebracht. Een illuminant en een odorant moeten aan waterstofgas worden toegevoegd om waterstofgas ruikbaar te maken en de vlam kleur te geven. Bij de keuze van deze kleur -en reukstof moet rekening worden gehouden met de aantasting van technische toepassingen [Commissie Ampere, 2000].

Concluderend kan het volgende worden gezegd: door de jarenlange industriële ervaring met waterstof en de huidige stand van de techniek kan waterstof in principe even veilig worden gebruikt als aardgas.

2.2.4 Waterstoftransport

Transport van waterstof

Een waterstofketen kan worden opgedeeld in productie, transport en te gebruiken H₂. In schema 1 van bijlage 5 is te zien dat het transportgedeelte een centrale plek binnen de waterstofketen heeft en daardoor de prestatie van de keten als geheel in grote mate kan beïnvloeden.

In dit hoofdstuk wordt een beeld gegeven van de manier waarop waterstof kan worden getransporteerd en waarvan de keuze van de transportvorm afhangt. Het transport naar woonwijken en huizen zal uitgebreid besproken worden.

Het transportgedeelte van waterstof kan worden opgedeeld in: voorbereiding voor het transport, opslag, transport, opnieuw opslag en voorbereiding voor het gebruik (zie bijlage 5, schema 2).

Het transport van waterstof kan plaatsvinden via vervoersmiddelen en leidingen. De waterstof kan ook in verschillende fasen getransporteerd worden. Voor het transport zijn er in totaal acht verschillende combinaties mogelijk:

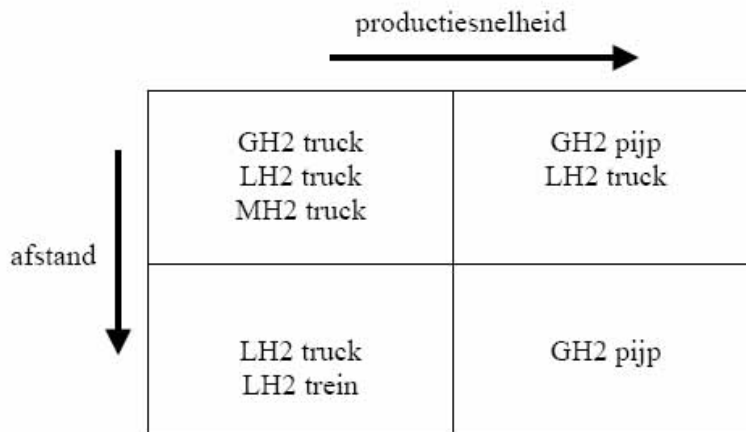
- De gasvorm (GH₂) in truck, trein, of leiding,
- De vloeibare vorm (LH₂) en trein, truck, of schip
- Of de gebonden vorm (MH₂) in truck of trein.

In figuur 10 is de hoeveelheid te transporteren waterstof (kg) aangegeven.

	truck	treinwagon	schip
GH ₂	180	454	
LH ₂	4080	9090	45000
MH ₂	454	910	

Figuur 10 hoeveelheid te transporteren waterstof

In figuur 11 is aangegeven welke combinatie op economisch gebied het gunstigste is.



Figuur 11 economische visie op transport

Hieronder zullen kort de hierboven vermelde mogelijkheden specifiek bekeken worden.

Vrachtwagens

Bij gebruik van waterstof voor voertuigen, zal waterstof met bijvoorbeeld vrachtwagens bij tankstations geleverd kunnen worden. Dit heeft echter grote nadelen.

Eens 40-tons vrachtwagen kan ongeveer 26 ton benzine naar een tankstation transporteren. Als dezelfde vrachtwagen waterstof moet gaan vervoeren, zal hier maar 400 kg in kunnen. Om het waterstof vloeibaar te houden is er een druk van 200 bar nodig. Waterstof heeft echter een hogere energiedichtheid. Om eenzelfde hoeveelheid energie als bij benzine te leveren zullen er 15 vrachtwagens met waterstof nodig zijn. Ook veiligheid is een belangrijk punt bij het vervoer. Doordat de waterstof onder hoge druk vervoerd wordt, kan dit bij ongelukken tot grote explosies leiden.

Treinen

Het transport van waterstof door treinen heeft een aantal voordelen. Het is relatief goedkoop door de grote hoeveelheden dat per keer vervoerd kunnen worden. Ook kunnen er grote afstanden bereikt worden per spoor. Een ander voordeel is dat er gebruik kan worden gemaakt van het huidige spoornetwerk, de enige aanpassing die er plaats zal moeten vinden is in de treinwagons waarin de waterstof opgeslagen zit. Deze zullen vloeibaar waterstof bij extreem lage temperaturen moeten vervoeren.

Er zijn echter ook een aantal belangrijke nadelen die een rol spelen. Het transport is bijvoorbeeld beperkt door de capaciteit van het spoorwagennet. Hierdoor zal het laatste deel van het transport met een ander vervoersmiddel moeten gebeuren. Dit kost extra tijd en geld. Een ander nadeel zijn de vertragingskosten waarmee men te maken heeft. In Nederland hebben de personentreinen voorrang op de goederentreinen, waardoor de kans op vertragingskosten extra groot is. Dit alles zorgt ervoor dat de trein maar in beperkte mate geschikt is voor waterstof transport.

Pijpleidingen

Het vervoeren van waterstof door middel van pijpleidingen betreft een geheel ander soort van transport. De ondergrondse infrastructuur is geheel afgescheiden van andere soorten infrastructuur. Dit heeft het grote voordeel dat kans op schade klein is door de afwezigheid van invloeden van buitenaf (zoals weersomstandigheden). Een ander kenmerk dat transport per pijpleiding onderscheidt van de andere vervoermodaliteiten is dat hierbij geen sprake is van het vervoer met containers, het kan direct door de pijpleiding vervoerd worden. Voordelig is tevens dat men door de afgescheiden infrastructuur geen rekening hoeft te houden met enige vormen van vertraging. Voor het transport naar woonwijken en van de distributiepunten naar de woonhuizen kunnen de huidige aardgasleidingen worden gebruikt. Deze dienen daarvoor wel aangepast te worden (zie hoofdstuk 3.2.2). Aan de vraag naar waterstof kan op deze manier continu gehoor worden gegeven, waardoor deze vorm van waterstoftransport de beste optie is voor het transport naar de lokale gebruikers.

Transport per pijpleiding kent ook een aantal nadelen. Allereerst wordt er in Nederland niet veel goederen per leiding vervoerd, dit betreft slechts 5% (Van Ham, 2004). Om een volwaardig alternatief te vormen ten opzichten van het wegvervoer, spoorvervoer en het vervoer per binnenschip zal uitbreiding van het aardgasnetwerk noodzakelijk zijn. Hier zijn echter weer investeringskosten aan verbonden. Toch zijn pijpleidingen de beste optie voor transport op grote afstanden

2.2.5 Waterstofopslag

Opslag

Waterstof kan een grote rol gaan spelen op verschillende gebieden. Wij concentreren ons vooral op het gebruik van waterstof op wijk en huisniveau. Hier zal waterstof gebruikt kunnen worden als brandstof, maar ook als opslagmiddel om tekorten aan energie op te vangen en overschoten aan energie op te slaan.

Bij gebruik van waterstof als brandstof voor voertuigen is sprake van mobiele opslag. Bij het gebruik van waterstof op wijk en huisniveau heb je te maken met stationaire opslag. De laatste vorm zal in dit hoofdstuk nader besproken worden.

Vormen stationaire opslag

Bij stationaire opslag zijn er verschillende mogelijkheden. Het bepalen van de beste manier gebeurt op basis van de productiesnelheden en de opslagperiode.

Waterstof kan opgeslagen worden als gecompriemd gas (boven en ondergronds, aangeduid met respectievelijk GH_2 en GH_2O), als vloeistof (LH_2), of gebonden in een metaalhydride (MH_2). Deze vier vormen worden hier kort besproken:

Metaalhydride opslag

Bij deze vorm worden waterstofmoleculen tijdelijk opgeslagen in het atoomrooster van metalen. Dit gebeurt onder hoge druk waarbij warmte vrij komt. Om het waterstof weer vrij te maken zal er warmte toegevoegd moeten worden. Deze manier wordt onderzocht voor mobiele en stationaire systemen die waterstof gebruiken. Deze methode is vooral bij grote hoeveelheden erg duur.

Vloeibare opslag

Het vloeibaar maken van waterstof kost veel energie, terwijl er door verdamping ongeveer 5% van de waterstof verloren gaat. Vloeibare waterstof wordt opgeslagen bij een temperatuur rond het kookpunt van waterstof, ongeveer $-253\text{ }^\circ\text{C}$. De kosten van vloeibare waterstof zijn in verhouding met de gasvormige opslag erg hoog. Dit komt doordat er veel elektriciteit nodig is voor het liquideren.

Gasvormige opslag bovengronds

Dit is een vorm die vooral op kleinschalig niveau toegepast kan worden. In de industrie wordt deze vorm al vaak gebruikt. Bij deze vorm wordt het gas onder hoge druk in vaten opgeslagen. De druk kan variëren van 1 MPa in lagedrukvaten tot 30 MPa in hogedrukcilinders. De capaciteit van deze vorm is te laag, om te gebruiken voor hele steden. Daarvoor komt ondergrondse gasopslag in aanmerking.

Gasvormige opslag ondergronds

Waterstof kan bij deze manier opgeslagen worden in oude gas- of olievelden, of oude zoutmijnen. Op deze manier kan veel waterstof opgeslagen worden. In de stad Ontario (noord-Amerika) wordt deze manier al toegepast. Hier wordt $20 \cdot 10^6\text{ m}^3$ waterstof opgeslagen, onder een druk van 64 bar. Deze vorm van opslag lijkt het meest voor de hand liggend voor de waterstof opslag voor grote gebieden. Een nadeel van deze vorm is dat deze alleen gebruikt kan worden, bij aanwezigheid van oude gas- of olievelden, of oude zoutmijnen. Van deze opslagplaatsen kan het gas wel over grote afstanden worden getransporteerd via pijpleidingen.

3 **Energiemogelijkheden in de toekomst**

In de toekomst zal er overgestapt moeten worden naar duurzame energie omdat in het Kyoto protocol wordt gestreefd naar een reductie van de uitstoot van CO₂. In het volgende hoofdstuk wordt de energiebehoefte van een wijk uitgewerkt in de zin van duurzame energiebronnen. Waterstof wordt nader besproken en uitgediept.

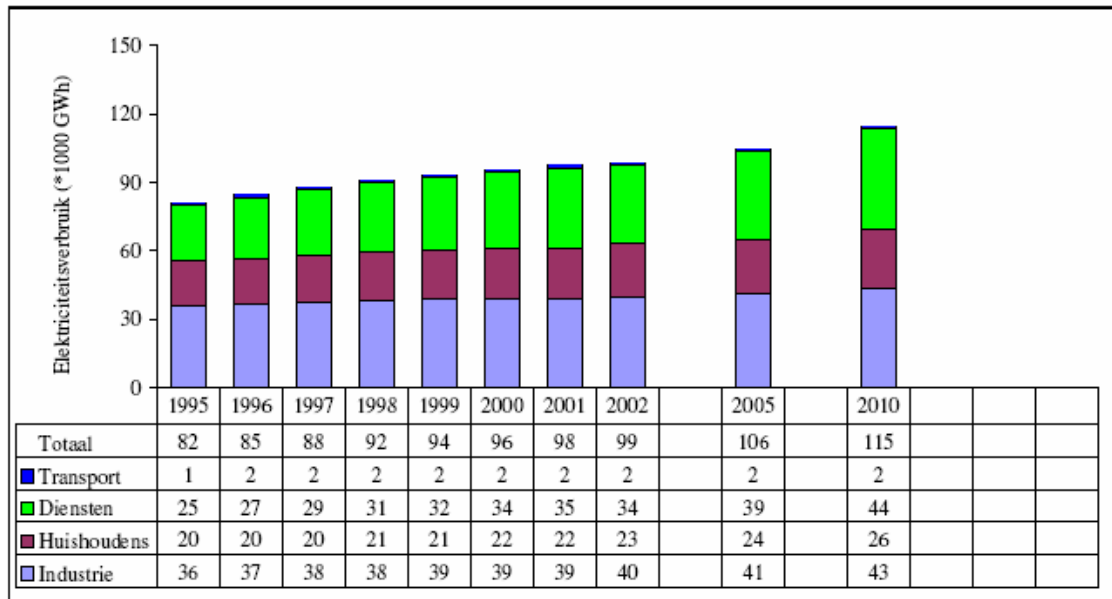
3.1 **Een beeld van het elektriciteitsverbruik 2030**

Aan de hand van de gegevens in de voorgaande hoofdstukken kan er een idee worden geschetst voor het elektriciteitsverbruik in 2030 voor het beeld van de wijk. Deze schatting is nodig om verder in het rapport de mogelijkheden voor opwekking door duurzame energiebronnen te onderzoeken.

Zoals in hoofdstuk 2.1.5 bezuiniging, is te zien zal er op apparaten in de toekomst flink worden bezuinigd en daardoor zal het elektriciteitsgebruik ook afnemen. Echter het gedrag van de gebruikers zal steeds veranderen en er zullen meerdere apparaten bij komen.

Ook wordt dit elektriciteitsverbruik bepaald door trendbreuken die plaatsvinden.

Het elektriciteitsgebruik in Nederland is in de periode 1995-2002 gegroeid met 2,8% per jaar, waardoor in 2002 het elektriciteitsgebruik ruim 17.000 GWh boven het niveau in 1995 lag (CBS, 2002). De sterke groei wordt veroorzaakt door de steeds verdere penetratie van (nieuwe) elektrische apparaten in de huishoudens en de dienstensector. De verwachting is dat het elektriciteitsgebruik verder zal stijgen en in 2010 ruim 16.000 GWh boven het gebruik in 2002 zal liggen (ECN, RIVM, 2002). Deze prognose maakt een fors hogere inzet op elektriciteitsbesparing eens te meer urgent. Het elektriciteitsgebruik in de huishoudens blijft tot 2010 doorgroeien tot ruim 26.000 GWh in 2010. Dat is ongeveer 3500 kWh per huishouden in 2010. Door steeds weer nieuwe toepassingen en voortschrijdende penetratie van nieuwe apparaten is de verwachting dat het elektriciteitsgebruik per huishouden daarna verder zal stijgen tot ruim 4500 kWh per huishouden in 2030 (Rooijers et al, 2003).



Figuur 12 Elektriciteitsverbruik in de periode 1995 tot 2010 bronnen Historisch CBS (2004), prognose (ECN, RIVM, 2002)

Verwacht wordt dat per jaar het elektriciteitsverbruik per huishouden zal stijgen met 1,5% per jaar tot 2030 (ECN).
 Het verbruik van een eenpersoonshuishouden is geschat op 3600 kWh per jaar in 2030.
 Het verwachte verbruik van een tweepersoonshuishouden is geschat op 4000 kWh per jaar en van een driepersoons huishouden ongeveer 4600 kWh per jaar in 2030
 Het elektriciteitsverbruik van 1700 eenpersoonshuishoudens 1000 tweepersoonshuishoudens en 2500 driepersoons huishoudens in de wijk zal in totaal op 22000 MWh komen.

Het verbruik van andere instellingen in de wijk zal ondanks bezuinigingen toch stijgen met 2.3% per jaar (ECN, CBS 2002)
 Hieruit kan worden geconcludeerd dat het verbruik van de wijk wordt dan ongeveer op 23000 MWh per jaar in 2030.

3.2 Elektrische energievoorziening door waterstof in de toekomst

De elektrische energievoorziening in medio 21^e eeuw zullen minder fossiele brandstoffen moeten gaan gebruiken om uitputting van grondstoffen tegen te gaan. Het gebruik van waterstof kan een oplossing worden om dit energietekort in de toekomst bij te vullen en om de uitstoot van koolstofdioxide en andere broeikasgasemissies te verminderen.

De waterstof kan uit een groot aantal verschillende bronnen worden geproduceerd met behulp van een aantal verschillende technologieën.

Waterstof kan als opslagmiddel dienen voor intermitterende en seizoengebonden vernieuwbare energie. De waterstof kan in verbrandingsprocessen en brandstofcellen worden gebruikt voor een groot scala aan energiediensten zoals verlichting, mobiliteit, het verwarmen, het koelen, en koken.

De eerste stappen naar een schone energietoekomst zullen op de opgezette commerciële processen en de systemen in gebruik vandaag voortbouwen. Een waaier van geavanceerde technologieën aan opbrengst, opslag, vervoer, en gebruik is reeds in ontwikkeling.

Waterstof is vooral een goede manier om energie op te slaan, te transporteren en op een schone manier te benutten op de plek waar energie nodig is. Elektriciteit is slecht op te slaan en er zijn grote transportverliezen. Olie en kolen zorgen voor schadelijke uitlaatgassen. Maar waterstof heeft als energiebron ook nog een moeilijkheid ten opzichte van olie en kolen. Waterstof moet namelijk eerst nog gemaakt worden. Verder in het rapport wordt uitgelegd welke technologieën toepasbaar zijn op een elektriciteitsvoorziening van waterstof in een wijk of op huisniveau dus ofwel centraal als decentrale opwekking. Ook wordt de opslag, het vervoer en het gebruik uitgebreid besproken.

3.2.1 Waterstofproductie 2030

De verlaging van de CO₂-emissie bij de productie van waterstof is op twee manieren te bewerkstelligen. De eerste manier is om waterstof te produceren uit fossiele bronnen, en de CO₂ die daarbij vrij komt af te vangen en op te slaan. Een andere optie is om over te stappen op duurzame bronnen.

CO₂-opslag

Bij de productie van waterstof uit fossiele bronnen komt CO₂ vrij. Omdat deze CO₂ op een centrale plek vrij komt is het theoretisch goed mogelijk om de CO₂ af te vangen en ondergronds op te slaan. Uitgeputte olie- en gasvelden kunnen goed dienst doen als opslagplaatsen. Uit onderzoek van ECN is gebleken dat we in Nederland in de oude olie- en gasvelden minstens 13 ton CO₂ kunnen slaan, dat is 70 keer de jaarlijkse CO₂ emissie van Nederland in het jaar 1998.

Het is ook mogelijk om CO₂ op te slaan in aquifers, dat zijn poreuze watervoerende lagen die zich op meer dan 750 meter diepte bevinden. De schattingen van de opslagcapaciteit lopen uiteen van 90 tot 2500 miljard ton wereldwijd. In Noorwegen wordt reeds CO₂ opgeslagen door Statoil in de Utsira formatie, een zoutwater aquifer 800 m onder de Noordzee.

Op dit moment wordt er nog volop onderzoek gedaan naar de mogelijkheden van CO₂-opslag. Op dit moment gaat men uit van de volgende opslagcapaciteit.

	Mondiale opslagcapaciteit (Gton CO ₂)
Aquifers	>100
Diepe steenkoollagen	>100
Uitgeputte olie- en gasvelden	>130

Tabel 5

Er bestaan nog veel ecologische onzekerheden over de opslag van CO₂. Er zijn echter overtuigende argumenten van zowel fysisch-chemische als geologische aard, dat het opgeslagen CO₂ ook permanent opgeslagen blijft.

Gasvelden en kolenlagen houden zelf al miljoenen jaren methaan vast en hebben zich dus bewezen als duurzaam gasreservoir. CO₂ adsorbeert zelfs beter aan de bodem dan aardgas en kan bovendien in sommige gevallen mineraliseren, wat tot een onomkeerbare opslag leidt. Metingen in het water van aquifers tonen aan dat dat water al miljoenen jaren geen uitwisseling met andere stoffen heeft gehad, oftewel, het reservoir is zeer dicht.

Het is verder ook belangrijk om te publieke acceptatie van CO₂-opslag te onderzoeken, want als het volk er niet achter staat zal CO₂ opslag nooit een succes worden.

Waterstof productie uit duurzame bronnen

Om de CO₂-emissie zo goed mogelijk te beperken is natuurlijk het beste om helemaal geen CO₂ meer te produceren. Dit kon door waterstof te produceren uit duurzame, niet-

fossiele, bronnen. De mogelijkheden die in hoofdstuk 2.2.2 aan bod gekomen zijn, zijn: Waterkracht, zonne-energie, windenergie en biomassa.

In 2030 moet het technisch gezien zeker mogelijk zijn om in de gehele waterstofvraag te voorzien door gebruik te maken van elektrolyse gevoed door hernieuwbare bronnen. Maar zo lang er nog fossiele voorraden zijn is de kans klein dat er op grote schaal gebruik wordt gemaakt van duurzame bronnen. Als de voorraden slinken, zal er steeds meer gebruik gemaakt worden van duurzame bronnen. Hierbij is vooral de bufferende werking van waterstof van groot belang.

Situatie waterstofproductie in 2030

De kans dat voor het jaar 2030 de overstap gemaakt is naar elektrolyse uit duurzame bronnen achten wij erg klein. Wel gaan we er van uit dat bij een groot deel van de fossiel geproduceerde waterstof de CO₂ afgevangen en opgeslagen wordt.

Bron	Deel van het totaal
Fossiel zonder CO ₂ -opslag	10%
Fossiel met CO ₂ -opslag	80%
Elektrolyse fossiel	2%
Elektrolyse duurzaam	8%
Totaal	100%

Tabel 6

Na 2030 zal het aandeel elektrolyse duurzaam steeds verder toenemen. Hoe lang het zal duren voordat alle waterstof uit duurzame elektrolyse komt is van een aantal factoren afhankelijk:

- Het tempo van uitputting van de fossiele energiebronnen
- De sterkte van de schadelijke gevolgen van het broeikaseffect
- De technologische ontwikkelingen op het gebied van duurzame technieken
- Politieke verhoudingen in de wereld
- Prijsverhouding: fossiel/duurzaam

Een groot deel van deze factoren is erg onvoorspelbaar, daarom is het voor ons op dit moment onmogelijk een goede prognose te geven van wanneer alle waterstof op een duurzame manier geproduceerd is.

3.2.2 Waterstoftransport

Zoals in hoofdstuk 2.2.5 beschreven staat, zijn leidingen het meest effectief om waterstof naar de wijken en woonhuizen te transporteren. Op deze manier kan er zonder enige vertragingen, continu aan de vraag naar waterstof worden voldaan. Deze vorm van waterstoftransport zal hier dan ook uitgebreid besproken worden. Op de andere transportvormen wordt minder diep ingegaan.

Waterstoftransport door de aardgasleidingen:

Huidige situatie aardgasnet

In Nederland wordt aardgas gewonnen onder een hoge druk van ongeveer 100 bar. Hierna wordt het gas door een landelijk hogedruknet onder een druk van 43 tot 66 bar over grote afstanden getransporteerd. Dicht bij het distributiegebied wordt de druk in een ontvangstation teruggebracht tot ongeveer 8 bar. Vervolgens komt het gas in het lokale lagedruknet van de distributiebedrijven. In dit lagedruknet vinden nog enkele drukterugvallen plaats, tot het gas in de huishoudens gebruikt kan worden. Het hogedruknet bestaat uit ongeveer 12.500 km. stalen leidingen en is in het bezit van de Gasunie. Het lagedruknet is in het bezit van verschillende distributiebedrijven en bestaat uit ongeveer 125.000 km. leidingen. [Gasunie 2002]

Mogelijkheden waterstoftransport door aardgasleidingen

Volgens berekeningen van TNO kan waterstof zonder problemen worden getransporteerd in het huidige aardgasnet. Dit waterstoftransport kan waterstofbroosheid van de stalen leidingen tot gevolg hebben. De broosheid van het staal wordt veroorzaakt doordat kleine hoeveelheden waterstof na verloop van tijd in het metaal diffunderen. Wanneer de druk in de pijpleidingen cyclisch varieert, dan kan de broosheid van het staal leiden tot een snellere groei van scheurtjes.

De broosheid van de leidingen kan worden voorkomen door ze te voorzien van een beschermend laagje of door een kleine hoeveelheid zuurstof aan waterstof toe te voegen [Ogden, 1999] [Cialone, 1984]. Als waterstof in plaats van aardgas wordt vervoerd onder dezelfde omstandigheden kan ongeveer dezelfde hoeveelheid energie worden getransporteerd. Bij gelijke druk verschilt de maximale energietransportcapaciteit van waterstof door de leidingen met een factor 0,93 ten opzichte van aardgas. [TNO, 1975]

Hogedruknet

Door het grote drukverschil zullen de huidige compressoren moeten worden vervangen. De compressiekosten van waterstof zijn bovendien hoger als de compressiekosten van aardgas [TNO, 1975].

Verder zullen de transportkosten van aardgas door leidingen ongeveer 15-25% hoger uitvallen, dan die van het huidige aardgas. [Bergsma, 1996]

Lagedruknet

Het lokale aardgasnet kan net als het hogedruknet worden omgebouwd tot waterstofnet. Waterstof heeft een lager molecuulgewicht en een lagere gasdichtheid dan aardgas. Hierdoor lekt het gas sneller weg en kan het sneller diffunderen in de stalen- en kunststofleidingen. Rondom scheurtjes, oneffenheden en koppelstukken kan waterstof het staal bros maken.

Het lokale gasdistributienet bestaat in vereenvoudigde vorm uit de volgende onderdelen:

- de huisinstallatie: gasmeter, dienst- en stijgleidingen
- het lagedruknet
- het districtstation

De gasmeter moet worden aangepast of vervangen, omdat de dichtheid van de gassen te veel verschilt. De dienst- en stijgleidingen binnen de huizen zullen van koper of staal moeten zijn. In Nederland hebben huishoudens al koperen dienst- en stijgleidingen.

De huidige kunststofleidingen in het lagedruknet zijn niet geschikt voor de distributie van waterstof, omdat de lekverliezen vooral bij de koppelstukken zullen toenemen. Deze lektoename is niet aanvaardbaar vanwege de bredere explosiegrenzen van waterstof en de geringe ontstekingsenergie. De kunststofleidingen moeten worden aangepast, waarbij de koppel- en sluitstukken van betere kwaliteit dienen te zijn.

Plastic pijpleidingen zijn namelijk minder geschikt om waterstof te vervoeren, omdat waterstof de leidingen 4 tot 6 keer eerder doordringt dan aardgas [Ogden, 1999]. TNO geeft een specifiekere omschrijving van de doorlaatbaarheid van kunststofbuizen. Poly-Ethyleen (PE) laat 5 maal zoveel waterstof door als aardgas. Poly-Vinyl-Chloride (PVC) laat 70 maal zoveel waterstof door als aardgas. Daarmee heeft PVC van de bekende kunststoffen de hoogste doorlaatbaarheid. Dit type leidingen dient dus vervangen te worden door een geschikte soort.

Het districtstation zal door de hogere veiligheidseisen tevens 1,5 maal duurder zijn dan een aardgas districtstation. [Bergsma, 1996] De totale meerkosten voor de lokale distributie van waterstof worden geschat op ongeveer 50%.

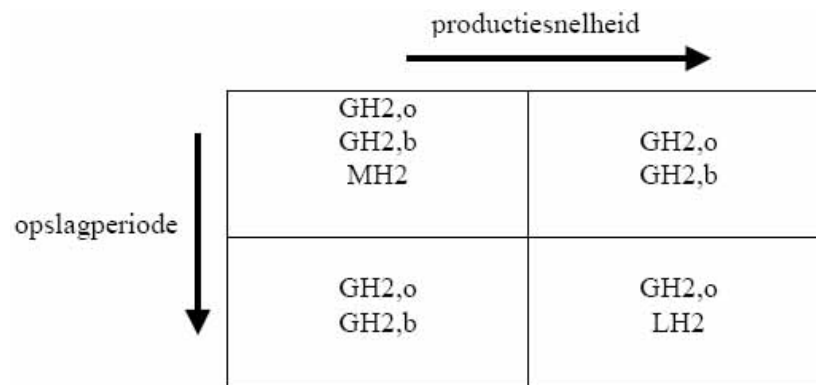
Ombouwen aardgasnet

Het abrupt ombouwen van het lokale aardgasnet naar een lokaal distributienet voor waterstof zal veel tijd kosten. Een dergelijke overschakeling kan worden vergeleken met de ombouwoperatie van stadsgas naar aardgas in de periode 1964 tot 1968. Hierbij vonden de aanpassingen sectorsgewijs plaats: aanpassingen van het distributienet, vernieuwing van leidingen, lekzoeken en herstel/bouw van nieuwe stations etc. Als wordt gekozen voor een snelle overschakeling op waterstof per regio, dan kunnen de richtlijnen worden gevolgd die zijn vastgesteld door de Werkgroep Overschakeling Aardgas (WOA) [TNO, 1975].

Ondanks dat het nog jaren gaat duren voordat er eventueel waterstoftransport door het huidige aardgasnet zal plaatsvinden, vind er tegenwoordig ook al waterstoftransport door leidingen plaats. De oudste nog werkende waterstofleiding ligt in het Duitse Ruhrgebied en functioneert daar al 50 jaar, zonder dat er ooit ongelukken hebben plaatsgevonden. De langste waterstofleiding die op dit moment in gebruik is ligt tussen België en Frankrijk en is 400 km lang.

3.2.3 Opslag van waterstof

In hoofdstuk 2.2.5 staat een beschrijving van de mogelijkheden voor waterstofopslag. De belangrijkste factor bij het bepalen van de opslagmethode is de prijs. Deze is afhankelijk van de capaciteit die de opslag zal moeten hebben. De capaciteit is het product van de productiesnelheid en de opslagperiode. In het onderstaande diagram is nogmaals overzichtelijk aangegeven welke vorm van opslag uit economisch oogpunt het gunstigst is.



Figuur 13

Voor korte opslagperiode en lage productiesnelheden zijn de investeringskosten voor een liquidatiefactor te hoog. Bij hogere productiesnelheden en langere opslagperioden valt de opslag in metaalhydriden af, omdat hiervan de investeringskosten lineair toenemen met de capaciteit. In alle gevallen geldt dat ondergrondse opslag het voordeligste is, maar deze mogelijkheid hangt af van de lokale geologische omstandigheden.

Behalve economische argumenten zijn er ook nog andere factoren die de manier van transport bepalen:

- De toepassing
- De vereiste energiedichtheid
- De beschikbaarheid van bepaalde energievormen
- De lokale geologie
- De behoefte aan toekomstige uitbreiding
- De onderhoudsgevoeligheid

Behalve de genoemde opslagsystemen worden nieuwe systemen voor stationaire waterstofopslag ontwikkeld gebaseerd op:

- vloeibare organische hydriden
- koolstofadsorptie, en
- reductie van een metaaloxide

Bij opslag in vloeibare organische hydriden wordt gebruik gemaakt van het feit dat sommige organische verbindingen relatief gemakkelijk waterstof opnemen en dat de gevormde verbindingen relatief gemakkelijk waterstof afstaan door verandering van druk en of temperatuur. De waterstofdichtheid is hoog omdat de verbindingen vloeibaar zijn. Voorbeelden zijn benzeen en toluen die gemakkelijk hydrogeneren. In beide gevallen wordt methylcyclohexaan gevormd dat bij opwarming dehydrogeneert [Hacker, V 1998]

Bij koolstofadsorptie wordt waterstof gebonden door geactiveerd koolstof bij temperaturen tussen 60 m 100 K en drukken tussen 20 en 40 bar. De gemiddelde waterstofdichtheid op het oppervlak bereikt daarbij waarden vergelijkbaar met vloeibaar waterstof. De effectieve dichtheid is veel lager omdat een deel van volume wordt gebruikt om de adsorbent en het drukvat, echter de liquefactie kan worden vermeden.

Bij reductie van een metaaloxide wordt een puur metaal gevormd dat in een later stadium bij reactie met water weer waterstof levert. Voorbeelden zijn Zn-O-Zn cyclus [Steinfeld, A 1998] waarbij ZnO m.b.v. zonnewarmte en aardgas wordt gereduceerd tot Zn, of het stoom-ijzer proces. In het laatste geval wordt synthese gas, verkregen door vergassing van kolen of biomassa, gebruikt voor reductie van ijzeroxiden [Scherer, G.W.H. 1996]

3.2.4 Centrale en decentrale opwekking van elektriciteit

Centrale vraag

Hoe en waarmee kan 23000MWh per jaar opgewekt worden voor een wijk van 12000 inwoners?

Opmerking: er wordt onderscheid gemaakt tussen centrale opwekking en decentrale opwekking.

Het totale energieverbruik kan ingedeeld worden in een thermisch aandeel en een elektrisch gedeelte. De geschatte verhouding thermische-/elektrische energie in 2030 is gesteld op 60% respectievelijk 40%, aangezien warmte de grootste energievraag op wijkniveau is. De volgende energiehoeveelheden moeten centraal dan wel decentraal voor de behoefte worden opgewekt:

Elektrische energievraag (2030)	Thermische energievraag (2030)
23 GW	34,5 GW

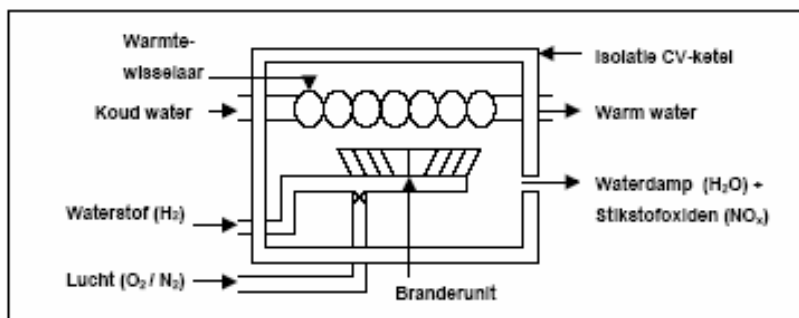
Tabel 7: geschatte energieverbruik in een wijk anno 2030

Decentrale opwekking

De warmtevraag

De warmtevraag van een huishouden zal decentraal worden opgewekt door middel van waterstofgas dat via het huidige aardgasnet wordt gevoerd naar de H₂ ketel. (hoofdstuk 3.2.2 transport).

Hieronder is een schematische weergave van een H₂ ketel weergegeven.



Figuur 14: Schematische weergave H₂-CV [Bron: NL rapport Hydrogen]

Een korte uitleg van de H₂ ketel

Evenals aardgas zou waterstof kunnen worden verbrand in een Cv-ketel. De maximale vlamtemperatuur van waterstof ligt bij de 2318°C. Onder aanvoer van grote hoeveelheden lucht kan de verbrandingstemperatuur zakken, waardoor de vorming van stikstofoxiden wordt beperkt.

Het Cv-ketel principe blijft hetzelfde, alleen zal de branderunit van de installatie geschikt moeten worden gemaakt voor de verbranding van waterstof. Aangezien de vlamsnelheid van waterstof 7 keer hoger is dan die van een aardgasvlam.

Wanneer de uitstroomsnelheid van het gas te laag is, dan treedt vlaminslag op. Om dezelfde hoeveelheid warmte te kunnen produceren als in het geval van een HR Cv-ketel aardgas, zal een drie maal zo groot volume aan waterstof nodig zijn.

Uitgaande van de bestaande HR 107 Cv-ketel wordt aangenomen dat de H₂-CV-ketel met soortgelijke techniek een efficiency kan halen van 113% op grond van de calorische bovenwaarde van waterstof. [NL Rapport HYDROGEN]

De kosten van een H₂-CV-ketel met een vermogen van 18 kW in 2005 worden geschat op 2000 euro. [Bergsma, 1996]

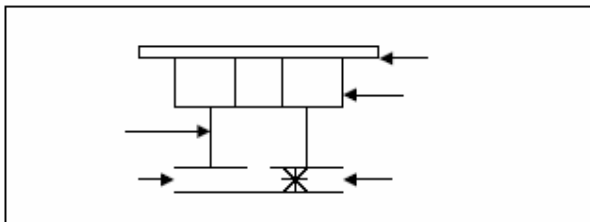
Deze waarden zijn afhankelijk van de thermische eigenschappen van het huis, volume van het huis en andere factoren. De waarden hierboven zijn genomen voor een gemiddelde woning.

H₂ ketel met katalytische brander

Door de ontwikkeling van nieuwe technologieën is er een H₂ ketel met katalytische brander ontworpen. Hiermee zal een hoger rendement worden gehaald.

Een voorbeeld van dit type brander is hieronder geïllustreerd.

Een andere manier om waterstof te verbranden is met behulp van katalytische verbranding. Waterstof wordt verbrand op een oppervlakte dat is behandeld met een katalysator. De katalysator is van platina of van palladium dat is verwerkt in een keramische brandplaat. De keramische brandplaat is poreus en bevat openingen kleiner dan 1 millimeter. Het gasmengsel van lucht en waterstof wordt naar de brandplaat geleid en op de brandplaat vindt de verbranding plaats, in tegenstelling tot conventionele branders waar de verbranding homogeen in de ruimte gebeurt. Hieronder is een Schematische weergave van een katalytische brander weergegeven. [Al-Garni, 1997]



Figuur 15: Schematische weergave katalytische brander [Bron: NL rapport Hydrogen]

Waterstofgas en de lucht worden samen gebracht in een mengruimte. Vanuit de mengruimte wordt het gasmengsel door de keramische distributie plaat naar de katalytische plaat geleid. De omzetting van waterstof en zuurstof naar water vindt plaats op het oppervlak van de katalytische plaat. De katalytische omzetting van waterstof vindt plaats bij temperaturen lager dan 700°C. De warmte komt deels vrij door straling van de katalytische plaat en deels door de hete verbrandingsproducten. De katalytische brander kan na enige aanpassingen functioneren als brander in een Cv-ketel. Een speciale warmtewisselaar in de ketel moet waarschijnlijk worden aangebracht om de lagere temperatuurswarmte even efficiënt over te brengen als bij de normale Cv-ketels. [Gasunie, 2002]

Elektriciteitsvraag in een huis.

Een gemiddeld huishouden verbruikt 4200kWh aan elektrische energie per jaar. In een wijk van 12000 inwoners ligt het gemiddelde energieverbruik op zo'n 22000MWh (hoofdstuk elektriciteitsverbruik). Om deze huishoudens van de elektriciteit te voorzien kan op decentraal niveau gebruik gemaakt worden van verschillende energiebronnen.

Deze energiebronnen zijn:

- brandstofcellen
- zonne-energie
- eventueel windenergie

Voor decentrale opwekking van elektriciteit kunnen drie typen brandstofcellen worden geselecteerd. (zie hoofdstuk 2.2.2 brandstofcellen)

Deze drie typen zijn:

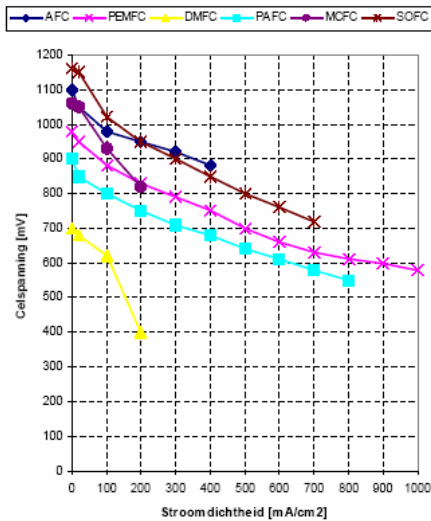
- PEMFC
- RFC
- DMFC

De brandstofcellen zullen in eerste instantie de nachtstroomvoorziening vervullen omdat overdag elektrolyse moet plaatsvinden waarna de waterstof wordt opgeslagen.

De hoeveelheid elektrische energie die door middel van brandstofcellen kan worden opgewekt, is onder andere afhankelijk van het rendement en de gebruikte brandstof. Voor de verschillende typen cellen geven we hieronder de geschatte hoeveelheid opgewekte elektrische energie. Hieronder staat de energiedichtheid van verschillende typen brandstoffen weergegeven:

Brandstof	Energie [kJ/g]	Energie[kJ/L]
Steenkool	29,3	-
Bruinkool	8,1	-
Hout	14,6	-
Benzine	43,5	30590
Diesel	42,7	29890
Methanol	19,6	15630
Aardgas	50,02	31,7
Waterstofgas	119,9	10

Tabel 8: Energiedichtheden van verschillende brandstoffen



Figuur 16: Stroomdichtheid brandstofcellen [Bron: LEDJ-95]

De PEMFC heeft een elektrisch rendement van 40% en zal volgens onderstaande gegevens een hoge investering eisen:

PEMFC	Input
Vermogen elektrisch	3kW
Efficiency elektrisch	40%
Efficiency thermisch	45%
Brandstof	Waterstof
Streamfactor	4000 uur
Levensduur	10 jaar
Investeringskosten	3322 euro/kW

Tabel 9: Modelgegevens van de PEMFC [Bron: NL rapport Hydrogen (2002)]

Per kW is dus zo'n 3000 euro aan investeringskosten benodigd, dat is veel te hoog voor een modaal gezin. Eventueel zal in de toekomst (2030>) deze kostprijs dalen.

Omdat over de RFC nog geen gegevens beschikbaar zijn (ontwikkelingsfase), kan over deze technologie nog geen uitspraak gedaan worden.

De DMFC is geschikt voor kleine mobiele applicaties. Per kW is de kostprijs hoog, maar toch rendabel, omdat de kleine applicaties per definitie een veel kleiner vermogen hebben.

In de toekomst (2030-2050) zal, wanneer elektrolyseprocessen efficiënter worden, zowel overdag als 's nachts waterstof opgewekt kunnen worden, waardoor brandstofcellen 24 uur per dag kunnen voorzien in elektrische energie.

De decentrale opwekking van elektrische energie met behulp van zonne-energie en windenergie valt buiten het bereik van dit rapport. Meer informatie over deze onderwerpen is te vinden in het rapport van EXI en andere referenties (referentielijst).

De vraag naar warm tapwater in een woning

De decentrale opwekking van warm tapwater is tegenwoordig een post die veel warmte vraagt. Het is dan ook van belang om ervoor te zorgen dat de verwarming van het tapwater gebeurt op een zo milieuvriendelijk mogelijke wijze.

In de eerste plaats kan dit met behulp van een geoptimaliseerd H₂-CV-systeem, al dan niet uitgerust met katalytische brander. Het tapwater wordt dan opgewarmd door de verbranding van H₂-gas.

Een andere mogelijkheid is het gebruik van fotovoltaïsche cellen. Door middel van zonnecellen kan dan zonnewarmte worden gebundeld en op deze wijze naar koud water worden geleid. Het water wordt dan opgewarmd en is zo geschikt als warm tapwater. Aanvullend kan nog aardgas/H₂-gas gebruikt worden.

Centrale opwekking

Centrale vraag

Hoe en waarmee kan 23000MWh per jaar opgewekt worden voor een wijk van 12000 inwoners?

Om te beginnen met het beantwoorden van deze vraag, zijn net als bij de decentrale opwekking, schattingen van het energieverbruik op jaarbasis benodigd. Deze zijn hieronder weergegeven (zie ook hoofdstuk 'verbruiken').

Huishouden	Jaarverbruik
Eenpersoons	3600 kWh
Tweepersoons	4000 kWh
Vierpersoons	4800 kWh

Tabel 10: elektrisch jaarverbruik per huishouden [hoofdstuk 2.1.4 verbruiken]

In een wijk onderscheiden we de volgende typen gebouwen/voorzieningen:

- woningen/ woonvoorzieningen
- utilitaire- en openbare gebouwen (bedrijfspannen, industrie, supermarkt, etc.)

Deze bouwtypen onderscheiden zich in soort en hoeveelheid energieverbruik en daarom is het verstandig om voor elke soort de verschillende energievragen te bespreken met betrekking tot centrale opwekking. Eerst zullen de woningen aan bod komen en vervolgens zal voortgeborduurd worden op dit principe voor de utilitaire en openbare gebouwen.

Energiestroom naar de woningen

Woningen hebben de volgende energievragen:

- Warmtevraag
- Elektriciteitsvraag
- Vraag naar warm tapwater

Warmtevraag

De warmtevraag bestaat voornamelijk uit de verwarming van woningen door middel van een CV-systeem. De huidige CV wordt gevoed door aardgas. In de toekomst (2030) zal er in plaats van aardgas, H₂-gas gebruikt worden (hoofdstuk transport; hoofdstuk decentrale opwekking). Net als bij de decentrale opwekking wordt ook hier gebruik gemaakt van speciale H₂-CV-systemen, al dan niet uitgevoerd met katalytische brander, ter verhoging van het verbrandingsproces. Echter, het H₂-gas wordt niet op woningniveau, maar decentraal opgewekt. Het voordeel hiervan is dat er meer veiligheid gewaarborgd wordt, omdat grote thermische spanningen worden uit de buurt van de woningen gehouden worden en de buffering van eventueel vrijkomend CO₂-gas kan gemakkelijker geregeld worden. Het H₂-gas, afkomstig van grote centrale elektrolyse-installaties, gevoed door zonne-, wind- en eventueel kernenergie, bereikt de woningen via een aan hogedruk aangepast leidingstelsel. Het H₂-gas is opgeslagen in grote opslagreservoirs, net buiten de wijk. Indien met H₂-gas niet aan de totale warmtevraag kan worden voldaan (piekuren), dan kan vanuit reserve reservoirs extra gas aangevoerd worden. Ook aardgas kan in de verdere gasvraag een aanvullende rol spelen.

Een andere rendabele oplossing is het gebruik van WKO-voorzieningen. Door het gebruik van warmte- en koudebronnen diep in de grond, kan een hoeveelheid warmte gebufferd worden en met behulp van warmtepompen naar de gewenste plaatsen worden gebracht. Het probleem, is hier dat de omgeving en bodem geschikt moeten zijn om warmte- en koudebronnen te graven en geschikt te maken voor het WKO-systeem. In de toekomst is het wellicht mogelijk om op meerdere plaatsen WKO-systemen aan te leggen en zal het kostentechnisch ook interessanter worden. Tegenwoordig worden WKO-systemen toegepast voor verwarming van grotere gebouwen/bedrijfsterreinen en verdienen zich binnen een tijdsbestek van zo'n vijf à tien jaar terug. Met grote installaties kunnen miljoenen kubieke meters gas en geld bespaard worden. [bron: Rapporten WKO-installaties TU/e]

Elektriciteitsvraag

In de woningen is natuurlijk ook elektriciteit benodigd. Deze kan, net als bij decentrale opwekking op verschillende wijzen worden verkregen:

- Brandstofcellen
- Zonne-energie
- Windenergie
- Elektriciteit verkregen uit biomassavergassing
- STEG
- Waterkracht
- Aanvullend kernenergie

Met behulp van grote batterijen geschakelde brandstofcellen, kan een grote hoeveelheid elektrische energie geproduceerd worden. Tegenwoordig kan al meer dan 100MW met behulp van MFCE's en SOFC's (hoofdstuk brandstofcellen) worden opgewekt. Dit type

cellen is dus uitermate geschikt om een gedeelte van de elektrische energievraag op centrale en milieuvriendelijke wijze in te vullen. De resterende vraag naar elektrische energie kan worden bereikt met onder andere windenergie, zonne-energie, waterkracht of uit biomassa-vergassing.

STEG

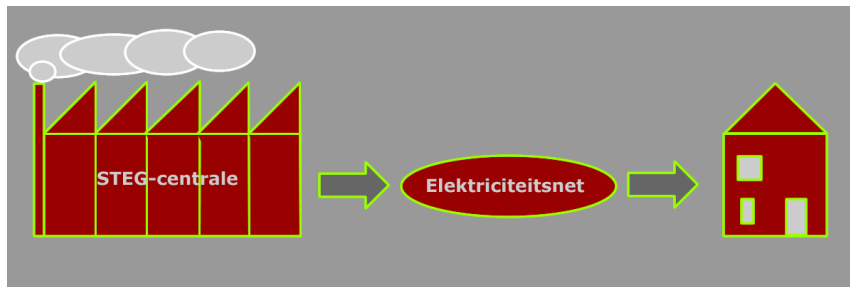
Een andere interessante optie, in combinatie met de brandstofcellen is de STEG-centrale. In een STEG-centrale wordt door middel van een gasturbine een elektrische stroom opgewekt. Tegenwoordig gebeurt de aandrijving middels aardgas. In combinatie met brandstofcellen kan zelfs nog een efficiëntere stroomopwekking worden verkregen. De output van de brandstofcellen leveren, naast elektrische energie ook zuurstofgas, warmte en water en dus stoom op. Door dit hete gas en H_2 -gas te gebruiken ter aandrijving van een gasturbine, kan een extra hoeveelheid elektrische energie opgewekt worden en men is verlost van grote hoeveelheden restwarmte. Onderzoeken hebben reeds uitgewezen dat op deze wijze meer rendement uit een STEG gehaald kan worden dan met aandrijving middels aardgas. [Daces 2001]

De werking van een STEG-centrale

Een STEG-centrale (Stoom En Gas - centrale) is een vermenging van een gas- en een stoomturbine. Door verhit aardgas (of H_2 -gas) in de turbine te leiden, treedt in de turbine een verbrandingsproces op en daarbij komen elektriciteit en stoom vrij. Deze stoom kan nogmaals worden gebruikt om elektriciteit op te wekken: namelijk door een stoomturbine. De in het vorige proces ontstane stoom wordt dan onder hoge druk de turbine ingeleid, waardoor nog een extra hoeveelheid elektrische stroom opgewekt wordt. [DACES 2001] Een schematische weergave van de STEG is hieronder en op de volgende bladzijde te zien:



Figuur 17: Werking van een STEG-centrale



Figuur 18: Positie STEG-centrale in E-net

Indien niet aan de totale elektrische energievraag voldaan kan worden, kan kernenergie gebruikt worden. Het transport van de elektrische energie zal gebeuren via het huidige elektriciteitsnet (hoofdstuk transport en opslag).

Warm tapwater

De vraag naar warm tapwater is ook een onderdeel dat gedeeltelijk op centrale wijze, met behulp van milieubewuste installaties kan worden voorzien. Allereerst kan met behulp van de restwarmte van brandstofcellen het warme tapwater voorverwarmd worden. Deze warmte wordt eerst vastgehouden in een Warmte/Koude-Opslag voorziening (hoofdstuk transport en opslag) en kan, indien nodig toegevoerd worden voor de voorverwarming van warm tapwater. Op deze wijze wordt rendabel omgegaan met de vrijgekomen restwarmte van de brandstofcellen.

Ten tweede kan door verbranding van H_2 -gas, warm tapwater worden opgewarmd. Dit is precies wat ook in de H_2 -CV gebeurt (hoofdstuk decentrale opwekking). Ook fotonvoltaïsche cellen kunnen een rol spelen bij warm tapwater voorzieningen. Door middel van de cellen kan namelijk zonnewarmte in koud water geleid worden en zo ontstaat ook warm tapwater. Deze verkregen warmte kan vervolgens ook weer opgeslagen worden in een warmte-/koude-opslag. Aanvullend, geldt, net als bij de elektriciteitsvoorziening, dat in geval van onvoldoende capaciteit, een beroep kan worden gedaan op de traditionele methodes, dat wil zeggen, de verbranding van aardgas.

Energiestroom naar utilitaire gebouwen

Voor utilitaire gebouwen geldt ene wat striktere regeling. Afhankelijk van het jaargebruik kan al dan niet geheel of gedeeltelijk gebruik gemaakt worden van de al aanwezige centrale voorzieningen voor woningen, zowel op thermisch als elektrisch gebied. Aanvullende eisen kunnen op decentrale wijze, per gebouw of 'gebouwengroep' worden ingericht.

Allereerst is weer een verdeling in elektrische energie, thermische energie en warm tapwater vraag benodigd.

Elektrische energie	Thermische energie
600-1000 GW	900-1500GW

Tabel 11: geschatte energieverbruik door utilitaire gebouwen in een wijk anno 2030

Warmtevraag

De warmtevraag in een utilitair gebouw is relatief groter dan in een woning (een groter volume en gebouwmassa moeten verwarmd worden). Door deze grotere warmtevraag is het van belang om juist hier een gestructureerd plan op te stellen. Per gebouw kan een hoeveelheid warmte gelijk aan die van een woning beschikbaar gesteld worden, de resterende vraag kan dan op decentrale wijze voor het gebouw opgewekt worden. Een batterij brandstofcellen zou hiermee kunnen volstaan.

Een andere mogelijkheid is het aanleggen van een aparte utilitaire voorziening die centraal in H₂-gas voorziet. Dit betekent, dat net als op woning niveau, op één plek waterstof wordt geëlektrolyseerd en dat deze opgeslagen kan worden in reservoirs. Via een leidingsysteem dat verbonden is met de utilitaire gebouwen, kan vervolgens het waterstofgas als directe energiedrager worden aangeleverd. Op deze wijze heeft men een tweedelige centrale opwekking: Opwekking naar woningen en opwekking naar utilitaire en openbare gebouwen.

Indien brandstofcellen gebruikt worden kan op decentraal niveau voor de volgende cellen gekozen worden:

- PAFC
- SOFC
- PEMFC

Een zeer goed realiseerbare toepassing is het gebruik van WKO-opslag. Net als bij de woningen kan op centrale wijze in aquifers warmte opgeslagen worden, en die warmte kan vervolgens via leidingen getransporteerd worden naar de gebouwen. DE aanvulling van de aquifers kan geschieden door verbranding van H₂-gas en verwarming met behulp van fotovoltaïsche cellen.

Elektrische energie

De elektrische energie naar de utilitaire gebouwen kan ook plaats vinden via het centrale systeem van de wijk. Voor piekvermogens kan worden bijgeschakeld met een extra capaciteit brandstofcellen, welke on-site zijn geïnstalleerd. Het type brandstofcellen dat kan worden gebruikt zijn:

- PAFC

- SOFC
- PEMFC

Ook het gebruik van STEG-installaties is hier op zijn plaats, omdat het hier over grote vermogens gaat, verspreid over een relatief klein aantal bestemmingen. Het is dus rendabel om een klein lokaal net voor de utilitaire gebouwen op te zetten, waarmee deze voorzien kunnen worden van elektrische energie.

Warm tapwater

Het warme tapwater kan in principe door H₂-gevoedde CV-installaties geregeld worden. Daarbij kan gebruik gemaakt worden van de bestaande voorzieningen voor de verwarming van de gebouwen.

4 Conclusies en aanbevelingen

Is de energieneutrale wijk in 2030 haalbaar?

Elektriciteit kan op verschillende duurzame manieren opgewekt worden. In dit hoofdstuk wordt eveneens als in het rapport een conclusie getrokken uit het gebruik van waterstof in de toekomst.

Er kan nu antwoord op de vraag: hoe een huis/wijk in de toekomst aan energie komt en hoe het energiegebruik kan zijn om bij te dragen aan het doel om in de toekomst comfortabel gezond en duurzaam te werken en te leven in de gebouwde omgeving met minimale energie- en milieubelasting?

Alleen op de zon is waterstof een energiebron. Op aarde is waterstof is geen energiebron maar een schone energiedrager. Het moet schoon geproduceerd worden om op een echt duurzame manier ingezet te worden. De goedkoopste manier om CO₂-arme waterstof te produceren is op dit moment met fossiele brandstoffen gecombineerd met CO₂-opslag. Vergassing van biomassa is een hernieuwbare energiebron voor waterstof en ligt qua kosten niet ver verwijderd van waterstof uit fossiele brandstoffen met CO₂-opslag. Dure opties zijn op dit moment omzetting van elektriciteit uit zon of wind in waterstof (ongeveer 10-30 keer duurder afhankelijk van de duurzame elektriciteitsbron).

In 2030-2050 zal er geschat 23000 MWh in een standaard wijk opgewekt moeten worden om de elektriciteitsvoorziening te voorzien, daarnaast is er ook nog een warmtebehoefte dat moet worden voorzien door waterstof. Dit is allemaal theoretisch mogelijk met een 100% waterstofeconomie in combinatie met duurzame energiebronnen.

In de toekomst zal alleen in gevallen van piekvermogens zullen koolwaterstoffen toch nog benodigd zijn om de extra energievraag in te vullen. Ook voor de opwekking zullen goede alternatieven moeten worden gezocht, het liefst op 'groene wijze'. Een combinatie van zonne-energie, windenergie en biomassavergassing is een van de oplossingen om op deze groene wijze, waterstofgas op te wekken.

Een goede aanbeveling wat betreft opwekking van waterstofgas is dat de productietechnieken zodanig veranderen, dat geen fossiele brandstoffen meer benodigd zijn. Een belangrijke ontwikkeling zal een efficiënter elektrolyseproces zijn, hierbij is voor wind-, zonne- en bio-energie een grote rol weggelegd. Belangrijke ontwikkelingen zullen zijn: de rendementsverbetering van brandstofcellen (PEMFC, SOFC, PAFFC, DMFC etc.)

Voor de opslag van waterstof zijn verschillende mogelijkheden. De meest voor de hand liggende vorm is ondergrondse gasopslag. Als waterstof vooral wordt gebruikt om de elektriciteit uit zon en wind op te slaan, kan men denken aan de opslag in lege gasvelden. Eventueel kan men ook halflege gasvelden bijvullen met waterstof. Of men kan waterstof opslaan in diepe zoutlagen. Het voordeel is dat deze manier van waterstofopslag zou kunnen dienen om de wisseling der seizoenen te overbruggen. De vloeibare opslag en opslag met metaalhydride. Ook is voor opslag van grote hoeveelheden ondergrondse waterstofopslag de goedkoopste variant. Voor waterstofopslag op woon- en wijkniveau is ondergrondse opslag de beste oplossing

Waterstoftransport is mogelijk op verschillende manieren. Voor transport van grote hoeveelheden naar steden en woonhuizen is transport via leidingen de beste optie. Op deze manier kan er continu en de vraag worden voldaan. Een ander groot voordeel van

deze vorm is dat grote delen van de bestaande aardgasleidingen gebruikt kunnen worden. Andere transport mogelijkheden zijn transport per truck en per trein.

Bron	Deel van het total
Fossiel zonder CO ₂ -opslag	10%
Fossiel met CO ₂ -opslag	80%
Elektrolyse fossiel	2%
Elektrolyse duurzaam	8%
Totaal	100%

Bronvermeldingen

Referenties:

- http://www.crest.org/hydrogen/hydrogen_fuelcell_types.html
- http://www.crest.org/hydrogen/hydrogen_fuelcell_applications.html
- <http://www.fuelcelltoday.com/FuelCellToday/EducationCentre/EducationCentreExternal/EduCentreDisplay/0,1741,FCInfoTypes,00.html>
- <http://www.fuelcelltoday.com/FuelCellToday/EducationCentre/EducationCentreExternal/EduCentreDisplay/0,1741,FCInfoTypes,00.html>
- <http://waterstof-energie.pagina.nl>
- http://www.ballard.com/be_informed/fuel_cell_technology
- <http://www.fuelcelltoday.com/FuelCellToday/EducationCentre/EducationCentreExternal/edukit02en.pdf>
- http://www.e-core.org.uk/content/fuel_cells/types.htm#ceramic
- <http://www.powerzinc.com/en/index-2-c1.htm>
- <http://planetforlife.com/h2/h2swiss.html>
- http://www.bellona.no/en/energy/hydrogen/report_6-2002/22915.html

Al-Garni, M. [1997] Experimental investigations of hydrogen catalytic combustion plates at KACST. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 22, No.4, blz. 383-387.

Bergsma, G.C. , T.T. v.d. Werff & F.J. Rooijers [1996]

Waterstof voor kleinverbruikers en CO₂-opslag, Haalbaarheidsstudie demonstratieproject in de Rijnmond. CE, Delft.

CBS [2002] Centraal Bureau voor de Statistiek, StatLine. <http://www.cbs.nl/>. juli 2002.

Cialone, H. , P. Scott & J. Hollbrook [1984]

Hydrogen effects in conventional pipeline steels. *Hydrogen Energy Progress V*, UK: Pergamon, blz. 1855-1867.

Commissie Ampere [2000]

Commissie Ampere - Groep F, sectie F - deel 2, Brandstofcellen. De Commissie voor de Analyse van de Middelen voor Productie van Elektriciteit en de Reëvaluatie van de Energievectoren (AMPERE). Belgische Ministerie van Economische Zaken.

Gasunie [2002]

Gasunie Trade & Supply. Anne Draijer, Accountmanager Industrial Gassales. Jan Boon, Gastransport Services. Prof.dr.H.B Levinsky, verbrandingstechnologie aan de Rijksuniversiteit Groningen. april, juni 2002.

Hacker, V [1998]

V.Hacker, H. Fuchs, R. Fankhauser, B. Spreitz, K. Freidrich en G. Faleschini, Proc. 12th World Hydrogen Energy Conference, 21-26 juni 1998, Buenos Aires, p543

NL Rapport hydrogen

"Schone waterstof als energiedrager voor huishoudens, Een analyse naar de praktische mogelijkheden van CO₂-neutrale waterstof als energiedrager voor huishoudens in Nederland", Mark Bakkers, Augustus 2002, Universiteit van Utrecht.

Ogden, J.M. [1999]

Prospects for Building a Hydrogen Energy Infrastructure. *Annu. Rev. Energy Environment*. Vol. 24, blz. 227-279.

Scherer, G.W.H. [1996]

G.W.H. Scherer, E. Newson en A. Wokaun, *Int. J. Hydr.En.*, 24 nr. 12 (1999) p1157-1169

Steinfeld, A [1998]

A. Steinfeld en A. Reller, *Proc. 12th World Hydrogen Energy Conference*, 21-26 juni 1998, Buenos Aires, p793.

TNO [1975]

Waterstof als energiedrager, toekomstige mogelijkheden in Nederland. Uitgave van de Nijverheidsorganisatie TNO, 's-Gravenhage.

Bijlagen

Bijlage 1; Vermogens

Hieronder staan enkele waarden weergegeven van apparaten en de bijbehorende vermogens. Sommige vermogens zijn afhankelijk van het type apparaat. Hiervoor zijn gemiddelde waarden genomen.

Onderdeel	Omschrijving	Vermogen(kW)
<i>Verlichting</i>	Gloeilamp 25 Watt	0,025
	Gloeilamp 40 Watt	0,04
	Gloeilamp 60 Watt	0,06
	Gloeilamp 100 Watt	0,1
	TL 1x18 Watt	0,026
	TL 1x36 Watt	0,044
	TL 1x58 Watt	0,069
	Spaarlamp 1x9	0,009
	<i>Keuken</i>	Broodrooster
Elektrische kookplaat		1,1
Elektrische oven		5
Friteuse		0,85
Magnetron		1,1
Tostiapparaat		1,3
Waterkoker		2
Koelkast (klein)		0,2
Koelkast (middel)		0,3
Koelkast (groot)		0,4
Vrieskist		1,4
Koffiezetapparaat		1,4
Vaatwasser		0,95
Wasmachine		1
<i>Apparatuur</i>	Elektrische boiler 60 liter	2
	Elektrische boiler 80 liter	2,2
	Close-in boiler 10 l	1,1
	Close-in boiler 15 l	1,5
	Stereo installatie	0,05
	TV	0,08
	Videorecorder	0,02
<i>Kantoor</i>	Fax	0,05
	Inkjet printer	0,035
	Kopieerapparaat (tafel)	0,25
	Kopieerapparaat (midden)	0,5
	Kopieerapparaat (groot)	0,75
	Laserprinter	0,11
	PC	0,14

Bijlage 2; Sluipvermogens

Een overzicht van sluipvermogens van veelgebruikte apparaten

<i>Apparaat/Product</i>	<i>Sluipverbruik per jaar</i>	<i>Kosten</i>
Waterbed	496,7 kWh	€ 84,43
Computer + monitor	93,6 kWh	€ 15,91
Satelliet ontvanger	72,3 kWh	€ 12,29
Video recorder	68,5 kWh	€ 11,64
Televisie	64,2 kWh	€ 10,91
Dvd-speler	61 kWh	€ 10,37
Cv-ketel	52,6 kWh	€ 8,94
Scanner	45,2 kWh	€ 7,68
Modem	43,4 kWh	€ 7,37
Versterker	41,6 kWh	€ 7,07

Bijlage 3; Tijdschema en trendbreuken en technische consequenties

De trendbreuken zijn hieronder gepresenteerd in de vorm van een tabel met jaartallen en ontdekkingen. De groengekleurde rijen stellen belangrijke ontdekkingen en trendbreuken voor. De oranje gekleurde rijen zijn recente trendbreuken (2000-2005). De grijze rijen onderaan zijn belangrijke verwachte trendbreuken die in de toekomst bereikt moeten worden.

Jaartal	Ontdekking
	Op wereldniveau
1930	Kernenergie ontdekt
	De eerste warmtepomp wordt toegepast. Dit betekent een doorbraak op het gebied van verwarmingsinstallaties.
1931	grote val in de olieprijs tot een dieptepunt van 13 dollarcent per vat.
	September; begin bouw eerste waterkrachtcentrale in Las Vegas met een productie van 1 miljoen kW.
1937	Frank Whittle en A.A. Griffith bouwen de eerste werkende straalmotor in Engeland. Onafhankelijk hiervan, wordt in hetzelfde jaar in Duitsland door von Ohain en M. Muller een zelfde soort straalmotor ontwikkeld.
	de brandbaarheid van waterstofgas worden onder ogen gezien, doordat de zeppelin Hindenburg explodeert door een brand in deze zeppelin tijdens het landen.
1938	Maart; Aramco vindt eerste commerciële oliebronnen in Saudi-Arabië.
	General Electric company en the Westinghouse Electric corporation introduceren de eerste fluorescentielampen.
	April; De eerste elektrische stroom, veroorzaakt door cosmische straling werd in gebruik genomen en aangetoond met behulp van de befaamde Geiger-Müller teller.
1939	WO2 begint en men realiseert dat recycling belangrijk is. Recycling neemt een grote vlucht.
1941	Oktober; plaatsing eerste windturbine ter opwekking van elektrische energie.
	De eerste autonome nucleaire kettingreactie is aangetoond op de universiteit van Chicago
1945	juli; de V.S. laten het eerste nucleaire wapen exploderen.
	augustus; rantsoeneren van benzine en gas stopt.
1946	Januari; De VN richten de internationale Atoom Energie Commissie op.
	Iran sluit een verbond met de U.S.S.R. zodat de Sovjets voor 25 jaar 51% van de Iraanse olie krijgen.
	December; De eerste Soviet nucleaire reactor gaat in gebruik.
1947	Augustus; De bouw van de eerste peacetime nucleaire reactor in de VS gaat van start.
1948	Juni; uitvinding eerste transistor door Drs. John Bardeen en Walter Houser Brittain.
	December; het eerste volledig met zonnewarmte voorziene huis wordt opgericht.
	de eerste warmtepomp voor grondwaterdoeleinden wordt in gebruik

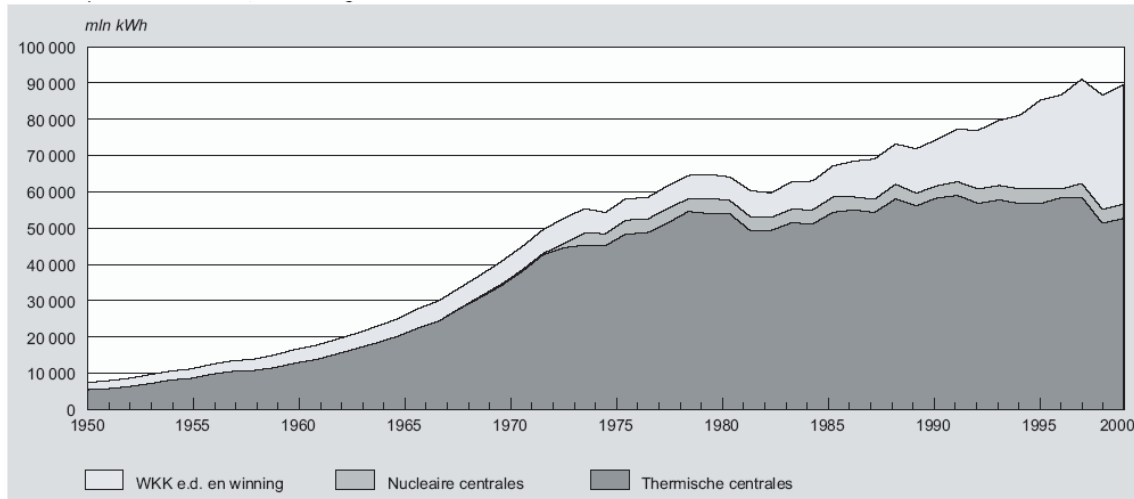
	genomen.
1949	Mei; de eerste gasturbine wordt in gebruik genomen.
1950	September; voor het eerst wordt uit atoomenergie elektrische energie gewonnen.
1952	in Canada gebeurt het eerste nucleaire ongeval. Gelukkig zonder gevolgen.
1953	December; Met 'Atoms for Peace' zorgt president Dwight Eisenhower voor internationale regulering van de voorraden van nucleaire materialen voor energieproductie.
1954	uitvinding van zonne-cellen en demonstraties zonne-cellen door onder andere Bell Laboratory.
	Eisenhower tekent 'Atomic energy Act' waardoor nucleair opgewekte elektriciteit ook voor privé-gebruik geschikt is.
1955	ontwikkeling eerste fotonvoltaïsche cellen, waardoor de technologie omtrent zonnecellen in een stroomversnelling komt.
1957	Oktober; De Sovjet Unie brengt de eerste satelliet, Sputnik 1 in de ruimte.
1960	November; De OPEC wordt opgericht.
1965	eerste succesvolle toepassing van brandstofcellen in de ruimtevaart.
1967	Juli; De Arabiërs kondigen een groot olie-embargo tegen de VS en Engeland.
1974	allerlei commissies, over windenergie, nucleaire energie en andere energiesoorten worden opgericht.
1977	De eerste zonne-energie gevoede waterverwarming wordt geïnstalleerd in de VS.
1978	'ZON DAG'→ over de hele wereld viert men het bestaan van vernieuwende energiebronnen.
1979	Juni; OPEC verhoogt de olieprijs met een toename van 50% per vat.
	november; een tweede 'oliecrisis' wordt voorkomen in de VS doordat een embargo op de import van Iranese olie in de VS van kracht dreigt te worden.
1980	januari; in Utah wordt de eerste zonne-energiecentrale ter wereld gebouwd. Deze heeft 266.029 zonnecellen en produceert een output van 100kW.
1981	President Reagan beëindigt de prijsbepalingen op ruwe olie en geraffineerde petroleum producten.
	voor het eerst wordt elektriciteit opgewekt met behulp van geothermische energiecentrales die gebruik maken van bronnen met modale temperaturen.
1983	ontwikkeling van de eerste Solar-car in Australië. Deze zonneauto heeft zonnepanelen die gezamenlijk 1kW leveren en heeft een topsnelheid van 72km/u. In 20 dagen legt de 'SOLAR TREK' zo'n 4000km af. Later dit jaar
1984	maart; voor het eerst is OPEC het eens geworden over het dalen van de prijs van haar ruwe olie.
1985	In Australië wordt op de University of New South Wales de 20%-rendementsbarrière voor zonnecellen doorbroken.
1986	OPEC kondigt aan dat de olieprijs is gezakt tot \$15 per vat. Een fikse daling sinds jaren.
	April; Chernobyl→ een nucleaire reactor explodeert in de kerncentrale in Chernobyl. Dit is de allereerste grote kernramp in de geschiedenis met betrekking tot kerncentrales. Een catastrofische hoeveelheid radioactieve straling komt bij de ontploffing vrij.
	juni; ARCO Solar lanceert de eerste commerciële zonnecellen, in de vorm van een dunne filmlaag.

	in de VS wordt gewaarschuwd voor het slinken van de petroleumvoorraden. In de VS dreigt de mijlpaal van 500 miljoen vaten bereikt te worden. De geschatte reserves liggen op 750 miljoen vaten.
1987	voor het eerst wordt in Australië een heuse World Solar Challenge Race gehouden. De GM Sunraycer wint de track van 950km met een gemiddelde van ongeveer 71 km/h.
1989	Wetenschappers van het High Technology Center van Boeing ontwikkelen een gestapelde fotonvoltaïsche cel met een rendement van maar liefst 37%.
1990	General Motors introduceert een elektrisch vervoermiddel op autoshow's: the Impact. Dit betekent een stimulans voor het ontwikkelen van nieuwe, milieuvriendelijkere vervoermiddelen.
	Irak valt Koeweit binnen, waardoor de prijzen van ruwe olie en andere fossiele brandstoffen flink de lucht in schieten. Op 15 januari in 1991 geven de geallieerden een tegenaanval op Irak.
1992	de grootste aaneenschakeling van dunne fotonvoltaïsche modules begint. Deze systemen moeten een vermogen van 479 kW leveren, genoeg voor 124 woningen.
	Nederland
1970	Zonne-energie wordt gebruikt in Nederland
1990	Aardgas is over de wereld algemeen gebruikt
1993	Op de nationale zonne-energieconferentie in april presenteert Ases B.V. uit Arnhem de eerste zonneboiler, waarbij collector en opslagvat geïntegreerd zijn.
	Begin februari wordt een proef gestart met een prototype van een thermochemische warmtepomp in een kantoor van de PGEM in Almere
	Grootste windturbines in Nederland in Flevoland
2001	Februari: Energie uit asfalt
	Op het gebied van de elektriciteitsvoorziening in Nederland vinden ontwikkelingen plaats die de milieuorganisatie Greenpeace onder de aandacht wil brengen van het publiek
	September EZ kiest voor biomassa en wind
	November Nederlands team wint zonnestroom-race Australië
2002	Basisschool Goes beperkt CO ₂ -uitstoot met innovatief energiesysteem. Het betreft een systeem, gebaseerd op warmtepompen en een collectieve bron, waarvan ook 337 woningen in de wijk gebruik zullen maken.
	Het energieverbruik in Nederland is in 2002 nagenoeg even hoog als in 2001. Dit blijkt uit cijfers van het Centraal Bureau voor de Statistiek. De jaren daarvoor vertoonden het totale energieverbruik een licht stijgende tendens
2003	Hoeveelheid duurzame energie uit windmolens is met 45% gestegen.
	Duurzame energie van zonne-energie is met 50% verdubbeld t.o.v. 2002
	Duurzame energie uit waterpompen is met 40% gestegen.
	Duurzame energie uit biomassaverbranding is gestegen met 26%
	De binnenlandse elektriciteitsproductie uit duurzame energie bleef gelijk aan 3,3% van het binnenlandse elektriciteitsverbruik
	Windenergie op zee kan uit de startblokken
Toekomst	Over tien jaar moet de hoeveelheid uit afval opgewekte energie zijn verdubbeld.

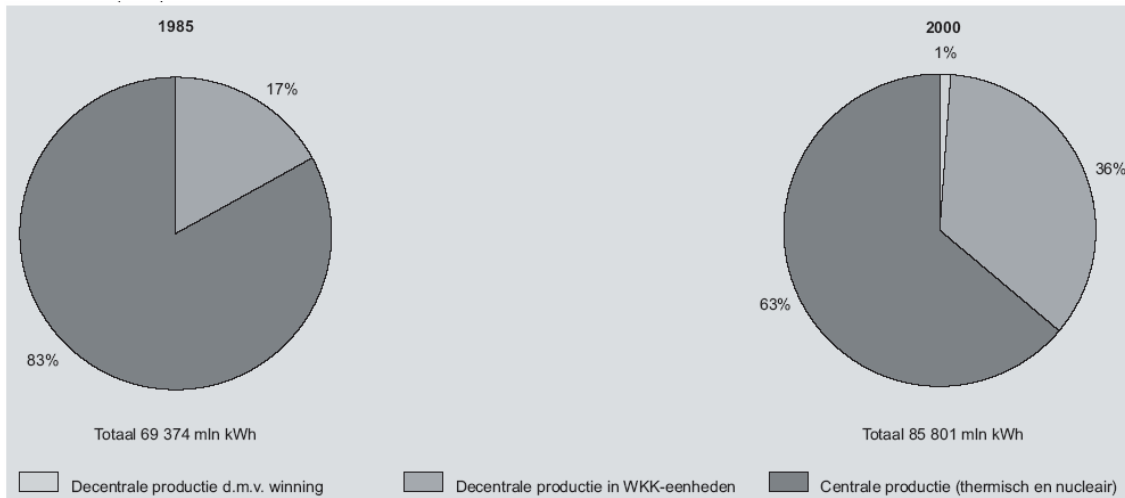
	De binnenlandse productie van duurzame energie uitgedrukt in vermeden primaire energie is in 2003 niet verder gestegen en bleef gelijk aan 1,5% van het totale binnenlandse energieverbruik. De hoeveelheid duurzame energie uit windmolens steeg wel sterk (met 45%)
2007	EPC<0.8 door o.a.: verbeterde ventilatie, WTW, verdergaande schilisolatie, HR107 en overige energiezuinige apparaten, zonneboilers, LTV (nieuwbouw), kierdichting, keurmerken en labels.
	HR verwarmingsapparatuur met groot aandeel zonne-energie, geoptimaliseerde regelingen (o.a. stooklijnen), hybride ventilatie.
2015	Micro-WKK (Stirling), geïntegreerde zonnepanelen, zongedreven warmtepompen, actieve (energie) daken, "H ₂ O-hub", duurzame (energie) verbeter-pakketten bestaande bouw, DE en domotica, schakelende beglazing.
	GBS-stekker, flexibele zonnepanelen, "E-hub", de "onzichtbare installatie", installatie- en gebouwintegratie, nul-energie renovatieconcepten, integrale ontwerptool wijkniveau, micro-WKK (brandstofcel), windconverters GO, H ₂ -accu voor lokaal opgewekte elektriciteit.
	Compacte warmte/koudeopslag, HR zonnecellen, virtuele stroomcentrales i.c.m. opslag, schakelende coatings, energieneutrale steden, onderhoudsvrije concepten, adaptieve gevels, micro-WKK op duurzame brandstoffen.
2030	Energie-nulconcepten bestaande bouw, energie-plusconcepten nieuwbouw, energie-integratie op wijkniveau (nieuwbouw), micro-WKK, gebouwgeïntegreerde windconverters, gebouw- of componentgeïntegreerde zonnepanelen en PVT, gedragsadaptieve binnenmilieuregeling, virtuele zonnestroomcentrales, superisolatie, energieneutrale steden, PVT nieuwe generatie (zonne-WKK).
2050	Energie-plusconcepten bestaande bouw, energie-integratie op stedelijk niveau (nieuwe en bestaande bouw), super-HR zonnepanelen, virtuele regelbare centrales o.b.v. zonne-energie en micro WKK op duurzame brandstoffen, adaptieve gevels.

Energiemonitor

Een andere maatstaf voor de trendbreuken kan gedaan worden aan de hand van cijfers over de energieproductie. Hiervoor zijn enkele goede bronnen beschikbaar waaronder de Energiemonitor. Hieronder is een overzicht van de energiemonitor 2001/4 weergegeven, met de energieproductie van de periode 1950-2000.



Bruto productie elektriciteit, incl. winning (bron: energiemonitor 2001/4)



Productie (netto) van elektriciteit (bron: energiemonitor 2001/4)

In de grafiek is een flinke stijging in de elektriciteitsproductie te zien. Dit is onder andere te wijten aan de ontdekking van de brandstofcel, zonnecellen/ fotovoltaïsche cellen en de steeds groter wordende toepassing van kerncentrales. Toch is te zien dat vanaf 1980 de opwekking door thermische en nucleaire centrales vrijwel gelijk blijft. In het jaar 2030 moet deze lijn dus op halve hoogte liggen (halvering van de CO₂-emissie). Een andere belangrijke trend die de laatste 20 jaar veelvoorkomend is, is dat energieproductie steeds vaker decentraal plaatsvindt.

Ontwikkelingen en gevolgen

Om in 2030 een halvering van de CO₂-uitstoot te verkrijgen zal de invloed van groene stroom een belangrijke zijn. Het gebruik van deze 'groene' energiebronnen zal dan ook nog flink moeten stijgen.

Aan het eind van de 19^e eeuw werd in Nederland als energiebron voornamelijk steenkool gebruikt. In de energievraag werd voor een groot deel voorzien door de kolenmijnen in Zuid-Limburg. Na de eerste wereldoorlog stijgt de vraag naar steenkool enorm. Maar mede door de technologische ontwikkelingen kan aan de vraag worden voldaan.

Tijdens de tweede wereldoorlog wordt brandstof erg schaars. Het niet bevrijde deel van Nederland moet in 1945 een koude hongerwinter meemaken.

Na de tweede wereldoorlog werd Europa in korte tijd weer opgebouwd. Hele steden werden hersteld en de industrie maakte een nieuwe start. De welvaart steeg en de mensen waren optimistisch; ze konden alle problemen aan. De toenemende welvaart werd al snel in het dagelijkse leven zichtbaar: er kwamen allerlei nieuwe snuffjes in huis die het leven een stuk prettiger konden maken zoals wasmachines en stofzuigers. Maar ook allerlei luxe apparaten zoals de televisie deden hun intrede.

Het toenemende energieverbruik in de huishoudens en de industrie kon gedekt worden door een nog efficiënter gebruik van de steenkolenvoorraad, ook werd er steeds meer gebruik gemaakt van aardolie.

Maar men had ook in de gaten dat de steenkoolvoorraad eindig is en ging dus op zoek naar alternatieve energiebronnen. Men verwachtte dat kernenergie de toekomst zou hebben. Na kernenergie zou de mooiste energiebron aller tijden komen: kernfusie. In 1958 dacht men dat commerciële exploitatie van kernfusie binnen twintig jaar mogelijk zou moeten zijn.

In de jaren 60 komt de welvaart binnen het bereik van de gewone man. Ieder huishouden beschikt over de nodige elektrische apparatuur en ook heeft ieder gezin een auto. In deze tijd deed ook de centrale verwarming zijn intrede. Dit alles leidde tot een nog verdere stijging van het energiegebruik

Doordat olie financieel aantrekkelijker was dan steenkool steeg het gebruik van aardolie. In 1965 werd besloten de mijnen in Limburg te sluiten omdat de winning van steenkool niet langer meer rendabel was. Op dat moment was net bekend geworden dat Nederland beschikt over een grote aardgasvoorraad. Eind jaren 60 was bijna heel Nederland overgestapt van steenkool naar olie en gas.

Het ging in deze tijd erg goed met Nederland. De mensen waren optimistisch en de welvaart groeide verder door. Een ommekeer kwam in 1972 toen 'de club van Rome' haar rapport 'Grenzen aan de groei' presenteerde. Voorzetting van het toenmalige energiebeleid zou binnen afzienbare tijd lijden tot uitputting van de fossiele bronnen.

De olieproducerende landen werden bewust van hun machtspositie, en besloten olie in te zetten als politiek wapen. Dit leidde in 1973 tot de eerste oliecrisis. Het Midden-Oosten stelde een olieboycot in tegen alle landen die Israël politiek steunden. De overheid nam maatregelen en we kregen te maken met rantsoenering, autoloze zondagen en een verbod op reclameverlichting. Maar voor dat Nederland de gevolgen echt ondervond was

de crisis alweer voorbij. Het belangrijkste effect van de oliecrisis was onze veranderde kijk op energie. Energie werd vanaf nu als politieke zaak gezien.

In 1979 brak de tweede oliecrisis uit. Door onrust in Iran werden de olieprijsen in één jaar tijd bijna verdrievoudigd. Nederland kwam in een recessiespiraal terecht. De economie zat in het slop en de werkloosheid nam onrustbarend toe.

Halverwege de jaren tachtig is op grote schaal doorgedrongen dat het erg slecht gaat met het milieu. Het broeikaseffect, het verdwijnen van de tropische regenwouden en het gat in de ozonlaag baarde grote zorgen over de toekomst van de aarde.

Er kwam een nieuw energiebeleid, daarin werd onderstreept dat het belangrijk was te blijven streven naar optimale energiebesparing en stimulering van duurzame energie. Ook werd besloten meer gebruik te maken van kernenergie. Maar vanuit het volk kwam hier steeds meer verzet tegen. De mensen waren bang dat de splijtstoffen werden gebruikt voor het fabriceren van kernwapens.

In de toekomst zal de vraag naar energie blijven stijgen, en dus zal op termijn de energievoorraad daadwerkelijk uitgeput raken. Eerst aardolie, dan aardgas en uraan.

Het is zeker dat we de komende tientallen jaren nog gebruik moeten maken van fossiele energiebronnen, want alternatieve bronnen zijn voor die tijd nog niet op grote schaal realiseerbaar, geaccepteerd of economisch haalbaar.

Technische consequenties

Wat waren dan de technische gevolgen van al deze technologische ontwikkelingen? Laten we weer in 1930 beginnen. In 1930 werd de kernenergie ontdekt. Toen men ontdekte dat uit kernenergie ook elektrische energie gewonnen kan worden, ging men over tot de ontwikkeling van kerncentrales. Toen voor het eerst warmtepompen werden toegepast, kreeg de warmtepomp al snel bekendheid en in korte tijd steeg de toepassing ervan dan ook. Door de oprichting van de eerste waterkrachtcentrale in 1931, kreeg men nieuwe ideeën over het gebruik van waterstroming ter opwekking van energie. Als in 1939 recycling belangrijk wordt, dan gaat men toch wat terughoudender denken over de consumptie van goederen en men wordt zuiniger in het gebruik van energie. Hergebruik en recycling wordt in zoveel mogelijk omgevingen toegepast. Ook de ontwikkeling van nieuwe recycletechnieken wordt in gang gezet. Door de oprichting van de eerste windturbine komt voor de tweede keer aan bod dat de natuur een zeer goede hand kan bieden bij het opwekken van elektrische energie. De markt voor natuurlijke stroomopwekking krijgt weer een extra stimulans. Door de oprichting van een nucleaire reactor komt de ontwikkeling van kerncentrales weer een stap dichterbij het doel: veel elektrische energie opwekken. Door de uitvinding van de transistor staat een grote technologische ontwikkeling aan haar beginfase: de computer.

Door de ontwikkeling van de transistor ontstaan later versterkers en daarna de computerchips. In 1948 komt wederom de natuur om het hoekje kijken en krijgt het gebruik van zonne-energie haar eerste echte intrede in de woningbouw. Het eerste huis, volledig verwarmd met zonne-energie wordt opgericht. Het gebruik van gas voor stroomopwekking wordt geïntroduceerd in 1949, waardoor gas niet meer alleen gebruikt hoeft te worden voor verwarmen en koken maar ook voor de opwekking van elektrische energie. Hiermee komt het gasgebruik in een stroomversnelling. Echter de uitputting van de bronnen dreigt eerder plaats te vinden. Dus ook energiebesparing krijgt de belangstelling.

In 1950 wordt atoomenergie een feit. Dit betekent een zeer grote vooruitgang op de elektrische energiemarkt. Grote hoeveelheden elektrische stroom kunnen nu opgewekt worden, maar niet zonder gevaar. De straling is erg gevaarlijk en dus krijgt veiligheid een extra impuls. Door de uitvinding van zonnecellen wordt de zon voor de tweede maal nuttig gebruikt. Het is mogelijk om met zonne-energie te verwarmen en elektrische stroom op te wekken. Het technische gevolg is dat grote hoeveelheden zonnecellen en later zonnepanelen worden ontwikkeld en dat in de toekomst het rendement zal stijgen.

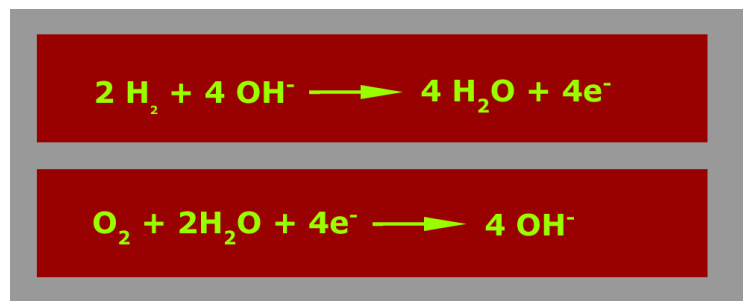
De uitvinding van brandstofcellen heeft tot gevolg dat allerlei apparatuur omgebouwd en aangepast moet worden, echter, er kan veel energie bespaard worden en het is een stuk milieuvriendelijker. Het verkrijgen van een groter rendement met zonnecellen (>20%) in 1985 heeft tot gevolg dat de cellen in verhouding tot de oude typen, kleiner van formaat worden en dat de toepassing van zonnecellen zal stijgen. Door de introductie van het eerste elektrische vervoermiddel wordt weer een nieuwe mijlpaal voor de CO₂-reductie gezet. Het gevolg is dat in de toekomst meer van dit soort voertuigen zullen komen en dat de CO₂-uitstoot zal dalen. De laatste trend, uit 2003, is dat het gebruik van groene stroom, zowel uit biomassa, windmolens, zonne-energie en waterpompen met grote mate is gestegen. Het technische gevolg is/zal zijn dat het onderzoek naar deze energiebronnen verder doorgezet wordt en verbeteringen gestimuleerd worden. Zo komt de zero-line weer een stapje dichterbij.

Echter, het grootste gevolg van allemaal is dat alle technologische ontwikkelingen hebben gezorgd voor een grote verscheidenheid aan elektrische apparatuur en dat daardoor het elektrische energieverbruik enorm is toegenomen

Bijlage 4; De verschillende typen brandstofcellen

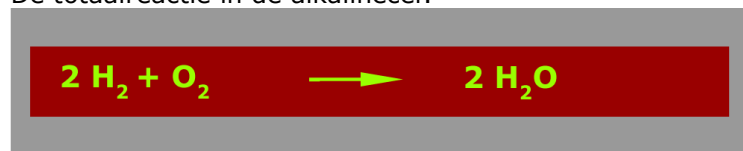
De Alkaline Fuel Cell [AFC]

Dit is het oudste type brandstofcellen. Het werd en wordt nog steeds gebruikt in de ruimtevaart. Het rendement van dit type is vrij hoog: tot wel 80% (indien gebruikt voor verwarmingstoepassingen). Het nadeel is echter dat het H₂-gas en zuurstofgas in zeer zuivere vorm moeten worden aangeleverd. De productie van het gas is dus erg duur, omdat alle verontreinigingen eruit gehaald moeten worden. De AFC is voor mobiele toepassingen het meest geschikt. De techniek van deze cel berust op een elektrolyt van zogenaamd 'potassium-hydroxide' (KOH). Bij de anode reageren 2 waterstofatomen met KOH en Bij komen 2 elektronen en water vrij. de kathode reageren twee zuurstofatomen met de elektronen en door de elektronenstroom komt elektrische energie vrij. AFC's werken bij een temperatuur van 80°C en zijn het goedkoopste type cellen op de markt. Het grote nadeel van deze cellen is dat de energiedichtheid tien maal kleiner is dan die van PEM-cel. Daardoor zijn ze ongeschikt en gevaarlijk voor mobiele toepassingen. De druk in de tank wordt dan ontzettend hoog óf de tank wordt ontzettend groot, om toch een rendabele actieradius van het voertuig voort te brengen. Een ander probleem dat opduikt, is dat er in de cel schadelijke verontreinigingen kunnen ontstaan en er milieuvervuilende dampen ontstaan tijdens de reacties. Ook zullen de prestaties van de cel achteruitgaan. Wellicht zijn in de toekomst betere energiedichtheden te realiseren. In stationaire applicaties zal de Alkaline cel een betere toepassing vinden.



Figuur 19: de halfreacties in de AFC

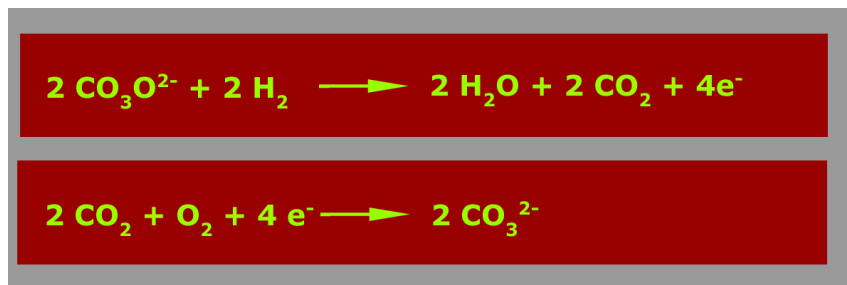
De totaalreactie in de alkalinecel:



Figuur 20: de totaalreactie in de AFC

De Direct Methanol Fuel Cell (DMFC)

Bij de methanol brandstofcel is methanol (CH_3OH), zoals de naam al aangeeft, de ingaande 'brandstof'. Vier waterstofatomen van de methanol gaan een reactie aan met een protonuitwisselend membraan (PEM), waardoor vier elektronen, overgebleven CO_2 , water en zuurstof vrijkomen. Het membraan is gemaakt van polymeren. De operatietemperatuur van een DMFC is zo'n 120 graden Celcius. Dit type cel heeft een lager rendement dan de hiervoor besproken AFK, namelijk zo'n 35% tot 45%, echter de energiedichtheid is wel aan de hoge kant. Vandaar dat de DMFC goed inzetbaar is in kleine en mobiele toepassingen. Ook de lage operatietemperatuur, maakt hem aantrekkelijk voor de mobiele toepassing. De opstarttijd kan dan kort blijven, wat dus bijdraagt aan het gebruiksgemak. Een ander belangrijk criteria is het gewicht. Omdat de cel een lichtgewicht is, in vergelijking met andere typen cellen (behalve de PEM-cel), zijn de prestaties in mobiele toepassingen ook efficiënter. (Er gaat minder energie verloren aan het vervoeren van het eigen gewicht van het voertuig.) De DMFC wordt ook toegepast in de vorm van laptop- en telefoonvoedingen.



Figuur 21: de halfreacties in de DMFC

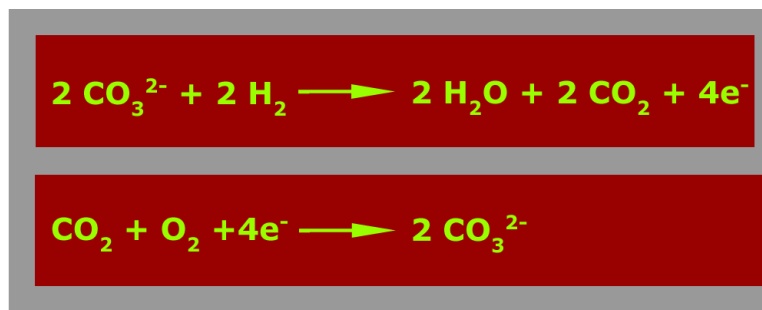
De totaalreactie van de DMFC:



Figuur 22: de totaalreactie van de DMFC

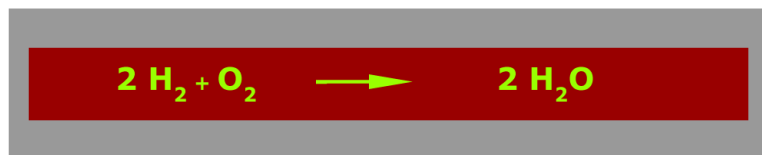
De Molten Carbonate Fuel Cell (MFCF)

Deze brandstofcel wordt gevoed door waterstof, koolstofmonoïxide, (methaan en koolwaterstof). De elektrolyt bestaat uit Lithium en kaliumcarbonaat, of een ander carbonaatzout. Als reactieproducten komen CO₂ en water vrij. De efficiency van deze cel is 50%. De operatietemperatuur van dit type brandstofcellen is: 650 °C. Het voordeel van deze hoge temperatuur is dat er (vrijwel) geen koolstofmonoïxide vrijkomt en dus niet heel 'giftig' is. Echter komt er wel koolstofdioxide vrij en het ontstaan van zwavelhoudende eindproducten is ook niet erg aantrekkelijk, vandaar dat dit type cellen niet geschikt is voor huishoudelijk en mobiel gebruik. Het rendement van de MFCF is echt er wel aantrekkelijk: maximaal 60% bij normaal gebruik en nog efficiënter wanneer afvalwarmte wordt gebruikt: 80%. De MCFC kan worden toegepast op grotere energieschalen tot wel 2 MW. De toepassing ligt vooral in de energiecentrales, WKK en warmteopwekking. Er zijn al ontwerpen voor 50MW en 100MW centrales in omloop.



Figuur 23: de halfreacties in de MFCF

De totaalreactie in de MFCF is:



Figuur 24: de totaalreactie van de MFCF

Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC)

Phosphoric Acid Fuel Cells waren de eerste brandstofcellen die in gebruik werden genomen.

PAFC gebruikt een elektrolyt van fosforzuur (H_3PO_4). Het ioniserende geleidingsvermogen van fosforzuur is laag bij lage temperaturen en zo worden PAFC's in werking gesteld op het hogere temperatuurbereik van 150°C tot 220°C .

Ook bij de PAFC wordt, net als bij de PEFC met een kathode, anode en een elektrolyt een elektronenstroom opgewekt en reactieproducten gevormd. Aan de anodezijde gaat waterstof naar binnen en bij de kathode reageren zuurstof en waterstof. De reactieproducten zijn water, warmte en elektriciteit.

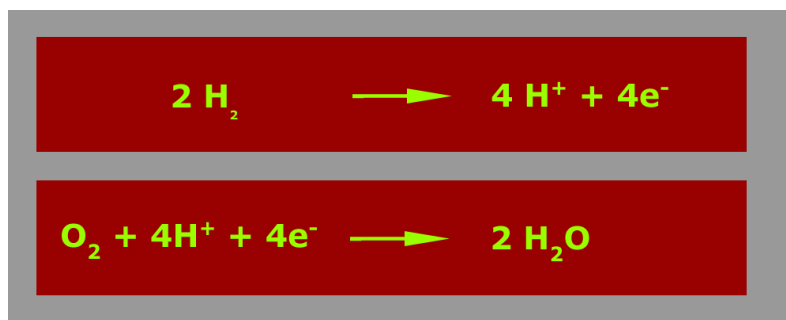
De efficiency van de PAFC loopt van 40% op tot 85%. Voorts bij de werkende temperatuur van PAFC's, de warmte die bij dit proces vrij komt kan heet water verwarmen of produceren van stoom bij atmosferische druk.

De hoge efficiency van PAFC wanneer in deze in werking gesteld in co-generatie is de wijze één voordeel van dit type van brandstofcel.

In toevoeging, CO_2 beïnvloedt niet de elektrolyt of celprestaties en kan daarom ook gemakkelijk met hervormde fossiele brandstof worden gewerkt. De lage elektrolytvluchtigheid en de stabiliteit op lange termijn zijn extra voordelen.

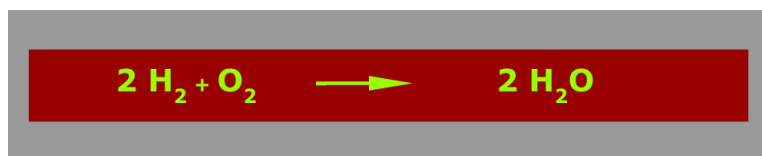
Ongeveer 75 MW van de productiecapaciteit van de PAFC is tot op heden geïnstalleerd en in werking. Typisch de installaties omvatten gebouwen, hotels, de ziekenhuizen, en andere instellingen in Japan, Europa en de Verenigde Staten.

In een bijzonder programma moesten 30 PAFC's batterijen in totaal 200 kW per batterij produceren voor militaire doeleinden. De doelstelling van dit programma moest ervaring met PAFC opbouwen voor onderhoud, betrouwbaarheid en prestaties.



Figuur 25: de halfreacties van de PAFC

De totaalreactie van de PAFC:

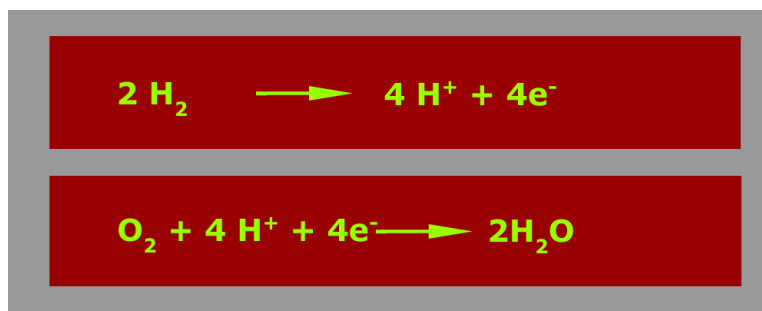


Figuur 26: de totaalreactie van de PAFC

Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)

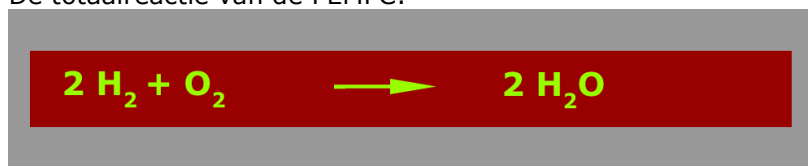
Dit type brandstofcellen is precies het type dat werkt volgens de beschrijving in het begin van dit hoofdstuk. Het is al uitgevonden in de jaren '50. De input is waterstof aan de anode zijde en zuurstof aan de kathode zijde. De elektrolyt is een proton uitwisselend membraan. Wederom wordt een elektronenstroom opgewekt en dat zorgt voor een elektriciteitsproductie. Verder komt aan de O₂-zijde warmte vrij. Het rendement van dit type is 40% (elektrisch) tot 68% (thermisch). Deze cellen hebben de hoogste energiedichtheid van alle typen die hier beschreven worden. Door een vaste elektrolyt te gebruiken, in plaats van de gebruikelijke vloeibare elektrolyt, kan corrosie van de elektroden voorkomen worden en wordt meer veiligheid gewaarborgd.

Door de anode en kathode met een speciale platina coating te behandelen en door de waterstof en zuurstof te comprimeren, kunnen de prestaties van dit type cellen verder verhoogd worden. (katalytische werking). Het is van groot belang om de productiekosten, prestaties en brandstofkosten onderling in de hand te houden, zodat deze cellen betaalbaar blijven. De levensduur van de PEM is ongeveer 50000 uur. De toepassing van de PEM-cellen is vooral te vinden in mobiele toepassingen, omdat de energiedichtheid van deze cellen zo groot is en mede omdat de operatietemperatuur aan de lage kant is en daardoor kan dus een korte opstarttemperatuur worden verwezenlijkt. Hieronder zijn de halfreacties en de totaalreactie van de PEMFC gegeven.



Figuur 27: de halfreacties in de PEMFC

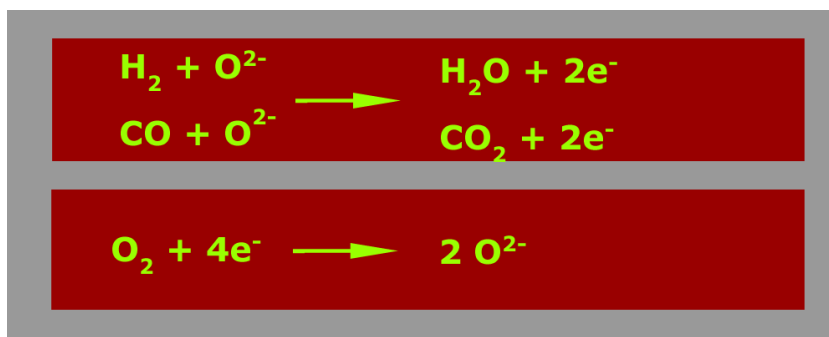
De totaalreactie van de PEMFC:



Figuur 28: de totaalreactie van de PEMFC

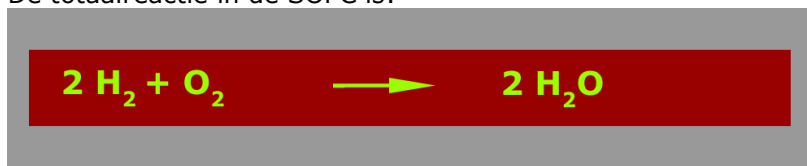
Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)

De SOFC gebruikt een elektrolyt van hard Yttra-gestabiliseerd Zirkoniumoxide, dus geen vloeibare elektrolyt zoals bij een PEMFC. De operatietemperatuur van een SOFC ligt door de harde elektrolyt dan ook een stuk hoger: 1000 °C. Dit betekent dat de cel voor mobiele toepassingen niet erg geschikt is en dat de opstarttijd toch aan de lange kant is. Echter is uit testen al gebleken dat grote energieproducties van enkele tientallen MW kunnen worden gerealiseerd. In Japan zijn al twee grote stations met 25MW operatief en in Europa zijn testen met 100MW installaties in ontwikkeling. Veelbelovend dus voor elektriciteitsproductie op grote schaal en centrale opwekking. Het elektrische rendement van deze cellen ligt tussen de 45% (thermisch) en 65%(elektrisch) , afhankelijk of de cellen al dan niet onder hoge druk worden toegepast. Het is zelfs mogelijk om nog betere rendementen te bereiken, wanneer ze op grote schaal worden ingezet, bijvoorbeeld voor grootschalige elektriciteitsproductie. Voor toepassing in WKK zijn SOFC's ook zeer geschikt. Door de hoge operatietemperatuur, komt er veel restwarmte vrij, welke kan worden gebruikt voor de verwarming van andere processen of voor de aandrijving van gasturbines. Onderzoeken hebben aangetoond dat de efficiency van de gasturbines in combinatie met SOFC's een hoger rendement opleveren dan aardgasturbines. De levensduur van de SOFC is zo'n 30000 uur. Toepassing op huisniveau is af te raden door de hoge restwarmte en lange opstarttijd.



Figuur 29: de halfreacties in de SOFC

De totaalreactie in de SOFC is:

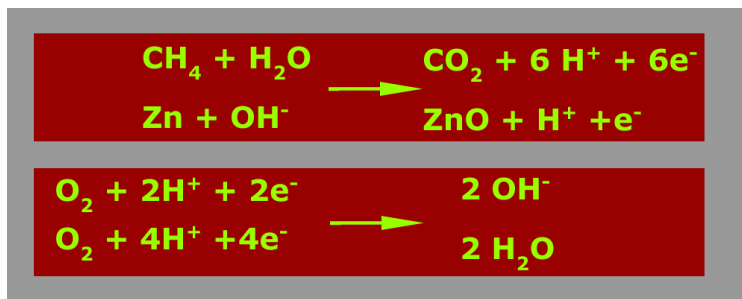


Regenerative Fuel Cell (RFC)

Dit is een type brandstofcellen wat nog in de onderzoeksfase staat. Het idee achter dit type cellen is, dat het één gesloten systeem vormt. Aan de output van de brandstofcel komt water vrij. Dit water gaat direct door naar een unit waar de omgekeerde reactie plaatsvindt: elektrolyse van water. Op deze wijze wordt weer nieuw waterstofgas ter beschikking gesteld voor de brandstofcel. Het voordeel is dat er geen nieuw waterstofgas met de hand hoeft worden toegevoegd. Echter er zijn nog vele problemen met betrekking tot onder andere efficiency en kosten. Dit type cellen kan in een volgend scenario goed toegepast worden: nachtstroomverzorging. Overdag wordt met behulp van zonne- of windenergie een hoeveelheid waterstof geproduceerd door middel van elektrolyse. De ontstane waterstof wordt opgeslagen in een reservoir en kan 's nachts worden gebruikt voor nachtstroom. Overtollig waterstof kan via kanalenstelsels naar centrale opslagvoorzieningen worden getransporteerd. DE operatietemperatuur van de RFC ligt, sinds de meest recente ontwikkelingen tussen de -20°C en 120°C .

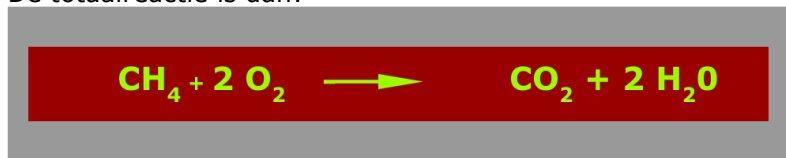
Zinc-Air fuel cell (ZAFC)

Dit is een nieuw type cellen dat ook nog in beginfase is, net als de voorgaande type cel de RFC. Dit type cel bestaat uit een zuurstofdoorlatend membraan, een kathode, een gasdiffusie elektrode en mechanische scheidingscomponenten. Er wordt OH^- , water en zinkoxide gevormd, waardoor ook weer een potentiaalverschil en dus elektronenstroom opgewekt wordt in een zoutbrug. Het lijkt veel op de PEM-cel, maar dit type onderscheidt zich door zijn manier van bijvulling. Het is een soort van oplaadbare batterij. Wanneer de reacties in de brandstofcel zich hebben voorgedaan, keert het hele proces om: het is dus een recyclebare reactie, oftewel een gesloten systeem. Het nadeel is dat het recoveren van de zink moet gebeuren bij speciale stations, echter dit kan binnen 5 minuten. De toepassing is erg breed: van militaire toepassingen tot huishoudelijke tot mobiele toepassingen. Een mooi voorbeeld van een project is te zien in China. Daar zijn vele scooters die zijn uitgerust met ZAFC's. Over het rendement van ZAFC's zijn helaas geen concrete gegevens beschikbaar. De operatietemperatuur ligt op zo'n 700°C .



Figuur 30: de halfreacties van de ZAFC

De totaalreactie is dan:



Figuur 31: de eindreactie van de ZAFC

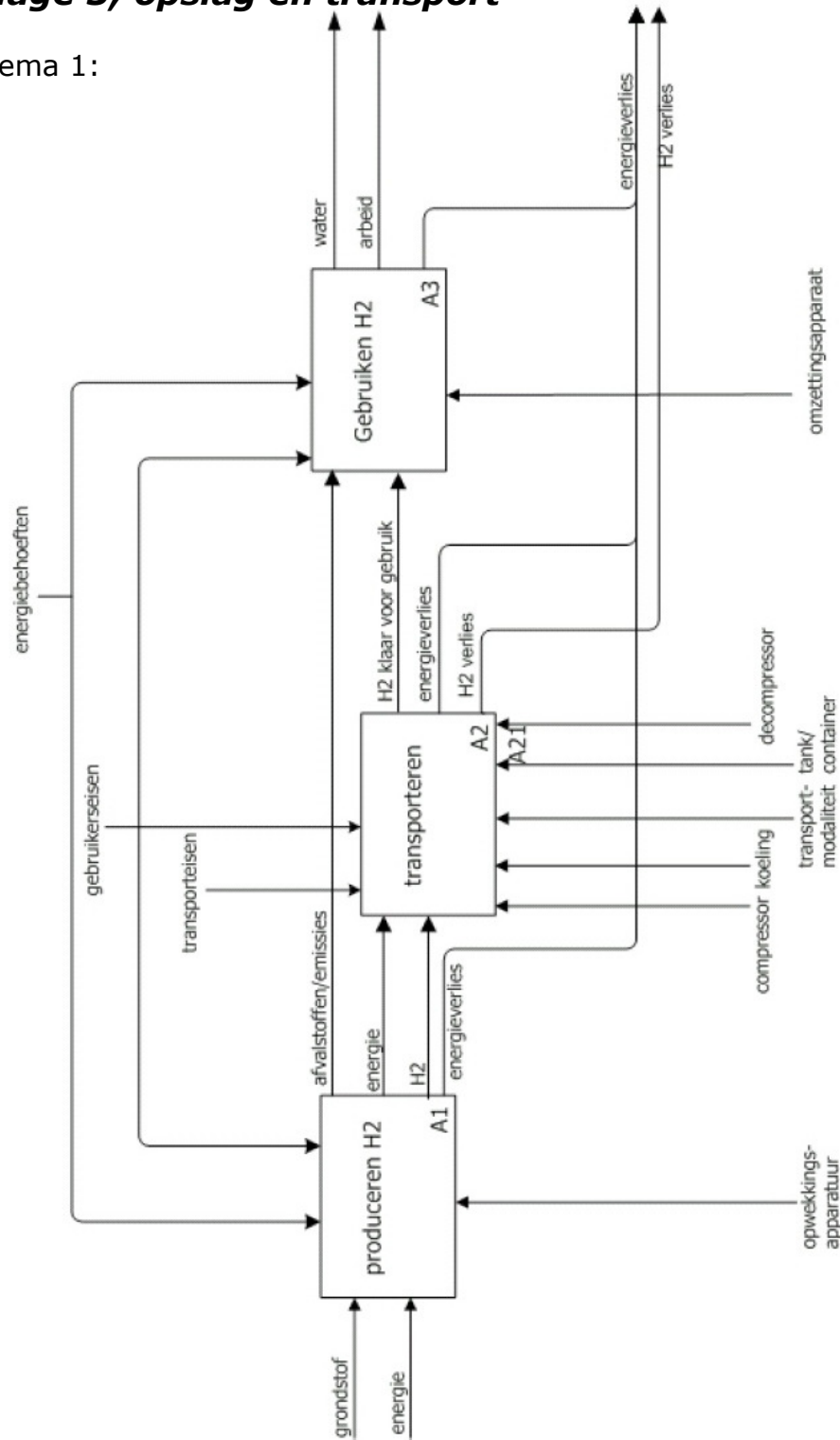
Keramische Protonuitwisselende Brandstofcellen (PCFC)

Het laatste type cellen dat we behandelen is de PCFC. Deze brandstofcel maakt gebruik van een elektrolyt van een keramisch materiaal. Deze cel kan direct fossiele brandstoffen als input gebruiken en is dus niet afhankelijk van een speciale opwekking, zoals bijvoorbeeld bij de PEM-cel het geval is. De fossiele brandstoffen worden namelijk op elektrochemische wijze, meteen naar de anode geoxideerd en vormen daar weer een halfreactie, waardoor weer elektronen vrijkomen en zo een energiestroom opgewekt wordt. De operatietemperatuur van de PCFC is 700°C.

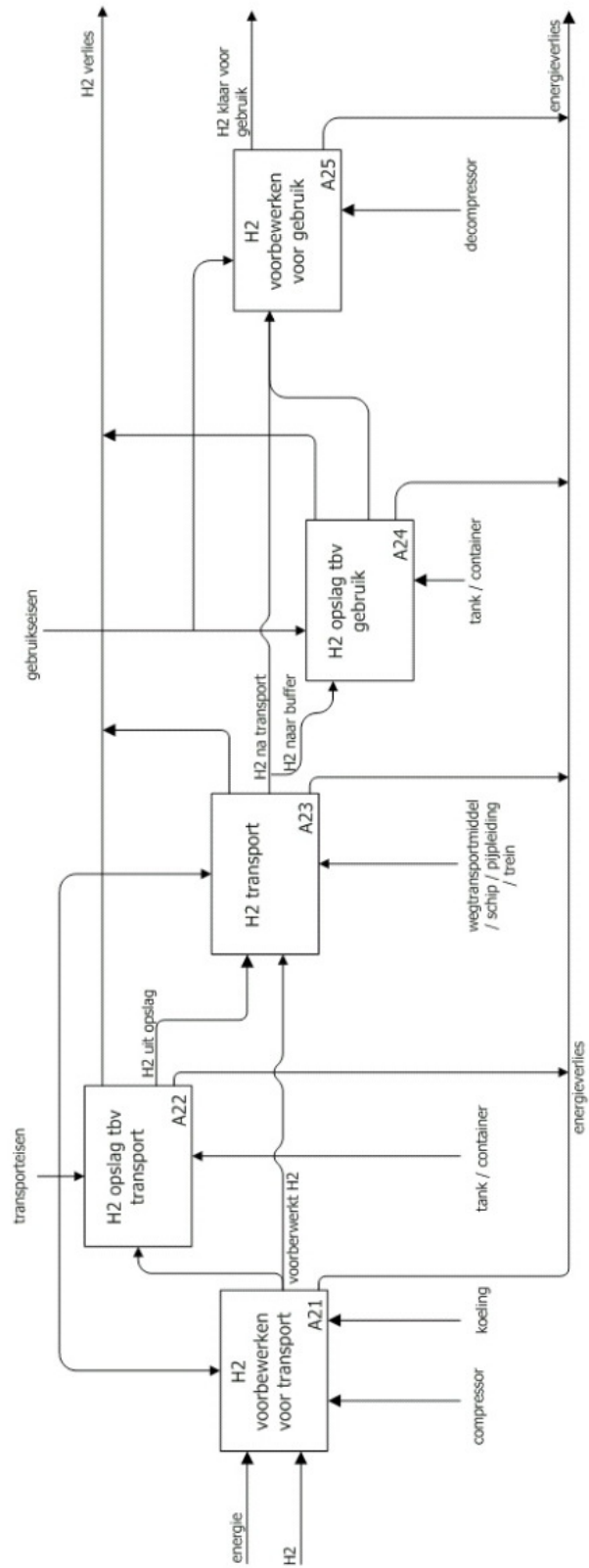
De reactieproducten van het proces zijn water en CO₂. Door de hoge operatietemperatuur wordt er echter geen giftig CO-gas opgewekt, waardoor bijgedragen wordt aan het milieu. Een ander voordeel is, dat door het gebruik van een keramische elektrolyt, er geen uitdroging van de elektrolyt plaatsvindt, zoals bij PEM-cellen of andere cellen waarin een vloeibare elektrolyt wordt toegepast. Over de efficiency van dit type cellen zijn helaas nog geen metingen beschikbaar.

Bijlage 5; opslag en transport

Schema 1:



Schema 2:



Bijlage 6; Eigenschappen van waterstof en aardgas

[TNO, 1975][Bergsma,1996]

Eigenschap	Waterstof	Aardgas
Verbrandingswaarde (MJ/m ³)		
- bovenwaarde	12,7	35,1
- onderwaarde	10,8	31,7
Dichtheid (kg/m ³)	0,090	0,833
Maximale vlamtemperatuur (°C)	2205	2010
Stoichiometrische vlamsnelheid (cm/s)	237	42
Explosiegrenzen (vol. %)	4-75	6-15
Detonatiegrenzen (vol. %)	18-59	6-14
Minimum ontstekingsenergie (mJ)	0,2	4,2
Dynamische viscositeit (g/cm.s)	1,21	0,89
Kleur van het gas	Kleurloos	Kleurloos
Kleur van de vlam	Kleurloos	Blauw-geel
Geur	Geurloos	Geurloos