



# Elektrisch autorijden Evaluatie van transities op basis van systeemopties

Beleidsstudies



# Elektrisch autorijden

## Evaluatie van transitie op basis van systeemopties

D. Nagelhout, J.P.M. Ros



## **Elektrisch autorijden – Evaluatie van transitie op basis van systeemopties**

© Planbureau voor de Leefomgeving (PBL), Bilthoven, januari 2009

*D. Nagelhout, J.P.M. Ros*

PBL-publicatienummer 500083010

### *Redactie figuren*

M. Abels, F.S. de Blois

### *Vormgeving en opmaak*

Uitgeverij RIVM

### *Contact*

Dick Nagelhout [Dick.Naghelout@pbl.nl](mailto:Dick.Naghelout@pbl.nl)

U kunt de publicatie downloaden van de website [www.pbl.nl](http://www.pbl.nl) of opvragen via [reports@pbl.nl](mailto:reports@pbl.nl) onder vermelding van het PBL-publicatienummer.

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: 'Planbureau voor de Leefomgeving, de titel van de publicatie en het jaartal.'

Planbureau voor de Leefomgeving

Postbus 303

3720 AH Bilthoven

T: 030 274 274 5

F: 030 274 4479

E: [info@pbl.nl](mailto:info@pbl.nl)

[www.pbl.nl](http://www.pbl.nl)

# Abstract

## Electric driving; an attractive challenge

Over the past years, electric driving has become more and more attractive because of the development of better batteries. Driving electric vehicles could drastically reduce CO<sub>2</sub> emissions, especially if more electricity would be generated by using sustainable energy. As most passenger cars are not used at night, this is the ideal time for charging their batteries. This would be cost-effective because, at that time, there is a surplus of generating capacity, and wind energy could also be used more effectively. Moreover, consumers will be able to drive clean and quiet vehicles at costs that seem surmountable in the future.

At least two obstacles still need to be overcome. The first of which is the current maximum range of electric vehicles of around a few hundred kilometres. Battery producers and universities are working hard on the development of batteries that could be charged within 5 to 10 minutes at EV fast-charge stations. This limited range would not be a drawback for the so-called plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs), which can run on both fossil fuel and electric power, and are expected to come onto the market in the near future. However, these plug-in hybrids reduce less CO<sub>2</sub> and carry slightly higher costs. The second obstacle is the need for a standardised European network of charging stations, and electrical outlets near residences and at commercial and public parking facilities.

This report shows the challenges facing the government and the business community of utilising the benefits of electric driving and of overcoming the obstacles.

Key words: electric vehicle; plug-in hybrid; transport; transition; battery



# Inhoud

- Abstract 5
- Samenvatting 9
- 1 Inleiding 11
  - 1.1 Voortgang van de transitie 11
  - 1.2 De systeemoptie elektrisch rijden 11
  - 1.3 Werkwijze en leeswijzer 12
- 2 Beschrijving van de systeemoptie: schets van het toekomstbeeld 13
  - 2.1 Korte schets van het basisidee 13
  - 2.2 Veranderingen in de productiestructuur 13
  - 2.3 Aanpassingen in het mobiliteitsgedrag 16
  - 2.4 Institutionele veranderingen 18
  - 2.5 Ruimtelijke invulling 18
  - 2.6 Belangrijke spelers 18
  - 2.7 Relatie met andere bestudeerde systeemopties 18
- 3 Beoordeling van de potentiële effecten van de systeemoptie 21
  - 3.1 Veiligheid 22
  - 3.2 Geluid 22
  - 3.3 Energie en klimaat 22
  - 3.4 Lokale en grootschalige luchtverontreiniging 24
  - 3.5 Kosten op de lange termijn 24
  - 3.6 Grondstoffenvoorraden 26
- 4 Resultaten van de activiteiten in de voorontwikkelingsfase 27
  - 4.1 Ontwikkeling van probleemperceptie 27
  - 4.2 Toekomstvisie (op auto en elektriciteit) 27
  - 4.3 Research & Development 28
  - 4.4 Experimenten in de praktijk 29
  - 4.5 Leercurven 30
  - 4.6 Samenhang tussen de activiteiten 30
- 5 Motivatie voor systeemverandering 33
- 6 Conclusies 37
- Literatuur 39
- Bijlage 1 Interviewronde 41





# Samenvatting

Elektrische auto's – in combinatie met een elektriciteitsproductie op basis van vernieuwbare bronnen en schoon fossiel – hebben de potentie om op lange termijn de CO<sub>2</sub>-emissie van personenauto's en andere lichte voertuigen met 80-90% terug te brengen. Elektrisch vervoer kan ook de geluidhinder in de stad aanmerkelijk terugdringen. De kosten lijken hiervoor geen beletsel te zijn, want de verwachting is dat de accu nog aanzienlijk goedkoper kan worden. De belangrijkste nadelen in het gebruiksgemak op de korte termijn zijn de beperkte actieradius van elektrische auto's, de toegankelijkheid van oplaadpunten en de duur van het opladen.

Ondanks de verbeteringen die nog mogelijk zijn in de huidige aandrijfsystemen voor auto's, is het onwaarschijnlijk dat daarmee de sector verkeer op de lange duur aan gewenste doelstellingen voor broeikasgasemissies kan voldoen. Hiervoor is een grootschalige transitie naar alternatieve brandstoffen en geavanceerde voertuigtechnologie nodig. Alternatieven zijn naast elektrisch rijden ook brandstofcelauto's en biobrandstoffen. De verschillende alternatieven hebben voor- en nadelen. Voor de realisatie van brandstofcelauto's op waterstof is een complexe waterstofinfrastructuur nodig. De brandstofcel moet nog aanzienlijk goedkoper worden om de auto te kunnen laten concurreren met de conventionele auto. De benodigde energieconversiestappen zorgen voor een laag rendement. Biobrandstoffen hebben het nadeel van een groot landgebruik en kunnen daarom conflicteren met voedselvoorziening en biodiversiteit. De beschikbaarheid van biomassa is om die reden beperkt. Over deze twee systeemopties zijn eerder rapporten uitgebracht. In dit rapport wordt de systeemoptie elektrisch rijden beschouwd.

## De voordelen: schoon, stil en minder afhankelijk van olie en gas

Voor zware vrachtwagens is elektrisch rijden geen voor de hand liggende optie. Voor personenauto's en andere lichte voertuigen moet het gezien de kenmerken van het autogebruik haalbaar worden geacht dat op de lange termijn (begin tweede helft van deze eeuw) maximaal 90% van de kilometers elektrisch wordt gereden. De emissie per kilometer zou dan zelfs nihil kunnen zijn, maar dit is uiteraard afhankelijk van de emissie per kilowattuur en dus van het toekomstige technologiepakket in de elektriciteitsproductie. Met hernieuwbare bronnen en schone fossiele bronnen zijn zeer lage emissies mogelijk, waarbij de kosten voor productie en transport in

een ruwe schatting voor 2050 2 à 3 eurocent per kWh hoger kunnen liggen dan in het huidige systeem.

Elektrisch rijden levert (net als brandstofcelauto's) ook voordelen op voor de leefomgevingskwaliteit in de stad. De luchtverontreiniging kan nog wat lager worden dan met toekomstige schone conventionele auto's of hybrides. Bovendien kan de geluidhinder in de stad verminderen, vooral bij accelereren. Elektrisch rijden is ook een vervangingsoptie voor brommers en motoren. Deze bronnen zorgen in de stedelijke omgeving bij meer dan 10% van de bevolking voor ernstige geluidhinder (brommers ongeveer 20%). Ook de gebruiker zelf kan genieten van een stil voertuig.

Een ander voordeel is dat de afhankelijkheid van olie, maar ook van gas, verder daalt. Het laatste hangt samen met het systeem van opladen en vraagt enige toelichting. Elektrisch rijden kan de toekomstige elektriciteitsvraag op nationaal niveau met zo'n 10% verhogen, op wijkniveau soms wel met 50% of meer. In de huidige situatie is het aanbod 's nachts groter dan de vraag. Auto's kunnen juist goed 's nachts worden opgeladen. In een optimaal oplaadsysteem zouden de auto's (die gemiddeld 23 uur per etmaal niet worden gebruikt) zoveel mogelijk aan het net gekoppeld moeten zijn. Dat biedt de mogelijkheid om vraag en aanbod beter op elkaar af te stemmen. Het vraagt een centraal (op nationaal niveau) en een decentraal (op wijkniveau) aangestuurde controle, die rekening houdt met de capaciteit van het netwerk, de wensen van individuele gebruikers over het tijdstip waarop de accu volgeladen moet zijn en de prijs. Geautomatiseerde sturing biedt kansen om bijvoorbeeld windenergie, die een wisselend aanbod kent, beter te benutten en minder afhankelijk te worden van gascentrales die nu vaak worden ingezet om de flexibiliteit in het aanbod te vergroten.

## De nadelen: minder flexibiliteit in het gebruik

De nadelen van elektrisch rijden hebben te maken met de beperkte actieradius van de elektrische auto en de praktische problemen bij het opladen. De energiedichtheid van de accu's is en blijft naar verwachting zodanig beperkt dat er voor een actieradius van enkele honderden kilometers een zwaar (men hoopt 1 kg/km te bereiken), omvangrijk en duur accusysteem nodig is. Het kost enkele uren om de accu thuis weer op te laden. Hoewel de meeste dagafstanden kunnen worden afgelegd op één volgeladen accu is die oplaadtijd toch een

handicap wanneer af en toe langere ritten moeten worden gemaakt.

Er wordt gewerkt aan diverse oplossingen voor dit probleem. Een alternatief dat al op korte termijn commercieel beschikbaar zal zijn, is de plug-in hybride. Daarmee kan bijvoorbeeld 50 kilometer elektrisch worden gereden, waarna wordt overgeschakeld op conventionele brandstoffen. Op deze manier wordt per saldo een CO<sub>2</sub>-emissiereductie van meer dan 50% bereikt. Door het dubbele aandrijfsysteem is de auto relatief duur. Een andere oplossingsrichting is een uitgebreider aanbod van deel- en huurauto's voor lange ritten. Er wordt ook gewerkt aan een systeem voor snelladen onderweg bij oplaadstations. Technisch is de accu er momenteel nog niet tegen bestand, maar bedrijven en onderzoekers streven ernaar op termijn oplaadtijden van vijf à tien minuten te halen. Als alternatief wordt ook gewerkt aan accuwisselstations, waar men onderweg binnen enkele minuten het lege accupakket vervangt door een opgeladen pakket. Dat vraagt wel om standaardisatie en het beperkt de mogelijkheden voor autofabrikanten om het omvangrijke accupakket op een zodanige wijze in te bouwen dat het zo min mogelijk ruimte kost.

#### Het prijskaartje op de lange termijn: afhankelijk van het gebruiksgemak

Het is de verwachting dat tussen ergens in het tijdvak tussen 2020 en 2040 de kosten van elektrisch rijden lager zullen zijn dan van rijden in een conventionele of hybrideauto, ook als er geen verschil zou zijn in belastingtarieven per kilometer. De prijs van de accu bepaalt voor een groot deel de prijs van de elektrische auto. In de literatuur wordt verwacht dat de accuprijs kan dalen tot 150 à 300 euro per kWh opslagcapaciteit. Er wordt vanuit gegaan dat er in de toekomst voldoende lithium, een belangrijk element in de meest kansrijke accu, beschikbaar zal zijn. Meer accucapaciteit betekent een grotere actieradius. Dat biedt de gebruiker meer gemak, maar maakt het rijden duurder. Hetzelfde geldt voor de plug-in hybride. Wanneer de tijd die nodig is voor snelladen tegen een acceptabele prijs minder wordt dan vijf minuten en er sprake is van een Europees dekkend systeem, lijkt er nog weinig het elektrisch rijden in de weg te staan.

#### De barrières op de korte termijn: oplaadfaciliteiten

Wat betreft de productiekosten van auto's en brandstoffen is elektrisch rijden de komende tien jaar duurder dan rijden in een conventionele auto. Voor de consument ligt de situatie echter anders. De belasting op motorbrandstof is hoger dan op elektriciteit. Bovendien zijn diverse beleidsinstrumenten van toepassing (geen Belasting van personenauto's en motorrijwielen, (BPM) en motorrijtuigenbelasting voor elektrische auto's), zodat de kosten voor de consument op ongeveer hetzelfde niveau liggen als voor conventionele auto's (bij een benzineprijs van 1,60 euro per liter). Bovendien bereiden bedrijven een systeem voor met het leasen van accu's, wat de investeringsdrempel wegneemt en het risico van een korte levensduur (er is immers geen auto die al vijftien jaar met dezelfde accu rondrijdt) niet bij de gebruiker legt.

De consument moet echter wel mogelijkheden hebben voor het opladen thuis en elders. Minder dan de helft van de auto's wordt in de huidige situatie bij huis geparkeerd op een parkeerplaats op eigen grond. Als niet de zekerheid bestaat dat de automobilist bij thuiskomst, op het werk of elders een aansluiting op een oplaadpunt kan krijgen, is dit een belangrijke barrière bij de aanschaf van een elektrische auto.

#### Europese beleidsimpulsen zijn gericht op autofabrikanten

De barrières voor de consumenten bepalen ook in sterke mate de afweging van autofabrikanten om elektrische auto's op de markt te brengen. Vanuit Europese regelgeving zijn de impulsen nog beperkt. Elektrische auto's kunnen bijdragen aan het halen van te verwachten CO<sub>2</sub>-normen en aan de doelstelling van 10% hernieuwbare energie in transport, maar ze zijn daarvoor niet nodig. Juist het ontbreken van een specifieke verplichting voor elektrische auto's verzwakt de prikkels naar de autofabrikanten.

Constructies voor het leasen van accu's zorgen dat er samenwerkingsovereenkomsten van de grond komen tussen autofabrikanten, accufabrikanten, elektriciteitsbedrijven en bedrijven die oplaadfaciliteiten leveren. Een belangrijk aandachtspunt bij leasen van accu's door de consument is de dekking van het risico van de levensduur van de accu's. Daarmee is geen praktijkervaring.



# Inleiding

## 1.1 Voortgang van de transitie

In 2001 heeft het vierde Nationaal Milieubeleidsplan (NMP4: VROM, 2001) een beleidsimpuls gegeven aan het denken in termen van systeemverandering op de lange termijn om hardnekkige milieuproblemen de baas te kunnen. Het heeft ook diverse beleidsacties in gang gezet, die invulling hebben gegeven aan het begrip transitie-management in de context van duurzame ontwikkeling. In 2005 is een interdepartementale directie voor de energietransitie in het leven geroepen, waardoor beleid dat voorwaarden schept voor en initiatieven neemt in het transitieproces over de departementen heen beter kan worden aangestuurd. In overleg met alle betrokken ministeries heeft het toenmalige Milieu- en Natuurplanbureau in 2006 een eerste evaluatie uitgebracht van de voortgang van het transitieproces en de rol van het beleid daarin op basis van een analyse van zes systeemopties. In 2008 is een rapportage over zonne-energie in woningen uitgebracht.

De zeven systeemopties en het samenvattend evaluatierapport zijn:

- Vloeibare biobrandstoffen (Ros en Montfoort, 2006);
- Groene diensten in de landbouw (Reudink et al., 2006);
- Groene grondstoffen (Van den Born en Ros, 2006);
- Visvoer voor viskweek (Rood et al., 2006);
- Brandstofcelauto op waterstof verkregen uit zonthermische krachtcentrales (Nagelhout en Ros, 2006);
- Micro warmtekracht en de virtuele centrale (Elzenga et al., 2006);
- Transitieprocessen en de rol van het beleid in samenhang bekeken (Ros et al., 2006b);
- Zonne-energie in woningen (Montfoort en Ros, 2008).

In dit rapport wordt de analyse van een achtste systeemoptie, opgebouwd rond elektrisch rijden, gepresenteerd.

Het werken aan een beter systeem op de lange termijn heeft met het NMP4 weliswaar extra aandacht gekregen, maar het is er niet mee begonnen. Er liepen al tal van onderzoeksprogramma's en experimenten, er waren vele ideeën over nieuwe institutionele vormgeving en er was al veel beleid dat daar direct of indirect invloed op had. Het heeft geen zin de ontwikkelingen van de laatste jaren te beschouwen zonder deze context. Bovendien zijn er tal van relevante internationale ontwikkelingen. Uitgangspunt voor de evaluaties was

dan ook de voortgang van de processen in de praktijk. Daarbij is aangegeven welke prikkels er vanuit het Nederlandse beleid zijn gegeven en hoe effectief die zijn geweest.

In de voorontwikkelingsfase zijn transities doelzoekende processen. Zonder duidelijke doelen is het lastig vast te stellen wat in monitoring moet worden gemeten en geëvalueerd. Er is gezocht naar een aanpak waarbij de evaluatie kan worden toegespitst op concrete onderdelen van het transitieproces. Dat heeft geleid tot de keuze om systeemopties als uitgangspunt voor het in beeld brengen van de voortgang te nemen. Een systeemoptie schetst een deel van het toekomstige systeem, zoals dat zou kunnen worden. Het vormt een potentieel doel. De evaluatie richt zich op het proces om deze systeemoptie te realiseren en dus op de voorwaarden die moeten worden vervuld om de potenties van de systeemoptie te verzilveren. Daarmee krijgt de evaluatie enigszins het karakter van *back casting*. Bij de formulering van de eindconclusies dient te worden bedacht dat in het brede transitieproces ook alternatieven – soms aanvullend, soms concurrerend – worden ontwikkeld.

In deze rapportage staan drie elementen centraal:

- een inschatting van het potentieel van het nieuwe technologische systeem ofwel de redelijkerwijs maximaal haalbare toepassing op de lange termijn (rond 2050);
- een beoordeling van de effecten als de systeemoptie gerealiseerd zou zijn, vergeleken met het bestaande, doorontwikkelde systeem;
- een analyse van het proces tot nu toe om de systeemoptie te realiseren en de rol van het beleid daarin.

## 1.2 De systeemoptie elektrisch rijden

In dit rapport wordt de systeemoptie elektrisch rijden beschreven en beoordeeld en worden de activiteiten en het beleid rondom deze systeemoptie geëvalueerd. Elektrisch rijden omvat in dit rapport zowel de volledig elektrische auto als de plug-in hybride waarvan de accu met elektriciteit uit het net wordt opgeladen en waarmee enkele tientallen kilometers kan worden gereden voordat eventueel – al of niet geleidelijk – een verbrandingsmotor het overneemt. De nu al rijdende hybride waarbij de accu de verbrandingsmotor ondersteunt, komt slechts zijdelings aan bod. Hetzelfde geldt

voor de brandstofcelauto die in een eerdere studie al aan de orde was (Nagelhout en Ros, 2006). Het rapport beschrijft niet alleen de ontwikkelingen van de auto, maar ook de inrichting van het hele systeem eromheen. De gegevens in dit rapport zijn gebaseerd op literatuuronderzoek en interviews met actoren die bezig zijn met accu's, elektrische auto's en het elektriciteitsnet.

### 1.3 Werkwijze en leeswijzer

Er is gebruikgemaakt van de door het toenmalige Milieu- en Natuurplanbureau (MNP) opgestelde evaluatiemethodiek voor transitie en de daarin aangegeven bouwstenen (Ros et al., 2006a; Ros et al., 2009).

In de eerste plaats is een beschrijving en vooral een afbakening van de beschouwde systeemoptie van belang. Het is het plaatje van de mogelijke toekomst. Dit gebeurt in hoofdstuk 2. Het gaat om een samenhangend geheel van technieken, processen, instituties en structuren. Het potentieel en de mogelijke effecten van de systeemoptie bepalen mede de houding van diverse actoren. Daarom gaat hoofdstuk 3 in op de redelijkerwijs maximaal haalbare toepassing en de effecten, met speciale aandacht voor de effecten op CO<sub>2</sub>, lokale luchtverontreiniging, veiligheid, geluid, grondstofvoorraden en de kosten.

Milieubeleidsevaluaties worden veelal gebaseerd op de monitoring van emissies, milieukwaliteit en zo mogelijk van effecten op natuur en volksgezondheid. In het geval van de lopende transitieprocessen worden de beoogde veranderingen in deze grootheden echter pas op de lange termijn bereikt. Beleid dient zich eerst te richten op de voorontwikkeling van dat veranderingsproces. Daarin zijn vier typen activiteiten verondersteld:

- het ontwikkelen van een gevoel van urgentie op basis van een probleempceptie;
- het ontwikkelen van een gezamenlijke toekomstvisie;
- onderzoek naar en ontwikkeling van nieuwe technologie en nieuwe instituties;
- experimenten in de praktijk met onderdelen van het nieuwe systeem of het inrichten van niches.

In hoofdstuk 4 worden de feitelijke ontwikkelingen in de voorontwikkelingsfase van de transitie van de afgelopen jaren op een rij gezet. Wat is er op die punten de afgelopen jaren gebeurd en welke beleidsacties zijn daarop gericht? Dit hoofdstuk gaat ook in op de samenhang tussen deze ontwikkelingen. Hierbij wordt vooral beschouwd in hoeverre de cyclus van visievorming → Research & Development → experimenten, die gericht is op de lange termijn, spoort met de cyclus van actiegerichtheid → creëren van markten en niches, die gericht is op de korte termijn.

In hoofdstuk 5 wordt nagegaan in hoeverre de activiteiten in de voorontwikkelingsfase en het gevoerde overheidsbeleid de motivatie vergroten en de benodigde randvoorwaarden

invullen om tot daadwerkelijke systeemverandering over te gaan. Daartoe worden cruciale acties geïdentificeerd die zouden kunnen leiden tot de beslissing om te investeren in productiecapaciteit. In krachtenveldanalyses worden alle factoren samengebracht.

Hoofdstuk 6 bevat conclusies over de mogelijke effecten, de voortgang van het proces en de invloed van het Nederlandse beleid daarop.

In de bijlage staat een overzicht van personen die ten behoeve van deze studie zijn geïnterviewd. Zij worden hartelijk bedankt voor de tijd en expertise die zij beschikbaar hebben gesteld. Hetzelfde geldt voor een aantal collega's van het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL).

# 2

## Beschrijving van de systeemoptie: schets van het toekomstbeeld

### 2.1 Korte schets van het basisidee

In dit hoofdstuk wordt een kijkje genomen in de toekomst. Hoe zou het systeem van het elektrisch rijden er pakweg rond 2050 uit kunnen zien? Het gaat daarbij niet om een exact jaartal. Het moet ver genoeg weg zijn om een ingrijpende systeeminnovatie te kunnen realiseren, maar ook niet zo ver weg dat het niet meer aanspreekt en op sciencefiction lijkt. Het gaat evenmin om een exacte invulling van het toekomstige systeem, een soort blauwdruk. Daarvoor zijn er binnen de systeemoptie nog te veel varianten mogelijk en vrijheidsgraden aanwezig voor optimalisatie. Het is een schets, die aangeeft wat er allemaal komt kijken bij de mogelijke realisatie van het systeem.

In tegenstelling tot de conventionele auto die een verbrandingsmotor heeft die gevoed wordt door benzine, diesel of gas heeft de elektrische auto een elektromotor die loopt op elektriciteit afkomstig van een accu. Elektrische voertuigen hebben het voordeel dat ze veel minder lokale milieubelasting kennen en zuiniger omgaan met energie in vergelijking met auto's met een verbrandingsmotor. Los van de vraag met welke energiebron elektriciteit wordt opgewekt, maakt dit gegeven deze systeemoptie al interessant. Deze systeemoptie gaat ervan uit dat op de lange termijn, rond 2050, een belangrijk deel van de automobilisten dat nu rondrijdt in voertuigen met een verbrandingsmotor, dan rijdt in geheel elektrische auto's. Een ander deel van de automobilisten rijdt in plug-in hybrides, auto's die een deel van de kilometers elektrisch afleggen. Het lokale vrachtvervoer wordt grotendeels elektrisch afgewikkeld met bestelauto's en lichte vrachtwagens die in de stad stil en schoon rijden. Zware vrachtwagens worden in deze systeemoptie niet beschouwd, omdat rijden op accu's voor deze voertuigen minder geschikt lijkt te zijn vanwege het gewicht en volume van de accu.

De systeemoptie omvat ook het systeem van het laden van de accu door de automobilist en het inspelen op de mogelijkheden van de toekomstige elektriciteitsvoorziening. Zo zouden

de accu's vooral 's nachts kunnen worden geladen met elektriciteit afkomstig van windmolens die dan capaciteit over hebben. Maar ook koppeling met decentraal opgewekte elektriciteit (zon-PV) of met zonne-energie uit de Sahara, hierheen geleid via een hoogvermogen gelijkstroom netwerk (HVDC), is denkbaar. Daarnaast zijn er snellaad- en/of wisselpunten, vooral langs de grote wegen, oplaadmogelijkheden bij parkeergarages of -terreinen en gereserveerde parkeerplaatsen bij huis waar een eigen garage of carport ontbreekt (of niet voor de auto gebruikt wordt).

Elektrische auto's lijken – gezien gewicht en prijs van de accu – vooral geschikt voor korte en middellange afstanden. Er vanuit gaande dat men ook af en toe langere afstanden wil afleggen, betekent dit dat in een toekomstig systeem óf snel laden of -wisselen mogelijk moet zijn, óf dat er een voor de consumenten gemakkelijk toegankelijk aanbod van huur- of deelauto's beschikbaar is, bijvoorbeeld op basis van hybride-technologie. De voordelen van elektrische voertuigen met alle varianten tussen fiets en auto, voor de lokale leefomgevingskwaliteit, kunnen leiden tot een relatief grotere toegankelijkheid van binnensteden voor elektrisch verkeer.

### 2.2 Veranderingen in de productiestructuur

De auto-industrie wordt gekenmerkt door een vrij beperkt aantal fabrikanten dat auto's fabriceert en een groot aantal toeleveranciers, dat al of niet allianties aangaat met autofabrikanten. Onderdelen van de conventionele auto, zoals verbrandingsmotoren, benzinetanks, uitlaten, katalysatoren, startaccu's en transmissies, zijn voor elektrische voertuigen niet nodig. Daartegenover staat de komst van elektromotoren, opladers en uiteraard accu's die de auto van stroom voorzien. Kortom, de productiestructuur in en rond de auto-industrie verandert. Bovendien moeten er naast een infrastructuur voor de distributie van vloeibare of gasvormige brandstof ook voorzieningen voor de koppeling van de auto aan het elektriciteitsnet komen. Verder moet er ook meer

elektriciteit worden geproduceerd en wel op een schone manier om niet deels een verplaatsing van emissies te krijgen.

### 2.2.1 De auto

Voor een goed begrip is een enkel woord nodig over de auto. De hybrideauto die ruim tien jaar geleden op de markt kwam ('Prius') en nu aan een flinke opmars bezig is, heeft een accu die opgeladen wordt door de verbrandingsmotor. De accu zorgt ervoor dat de auto zo optimaal mogelijk gebruikmaakt van de brandstof. Door toepassing van de accu kan de motor lichter (zuiniger) uitgevoerd worden. De hybride kan hoogstens een paar kilometer elektrisch rijden. Er zijn en komen ook hybrides op de markt met alleen een stop-startsysteem waarbij energie wordt bespaard als de auto stilstaat of waarbij alleen remenergie wordt teruggewonnen.

Veel verder gaat de plug-in hybride (of stekkerhybride). Deze heeft een grote accu die opgeladen wordt vanuit het elektriciteitsnet. Afhankelijk van de grootte van de accu en andere kenmerken van de auto kan een plug-in hybride tientallen kilometers rijden op elektriciteit en daarna overschakelen op fossiele brandstof. Het is ook mogelijk een deel van de resterende accucapaciteit te gebruiken als bij de gewone hybride om zo efficiënt mogelijk met de acculading om te gaan. Ook hier komen verschillende varianten voor, zoals auto's met twee volledige aandrijfsystemen en plug-in hybrides waarbij een kleine, op een constant toerental draaiende verbrandingsmotor indien nodig fungeert als generator, de accu van stroom voorziet en elektromotoren de auto aandrijven (de *extended range electric vehicle*, zoals de geplande Chevrolet Volt). In de toekomst zou ook een elektrische hybride met naast de accu een brandstofcel en een waterstoftank een optie kunnen zijn.

Een volledig elektrische auto heeft alleen een accu en een of meer elektromotoren en is geheel afhankelijk van het stopcontact. Een uitgebreid overzicht is te vinden in Passier et al., 2008.

### 2.2.2 De accu

De mate waarin elektrisch rijden doorbreekt, staat of valt met verbetering van de accu, omdat deze bepalend is voor de prijs en de gebruiksmogelijkheden van de auto. Rond 1900 reden al auto's rond die geheel of gedeeltelijk elektrisch werden aangedreven. De teloorgang had te maken met een te lage actieradius en topsnelheid (en te weinig geluid!).

Een accu of batterij bestaat uit een of meer cellen. Een cel wordt gevormd door twee elektroden met een verschillende samenstelling – een anode en een kathode – een elektrolyt en een separator in het elektrolyt. De energie zit hierin chemisch opgeslagen. De samenstelling van anode, kathode en elektrolyt verschilt per soort batterij. De batterijen worden vaak benoemd naar de belangrijkste combinaties van chemische elementen, zoals bijvoorbeeld lood, nikkel, cadmium, kobalt, waterstof en lithium.

Aan accu's worden verschillende eisen gesteld. De ideale accu heeft een hoge energiedichtheid (laag gewicht en klein volume), kan veel vermogen leveren en snel geladen worden, heeft een lange levensduur, is veilig en goedkoop. Al naar gelang de toepassing van de accu varieert het belang van deze kenmerken. Bij een hybrideauto wordt het accent gelegd op het (kort) leveren van veel vermogen. Bij een elektrische auto of plug-in hybride is vooral de energiedichtheid (de hoeveelheid energie die kan worden opgeslagen per kg) van belang. De verhouding tussen de energiedichtheid en de vermogensdichtheid kan enigszins worden gevarieerd door de keuze van celgrootte en opbouw van het gehele accusysteem. Figuur 2.1 toont de kenmerken van enkele accutypen (Mulder en Wagemaker, 2008).

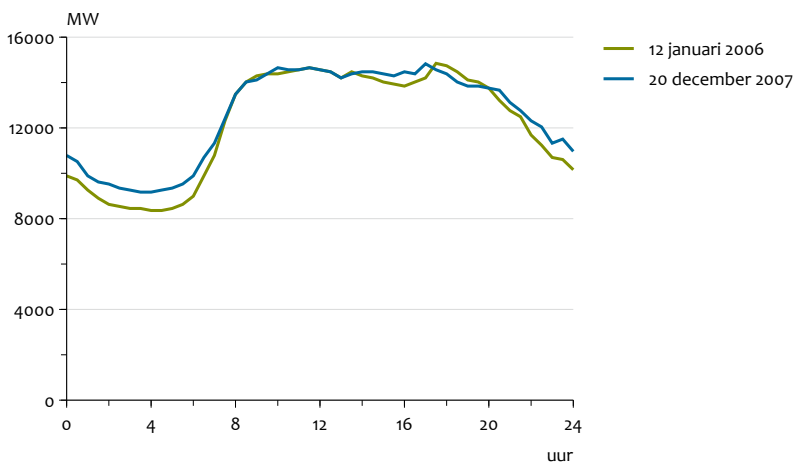
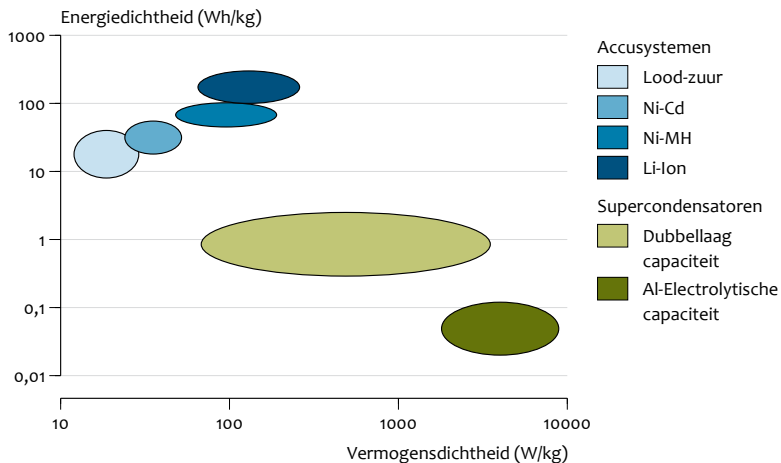
Op dit moment worden voor hybrideauto's Ni-MH-accu's gebruikt (H-ionen stromen tussen anode en kathode) en deze markt breidt nog verder uit. Voor de komende decennia worden voor het elektrisch rijden accu's met lithium vrij algemeen als meest veelbelovend gezien. De huidige Li-ion-accu kent een veel hogere energiedichtheid dan de Ni-MH-accu. Li-ion-accu's zijn gevoelig voor overlading. Om de levensduur te verlengen is een batterijmanagementsysteem nodig dat voortdurend de staat van de cellen controleert (Notten, 2006). De Li-ion-polymeeraccu is flexibel en nog lichter dan de Li-ion-accu. Een andere lithium bevattende accu is de lithium-ijsferfosfaataccu. Deze is goedkoper dan de conventionele Li-ion-accu maar kent ook een lagere energiedichtheid. Hij gaat langer mee doordat de  $\text{LiFePO}_4$  stabiel is dan andere elektrodematerialen. De accu kan dan vaak geladen en ontladen worden. Een auto gaat gemiddeld vijftien jaar mee en zo lang zou idealiter ook de accu mee moeten kunnen, gezien de prijs van de accu nu en in de toekomst. Met een accu die energie levert voor 250 km zou bij 2000 oplaadcycli 500.000 km gereden kunnen worden. Vooralsnog speculatief is de mogelijkheid dat accu's die na verloop van tijd aan prestaties te veel hebben ingeboet om nog in een auto te kunnen worden gebruikt, wel geschikt kunnen zijn voor elektriciteitsopslag.

Van groot belang is dat de nieuwe generaties Li-ion-accu's als veilig beschouwd worden zodat een belangrijk knelpunt van deze accu's, de ontvlambaarheid, is weggenomen.

Naast de accu, waarin energie chemisch wordt opgeslagen, is er de zogenoemde supercondensator (*ultracapacitor of electrochemical double layer capacitor*) voor fysische opslag van elektriciteit. De energiedichtheid hiervan is relatief laag. Daardoor is de technologie niet geschikt als opslagmedium in een auto. Voordeel is wel dat een supercondensator snel kan worden opgeladen en ook snel weer stroom kan afgeven, wat de prestaties van een systeem met als onderdeel daarvan een supercondensator, ten goede kan komen.

### 2.2.3 De levering van elektriciteit

De elektriciteitsvraag van een grotendeels elektrisch wagenpark kan in de toekomst in Nederland uitkomen op 10-15 TWh per jaar of 10% van de totale elektriciteitsvraag. Het elektrici-



teitsaanbod moet daarop worden aangepast. Een elektrisch wagenpark biedt ook kansen om vraag en aanbod beter in balans te brengen.

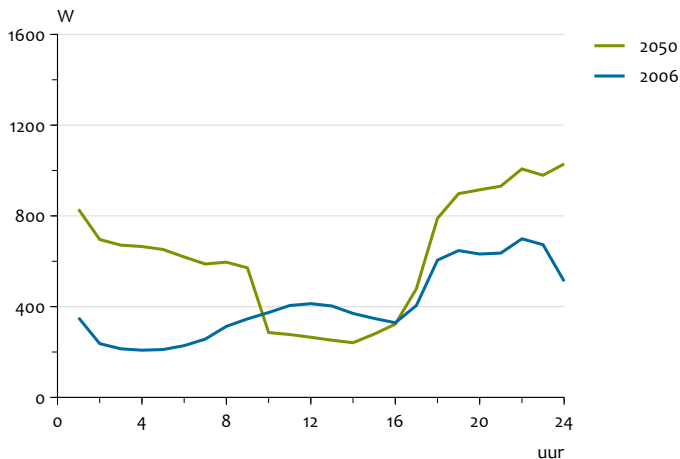
De piekvraag naar elektriciteit ligt in de winter overdag en in het begin van de avond, zie Figuur 2.2 (TenneT, 2008).

Als iedereen bij wijze van spreken morgen een elektrische auto zou aanschaffen en deze alleen 's nachts zou opladen, dan zou een groot deel van die elektriciteit geleverd kunnen worden door de bestaande installaties. Er is immers een groot verschil tussen dag- en nachtvraag. Dit wordt het nachtdal genoemd. Het laagspanningsnetwerk is er evenwel niet op berekend dat iedereen op hetzelfde tijdstip oplaadt. Door KEMA zijn voor een gemiddeld huishouden in een aantal wijktypen, gedifferentieerd voor zomer en winter inschattingen gemaakt van het elektriciteitsverbruik over de dag bij verschillende scenario's. Het gaat dan bijvoorbeeld over de mate van toepassing van airconditioning, warmtepompen, micro warmtekracht en zonne-energie, maar ook over de penetratie van elektrisch rijden (De Boer en In 't Groen, 2009). Een voorbeeld

van deze berekeningen is weergegeven in Figuur 2.3, waarbij voor een gemiddeld huishouden voor een gemiddelde wijk het huidige elektriciteitsverbruik over de dag is weergegeven en daarnaast het verbruik in 2050 waarbij veronderstellingen zijn gemaakt over de penetratie van warmtepompen (50%), koeling/airco (10%) en elektrische auto's (40% van de auto's, oftewel 60-75% van de huishoudens) en toepassing van PV. In deze figuur is verondersteld dat elektrische auto's tussen 23.00 uur en 4.00 uur opgeladen worden. In 2050 zou in dit voorbeeld elektrisch autorijden bijna 40% van het verbruik aan elektriciteit in een wijk voor zijn rekening nemen.

Wanneer 's nachts in de (bestaande) wijk gecontroleerd opgeladen wordt, zal het laagspanningsnetwerk de last op middellange termijn aankunnen, althans wanneer het laden gespreid plaatsvindt. Hiervoor is een geautomatiseerd centraal besturingssysteem noodzakelijk.

Als in 2050 iedere auto opgeladen moet worden zijn extra investeringen nodig. Dit moment kan uitgesteld worden door het aantrekkelijk te maken dat de auto als hij niet rijdt altijd



met het net verbonden is. Hiervoor zijn ook oplaadpunten bij parkeerterreinen nodig. Een nieuw laagspanningsnetwerk aanleggen in een bestaande wijk is een zeer kostbare zaak. Voor een nieuwe wijk ligt dit anders, omdat daar van meet af aan alles wat zwaarder gedimensioneerd kan worden.

's Nachts voorzien nu relatief goedkope kolen- en kerncentrales in de basislast. Overdag springen duurdere gasgestookte elektriciteitscentrales bij. In de nabije toekomst wordt veel capaciteit aan windenergie bijgebouwd. Windmolens draaien ook 's nachts, op een moment dat de vraag laag is. Door elektrische auto's 's nachts op te laden kan windenergie efficiënter worden benut. Voor de elektriciteitsbedrijven biedt elektrisch rijden bovendien het voordeel van een groot regel-potentieel. Dat betekent dat men voor de afstemming van vraag en aanbod minder afhankelijk zou kunnen worden van gasgestookte centrales. Elektriciteits- en netbedrijven kunnen via een te installeren communicatiesysteem met consumenten afspraken maken over het moment waarop de auto tot een bepaalde capaciteit opgeladen moet zijn en de daarbij behorende prijs (Postma, 2008a en 2008b; Better Place, 2008; Lowenthal, 2008). Ook bij plug-in hybrides is het mogelijk om af te spreken dat niet volledig geladen wordt als er toch te weinig capaciteit is of als de prijs te hoog is; de brandstofmotor moet dan sneller worden aangesproken (Kintner-Meyer et al., 2007).

Geladen accu's kunnen ook overdag bij een piekvraag een af te spreken hoeveelheid elektriciteit aan het net leveren (*vehicle to grid*). Een goedkoper alternatief kan zijn de energie thuis zelf te gebruiken. De meningen verschillen over de vraag of het qua kosten interessant is omdat het ook thuis aanpassingen vereist.

Voor het opladen zijn er verschillende mogelijkheden. Ongeveer 30% van de Nederlanders heeft een garage (overigens vaak niet in gebruik voor de auto) of carport en een deel van de automobilisten kan de auto op eigen grond stallen. Daarnaast zal een netwerk van oplaadpunten nodig zijn langs

de straat en op parkeerplaatsen. Ook op het werk moet de mogelijkheid van opladen bestaan. Op lange termijn veranderen tankstations voor brandstoffen mogelijk in snellaadpunten voor elektriciteit.

Tabel 2.1 geeft een overzicht van de mogelijkheden voor het opladen, de randvoorwaarden en de voor- en nadelen.

Algemene randvoorwaarde is een degelijk *privacy-proof* meet- en betaalsysteem en standaardisatie.

## 2.3 Aanpassingen in het mobiliteitsgedrag

Accu's vragen ruimte in de auto. Verondersteld wordt dat in de toekomst de nuttige ruimte voor passagiers en bagage blijft zoals in de huidige auto's, doordat de – vormvrije – accu's overal op en onder geplaatst kunnen worden en – alleen in volledig elektrische auto's – andere onderdelen kunnen worden weggelaten. Alleen bij systemen voor gerobotiseerde verwisseling van pakketten kunnen meer beperkingen optreden. De betrouwbaarheid van de auto is hetzelfde. Het comfort is verhoogd door de stille motor. De auto kan sneller optrekken dan een vergelijkbare benzineauto. De veiligheid van de accu's verschilt niet van die van het benzinesysteem.

Voor de consument is de elektrische auto aantrekkelijk als, net als nu, voldoende keus bestaat uit kleine en grote auto's. Gezien de hoge prijs van accu's is het waarschijnlijk dat de consument ook keuze krijgt uit auto's met een kleine of grotere actieradius. Wellicht wordt de actieradius deels klant-specifiek geleverd.

Elektrisch rijden kan op verschillende manieren worden ingepast in het mobiliteitsgedrag van mensen. Doordat de actieradius voor het rijden van lange afstanden zeker 300 km moet zijn en de accupakketten hiervoor ook in de toekomst groot en duur zijn, zal bij langere zakelijke reizen of vakantie-



## Mogelijkheden voor opladen in een toekomstig systeem

Tabel 2.1

Principe van opladen	Randvoorwaarden	Voor- en nadelen
<i>Thuis aan het eigen stopcontact</i>	Eigen garage, dan wel carport of parkeerplaats op eigen terrein	Kan 's nachts
<i>Oplaadpunten in de wijk</i>	Recht op een parkeerplaats met oplaadpunt vlakbij huis	Kan 's nachts
<i>Oplaadpunten bij parkeergarages en -terreinen, onder meer op het werk</i>	Geschikt laagspanningsnetwerk Vandalismebestendig	Verkleint de benodigde actieradius Gebeurt veelal overdag
<i>Snellaadpunten bij oplaadstations</i>	Specifieke voorzieningen voor hoge stroomdichtheid	Relatief korte tijd nodig voor opladen Kan onderweg Gebeurt veelal overdag Snelladen produceert veel warmte hetgeen niet goed is voor de batterij. Koeling wenselijk.
<i>Verwisselen accupakketten bij wisselstations</i>	Oplaadcapaciteit bij de wisselstations Standaardisatie in de vorm van de pakketten en wijze van inbouw in de auto nodig voor gerobotiseerd verwisselen Gerobotiseerd systeem voor verwisselen, opslag en opladen pakketten	Relatief korte tijd nodig voor verkrijgen opgeladen systeem Ruimtebeslag voor opslag/opladen accupakketten Vermindert opslagruimte in de auto voor de gebruiker bij kleine accu's
<i>Oplaadstroken langs de weg</i>	Beveiligde koppelingssystemen tussen auto en oplaadleiding.	Rijdend opladen beperkt tijdverlies (winst afhankelijk van netto oplaadsnelheid) (te?) hoge investeringen

## Enkele mogelijkheden voor gebruik van elektrische auto's in huishoudens.

Tabel 2.2

Situatie	Korte afstanden	Middellange afstanden	Lange afstanden
<i>Huishouden; twee auto's</i>	Kleine elektrische auto	Plug-in hybride	
	Kleine elektrische auto	Hybride	
	Grote(re) elektrische auto	Hybride	
	Plug-in hybride	Hybride	
	Twee plug-in hybrides (evt. met verschillende actieradius)		
<i>Huishouden; één auto</i>	Kleine elektrische auto	Autodeel of -huursysteem of OV	
	Grote(re) elektrische auto	Autodeel of -huursysteem of OV	
	Plug-in hybride		

reizen snelladen (de meeste bronnen spreken over vijf à tien minuten, dus toch wat langzamer dan benzine tanken) aan de orde zijn. Uit onderzoek blijkt dat veel mensen zo snel mogelijk op de bestemming willen zijn en zich ook niet houden aan het advies om na twee uur rijden te pauzeren (Belvilla, 2008). Op dit punt krijgt de gebruiker van een volledig elektrische auto met een beperking te maken.

Een alternatief is een geavanceerd en gemakkelijk te benutten systeem van huren of delen van auto's die beter geschikt zijn voor lange afstanden, zoals voor de vakanties. Dit kunnen plug-in hybrides zijn, eventueel ook hybrides. Het nadeel is het wennen aan een andere auto. Het voordeel is dat tot in de verre toekomst overal en altijd getankt kan worden. Het trekken van een caravan of aanhangwagen is bij elektrisch rijden wel mogelijk (hoog koppel), maar de elektromotor moet wel zo ontworpen worden dat oververhitting wordt voorkomen. Het brengt de actieradius van elektrisch rijden natuurlijk terug, maar dit geldt ook voor de huidige en toekomstige auto met verbrandingsmotor. Los hiervan is het natuurlijk mogelijk meer gebruik te maken van andere vervoerswijzen zoals de autotrein.

Net als nu bepalen in 2050 vooral de samenstelling van het huishouden, het inkomen, de kosten van de auto, de afstand tussen woon- en werkplaats(en), voorzieningen in de buurt en de gewenste flexibiliteit in ruimte (voor extra passagiers,

vakantie of bouwmarkt) de keuze voor een auto. Als een huishouden twee of meer auto's heeft, ligt het voor de hand dat in ieder geval één (kleine) auto elektrisch is. Eenpersoons-huishoudens of huishoudens met één auto zullen misschien minder geneigd zijn een kleine elektrische auto aan te schaffen omdat incidenteel ook langere ritten gewenst zijn (beschikbaarheidsnuttigheid).

Tabel 2.2 geeft een overzicht van de belangrijkste mogelijkheden.

Per dag zijn er volgens het CBS 5,3 miljoen woon-werkreizigers met een gemiddelde woon-werkafstand van 17 kilometer. Hiervan leggen 2,8 miljoen autobestuurders gemiddeld 22 kilometer af (enkele reis) (CBS, Statline). Maar dit zijn gemiddelden! De verdeling is niet bekend. Wereldwijd blijkt het merendeel van de ritten voor woon-werkverkeer onder de 50 kilometer te blijven en ook een groot deel van de dagafstanden (Kendall, 2008).

De auto wordt ook benut voor studie, zaken, boodschappen, bezoeken en vakanties. Het zijn vaak kleine ritjes en af en toe ook langere afstanden. In het weekend worden veelal kleinere afstanden afgelegd dan door de week (CBS, Statline). Waarschijnlijk rijdt meer dan 99% van de auto's minder dan 300 km/dag (Goodspeed, 2009).

Elektrisch rijden is bij uitstek geschikt voor vervoer over relatief korte afstanden, onder meer voor ritten in de stedelijke omgeving. Daarbij hoeft het vervoermiddel niet de auto te zijn zoals we die nu kennen. De vormgeving van transportmiddelen verandert voortdurend. Bovendien zijn er al elektrische fietsen, Segways en scooters op de markt.

## 2.4 Institutionele veranderingen

Voor deze systeemoptie moet een aantal technologische veranderingen worden doorgevoerd. Daarnaast zijn ook institutionele veranderingen noodzakelijk. Zonder uitputtend te zijn wordt hier op een aantal van deze veranderingen ingegaan.

- Veel op het gebied van accu's is nog in ontwikkeling. Voor de netbeheerder is een zekere standaardisatie van batterijtypen essentieel voor het laden van de accu's. In de toekomst moet men in heel Europa zijn accu kunnen laden (al of niet snel) en betalen voor de hoeveelheid afgenomen elektriciteit. Daarvoor is een gestandaardiseerd systeem nodig.
- Met de introductie van elektrisch rijden en 's nachts laden zullen elektriciteitsmaatschappijen 's nachts (en 's zomers) veel minder overcapaciteit hebben dan voorheen, wat moet leiden tot andere werkrouines (bijvoorbeeld onderhoudsschema's).
- Op termijn mag verwacht worden dat belastingen die geheven worden bij verkeersdeelnemers gelijk zullen blijven. Wanneer inkomsten uit belastingen en accijnzen op brandstoffen teruglopen zou dit kunnen leiden tot hogere elektriciteitsprijzen voor de automobilist (en niet voor bijvoorbeeld een huishouden waar wordt gefietst).
- Niet alleen autofabrikanten, maar ook garagebedrijven en hulpverleningsdiensten krijgen te maken met een andere tak van sport. Het werken aan een elektrische auto vraagt extra deskundigheid op het gebied van vermogens-elektronica, niet alleen bij garagepersoneel, maar ook bij hulpverleners zoals ambulancepersoneel, politie en brandweer.
- Bij volledig elektrische auto's zullen garages minder werk krijgen, omdat elektrische auto's minder onderdelen hebben die slijten en dus minder onderhoud en reparatie nodig hebben.
- Voor degenen die een kleine elektrische auto wensen, maar toch af en toe een grote auto nodig hebben, zal het bestaande systeem van huurauto's moeten worden uitgebreid. Hetzelfde geldt voor het systeem van autodelen.
- Het systeem van recycling van accu's zal zich ook moeten uitstrekken tot Li-ion-accu's voor auto's.

## 2.5 Ruimtelijke invulling

Er zullen in de stad minder snellaadpunten nodig zijn dan nu tankstations, doordat het usance wordt vooral 's nachts thuis op te laden. Niet iedereen heeft echter een garage of carport zodat ook langs de straat of op de parkeerplaats veilige, vandalismebestendige oplaadmogelijkheden gerealiiseerd moeten worden. Wel zijn grotere stations nodig voor

snelladen langs de snelweg (het laden kost immers meer tijd dan het tanken van brandstof). Dit geldt in nog sterkere mate voor eventuele accuwisselstations. Voor beide geldt dat vanuit het oogpunt van externe veiligheid de integratie in de bebouwing waarschijnlijk gemakkelijker wordt dan bij benzinestations.

Ook op de parkeerplaats bij het werk of bij de klant kan de auto weer opgeladen worden.

Om de omgevingskwaliteit te verbeteren, kunnen elektrische voertuigen een voorkeursbehandeling krijgen bij de bereikbaarheid van voorzieningen in de binnenstad (toegang en parkeervoorzieningen naar het voorbeeld van Londen en Oslo). Overigens zou dit meer een maatregel in de overgangsfase kunnen zijn, die in het eindbeeld niet meer nodig is.

## 2.6 Belangrijke spelers

Bij de realisatie van de systeemoptie zijn verschillende partijen betrokken. Sommige zien hun positie versterkt. Bij andere treedt een verzwakking op of er moet een andere rol worden gespeeld. Weer andere partijen zijn nodig om de overgang te bewerkstelligen. Een korte impressie:

- De auto-industrie moet aanpassingen plegen, eerst aan één model, later aan meer. Investerings in verbrandingsmotoren en dergelijke moeten wellicht versneld worden afgeschreven. Er komen kansen voor nieuwe toetreders uit de elektrowereld.
- Accufabrikanten zien een sterk groeiende markt.
- Elektriciteitsbedrijven en netbeheerders kunnen ook een uitbreiding van hun werkterrein tegemoet zien.
- IT-bedrijven gaan kennis leveren voor de aansturing van elektriciteitslevering en datacommunicatie.
- Garagehouders krijgen minder en andersoortig werk.
- Voor universiteiten valt nog veel fundamenteel en toegepast onderzoek te doen, vaak in samenwerking met bedrijven.
- Oliemaatschappijen verliezen marktaandeel.
- Gemeenten gaan faciliteren bij de realisatie van oplaadpunten.
- Consumenten moeten tot aanschaf overgaan.
- De rijksoverheid kan het transitieproces vergemakkelijken door belemmeringen weg te nemen.

De meeste spelers komen uitgebreid terug in de volgende hoofdstukken.

## 2.7 Relatie met andere bestudeerde systeemopties

Elektrisch rijden is één van de alternatieven voor de huidige – op fossiele brandstof rijdende – auto om tot aanzienlijk schonere vervoersmiddelen te komen. Daarnaast zijn er de brandstofcelauto's op waterstof en de biobrandstoffen. Ze kunnen deels aanvullend, deels concurrerend zijn. De systeemopties die hieraan gerelateerd zijn, staan in het

overzicht in paragraaf 1.1. Bij decentrale elektriciteitsopwekking (zon-PV of micro warmtekracht) kan voor de niet direct gebruikte elektriciteit worden gekozen voor opslag in accu's in plaats van teruglevering aan het net. Binnenkort volgt ook een rapportage over decentrale energiesystemen (Faber en Ros, 2009).



# 3

## Beoordeling van de potentiële effecten van de systeemoptie

Een systeemoptie is interessant als er oplossingen in schuilen voor grote maatschappelijke problemen. Maar juist veranderingen op systeemniveau zijn zo ingrijpend dat een beoordeling van de mogelijke effecten om een brede benadering vraagt. Voordat op enkele specifieke punten kwantitatieve analyses worden voorgelegd begint dit hoofdstuk daarom met een kwalitatieve beschouwing aan de hand van een beoordelingsschema dat is afgeleid van de duurzaamheidsmatrix (VROM/NSDO, 2002).
















Voor een beoordeling in de zin van ‘beter of slechter’ is een referentie nodig. Daarvoor wordt het systeem genomen dat in de huidige situatie in het wegverkeer domineert, het






systeem rond de verbrandingsmotor op basis van fossiele brandstoffen. Daarbij wordt er rekening mee gehouden dat de bestaande benzine- en dieselauto’s nog verder worden verbeterd.

Op de aspecten veiligheid, geluid, klimaateffecten, luchtverontreiniging, kosten en grondstofvoorraden wordt in aparte paragrafen nader ingegaan.

Duurzaamheidstoets elektrisch rijden

Tabel 3.1

	Sociaal	Economisch	Ecologisch
Nederland	Geluid  Veiligheid  Landschap <sup>1)</sup>  Gebruiksgemak  Koopkracht 	Voorzieningszekerheid <sup>1)</sup>  Leveringszekerheid <sup>2)</sup>  BBP <sup>3)</sup> 	Lokale luchtverontreiniging  Verzuring 
Elders	Voedselzekerheid 	Grondstoffenvoorraad <sup>4)</sup> 	Landgebruik <sup>5)</sup>  Natuurwaarde/biodiversiteit  Klimaateffecten 

 slechter  
  iets slechter  
  neutraal  
  iets beter  
  beter

1) De voorzieningszekerheid is toegenomen door verminderde afhankelijkheid van olie. Elektriciteit kan immers uit vele energiebronnen afkomstig zijn. Binnen de elektriciteitsproductie wordt de afhankelijkheid van gas minder. Gas wordt namelijk ook ingezet om flexibiliteit in het aanbod te genereren bij pieken in de elektriciteitsvraag. De vraag zal echter een veel vlakker verloop kennen.

2) Leveringszekerheid – overigens niet zo’n belangrijk aspect in Nederland – is toegenomen door de mogelijkheid elektriciteit uit accu’s te gebruiken bij stroomuitval (V2G).

3) Raffinaderijen boeten aan belang in. Accucellen worden naar verwachting vooral in het Verre Oosten geproduceerd, maar verder zijn er wel mogelijkheden voor de Nederlandse auto-industrie om onderdelen van elektrische auto’s te produceren (analoog aan CENEX-ARUP, 2008) zoals dit ook gebeurt voor de huidige auto-industrie.

4) Veel elektriciteit kan ’s nachts geleverd worden via het bestaande hoogspanningsnet. Bij een maximale toepassing van elektrisch rijden zou misschien een uitbreiding nodig zijn met negatieve effecten voor het landschap. Er wordt echter vanuit gegaan dat in de toekomst ook veel elektriciteit decentraal wordt opgewekt zodat een uitbreiding niet nodig is.

5) Een grote inzet van elektrisch rijden kan een geringere inzet van biobrandstoffen tot gevolg hebben. Een eventuele extra inzet van biomassa voor elektriciteit heeft een groter rendement (minder biomassa per kilometer). In geval biomassa voor energie wordt geteeld, zou dit tot minder landgebruik kunnen leiden.

### 3.1 Veiligheid

Als er geen specifieke voorzieningen worden ingebouwd, zorgt het elektrisch rijden voor verminderde veiligheid van fietsers en voetgangers, blinden en kinderen doordat zij de auto niet of minder goed horen aankomen. Het verkeersgedrag van fietsers en voetgangers wordt namelijk mede bepaald door geluid. Volgens de Gezondheidsraad zijn er 'aanwijzingen dat juist als er in het verkeer iets verandert, het risico van een ongeval althans tijdelijk juist afneemt in plaats van toeneemt, zodat voor dit gevolg mogelijk niet hoeft te worden gevreesd' (Gezondheidsraad, 2008). Anderzijds blijkt uit onderzoek dat stillere trams en het gebruik van mp3-spelers leiden tot wat meer ongelukken (Stoop, 2008). Ook praktijkproeven van Mitsubishi bij TNT geven aan dat het ontbreken van geluid tot gevaarlijke situaties leidt. Overigens wordt wel geopperd luidsprekertjes buiten de auto te plaatsen die een bescheiden ruis produceren of een eigen geluid (vergelijkbaar met de ringtone op een mobiel). Bij een niet-bescheiden geluid is er een *trade off* met het onderwerp in de volgende paragraaf.

Zoals eerder aangegeven, wordt verondersteld dat een ander potentieel veiligheidsaspect, de ontvlambaarheid van bepaalde Li-ion-accu's, door technische beheersmaatregelen en inherent veiliger combinaties van materialen niet meer aan de orde is. Ook wordt aangenomen dat hulpdiensten weten hoe ze bij ongevallen om moeten gaan met elektrische auto's.

### 3.2 Geluid

Uit enquêtes blijkt dat wegverkeer de belangrijkste bron van ernstige geluidhinder is. Het aantal gehinderden is in de periode 1993-2003 ongeveer constant gebleven. Brommers veroorzaken de meeste ernstige geluidhinder (19%), gevolgd door motoren (11%) en vrachtauto's (10%). Personenauto's scoren met 6% lager dan de buurwoning of buitenactiviteiten. Het percentage ernstig gehinderden door het geluid van personenauto's is afgenomen (Franssen et al., 2004). Afhankelijk van het geluidniveau en de duur kan (verkeers)lawaai leiden tot hinder, slaapverstoring, slechte schoolprestaties, hoge bloeddruk en hart- en vaatziekten (Berglund et al., 1999). Het percentage volwassenen in Nederland met ernstige slaapverstoring door wegverkeersgeluid is naar schatting 12%. Maximaal 270.000 mensen hebben last van hoge bloeddruk door verkeerslawaai (Knol en Staatsen, 2005), leidend tot hart- en vaatziekten. Let op: verkeerslawaai is een ruimere categorie dan lawaai van wegverkeer.

Naar wegtype gemeten scoren wegen waar maximaal 50 km/uur gereden wordt het hoogst wat geluid betreft (Franssen et al., 2004). Geluid van het autoverkeer wordt bepaald door de motor, de banden en het wegdek. Boven de 40 km/uur zijn de banden op dit moment bepalend voor het geluid van de personenauto, daaronder vaak de motor, vooral bij het optrekken en opschakelen. Het rijden met elektrische auto's en plug-in hybrides – voor zover ze elektrisch rijden –, maar

vooral van elektrische brommers, scooters en motoren, kan ertoe leiden dat de geluidsoverlast door het wegverkeer in binnensteden grotendeels verdwijnt. De vermindering van de genoemde gezondheidseffecten kan aanzienlijk zijn. De geluidhinder van auto- en snelwegen wordt er slechts in beperkte mate door verminderd.

### 3.3 Energie en klimaat

Het in deze systeemoptie beschouwde deel van het wegverkeer draagt momenteel in Nederland met ongeveer 25 Mton CO<sub>2</sub>-eq./jaar voor circa 12% bij aan de broeikasgasemissies. Het huidige personenautopark kent een gemiddelde CO<sub>2</sub>-uitstoot van ongeveer 170 gram CO<sub>2</sub>/km. De omvang van het verkeer zal naar verwachting verder stijgen, de emissiefactor voor de conventionele benzine- en dieselauto's verder dalen. Dit laatste kan al op korte termijn door verbeteringen aan banden, aerodynamica, lichten en materiaalbesparingen en -substitutie. Daarnaast zijn veranderingen aan de motor, zoals de grootschalige introductie van variabele kleppen, turbo, compressor, et cetera mogelijk. Gemiddeld zou het geheel voor het wagenpark kunnen leiden tot een efficiëntieverbetering van ruim 30% (OECD/IEA, 2008a; King, 2007; Heywood, 2008). Terzijde zij opgemerkt dat auto's per jaar in de periode 2002-2012 naar schatting 1,5% zwaarder zijn geworden en zullen worden, als gevolg van meer veiligheidsvoorzieningen en hogere comfortwensen (Smokers et al., 2006). Daar komt bij dat consumenten (in Nederland) sinds 1998 als het ware een klasse hoger zijn gaan rijden (KiM, 2007). Hoe deze ontwikkeling doorzet is onduidelijk. Voor de totale CO<sub>2</sub>-emissie maakt dit veel uit, maar voor de vergelijking tussen typen auto's is het minder relevant, aangezien deze ontwikkeling waarschijnlijk ook van toepassing is op de hybride- en elektrische auto's.

Een aantal verbeteringen, zoals ten aanzien van aerodynamica, banden en lichten, zal ook van toepassing zijn op plug-in hybrides en elektrische auto's. Het rijden met een hybrideauto, waarbij de accu opgeladen wordt door de verbrandingsmotor en de accu het gebruik van brandstof optimaliseert, geeft een extra reductie van CO<sub>2</sub>-uitstoot van ongeveer 15% (OECD/IEA, 2008a).

Er moet rekening mee worden gehouden dat in 2050 een deel van de conventionele olie is vervangen door niet-conventionele olie afkomstig van teerzanden en door olie uit gas of steenkool. Deze brandstoffen zijn op een *well-to-wheels*-basis ruim twee keer zo koolstofintensief als de huidige brandstoffen (OECD/IEA, 2008a). Greene schat voor een referentiescenario voor 2030 een marktaandeel in van 10% en bij een hoge olieprijs scenario 20% (OECD/ITF, 2007). Daarnaast kan het aandeel biobrandstoffen nog verder toenemen.

De energie-efficiency in een systeem met elektrisch rijden is gunstiger dan in een systeem met benzine of diesel. Weliswaar is het rendement van een elektriciteitscentrale lager dan van een raffinaderij, maar de veel efficiëntere omzetting

		Elektriciteitsmix <sup>1)</sup>		
		2050 NL	2004 NL	2005 EU-15
Huidige conventionele auto	170			
Conventionele auto 2050	120 <sup>2)</sup>			
Hybride 2050	95 <sup>2)</sup>			
Plug-in hybride auto 2050		50 <sup>2)</sup>	90	85
Elektrische auto 2050		10	75	60

1) Emissiefactor elektriciteitsproductie (in CO<sub>2</sub>-eq./kWh) in Nederland in 2004 volgens Energerapport 2008: 468 (EZ, 2008), in 2005 in de EU-15: 389 (De Visser et al., 2006) en in 2050 in Nederland, op basis van veronderstellingen die ten grondslag liggen aan Tabel 3.4.

2) Hierbij is geen rekening gehouden met de inzet van niet-conventionele fossiele brandstoffen of biobrandstoffen

Situatie	Maximaal % van het aantal auto's	Maximaal % van elektrisch verreden kilometers
EV met actieradius < 100 km	30-50	20-40
EV met actieradius < 100 km plus PHEV met actieradius < 50 km	30-50 aangevuld tot 100	50-70
EV met actieradius < 250 km	70-90	60-80
Idem met snellaad- of wisselstations	95	90

naar bewegingsenergie met een elektromotor in vergelijking met een verbrandingsmotor maakt dat meer dan goed. Het verschil wordt nog groter als de processen om vloeibare brandstoffen (ook biobrandstoffen) te produceren nog meer energie kosten, zoals bij kolen of biomassa als grondstof (Eickhout et al., 2008).

De directe emissiefactor voor broeikasgassen van een elektrische auto is nul. De broeikasgasemissie over de gehele keten hangt sterk af van de efficiëntie van de accu en de CO<sub>2</sub>-emissie bij elektriciteitsproductie op het moment van laden. Met de huidige elektriciteitsproductie in Nederland zijn de broeikasgasemissies van elektrische auto's met een emissiefactor van iets minder dan 100 gram CO<sub>2</sub>-eq./km, aanzienlijk lager dan van de huidige conventionele auto's. Maar hoe zal de elektriciteitsvoorziening er rond 2050 uitzien? Hoewel dit een belangrijk deel van deze systeemoptie betreft, wordt dit qua technologische varianten in dit rapport niet expliciet beschouwd. Als ervan wordt uitgegaan dat een mondiale emissiereductie van 25% tot 60% ten opzichte van 1990 nodig kan zijn om de klimaatdoelstelling te halen (Van Vuuren et al., 2006; OECD/IEA, 2008a), dan betekent dat een emissiefactor van zeker minder dan 100 gram CO<sub>2</sub>-eq./kWh. Het zou nog lager, zelfs nul of negatief (door inzet van biomassa met CO<sub>2</sub>-opslag) kunnen worden, als maatregelen bij andere sectoren (zoals verkeer) relatief duur blijken en men daarom bij de elektriciteitsproductie nog een stap verder gaat. Het kan ook nodig zijn als (daarbij) de vraag naar elektriciteit door elektrisch rijden aanzienlijk stijgt. In het geval van stringente CO<sub>2</sub>-reductie in de elektriciteitsproductie komt de emissie per kilometer 80 tot 100% lager te liggen dan voor de toekomstige zuinige hybride. Bij de plug-in hybride is de CO<sub>2</sub>-uitstoot afhankelijk van de verhouding in de kilometers die elektrisch en die met fossiele brandstof (deels biobrandstof) worden gereden. Bepalend zijn de capaciteit van de accu, het aantal kilometers

per rit of dag en de frequentie van opladen. Verondersteld wordt dat 60-70% van het aantal kilometers elektrisch wordt gereden met een accu die 50 km elektrisch rijden toestaat (OECD/IEA, 2008a; Kromer en Heywood, 2007).

Welk aandeel zouden elektrische auto's in het totale wegverkeer van lichte voertuigen kunnen hebben? Hiervoor worden in Tabel 3.3 enkele indicaties gegeven. Het uitgangspunt is de inschatting van welk deel van de auto's in de huidige situatie zodanig wordt gebruikt dat minder dan 100 km/dag respectievelijk 250 km/dag wordt gereden en welk aandeel die auto's hebben op het totale aantal kilometers. Bij de inzet van plug-in hybrides liggen er dan geen beperkingen meer in het aantal auto's – zelfs niet voor vakanties – nog wel in de kilometers. In die gevallen dat slechts incidenteel een langere dagafstand dan de aangegeven actieradius wordt afgelegd, wordt verondersteld dat dit met snellaad- of wisselstations of met huur- of deelauto's gebeurt. Het gaat dan om een beperkt aantal auto's, maar relatief meer kilometers. Er is rekening gehouden met de nog steeds toenemende levensduur van auto's.

Een grote vraag naar elektriciteit voor auto's kan de balans tussen vraag en aanbod over het etmaal aanzienlijk veranderen. Het laden van accu's zou voor een groot deel 's nachts plaats kunnen vinden, zeker als het thuis opladen domineert. Dit is afhankelijk van de mogelijkheden voor opladen thuis en elders, prijsverschillen van auto's met verschillende actieradius en eventuele tariefverschillen. Een groter aandeel van de elektriciteitsvraag 's nachts kan van invloed zijn op de keuze van het optimale technologiepakket voor de elektriciteitsopwekking. Het wordt veel genoemd als optie om bijvoorbeeld windenergie met een relatief groot aanbod 's nachts efficiënter te kunnen benutten. Elektrische auto's bieden dan de mogelijkheid windenergie te gebruiken en kolencentrales 's

	Aandeel (%) overdag	Aandeel (%) 's nachts
Steenkool (grotendeels met CCS)	26	29
Kernenergie	20	25
Biomassa (deels met CCS)	9	8
Wind	25	30
Zon	3	
Gas (grotendeels met CCS)	12	3
WKK-gas (deels centraal)	5	5
Totaal	100	100

nachts 5 procentpunt (CENEX-ARUP, 2008) efficiënter te laten draaien. Tabel 3.4 geeft ter illustratie een inschatting voor een technologiepakket voor de verdeling dag-nacht.

### 3.4 Lokale en grootschalige luchtverontreiniging

Bij overschakelen op elektrisch (of waterstof) aangedreven auto's zullen de uitlaatemissies van het wegverkeer tot nul afnemen. Ten opzichte van 2030 zullen de  $PM_{2,5}$ -concentraties als gevolg van wegverkeer hierdoor gemiddeld in Nederland met zo'n 0,6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  dalen. Langs drukke straten zal deze daling oplopen tot 1,5-3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Dit betekent een afname van zo'n 10% van de bijdrage van antropogene bronnen aan de gemiddelde concentratie  $PM_{2,5}$  in Nederland; in drukke straten kan dit oplopen tot 15-30% van de  $PM_{2,5}$  concentratie. De afname is relatief beperkt vergeleken met de afname in de periode 1990-2030, omdat Euro 6-auto's al lage emissies hebben. Daarnaast zullen slijtage-emissies van fijn stof zoals slijtage van banden en wegdek niet afnemen bij overschakelen op elektrische auto's. Hoewel de concentratiedaling dus beperkt is, gaat het wel om een gezondheidsrelevante fractie.

Ook zullen emissies die optreden tijdens de productie van brandstoffen afnemen (onder meer uit raffinaderijen). Dit wordt deels teniet gedaan door toename van emissies uit de elektriciteitssector. Netto zal de stedelijke luchtkwaliteit echter verbeteren bij het overschakelen op elektrische auto's.

In studies rond de herziening van de EU-richtlijnen worden gezondheidsbaten berekend van emissiereductiemaatregelen (zie bijvoorbeeld AEAT, 2005). Analoog aan die methodiek kunnen ook gezondheidsbaten worden berekend van het overschakelen op elektrische auto's. Schattingen van de gezondheidsbaten komen uit op zo'n 0,5-1 miljard euro per jaar.

### 3.5 Kosten op de lange termijn

De kosten voor vervoer en energie zijn voor velen een belangrijk onderdeel van de uitgaven. In hoeverre verschillen de kosten van elektrisch rijden van het rijden in een conventionele auto? Het gaat hier om de kosten op de lange termijn (voor de korte termijn zie hoofdstuk 5), als de technologieën die in het nieuwe systeem nodig zijn al een stuk verder zijn in hun ontwikkeling. Ze zijn dan al grotendeels of helemaal door hun leercurve heen. Het betreft kosten van de auto, de accu's, de kosten voor de vernieuwde elektriciteitsvoorziening en die van vloeibare brandstoffen, niet de prijzen inclusief belastingen (met kortingen en toeslagen) en accijnzen. Het gaat bij deze vergelijking met het conventionele systeem om de meerkosten. Het conventionele systeem betreft diesel/benzine als brandstof en de doorontwikkelde auto.

Een kostenraming voor een situatie die nog enkele decennia weg is, kan niet meer dan indicatief zijn. Toch is gepoogd enig inzicht hierin te bieden. In Tabel 3.5 zijn de aspecten bijeengebracht die de kostenraming bepalen.

De prijs van de accu is sterk bepalend voor de prijs van de auto en daarmee voor de afschrijvingskosten. Die prijs is grotendeels afhankelijk van de accucapaciteit die met de auto wordt meegeleverd. De afweging voor de koper is het gemak van een grotere actieradius (en veel 'elektrische kilometers' zonder te hoeven opladen) tegen een hogere aanschafprijs. In Figuur 3.1 zijn de meerkosten per gereden kilometer daarom gerelateerd aan de actieradius. Per type auto variëren echter de totale kosten van het accusysteem. De kosten voor het batterijmanagementsysteem liggen voor alle auto's in dezelfde orde van grootte. Daarbij komen de modulekosten die afhankelijk zijn van het type auto en de daarbij gewenste prestaties (Kalhammer et al., 2007). De kilometerkosten worden bovendien bepaald door de gereden afstand (in Figuur 3.1 gemiddeld per jaar). Figuur 3.1 laat de meerkosten zien. Daaruit blijkt dat op de lange termijn het rijden met elektrische auto's goedkoper kan zijn dan rijden op benzine of diesel. Het rijden in een plug-in hybride is ook dan nog iets duurder, zeker wanneer veel kilometers worden gereden.



Kostenaspect	Kosten resp. meerkosten ten opzichte van de referentiesituatie	Toelichting
Productie- en transportkosten elektriciteit <sup>1)</sup>	€ 0,105 per kWh	Voor 2050 (PBL-analyse voor emissiereductie broeikasgassen van 60% tussen 1990 en 2050)
Productiekosten benzine	€ 0,92 per liter benzine/diesel (exclusief belastingen/accijnzen)	Olieprijns in 2050: \$ 120 /vat (OECD/IEA, 2008b)
Prijs accu <sup>2)</sup>	modulekosten € 230-310 per kWh PHEV <sup>3)</sup> € 200-230 per kWh stads EV <sup>3)</sup> € 135-140 per kWh EV batterijsysteembeheer plus plug € 1900 kosten EV € 1600-2000 PHEV	Kosten gegeven per eenheid energieopslagcapaciteit. Deze is afhankelijk van batterijontwerp, dat weer afgestemd moet zijn op de gewenste prestaties (o.a Kalhammer et al., 2007)
Meerprijs auto (exclusief accu's)	Stadsauto EV - € 2000 Gezinsauto PHEVcirca + € 1000 Gezinsauto EV - € 3500	Uitsparen kosten verbrandingsmotor en bijbehorende onderdelen bij EV
Extra jaarlijkse kosten onderhoud	Kleine stadsauto EV - € 75-100 Gezinsauto PHEV + € 25-50 Gezinsauto EV - € 120-150 Afhankelijk van gereden km per jaar	Zeer ruwe schatting: elektrische auto heeft minder bewegende delen, dus minder slijtage en vraagt daarom minder onderhoud en reparatie dan conventionele auto
Afschrijvingstermijn	Bij 5.000 km/jaar: 20 jaar Bij 15.000 km/jaar: 15 jaar Bij 40.000 km/j: 8 jaar	

<sup>1)</sup> Aangenomen wordt dat de kosten van aanleg van laadpunten betaald worden uit de extra afzet van elektriciteit. Er is geen rekening gehouden met extra kosten voor snellaad- of accuwisselstations.

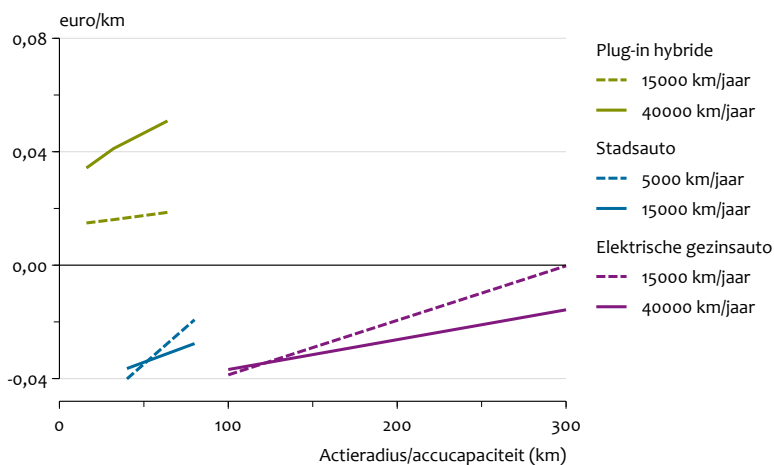
<sup>2)</sup> Wanneer door veroudering de accu niet meer geschikt is voor de auto kan hij nog wel door de netbeheerder gebruikt worden bij de tijdelijke opslag van elektriciteit. Met de (onbekende) restwaarde is hier geen rekening gehouden.

<sup>3)</sup> (Plug-In Hybrid) Electric Vehicle

Meerkosten elektrisch rijden 2050

Figuur 3.1

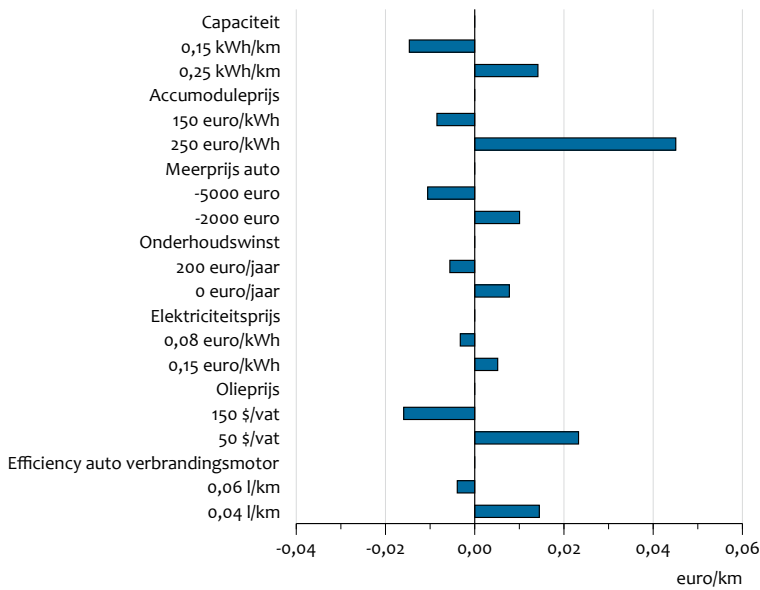
Ten opzichte van rijden op benzine/diesel



Een raming van kosten over een zo lange termijn kan niet meer dan indicatief zijn. Vele veronderstellingen hebben grote invloed op de uitkomst. Daarom is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd, waarbij enkele parameters zijn gevarieerd. Als uitgangspunt is gekozen voor een elektrische auto met een actieradius van 300 km, omdat deze met de hiervoor gekozen parameters op meerkosten nul uitkomt. Figuur 3.2 toont de invloed van de variatie in de verschillende parameters.

Tot slot kan worden opgemerkt dat de kosten die verbonden zijn aan het schoner maken van lucht mogelijk zullen dalen, omdat het goedkoper kan zijn centraal rookgasreiniging toe te passen bij elektriciteitscentrales dan bij elke individuele uitlaat van een auto.

Voor elektrische auto met 300 km actieradius ten opzichte van rijden op benzine/diesel



### 3.6 Grondstoffenvoorraden

Elektrisch rijden vertraagt de uitputting van olievoorraden. Voor elektriciteit kunnen verschillende bronnen worden gebruikt waarvan kleinere (gas) of grotere (steenkool) voorraden beschikbaar zijn. Daarnaast kan hernieuwbare energie gebruikt worden. De afhankelijkheid van gas voor een flexibeler elektriciteitsaanbod wordt kleiner.

Voor de accu wordt voor de komende decennia door velen gedacht aan verschillende varianten van de Li-ion-accu. Een accu bevat ongeveer 1,75% aan lithium (CENEX-ARUP, 2008). Er is discussie over de beschikbaarheid van lithium qua voorraden en gehalten, zoals ook de titels van enkele publicaties laten zien: The Trouble with Lithium, Peak Lithium (een variant op de Peak Oil discussie), An Abundance of Lithium, The Saudi Arabia of Lithium (Bolivia) en Bolivia holds key to electric car future (Tahil, 2007; Meridian International Research, 2008; Evans, 2008; Forbes, 2008; BBC, 2008 en [www.evworld.com](http://www.evworld.com), november 2008).

Lithium wordt niet alleen gebruikt voor batterijen. Meer dan de helft van de productie wordt nu gebruikt bij het maken van glas, keramiek en aluminium. Daarnaast wordt het bijvoorbeeld toegepast in synthetische rubber en smeermiddelen. Er bestaan hiervoor alternatieven. Lithium is relatief gemakkelijk winbaar onder zoutvlakten in Chili, Argentinië, Bolivia, de VS, Australië, Rusland en China. Een snelle introductie van plug-in hybrides en elektrische auto's zal leiden tot een veel grotere productie en meer onderzoek naar andere vindplaatsen. Het is waarschijnlijk dat de prijs van lithium op langere termijn hoger zal worden. Het lijkt er op dat er voldoende lithium is om alle auto's te voorzien van lithium-ion-accu's. Accu's van auto's moeten in de EU ingezameld worden. Het lithium kan

ook gerecycled worden, maar tot welk percentage en welke kwaliteit is nog niet helder (CENEX-ARUP, 2008; ICMM, 2008).

# Resultaten van de activiteiten in de voorontwikkelingsfase

# 4

## 4.1 Ontwikkeling van probleemperceptie

De problematiek van de klimaatverandering en de voorzieningszekerheid is de laatste jaren sterk gestegen op de maatschappelijke agenda. Monitoring die leidt tot zorgwekkende constatering, meer wetenschappelijke kennis over het klimaat (IPCC) en beter inzicht in wat ons te wachten kan staan, hebben daaraan bijgedragen, maar zeker ook de communicatie daarover (denk aan Al Gore). Daarnaast hebben diverse incidenten een belangrijke rol gespeeld. Met de hier beschouwde systeemoptie is ten aanzien van beide problemen veel winst te boeken.

Biobrandstoffen zijn de afgelopen jaren vaak bestempeld als een belangrijke bijdrage aan de oplossing van de problematiek van klimaatverandering en voorzieningszekerheid. De toepassing ervan is van de grond gekomen. Dit is gepaard gegaan met toenemende zorg over de duurzaamheid van deze oplossing (verlies aan biodiversiteit, misschien zelfs extra broeikasgasemissies door landconversie en mogelijk een nadelige invloed op de voedselprijzen). De zoektocht naar andere opties voor transport is daardoor versterkt en heeft elektrisch rijden meer in beeld gebracht.

De lokale leefomgevingskwaliteit is gebaat bij schone en stille voertuigen. De problematiek van de luchtverontreiniging, onder meer van fijn stof, heeft veel aandacht gekregen. Het waren niet zozeer de effecten als wel de consequenties van de Europese normstelling voor bouwkundige activiteiten die veel commotie brachten. De elektrische auto komt niet snel genoeg om daarvoor een oplossing te kunnen bieden. Die kan slechts in beperkte mate bijdragen. De conventionele auto zal ook nog aanzienlijk schoner worden.

Wegverkeer is een belangrijke bron van geluidhinder. De roep om stillere voertuigen wordt groter. Elektrische aandrijving kan vooral bij optrekken en lage snelheden op dit punt een grote vooruitgang betekenen. Dit geldt niet alleen voor auto's, maar ook voor brommers en scooters. De hinder

van auto- en snelwegen zal er nauwelijks door verminderen omdat daar het geluid van banden dominant is. Hier zijn echter ook verbeteringen mogelijk.

In dit rapport wordt verder niet ingegaan op de verklaring achter de toegenomen probleemperceptie en de initiatieven vanuit het beleid om deze te beïnvloeden zoals monitoring, onderzoeksprogramma's en communicatie.

## 4.2 Toekomstvisie (op auto en elektriciteit)

John German, manager of environmental and energy analysis bij American Honda komt met de volgende ontboezeming: 'Twenty-five years ago, methanol was the hot solution to energy problems; fifteen years ago, it was electric vehicles; ten years ago, hybrid-electric; five years ago, fuel cells; two years ago, ethanol; and today, it's the plug-in hybrid. Throughout this period, gasoline has remained the primary transportation fuel in the U.S.' (Ritter, 2008). Het is een relativerende opmerking die aangeeft dat het niet eenvoudig is een eenduidige, lang houdbare toekomstvisie te ontwaren.

In het vierde Nationaal Milieubeleidsplan uit 2001 kwamen drie (van ECN afkomstige) alternatieven naar voren voor wat denkbare (energietechnologische) eindbeelden betreft: Status quo, Nederland waterstofland en Nederland elektriciteitsland (VROM, 2001). Alle drie zijn nog steeds actueel. Toegespitst op automobilitieit is de hele autosector er van overtuigd dat conventionele auto's nog een stuk zuiniger, schoner en stiller kunnen worden maar hier zitten grenzen aan. Verder zijn velen van mening dat elektrisch rijden eerder van de grond komt dan de brandstofcelauto rijdend op waterstof. Dit vindt zijn oorzaak in kostenverschillen, de energieverliezen die optreden bij de productie van waterstof en de benodigde opbouw van een waterstofinfrastructuur (Rishi et al., 2008; OECD/ITF, 2008; Valentine-Urbschat en Bernhart, 2008). Veel fabrikanten zijn al gekomen met de aankondiging van (plug-in) hybride of elektrische auto's. Voor Europese

fabrikanten zal meespelen dat een elektrische auto meetelt bij het halen van CO<sub>2</sub>-emissie-eisen (bij de autotest wordt gekeken naar de emissie bij de uitlaat, niet naar de emissie die gepaard gaat met de productie van brandstof noch naar de emissie bij de schoorsteen van een elektriciteitscentrale!). De grote fabrikanten in de VS moeten een inhaalslag maken met zuinige auto's om de Aziatische producenten te kunnen weerstaan.

Maar niet iedereen schrijft de brandstofcelauto af. Zo gelooft bijvoorbeeld Honda hier meer in dan in de elektrische auto en schrijft ook Shell de brandstofcelauto niet af (Shell, 2008). ECN en NRG zagen in 2007 op lange termijn meer in waterstof (ECN, 2007), maar in een rapport uit 2008 worden toch ook mogelijkheden gezien voor de elektrische auto (Uyterlinde et al., 2008). Het IEA houdt in haar Energy Technology Perspectives beide opties open voor de lange termijn (OECD/IEA, 2008a). Hetzelfde geldt voor een aantal autofabrikanten. Een combinatie van een grote accu met een brandstofcel gevoed met waterstof kan te zijner tijd ook een mogelijkheid zijn om efficiënt met energie om te gaan en een onbeperkte actieradius te behouden.

IBM heeft recent een uitgebreid onderzoek gehouden onder 125 bestuurders in de internationale auto-industrie (Rishi et al., 2008). Bij de kansen voor elektrisch rijden rond 2020 heeft men zich gerealiseerd dat nieuwe ontwikkelingen in de batterijchemie veelbelovend zijn. Daarnaast schat men in dat de consument bereid is om in plug-in hybrides en elektrische auto's te investeren. Men verwacht dat de consument rond 2020 meer open zal staan voor flexibele toegang tot transport. Zo zal men een kleine luxe, zuinige auto willen aanschaffen met in de verkoopprijs begrepen een beperkte toegang tot andere vervoersvormen (bijvoorbeeld openbaar vervoer of een grotere huurauto). Verder denkt de auto-industrie dat accu's ook geleased gaan worden om de hoge kosten van de accu voor de eerste eigenaar te verminderen (Rishi et al., 2008). Er zijn bedrijven bezig met de uitwerking van dit concept (Better Place; Essent in Nederland).

Volgens onderzoek uitgevoerd in opdracht van Essent zou het merendeel van de Nederlanders zeer positief staan tegenover elektrisch rijden, maar is er nog te veel onduidelijkheid over bijvoorbeeld prestaties en kosten (Essent, 2008).

Wat betreft de visie op kosten kan worden opgemerkt dat nog weinig aandacht geschonken wordt aan de vraag hoe verminderde inkomsten voor de overheid (accijnzen, motorrijtuigenbelasting) in de verdere toekomst worden gecompenseerd.

De elektriciteitsproducent ziet een grotere afzetmarkt op zich af komen, een betere verrekeningsmogelijkheid van de vaste kosten in het nachtdal, een vollediger gebruik van windenergie en een groot regelvermogen waarmee onbalans in vraag en aanbod beter te beheersen is. De netbeheerder kan problemen krijgen met overbelasting van het laagspanningsnet en speelt een belangrijke rol om dit te voorkomen.

Zeker vier departementen zijn sterk betrokken bij deze systeemoptie: V&W, EZ, Financiën en VROM. In het kader van de energietransitie zijn twee platforms relevant: Duurzame mobiliteit en Duurzame elektriciteitsvoorziening. De platforms kennen strategie- en werkgroepen. Het bijeenbrengen van verschillende partijen leidt tot visievorming, een focus op te verrichten R&D, experimenten en bijstelling van visies.

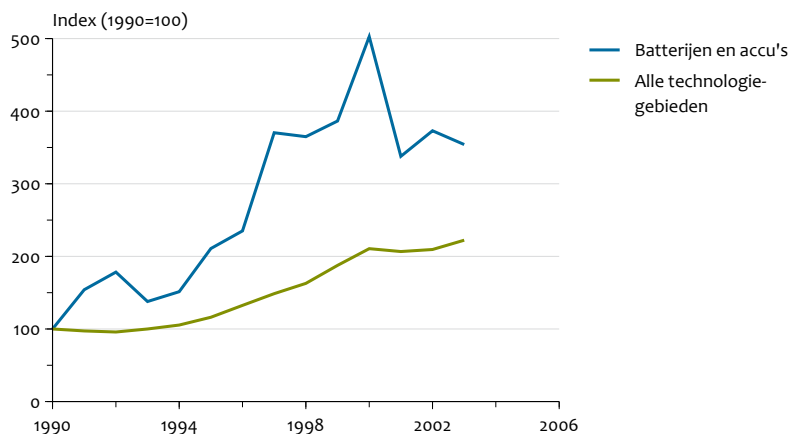
Het Platform Duurzame mobiliteit kent ook verschillende strategiegroepen met bijbehorende werkgroepen. Er leek hier tot voor kort een voorkeur te bestaan voor biobrandstof en waterstof. Afgelopen jaren is er vergeleken met de periode rond 2000 weinig aandacht geweest voor elektrisch rijden, maar dit verandert snel. De werkgroep hybridisering is onlangs omgedoopt in hybride en elektrisch rijden. Het Platform Duurzame Mobiliteit verwacht volgens het Actieplan Decentrale Infrastructuur in 2020 500.000 plug-in hybrides op de Nederlandse markt (Energietransitie, 2008).

Ook het Platform Duurzame Elektriciteitsvoorziening kent verschillende strategie- en werkgroepen. In het genoemde recente Actieplan Decentrale Infrastructuur worden actiepunten en initiatieven vanuit de netbeheerders bijeengebracht om decentrale toepassingen in te passen in de energievoorziening.

#### 4.3 Research & Development

Het ontwerp van de plug-in hybride en de elektrische auto kan met R&D nog sterk verbeterd worden, maar de ontwikkeling bij de accu is hier dominant. Het doel van batterijontwikkelaars en -fabrikanten is een accu te ontwerpen waarmee met een modale auto per kilogram accu een kilometer gereden kan worden. Autofabrikanten vormen allianties met acculeveranciers of gaan zelf accu's maken. Er wordt dan ook veel onderzoek gedaan naar andere materialen voor en structuren van de elektroden en het elektrolyt teneinde een accu te kunnen produceren die licht, klein, veilig en goedkoop is, veel vermogen kan leveren en snel te laden is. De laatste jaren werd ook al veel onderzoek uitgevoerd. Tussen 1990 en 2003 is het aantal aangevraagde octrooien voor batterijen twee keer zo hard gegroeid als het gemiddelde, zie Figuur 4.1 (Tans, 2006).

Het ruimtebeslag van batterijen is op termijn minder een probleem omdat accucellen zich lenen voor flexibele plaatsing in de auto. Er wordt ook veel research gedaan om het snelladen (vijf minuten) van accu's mogelijk te maken. Snelladen stelt hoge eisen aan de accu. In het laboratorium is het al mogelijk de accu in tien minuten te laden tot ongeveer de helft van de capaciteit (Notten, 2006). Snelladen is niet geschikt voor het laden thuis omdat daar het voltage te laag is. Er wordt veel onderzoek verricht aan Li-ion-accu's, maar bijvoorbeeld Toyota verwacht in 2030 de opvolger van de Li-ion-batterij (metal-air?) te kunnen presenteren.



Supercondensatoren kunnen weinig energie opslaan (wel veel meer dan conventionele condensatoren), maar veel sneller leveren en opgeladen worden dan accu's. In een auto kan een combinatie met een accu die de condensator laadt, nuttig zijn bij acceleratie, wanneer veel energie geleverd moet worden en bij het remmen wanneer veel energie opgeslagen moet worden. De kosten zijn het laatste decennium aanzienlijk gedaald, maar moeten nog met een factor tien of twintig naar beneden om aantrekkelijk te kunnen worden (OECD/IEA, 2008a). Kromer en Heywood (2007) zijn niet optimistisch. In Duitsland wordt een meerjarig onderzoeksprogramma opgezet om de combinatie nader te onderzoeken.

Een plug-in hybride heeft het nadeel dat twee aandrijvingssystemen nodig zijn. In Energy Technology Perspectives (OECD/IEA, 2008a) wordt gesteld dat de verbrandingsmotor zwaarder uitgevoerd moet worden om de zwaardere auto dezelfde prestaties te laten leveren als de conventionele auto. Een alternatief is echter een lichte, op een constant toerental draaiende generator die de accu van stroom voorziet, de zogenoemde Extended Range Electric Vehicle.

Meer op systeemniveau wordt ook onderzoek uitgevoerd. Op dit moment worden door het bedrijf Better Place samen met Renault-Nissan en verschillende overheden plannen uitgewerkt om in Israël, Denemarken, Californië, Hawaï, Ontario, Portugal en Australië te komen tot een systeem van snellaadpunten en wisselstations. Het idee is dat een consument accu's huurt en deze thuis, op het werk maar ook langs de snelweg oplaadt of de accu daar (gerobotiseerd) laat wisselen. Een probleem met dit systeem is dat het op korte termijn al veel standaardisatie vereist met betrekking tot de situering van de accu in de auto. Duitse autofabrikanten zijn sceptisch ([www.nu.nl](http://www.nu.nl), 27-10-08)

In Nederland hebben verschillende partijen de handen ineen geslagen bij het project Intelligent E-Transport management. Essent start in dit kader met een proef – het Mobile Smart Grid-systeem – waarbij de auto thuis of elders geladen wordt. De consument voert gegevens in waarmee hij aangeeft

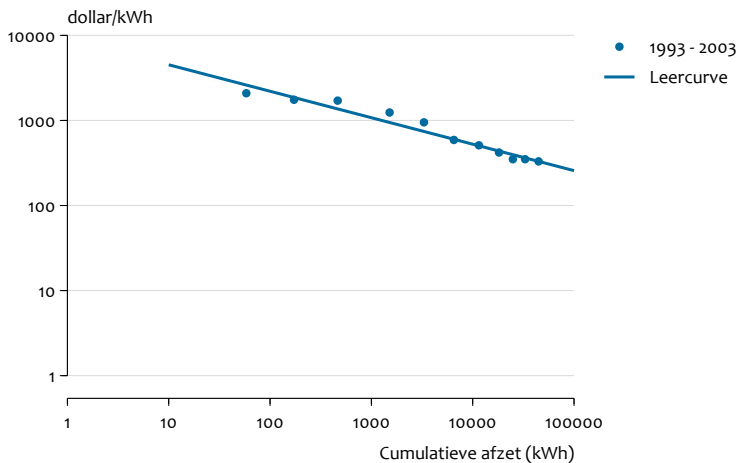
hoeveel en wanneer hij de energie wil hebben en voor welk tarief. Het Mobile Smart Grid haalt deze gegevens op, zorgt voor het uitvoeren van deze wensen en stuurt de rekening, ongeacht de locatie waar opgeladen is. Dit systeem kan zo goed voorkomen dat het net wordt overbelast. Bovendien kan windenergie 's nachts goed gebruikt worden. Essent start met honderd à tweehonderd eigen auto's. Andere Nederlandse netbeheerders zijn geïnteresseerd in deze ontwikkeling. In Frankrijk, Ierland en Duitsland heeft men soortgelijke plannen, al of niet in samenwerking met Better Place.

#### 4.4 Experimenten in de praktijk

De hybrideauto is de fase van experimenteren voorbij. De plug-in hybride is in China net op de markt gekomen, maar verder alleen nog als 'bouwpakket' te verkrijgen. Verschillende fabrikanten experimenteren met plug-in hybrides en hopen ze de komende jaren op de markt te brengen. Bij volledig elektrische auto's geldt hetzelfde. Daar zien fabrikanten op korte termijn een markt voor kleine stadsauto's en vooral bestelauto's. Daarnaast wordt nu geëxperimenteerd met luxe sportauto's, zoals de Tesla. BMW zet één dezer dagen voor een testprogramma vijfhonderd Mini's af in de VS en Duitsland. Daarbij wordt ook aandacht besteed aan het laden van de accu's thuis. In het centrum van Londen zijn al parkeerplaatsen uitgerust met oplaadpunten voor elektrische auto's en wordt volop ervaring opgedaan. In Rotterdam wordt geëxperimenteerd met het opladen van elektrische scooters op gunstig gelegen punten in de stad. Het lijkt erop dat iedere fabrikant iets doet of gaat doen op het gebied van hybriden en elektrisch rijden en voor vervolgstappen kijkt wat de markt en de overheid gaan doen.

#### 4.5 Leercurven

De resultaten van onderzoekstrajecten en de ervaringen uit experimenten en in nichemarkten uiten zich in een verbetering van de prijs/prestatieverhouding. Hierin worden de



ontwikkelingen van het leerproces zichtbaar. De ontwikkeling in prestaties en prijs van de accu is dominant voor de vooruitzichten van het elektrisch rijden. Vrij algemeen wordt verwacht dat varianten van Li-ion-cellen voor elektrisch rijden gebruikt worden. Daarom is in Figuur 4.2 de leercurve voor Li-ion-accu's geschetst. Er bestaat nog geen historie met betrekking tot de accu voor het elektrisch rijden. Tot nu toe zijn ontwikkelingen gedreven door toepassingen in draagbare elektrische apparatuur, waarbij het accent vooral lag op de energiedichtheid, niet zozeer op bijvoorbeeld de levensduur.

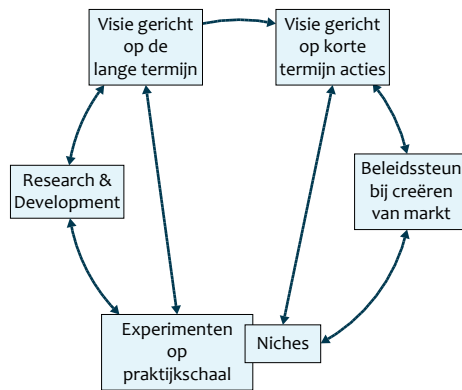
Tussen 1991 en 2005 is de prijs per eenheid opgeslagen energie (Wh) van Li-ion-batterijen met een factor tien gedaald. Uit gegevens over de prijzen tussen 1993-2003 (Batteryuniversity, 2008) valt een *progress ratio* (PR, de factor voor de vermindering van de kosten bij verdubbeling van de cumulatieve productie) van 0,83 af te leiden. Hierbij dient te worden bedacht dat het een ontwikkeling betreft voor een andere toepassing dan in auto's, zoals laptops. Er is sprake van massaproductie, maar de geproduceerde cellen zijn veel kleiner. Li-ion-batterijen worden momenteel voor ongeveer \$ 300 per kWh geproduceerd (zie Figuur 4.2). Als op basis van deze cellen accu's voor auto's worden gemaakt, zijn ze relatief erg duur, omdat de opbouw tot modules en batterijen dan relatief duur is. Het is lastig om op basis van de literatuur een eenduidig beeld te krijgen van de kosten, omdat niet altijd duidelijk is of het de prijs van een cel (en om welke celgrootte het gaat), een module of het gehele systeem betreft. Het IEA rapporteert kosten op de korte termijn in de grootteorde van 650-800 euro/kWh voor hele batterijsystemen (circa 240 euro/kWh op de lange termijn) (OECD/IEA, 2008a). Het kostenniveau van Li-ion-accu's voor laptops kan er echter wel op duiden dat schaalvergroting van specifieke accu's voor auto's al snel tot kostenreductie zou kunnen leiden. Hierdoor kan de komende jaren wellicht de progress ratio een lagere waarde krijgen. Het is niet duidelijk in hoeverre toepassing van Li-ion-accu's in auto's ook nog een specifieke ontwikkeling op celniveau vraagt, anders dan voor de huidige toepassingen.

Het volgen van de leercurve is een vorm van monitoring van de samenhangende ontwikkeling in onderzoek en bij experimenten in de praktijk. Het nadeel van de indicator is echter dat veranderingen in de prijzen op de korte termijn sterk beïnvloed worden door andere factoren dan de kosten. In een groeiproces moeten vraag en aanbod telkens opnieuw op elkaar worden afgestemd, wat gepaard gaat met tijdelijke over- en ondercapaciteit. Een periode van tenminste tien jaar is vereist om een zinvolle inschatting van de PR-waarde te geven (Junginger et al., 2008).

#### 4.6 Samenhang tussen de activiteiten

Voor een analyse van de samenhang in de beschreven activiteiten worden de langetermijnscyclus en de kortetermijnscyclus beschouwd op hun ontwikkeling en onderlinge verbanden. Dit gebeurt aan de hand van het schema in Figuur 4.3.

Elektrisch rijden is al enige decennia in beeld als optie voor schoner wegverkeer op de lange termijn. Toch is er de afgelopen periode een sterk wisselende verwachting aangaande de meest kansrijke optie met de brandstofcelauto op waterstof en biobrandstoffen als de belangrijkste alternatieven. Dat heeft wel enige invloed gehad op de intensiteit van R&D en zeker van praktijkexperimenten. Een wel degelijk steeds krachtiger element van de visie voor de lange termijn was de noodzaak van veel schonere en zuinigere auto's. Dat is in de kortetermijnscyclus opgepakt. Dat heeft ook geleid tot de hybrideauto. Het succes van de huidige hybrideauto (met name de Prius) zorgt wereldwijd voor veel R&D op gebied van accu's voor hybrides. Dat heeft ook gunstige gevolgen voor de verdere ontwikkeling van enerzijds de plug-in hybride en anderzijds voor de elektrische auto. Die zijn daardoor weer meer op de voorgrond gekomen in de visie voor de lange termijn. De publiciteit rond de negatieve neveneffecten van biobrandstoffen heeft ertoe bijgedragen dat deze technologie juist een stapje terug heeft moeten doen in de langetermijnvisie. Het heeft extra impulsen gegeven aan onderzoek naar efficiencyverbetering van de accu. Het lijkt er op dat



autofabrikanten inmiddels staan te dringen met versies van elektrische auto's en/of plug-in hybrides, zij het voorlopig in beperkte aantallen. Ze moeten daarom vooral als praktijkexperimenten worden gezien.

Enkele andere elementen ondersteunen de versterking van de kortetermijncyclus. Ontwikkelingen zijn in versnelling gekomen door de drang naar grotere voorzieningszekerheid, de voorziene eindigheid van olievoorraden en vooral de hoge olieprijs (de huidige lage olieprijs wordt gezien als een tijdelijk fenomeen, het gevolg van de economische crisis van dit moment). Bovendien betekent de beschikbare infrastructuur voor elektriciteit dat voorzieningen voor het opladen in principe relatief snel en met groot bereik kunnen worden ingericht wanneer gemeenten en netbeheerders de handen ineen slaan. De stap naar massaproductie lijkt daarmee dichtbij te komen.





# 5

## Motivatie voor systeemverandering

De voorbereidingsfase van een transitie naar elektrisch rijden, zoals beschreven in het vorige hoofdstuk, moet uiteindelijk de motivatie genereren voor de daadwerkelijke realisatie. Dat roept natuurlijk allereerst de vraag op wie er dan moet worden gemotiveerd om wat te doen. Er zijn meer actoren met verschillende rollen. In dit hoofdstuk wordt stilgestaan bij de beslissing van autofabrikanten om te investeren in de massaproductie van een elektrische auto of een plug-in hybride. Het kan ook vanuit de invalshoek van de consument worden bekeken. Wat zijn diens afwegingen voor de aankoop van zo'n auto? Als derde actor zijn de elektriciteitsproducenten beschouwd die kunnen overwegen te gaan opereren als leasemaatschappij voor de batterijsystemen. De ontwikkeling van de situatie voor deze actoren is geanalyseerd aan de hand van krachtenveldanalyses.

In de diverse krachten komen de resultaten van de voorontwikkeling terug. Het doorlopen van de leercurve door R&D en eerste toepassingen leidt tot een betere prijs/prestatieverhouding en efficiëntere productieprocessen. Ervaringen in experimenten bepalen mede in hoeverre de technologie als risicovol of complex wordt beschouwd. De probleemperceptie in de maatschappij wordt gereflecteerd in directe (NGO's of actiegroepen) of indirecte prikkels op bedrijven om er iets aan te doen. Het proces van visievorming versterkt de overtuiging dat de systeemoptie wel (of niet) in de nabije of iets verdere toekomst belangrijk gaat worden en geeft de prikkel om daarbij te zijn in welke vorm dan ook.

Daarbij kan de overheid ervoor kiezen de actoren met extra prikkels over de drempel te trekken. Dit kan in de vorm van doelen, variërend van algemeen geformuleerde taakstellingen tot harde normen. Er kunnen ook beleidsinstrumenten worden gekozen die inwerken op de andere krachten, zoals financiële instrumenten of in de vorm van overreding door communicatie.

Tabel 5.1 toont de krachtenveldanalyse voor de autofabrikant. Hierin wordt ook duidelijk dat de krachtenveldanalyses voor de verschillende actoren niet los van elkaar staan. De prijs van een elektrische auto en van elektrisch rijden voor de consument komt nadrukkelijk naar voren. Toch tellen ook zaken

mee als CO<sub>2</sub>-normen voor auto's, die concreter worden en in de toekomst net als andere normen waarschijnlijk verder omlaag zullen gaan. Dit geldt ook voor de toegenomen druk uit de maatschappij om iets aan klimaatverandering te doen en daarbij niet alles op biobrandstoffen te gooien. Bovendien lijken de autofabrikanten zich aan de startlijn op te stellen om snel de markt te kunnen bestormen, omdat het geloof in elektrische auto's als technologie van de toekomst vooral het laatste jaar groot is geworden.

Voor de autofabrikanten vormen de landen een groep van automobilisten. Een land heeft invloed naar rato van het aantal inwoners en de koopkracht. Nederlands beleid gericht op veranderingen binnen Nederland levert daarom slechts zwakke impulsen. De invloed van de EU is vele malen groter.

Tabel 5.2 laat het afwegingskader van een particuliere autokoper zien. Dé automobilist bestaat echter niet. Er zijn verschillen in huishoudensgrootte (in 2002 maakten eenpersoonshuishoudens 34% uit van het totaal in Nederland en dit percentage neemt waarschijnlijk nog aanzienlijk toe (CPB/MNP/RPB, 2006)). Daarnaast zijn er verschillen in inkomens, urbanisatiegraad, aanwezigheid openbaar vervoer et cetera die allemaal leiden tot een diversiteit in het aanbod. Verder hebben mensen verschillende wereldbeelden waardoor er ook verschillen bestaan in het meenemen van milieuoverwegingen. Desalniettemin geldt toch dat voor velen een aantal barrières weggenomen moet worden voordat elektrisch rijden een hoge vlucht neemt. Zo zal voor een brede acceptatie door de consument het laden van de accu niet veel lastiger moeten zijn dan het tanken van de auto nu. Ook bestaat de zekerheid van een eigen oplaadpunt bij huis en op de tussen- of eindbestemming lang niet voor iedereen. De wens van een netbeheerder dat de auto altijd aan het net gekoppeld is wanneer deze niet rijdt, houdt in dat per dag enkele keren aan- en afgekoppeld moet worden. Het tanken van brandstof doet men misschien eens per week.

Kracht	Kenmerken en ontwikkelingen 2000-2008	Beleidsimpulsen in de EU
Prijs/prestatie-verhouding	<ul style="list-style-type: none"> <li>De elektriciteitskosten zijn lager dan de benzine- of dieselkosten, maar er zijn wel hoge aanschafkosten en daar let de consument het eerste op. De prestatie van de accu is wel verbeterd, maar de accuprijs is nog hoog. Nog steeds moet er rekening mee worden gehouden dat elektrisch rijden per kilometer duurder is, maar de verwachting van velen is dat dit beeld snel kan veranderen</li> <li>De ontwikkelingen van de olieprijs (hoger en instabieler dan elektriciteitsprijs)</li> <li>Het voordeel van het thuis kunnen opladen weegt voor sommige gebruikers op tegen het nadeel van een kleine actieradius, maar moet toch als een minpunt worden beschouwd. De prijs van het wegnemen van dit nadeel in de vorm van een plug-in hybride is vrij hoog</li> </ul>	Subsidiereregelingen voor onderzoek aan batterijen en auto's Fiscale instrumenten, zoals vrijstelling voor belastingen, overigens variërend per land
Investeringsdrempel	Het is niet waarschijnlijk dat de opzet van een productielijn voor elektrische auto's duurder is dan een nieuwe lijn voor auto's met aangepaste verbrandingsmotor, waarschijnlijk iets goedkoper	
Complexiteit	<ul style="list-style-type: none"> <li>Er was een risico van explosiegevaar met Li-ion-accu's. Inmiddels is dat door technische maatregelen en aanpassing van batterijmaterialen zeer klein</li> <li>Er is nog weinig praktijkervaring met de levensduur van de accu</li> </ul>	
Doelstellingen overheid	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nederland speelt geen rol in overwegingen. EU, Japan en VS wel</li> <li>CO<sub>2</sub>-uitstoot moet verlaagd worden maar dit kan ook met verbeterde conventionele auto</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>De elektrische auto heeft een nulmissie die meeltelt in de CO<sub>2</sub>-normstelling van de EU voor auto's</li> <li>In de Renewables Directive worden landen verplicht de sector transport een taakstelling van 10% hernieuwbare energie in 2020 op te leggen</li> </ul>
Maatschappelijke houding	<ul style="list-style-type: none"> <li>Toegenomen belang van klimaatbeheersing en van vermindering olieafhankelijkheid</li> <li>Toegenomen zorg over duurzaamheid van het alternatief biobrandstoffen</li> </ul>	Communicatieve instrumenten
Visie in de keten	<ul style="list-style-type: none"> <li>Past in een steeds breder gedeeld beeld dat elektrische auto's een belangrijk marktaandeel gaan krijgen. De vraag wie dat marktaandeel gaan verdelen wordt steeds actueler</li> <li>Initiatieven voor opzetten van grootschalige projecten in enkele landen zijn aanzetten voor samenspel tussen cruciale spelers</li> </ul>	

Kracht	Kenmerken en ontwikkelingen 2000-2008	Beleidsimpulsen
Prijs/prestatie-verhouding	De uitgaven voor energie zijn bij een elektrische auto laag, omdat uitgaven voor elektriciteit per km lager liggen dan de uitgaven voor benzine/diesel	De accijns op benzine en diesel is momenteel hoger dan de belasting op elektriciteit.
Investeringsdrempel	De aanschaf van een elektrische auto is aanmerkelijk duurder dan van hetzelfde type auto met een benzine/dieselmotor; de prijs voor accu's is gedaald, maar de elektrische auto is nog onvoldoende ontwikkeld om besparingseffecten (goedkoper aandrijvingssysteem) ten volle te benutten. Mogelijk kunnen systemen van leasen van het accusysteem ingang vinden	Financiële instrumenten (geen BPM en motorrijtuigenbelasting) maken elektrisch rijden relatief aantrekkelijk en ook interessant met iets hogere actieradius
Complexiteit	<ul style="list-style-type: none"> <li>Het opladen thuis is eenvoudig, maar niet iedereen beschikt over een eigen parkeerplaats. Oplaadpunten zijn er verder nog niet</li> <li>Onderhoud en reparatie van een elektrische auto is naar verwachting beperkt (veel minder bewegende delen)</li> <li>Er is nog onzekerheid over de levensduur van de accu's, zodat een garantie hierop van belang is</li> </ul>	
Doelstellingen overheid		De relevante overheidsdoelen zijn niet specifiek gericht op de consument
Maatschappelijke houding	Toegenomen zorg om het klimaatprobleem en voorzieningszekerheid en veel discussie over biobrandstoffen als alternatief. Elektrisch rijden is tamelijk bekend als schoon alternatief in de stad	Financiering van onderzoek en monitoring rond klimaat en biobrandstoffen. Overheidssteuning van de communicatie over het klimaatprobleem (IPCC en naar Nederland halen van Al Gore)

Kracht	Kenmerken en ontwikkelingen 2000-2008	Beleidsimpulsen
Prijs/prestatie-verhouding	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Afzet van elektriciteit kan omhoog.</li> <li>- Efficiëntere inzet van het bestaande net.</li> <li>- Wind kan misschien concurreren met alternatieven als 's nachts ook een goede prijs verkregen kan worden</li> </ul>	
Investeringsdrempel	Het leasen van accu's geeft de mogelijkheid de consument te beïnvloeden in het laadpatroon. Dit kan leiden tot een gelijkmatiger afname van elektriciteit en lagere of uitgestelde investeringen in productie-eenheden en netwerk	
Complexiteit	Standaardisatie nodig. Afspraken met auto-producenten en andere netbeheerders	ITM-project
Doelstellingen overheid	Meer duurzame energie kan gemakkelijker bereikt worden	Duurzame energie 20% in 2020 (kabinet) of 14% (EC-voorstel)
Maatschappelijke houding	In geliberaliseerde markt is investering in duurzame energie een mooi punt om klanten te trekken en vast te houden	
Visie in de keten	Men kijkt met belangstelling naar de plannen van Essent Degene die nu gaat voor een nieuwe kolencentrale is niet geïnteresseerd in wind maar zou ook z'n kolencentrale kunnen inzetten voor elektrisch rijden	

Zeker zo belangrijk is dat elektrisch rijden niet duurder moet zijn dan rijden in een auto met verbrandingsmotor. Hierbij is het onderscheid tussen investeringen en jaarlijkse kosten van belang. Verder moet een onderscheid gemaakt worden in kosten en prijzen. Wat dit laatste betreft is ter illustratie een berekening gemaakt voor een auto uit de compacte klasse waarbij rekening wordt gehouden met een accuprijs van 800 euro/kWh, een elektriciteitsprijs van 0,17 euro/kWh en een benzineprijs van 1,30 euro/liter. Het laat zien dat de jaarlijkse uitgaven voor elektrisch rijden dan 20% hoger zijn dan de uitgaven voor het rijden in een vergelijkbare conventionele auto. Dit komt mede doordat de BPM op een zuinige benzineauto laag is. Bij een accuprijs van 600 euro/kWh en een benzineprijs van 1,60 euro zijn elektrisch rijden en rijden in een zuinige conventionele auto in de compactklasse in uitgaven gelijk.

De accu maakt de auto duur. Consumenten kijken bij de aanschaf van een auto vooral naar de prijs en in veel mindere mate naar de jaarlijkse kosten (zie bijvoorbeeld King, 2007).

Het leasen van de accu als oplossing hiervoor wordt door verschillende bedrijven uitgewerkt in bedrijfsplannen (Essent, Better Place). Dit concept biedt daarom kansen voor andere spelers om de nieuwe markt te betreden.

Een derde cruciale factor is het gemak waarmee de gebruiker op één dag verder kan komen dan de actieradius van de elektrische auto (die afhankelijk is van de accucapaciteit). In de huidige situatie is dit nog onvoldoende.

Tabel 5.3 geeft de krachtenveldanalyse voor een energieproducent die overweegt als leasemaatschappij op te gaan treden. Hierin speelt een rol dat elektrische auto's extra vraag naar elektriciteit genereren (bij één auto per huishouden ongeveer 50%), maar ook dat de auto voor een betere afstemming van vraag en aanbod van duurzame energie kan zorgen. In Nederland betekent dat een efficiëntere inpassing van

windenergie, waarvan het aanbod 's nachts voor het opladen van accu's kan worden benut.

Op dit moment worden de economische voordelen van elektrisch rijden vaak breed uitgemeten met verwijzing naar de grote verschillen in de prijs van brandstof en elektriciteit per kilometer. De prijs aan de pomp bevat bij benzine meer dan de helft aan accijnzen en belastingen. Hoewel ook de prijs van elektriciteit voor meer dan de helft bestaat uit belastingen is deze voor elektrisch rijden per gereden kilometer significant lager dan bij regulier autovervoer. Hierdoor worden per saldo door de automobilist dus minder belastingen afgedragen en bij een grootschalig gebruik van de elektrische auto zal voor de overheid een forse belastingderving ontstaan. In 2008 bedragen de overheidsinkomsten uit de verkoop van brandstof ongeveer 10 miljard euro. Wanneer de overheid de bijdrage van het wegverkeer op peil wil houden, zal de automobilist de gederfde inkomsten op de een of andere manier weer voor zijn rekening moeten nemen. Het is waarschijnlijk dat dan de prijs voor elektrisch rijden hoger wordt



## Conclusies

De broeikasgasemissies van een systeem van elektrisch rijden kunnen zeer laag zijn – aanzienlijk lager dan bij de meest zuinige toekomstige auto's met verbrandingsmotor – maar dit is sterk afhankelijk van de broeikasgasemissies bij de elektriciteitsvoorziening op de lange termijn. Er zijn voldoende technologische opties om rond 2050 elektriciteit te produceren met zeer lage emissiefactoren.

Het totaaleffect wordt mede bepaald door het aandeel elektrisch rijden in het wegverkeer. Als de barrière van de beperkte actieradius niet wordt genomen en de toepassing vooral beperkt blijft tot auto's met een actieradius onder de 100 km (veel kleine auto's, stadsbestelauto's en tweede auto's), dan wordt het aandeel gereden kilometers geschat op 20-40%. Wordt de barrière wel genomen, dan is een aandeel van 90% op de lange termijn mogelijk.

Elektrisch rijden kan bij grootschalige toepassing een aanzienlijk aandeel hebben in de toekomstige elektriciteitsvraag; in 2050 tot zo'n 10%. Op het wijkniveau kan tot meer dan 50% elektriciteit gevraagd worden door elektrische auto's. De balans tussen vraag en aanbod van elektriciteit kan aanzienlijk worden verbeterd, omdat het opladen van de accu in daluren kan gebeuren. Dit kan een enorme stimulans zijn om te investeren in windenergie gezien de uitstekende mogelijkheid om ook 's nachts, bij een normaal gesproken lage energievraag, windenergie te benutten. Dit geldt ook voor kolencentrales (met CCS) of kernenergiecentrales met een continu aanbod. De afhankelijkheid van gas, dat vaak flexibel wordt ingezet, wordt minder.

Het gebruik van elektrische auto's zal op de stedelijke leefomgeving een verdergaande positieve invloed hebben. De luchtkwaliteit zal verder verbeteren door de nulmissie, al zal het effect beperkt zijn omdat ook maatregelen bij auto's met verbrandingsmotor kunnen worden verwacht. De geluidshinder in de stad kan afnemen, zeker als ook brommers, scooters en motoren een elektrische aandrijving krijgen. Dit onder de voorwaarde dat elektrische voertuigen niet te luidruchtig worden gemaakt, wat noodzakelijk kan zijn als veiligheidsmaatregel om medeweggebruikers op hun komst te attenderen.

Een elektromotor is zeer efficiënt. Over de gehele keten beschouwd is bij het huidige elektriciteitspark een elektrische auto tot twee keer zo efficiënt. Bio-energie is efficiënter

dan vloeibare biobrandstof in die zin dat met dezelfde hoeveelheid biomassa (hout of houtachtig materiaal) tweemaal tot viermaal meer kilometers kunnen worden gereden. De brandstofkosten liggen mede daarom lager.

Op de lange termijn – afhankelijk van het succes zou dit kunnen zijn tussen 2020 en 2040 – kunnen de totale kosten (dus exclusief belastingen en accijnzen) voor het rijden met een elektrische auto met een actieradius van maximaal 300 km gelijk of lager zijn dan voor het rijden op benzine of diesel. Onzekerheid hierover zit in zaken als de olieprijs, de prijs van de accu en mogelijke besparingen. Tegenover de extra kosten van de accu staan immers een goedkoper aandrijvingssysteem, lagere onderhoudskosten en lagere energiekosten. Op kortere termijn zijn de uitgaven voor een automobilist die in de stad aan een lage actieradius genoeg heeft, maar toch veel kilometers rijdt, lager omdat de belastingen op energie per kilometer lager zijn en omdat geen motorrijtuigenbelasting en BPM wordt betaald.

Een belangrijke barrière voor de introductie van elektrische auto's is de beperkte actieradius. Dit heeft niet alleen te maken met de dure accu, maar ook met het gewicht. Het streven is met 1 kilogram accu 1 kilometer te kunnen rijden. Er zijn vier mogelijkheden om deze barrière te nemen:

- Accuwisselstations: hier kan gerobotiseerd het gehele accupakket in enkele minuten worden vervangen. Dit gaat ten koste van de flexibiliteit van de autoproducent om de accu in te bouwen. Accuwisselstations kunnen gecombineerd worden met snellaadstations.
- Snellaadstations: snelladen kan overal waar men grote stroomdichtheden kan aanbieden. De huidige accu's kunnen dit nog in beperkte mate aan zonder dat het ten koste gaat van de levensduur.
- Plug-in hybrides: in principe is hier ook snelladen of -wisselen mogelijk, maar het voordeel is vooral dat overgeschakeld kan worden op vloeibare brandstof als de accu leeg raakt en dat gemakkelijk kan worden bijgetankt. Een nadeel is dat twee aandrijvingssystemen nodig zijn en dat dit type auto duurder zal zijn en blijven dan een vergelijkbaar type met alleen een verbrandingsmotor en een elektrische auto met een niet al te groot bereik.
- Huur- of deelauto's: indien grote (hybride) auto's gemakkelijker dan nu en daardoor tegen relatief lage prijzen beschikbaar zijn, kan de consument bij een lange rit in het vooruitzicht hiervan gebruikmaken en de elektrische auto

laten staan. Nadelen (die door ieder verschillend worden gewogen) liggen in de sfeer van de moeite die het kost om te reserveren, het missen van de eigen spulletjes en het wennen aan een andere auto.

Een tweede belangrijke barrière is de garantie voor het overal en altijd kunnen opladen van de accu. Er moet een dekkend systeem van veilige en altijd beschikbare oplaadpunten komen, niet alleen bij huis, maar ook op het werk, in parkeer-garages en dergelijke.

Het is voor de netbeheerder belangrijk dat automobilisten zoveel mogelijk aan het net gekoppeld zijn wanneer niet gereden wordt om het netwerksysteem niet te veel te belasten en om efficiënt gebruik te kunnen maken van bijvoorbeeld windenergie. Gemeenten gaan een grote rol spelen bij de uitrol van het systeem van laadpunten.

In wezen hoeft het plaatsen van oplaadpunten geen probleem te zijn, omdat de elektriciteitswereld er belang bij heeft dat elektrisch rijden slaagt (grotere afzet en efficiëntere bedrijfsvoering vanwege opvullen van het nachtdal en een groter gebruik van het netwerk). Verder heeft de hele samenleving belang bij een optimale benutting van windenergie. De beschikbaarheid van gereserveerde parkeerplaatsen bij woningen, waar momenteel slechts openbare parkeerplaatsen zijn, moet in samenspel met gemeenten worden geregeld en kan nog voor obstakels zorgen.

Een derde barrière is de investeringsdrempel die verbonden is aan een elektrische auto vanwege de kosten van de accu en de onzekerheid over prestaties en levensduur. Leasen is hierbij een optie. De leasemaatschappij (dit kan de netbeheerder zijn, maar ook andere ondernemers zijn actief) spreidt het risico van falen over meerdere afnemers.

De plug-in hybride is duurder dan een auto met een verbrandingsmotor of een elektrische auto. Het voordeel voor marktintroductie is de beperkte afhankelijkheid van een te installeren laadpuntensysteem. Dit type auto kan toch een belangrijke bijdrage leveren aan het terugdringen van de CO<sub>2</sub>-emissie, omdat naar verwachting meer dan de helft van de kilometers elektrisch wordt gereden.

Gezien de slechte ervaringen met elektrische auto's in de jaren 90 heeft ook het Nederlandse beleid het laatste decennium weinig aandacht geschonken aan elektrisch rijden. Brandstofcelauto's rijdend op waterstof pasten bij velen beter in de visie op de lange termijn en biobrandstoffen hebben de laatste vijf jaar het debat gedomineerd. Dit ijlt na in de onderzoeksprogramma's die nu lopen. Aangezien brandstofcelauto's de komende jaren nog niet worden verwacht, de duurzaamheid van veel biobrandstoffen in twijfel wordt getrokken en de klimaat- en energievoorzieningsproblemen alleen maar groeien, wordt wederom naar de elektrische auto gekeken. Dat komt vooral ook doordat de accu (dankzij de opkomst van mobiele elektronica) is verbeterd en de olieprijs de afgelopen jaren sterk is gestegen. De opkomst van de

hybrideauto (met als icoon de Prius) is een extra stimulans voor onderzoek naar accu's voor auto's. In Nederland is het gebruik van de hybrideauto door de overheid financieel krachtig ondersteund (geen BPM en motorrijtuigenbelasting, lagere bijtelling bij leasen).

De verdere ontwikkeling van de elektrische auto en de plug-in hybride gaat gepaard met leerkosten. Vooral de accu moet nog efficiënter worden om grootschalige toepassing snel mogelijk te maken. Het doorlopen van de leercurve voor de meest kansrijke accu, de Li-ion-accu, zal (op basis van de ontwikkeling tot nu toe met een geschatte progress ratio van rond de 0,83) de komende jaren 2-3 miljard euro vragen aan extra kosten (of leerkosten) om de accu op de haalbaar geachte toekomstige eindprijs te krijgen. Dit is een bescheiden bedrag gelet op de bedragen die per jaar uitgegeven worden aan het autorijden (ongeveer 30 biljoen euro).

# Literatuur

- AEAT (2005). Cost-Benefit Analysis of the Thematic Strategy on Air Pollution, Service Contract for carrying out cost-benefit analysis of air quality related issues, in particular in the clean air for Europe (CAFE) programme, report number AEAT/ ED48763001/Thematic Strategy, AEA Technology, Didcot, UK.
- Batteryuniversity (2008). [www.batteryuniversity.com](http://www.batteryuniversity.com) geraadpleegd oktober 2008.
- BBC (2008). Bolivia holds key to electric car future, BBC News 9 november 2008.
- Belvilla (2008). Online onderzoek.
- Berglund B., T. Lindvall, D.H. Schwela (eds) (1999). Guidelines for community noise. World Health Organization, Geneve.
- Better Place Introduction. Power Point Presentatie, October 2008.
- Boer, P. de en B. In 't Groen (2009). Wijkniveau-voorspelling van elektriciteitsvraag en -aanbod van woningen. KEMA, Arnhem.
- Born, G.J. van den en J.P.M. Ros (2006). Biograndstoffen voor de chemische industrie, Evaluatie van transitie op basis van systeemopties, Milieu- en Natuurplanbureau, Rapport 500083005, Bilthoven.
- CENEX-ARUP (2008). Investigation into the Scope for the Transport Sector to Switch to Electric Vehicles and Plug-in Hybrid Vehicles. Studie voor UK Department for Business Enterprise & Regulatory Reform en Department of Transport.
- CPB/MNP/RPB (2006). Welvaart en Leefomgeving – Een scenariostudie voor Nederland in 2040. CPB/MNP/RPB, Den Haag/Bilthoven/Den Haag.
- ECN (2007). De belofte van een duurzame Europese energiehuishouding. Energievisie van ECN en NRG. Energieonderzoek centrum Nederland, Petten.
- Eickhout, B., G.J. van den Born, J. Notenboom, M. Van Oorschot, J.P.M. Ros, D.P. van Vuuren, H.J. Westhoek (2008). Local and global consequences of the EU renewable directive for biofuels, Testing the sustainability criteria. Milieu- en Natuurplanbureau, Rapport 500143001, Bilthoven.
- Elzenga, H.E., J.A. Montfoort, J.P.M. Ros (2006). Micro-warmtekracht en de virtuele centrale, Evaluatie van transitie op basis van systeemopties, Milieu- en Natuurplanbureau, Rapport 500083003, Bilthoven.
- Energie transitie (2008). Actieplan decentrale infrastructuur, actiepunten en initiatieven vanuit de netbeheerders om decentrale toepassingen in te passen in de energievoorziening. SenterNovem, Utrecht.
- Essent (2008). [www.essentelelektrischrijden.nl](http://www.essentelelektrischrijden.nl), geraadpleegd november 2008.
- Evans, K. (2008) An Abundance of Lithium (Part One and Two). [www.worldlithium.com](http://www.worldlithium.com).
- EZ (2008). Energierapport 2008. Ministerie van Economische zaken. Den Haag.
- Faber, A. en J.P.M. Ros (2009). Decentrale elektriciteitsvoorziening in de gebouwde omgeving, Evaluatie van transitie op basis van systeemopties. Planbureau voor de Leefomgeving, Rapport 500083011, Bilthoven.
- Forbes (2008). The Saudi Arabia of Lithium. [www.forbes.com](http://www.forbes.com), 24 november 2008.
- Franssen, E.A.M., J.E.F. Dongen, J.M.H. Ruysbroek, H. Vos, R.K. Stellato (2004). Hinder door milieufactoren en de beoordeling van de leefomgeving in Nederland. Inventarisatie verstoringen 2003. TNO, Rapport 2004-34, Den Haag. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Rapport 815120001, Bilthoven.
- Gezondheidsraad (2008). Waterstof in het wegverkeer – voor- en nadelen voor de gezondheid van een nieuwe vorm van brandstof. Den Haag.
- Goodspeed, R. (2009). Will Electric Cars Fuel Urban Sprawl? The Energy Collective, January 13, 2009.
- Heywood, J.B. (2008). More Sustainable Transportation: The Role of Energy Efficient Vehicle Technologies. Report prepared for the OECD International Transport Forum, Leipzig, Germany, 28-30 mei 2008.
- ICMM (2008). Zero Waste Recycling of Metals – Case Study.
- Junginger, M, P. Lako, S. Lensink, W. van Sark, M. Weiss (2008). Technological learning in the energy sector. Report 500102017. Universiteit Utrecht/ ECN.
- Kalhammer, F.R., B.M. Kopf, D.H. Swan, V.P. Roan, M.P. Walsch (2007). Status and Prospects for Zero Emissions Vehicle Technology, Report for the ARB Independent Expert Panel 2007. State of California Air Resources Board, Sacramento, California, USA.
- Kendall, G. (2008). Plugged in – The end of the oil age. WWF-World Wide Fund for Nature, Brussel.
- KiM (2007). Mobiliteitsbalans. Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid. Den Haag.
- King (2007). The King Review of low carbon cars, Part 1: the potential for CO<sub>2</sub> reduction. HM Treasury, London.
- Kintner-Meyer, M., K. Schneider, R. Pratt (2007). Impacts assessment of plug-in hybrid vehicles on electric utilities and regional U.S. Power Grids. Pacific Northwest National Laboratory.
- Knol, A.B. en B.A.M. Staatsen (2005). Trends in the environmental burden of disease in the Netherlands 1980-2020. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Rapport 500029001, Bilthoven.
- Kromer, M.A. en J.B. Heywood (2007). Electric Powertrains: Opportunities and Challenges in the U.S. Light-Duty Vehicle Fleet. Sloan Automotive Laboratory; Laboratory for Energy and the Environment. MIT. Cambridge. USA.
- Lowenthal, R. (2008). Networked Charging Stations. '08 Conference Electric Drive Transportation Association, 2-4 dec. Washington.
- Meridian International Research (2008). The Trouble with Lithium 2 – Under the Microscope. Martainville, France.
- Montfoort, J.A. en J.P.M. Ros (2008). Zonne-energie in woningen, Evaluatie van transitie op basis van systeemopties. Milieu- en Natuurplanbureau, Rapport 500083009, Bilthoven.
- Mulder, F.M. en M. Wagemaker (2008). Hydrogen and Electrical Energy Storage. Syllabus. TUDelft.
- Nagelhout, D. en J.P.M. Ros (2006). Brandstofcelauto op waterstof verkregen uit zonthermische krachtcentrales (CSP), Evaluatie van transitie op basis van systeemopties, Milieu- en Natuurplanbureau, Rapport 500083007, Bilthoven.
- Notten, P.H.L. (2006). Battery modelling & Battery Management – Managementrapport. EETK99124. Philips Research, TUEindhoven, Eindhoven.
- OECD/IEA (2008a). Energy Technology Perspectives, Scenario's & Strategies to 2050.
- OECD/IEA (2008b). World Energy Outlook. OECD, Parijs, France.
- OECD/ITF (2007). Future Prices and Availability of Transport Fuels. Discussion Paper No. 2007-15. International Transport Forum.
- OECD/ITF (2008). Transport and Energy – The Challenge of Climate Change. Research Findings. International Transport Forum. 28-30 mei 2008. Leipzig.
- Passier, G., F.V. Conte, S. Smets, F. Badin, A. Brouwer, M. Alaküla, D. Santini (2007). Status Overview of Hybrid and Electrical Vehicle Technology 2007; Final report of Phase III, Annex VII, IEA. TNO, Delft.
- Postma, A. (2008a). Wat betekent duurzame mobiliteit voor de netbeheerders? Presentatie op bijeenkomst Slimme energienetten bouwen voor een duurzame elektriciteitsvoorziening, georganiseerd door Platform Duurzame elektriciteitsvoorziening en Platform Nieuw gas op 3 oktober 2008. SenterNovem, Utrecht.
- Postma, A. (2008b). Mobile Smart Grid, de infrastructuur voor elektrisch rijden. Bijdrage voor het Nationaal Congres Mobiliteit & Milieu, 21 november 2008, Den Bosch.

- Reudink, M.A., H. van Zeijts, J.P.M. Ros (2006). Markt voor groene diensten, Evaluatie van transities op basis van systeemopties, Milieu- en Natuurplanbureau, Rapport 500083004, Bilthoven.
- Rishi, S., B. Stanley en K. Gyimesi (2008). Automotive 2020 – Clarity beyond the chaos, IBM Institute for Business Value. New York.
- Ritter, S.K. (2008). Biofuels, Batteries, And Solar Cells: The Future Of Driving. Chemical & Engineering News, Volume 86, Number 33, August 18, 2008.
- Rood, G.A., D. Nagelhout, J.P.M. Ros, H.C. Wiling (2006). Duurzame viskweek voor behoud van de visvoorraad, Evaluatie van transities op basis van systeemopties, Milieu- en Natuurplanbureau, Rapport 500083006, Bilthoven.
- Ros, J.P.M. en J.A. Montfoort (2006). Evaluatie van transities: systeemoptie vloeibare biobrandstoffen, Milieu- en Natuurplanbureau, Rapport 500083002, Bilthoven.
- Ros, J.P.M., J.C.M. Farla, J.A. Montfoort, D. Nagelhout, M.A. Reudink, G.A. Rood, H. van Zeijts (2006a). Evaluatiemethodiek voor NMP4-transities, Bouwtekening voor de evaluatie van het beleid ter ondersteuning van systeeminnovatie op de lange termijn, Milieu- en Natuurplanbureau, Rapport 500083001, Bilthoven.
- Ros, J.P.M., G.J. van den Born, H.E. Elzenga, J.A. Montfoort, D. Nagelhout, M.A. Reudink, G.A. Rood, H. van Zeijts (2006b). Transitieprocessen en de rol van het beleid – Evaluatie op basis van zes systeemopties, Milieu- en Natuurplanbureau, Rapport 500083008, Bilthoven.
- Ros, J.P.M., D. Nagelhout, J.A. Montfoort (2009). New environmental policy for system innovation: Casus alternatives for fossil motor fuels. Applied Energy, Volume 86, Issue2, February 2009, Pages 243-250. IGEC III – Special Conference (IGEC-III), June 18-20, 2007 Västerås, Sweden.
- Shell (2008). Shell energy scenarios to 2050. Shell International BV.
- Smokers, R., R. Vermeulen, R. van Mieghem, R. Gense, I. Skinner, M. Fergusson, E. MacKay, P. ten Brink, G. Fontaras, Z. Samaras (2006). Review and analysis of the reduction potential and costs of technological and other measures to reduce CO<sub>2</sub>-emissions from passenger cars. TNO/IEEP/AUT, Delft.
- Stoop, J.A.A.M. (2008). Rapportage Onderzoek en Interviews Veiligheid Stadstrams. Kindunos Veiligheidskundig Adviesbureau B.V, Gorinchem.
- Tahil, W. (2007). The Trouble with Lithium – Implications of Future PHEV Production for Lithium Demand. Meridian International Research, France.
- Tans, N. (2006). Octrooiaanvragen in de elektriciteitsopslag. Octrooicentrum. Rijswijk.
- TenneT (2008). Transportbalans 2007. TenneT TSO B.V. Arnhem.
- Uyterlinde, M.A., C.B. Hanschke, P. Kroon (2008). Effecten en kosten van duurzame innovatie in het wegverkeer – Een verkenning voor het programma ‘De auto van de toekomst gaat rijden’. ECN, Petten.
- Valentine-Urbschat, M. en W. Bernhart (2008). Powertrain 2020. Automotive inSIGHTS. No.2-2008. Roland Berger Strategy Consultants, München.
- Visser E. de, R. van den Hoed, H. Barten (2006). Concentrating solar power for fuel cell vehicles. Ecofys, Utrecht.
- VROM (2001). Nationaal Milieubeleidsplan 4. Een wereld en een wil, werken aan duurzaamheid. Ministerie van VROM, Den Haag.
- VROM/NSDO (2002). Nationale Strategie voor Duurzame Ontwikkeling – Verkenning van het rijksoverheidsbeleid. Ministerie van VROM, Den Haag.
- Vuuren, D.P. van, M.G.J. den Elzen, P.L. Lucas, B. Eickhout, B.J. Strengers, B. van Ruijven, M.M. Berk, H.J.M. de Vries, M. Hoogwijk, M. Meinshausen, S.J. Wonink, R. van den Houdt, R. Oostenrijk (2006). Stabilising greenhouse gas concentrations levels: an assessment of options and costs. Milieu en Natuurplanbureau, Rapport 500114002, Bilthoven.



# Bijlage 1 Interviewronde

A. Brouwer, SenterNovem  
M. Wagemaker, TUDelft  
P.H.L. Notten, TUEindhoven  
P. de Boer- Meulman, KEMA  
J. van Baalen, TNO  
G. Passier, TNO  
A. Postma, Essent  
R.J.F. Hoogma, SenterNovem

### **Elektrisch rijden; een aantrekkelijke uitdaging**

De afgelopen jaren is elektrisch rijden steeds aantrekkelijker geworden door betere accu's. Door elektrisch rijden kan de CO<sub>2</sub>-uitstoot drastisch worden gereduceerd, zeker wanneer met duurzame energie meer elektriciteit wordt opgewekt. Doordat de meeste personenauto's 's nachts stilstaan, kunnen accu's vooral dan worden opgeladen. Dat is kosteneffectief omdat er dan opwekkingscapaciteit over is en ook windenergie zo beter kan worden benut. Ook kan de consument rijden in een schone en stille auto, terwijl de kosten in de toekomst overkomelijk lijken.

Twee hindernissen moeten in ieder geval nog worden genomen. De eerste is dat de actieradius van elektrische auto's nu maximaal enkele honderden kilometers is. Accuproducenten en universiteiten werken hard aan accu's die bij snellaadstations in 5 à 10 minuten kunnen worden opgeladen. Met de binnenkort op de markt komende plug-in hybrideauto, die zowel elektrisch als op gewone brandstof rijdt, is de actieradius overigens geen beperking. Daar staan dan wel een geringere reductie van CO<sub>2</sub> en wat hogere kosten tegenover. De tweede barrière is dat voor elektrisch rijden een gestandaardiseerd Europees netwerk van oplaadpunten nodig is, bij woningen maar ook bij bedrijven en parkeerfaciliteiten.

Dit rapport schetst de uitdagingen voor overheid en bedrijfsleven om de voordelen van elektrisch rijden te benutten en de barrières te slechten.