Rijkswaterstaat
Ministerie van Verkeer en Waterstaat

Elektrisch rijden

Innovatie. Informatie. Inspiratie.

Water. Wegen. Werken. Rijkswaterstaat.

Elektrisch rijden

Innovatie. Informatie. Inspiratie.

Voorwoord

Wil René Jansen

Elektrisch rijden

Iedere dag staat er wel iets over in de krant. Kunt u het nog volgen?

Halverwege 2009 vroegen wij als innovatoren van Rijkswaterstaat onszelf af wat de opkomende elektrische auto voor de taken van Rijkswaterstaat in de toekomst zal betekenen. Toen bleek het om te beginnen moeilijk om een goed overzicht te krijgen van de wereld van het elektrisch rijden. Meestal is er dan wel ergens in de organisatie iemand die er veel van weet of je verder helpt.

Onze collega Rob Visscher is zo'n bron van kennis rondom duurzame mobiliteit. Rob Visscher van de afdeling innovatie en ontwikkeling van de Dienst Infrastructuur heeft zich de afgelopen jaren binnen Rijkswaterstaat ontwikkeld tot een voorhoedespeler voor praktische kennis over schone energie en duurzame mobiliteit. Vooral door zijn inzet bij Wegen naar de Toekomst, het Rijkswaterstaat innovatieprogramma voor de mobiliteit. De naderende pensionering van Rob versterkte de behoefte om het landschap van de elektrische mobiliteit nu eens bij elkaar te brengen.

Ik weet zeker dat u met dit boek een goed beeld krijgt van de wereld van elektrisch rijden en wat de mogelijke gevolgen voor Nederland, het milieu en de inrichting van Nederland kunnen zijn. Hopelijk bent u net zo verrast en geïnspireerd als wij.

Veel leesplezier en inspiratie,

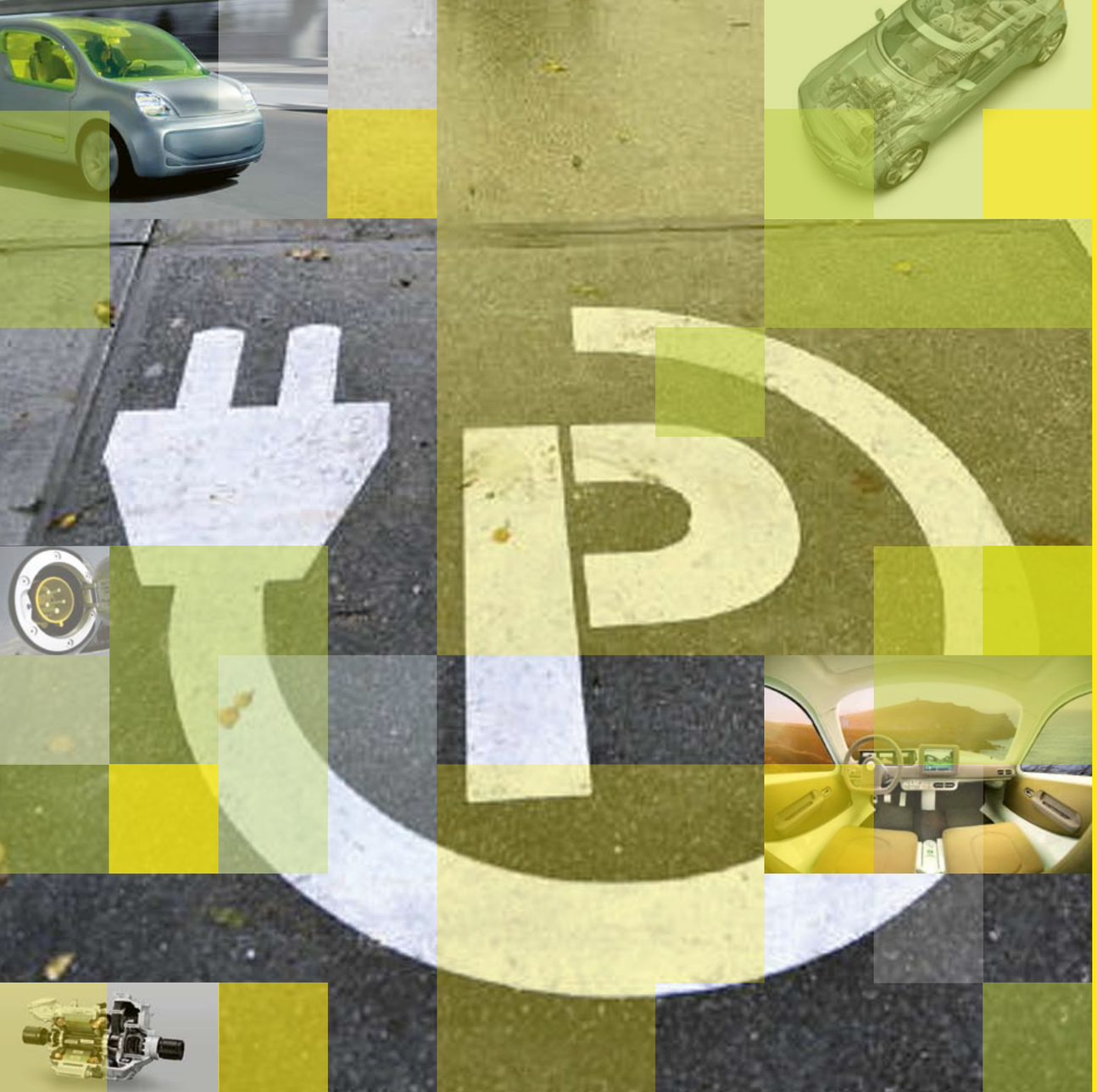
Wil René Jansen
Themaleider duurzame infrastructuur – Wegen naar de Toekomst

Inhoudsopgave

A De elektrische auto 5
1 Elektrisch rijden is plezierig rijden 6
2 Autorijden op zon en wind 16
3 Van benzine naar batterij 30
4 Elektrisch tanken in de praktijk 46
5 Wanneer te koop? 52

B Elektrisch rijden in 2028 63
6 De weg als bron van energie 64
7 Trends die door elektrisch rijden worden versterkt 70
8 Gevolgen voor de infrastructuur 78
Nawoord 82

Interviews en bijdragen 83
Afbeeldingen 84
Noten 86
Bronnen 90



De elektrische auto

De elektrische auto heeft twee voordelen:
hij rijdt plezierig en je kunt de benodigde energie op een duurzame manier opwekken.

Hij heeft ook twee uitdagingen:
er moeten oplaadpunten komen en de batterijen moeten beter en goedkoper.

A

1 Elektrisch rijden is plezierig rijden

De voordelen van de elektrische auto, bezien vanuit de autobezitter.

We houden van onze auto!

De opmars van de auto is de afgelopen eeuw onstuitbaar geweest. De elektrische auto zet die trend voort. De overheid moedigt de overstap naar de elektrische auto aan.

Eeuwenlang was onze dagelijkse mobiliteit beperkt tot enkele kilometers. Verharde wegen waren tot circa 1850 een zeldzaamheid en tot ver in de 19e eeuw was de trekschuit het belangrijkste vervoermiddel. Wie van Amsterdam naar Rotterdam wilde reizen was daarbij minimaal 15 uur onderweg. De komst van de stoomtrein bracht een ommekeer teweeg: 'Overal treinen, in alle steden trams! Een nieuwe wereld!' kopte een tijdschrift in 1897.
Een verdere versnelling werd veroorzaakt door de brede beschikbaarheid van individuele vervoermiddelen. In 1910 had één op de twaalf Nederlanders een *"stalen ros der democratie"*: een fiets. In de na-oorlogse jaren kreeg de brommer een prominente plaats als vervoermiddel voor de massa. In 1970 reden er maar liefst 1,9 miljoen brommers over de Nederlandse wegen (tegen 600.000 nu). Maar de echte mobiliteitsexplosie kwam met de introductie van de automobiel. We houden van onze auto! Dat blijkt onder meer uit enquêtes: daarin zegt ruim 86% van de Nederlanders dat zij een positief oordeel heeft over de auto.[1]

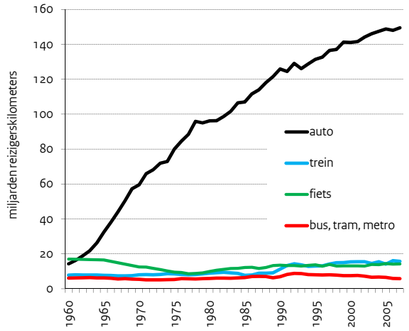
"Er was niets te vergelijken bij een automobiel! Een automobiel, dat troostte je voor het ellendige, duffe, vervelende leven. Met een automobiel langs gladde wegen ijlen, je kar bijna kapot te stoken [...] Heerlijk zou dat zijn! [...] En hij suggereerde zich, [...], de razende sneltewellust van zo een puffende en poefende automobiel, de snerpende stank van haar petroleum-emanatie, de precieze wendingen van de pneuwielen, die in het opgejaagde stof zouden ijlen als van een donderwagen op luchtwolken..."
Louis Couperus, Het late leven, 1901

We handelen ook naar dat gevoel. Sinds de jaren 60 is het autobezit in Nederland vertienvoudigd: Nederland telt nu meer auto's dan huishoudens! En we leggen ook steeds meer van onze reiskilometers per auto af.

Nu wordt onze auto voor het eerst in honderd jaar weer leverbaar met een elektrische motor in plaats van een brandstofmotor.
De overheid is geïntrigeerd door die auto zonder motorlawaai en uitlaatgassen. Kamerleden van links tot rechts steunen het kabinet bij het geven van financiële voordelen voor elektrische auto's: geen wegenbelasting[2], geen BPM[3], en geen fiscale bijtelling.[4]
Burgemeesters en wethouders stellen parkeerplaatsen met oplaadpunten ter beschikking.

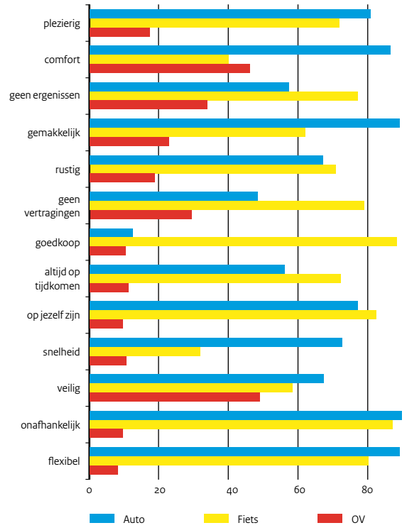
Auto-ontwerpers voelen zich door de elektrische aandrijving geïnspireerd tot het maken van mooiere auto's met meer features en de fabrikanten gaan elektrische auto's in de showroom zetten.

Maar willen we er wel in rijden?



De afgelopen decennia is het autoverkeer sterk toegenomen.
De grafiek toont miljarden reizigerskilometers in de periode 1960-2005.

Waardering van auto, fiets en OV



Gevraagd naar dertien kenmerken van vervoer wordt de auto het vaakst positief beoordeeld. In de grafiek is te zien hoeveel procent van de ondervraagden een bepaald kenmerk vindt passen bij de auto, de fiets of het OV.

Een andere rijervaring

Wie nog nooit in een elektrisch auto heeft gereden zou eigenlijk eens een proefrit moeten maken. Het voelt alsof de motor mist en de aansturing is verassend direct.

Pas als je in een elektrische auto rijdt merk je hoezeer we gewend zijn te luisteren naar onze brandstofmotor. Voor we wegrijden moeten we hem *"aanzwengelen"*. Als hij begint te *"brommen"* weten we dat het gelukt is. Als hij *"kucht"* of *"rochelt"* weten we dat het tijd is om hem naar de garage te brengen. Bij het rijden luisteren we naar de toonhoogte zodat we weten wanneer we moeten schakelen. En wanneer het ineens stil wordt dan weten we dat de motor is afgeslagen en dat we hem opnieuw moeten starten.

Als we gas geven horen we bewust of onbewust hoe er een heel proces op gang komt: de motor gaat een hoger en harder geluid produceren; misschien gaat de auto een beetje trillen; en tenslotte worden we in onze stoelen gedrukt en komt de versnelling.

Die motor lijkt bij een elektrische auto ineens verdwenen. Je hoort niets, er trilt niets en je voelt geen vertraging tussen het *"gaspedaal"* en de reacties van de auto. Het is een beetje alsof je de volumeknop van een stereoinstallatie bedient.

Ook de versnellingsbak, de toerenteller en het koppelingspedaal zijn verdwenen. Het is net een automaat maar dan zonder dat je voelt wanneer er geschakeld wordt: een elektrische auto heeft *"gewoon"* maximale trekkracht van stilstand tot aan de maximum snelheid.

Tenslotte kan je remmen op de motor. Daardoor slijten je gewone remmen minder en laad je gelijk je batterij weer een beetje op.[5]

Sportief en toch zuinig

Met een elektrische auto kan je het vermogen van een Porsche hebben, de zuinigheid van een Prius en de stilte van een Rolls Royce.

"Elektrische auto's zijn tot nu toe gemaakt door mensen die vinden dat je niet moet autorijden" aldus Martin Eberhard, de oprichter van Tesla Motors. Vervolgens maakte hij een einde aan de misvatting dat elektrische auto's niet snel kunnen zijn door de eerste in serie geproduceerde sportwagen op de markt te brengen.

De Tesla illustreert een opvallend verschil met een gewone sportwagen: sportwagens gebruiken gewoonlijk heel veel energie, maar de Tesla verbruikt juist heel weinig.

Bij elektrische auto's leidt een sterkere motor namelijk niet tot een hoger energieverbruik: een elektromotor is op elk toerental en bij elke belasting ongeveer 90% efficiënt.[6]

De efficiëntie van een brandstofmotor is veel lager (tussen de 15% en 35%) en is sterk afhankelijk van het toerental en het vermogen. Een extreem voorbeeld van prestaties versus benzinegebruik is de Bugatti Veyron. Die supersportwagen trekt op van 0-100 kilometer per uur in een ongeëvenaarde 2,5 seconde. Hij verbruikt in de stad 40 liter benzine per 100 kilometer, bijna tien keer zoveel als de zuinige Toyota Prius.[7]

De elektrische sportwagen van Tesla is met zijn 3,9 seconde iets trager maar nog steeds een supersportwagen. Alleen de Tesla gebruikt half zoveel energie als een Toyota Prius en twintig keer minder dan de Bugatti Veyron![8]

En wat Rolls Royce betreft: het is nog niet duidelijk wanneer er een elektrische versie komt maar topman Tom Purves staat er zeker voor open: "Wij staan voor ongeëvenaard raffinement, en stiller en onopvallender dan een goed ontworpen elektromotor bestaat niet", aldus de topman van het meest prestigieuze automerk ter wereld.[9]

Toerental

Een brandstofmotor presteert het best tussen de 1.500 en 3.000 toeren. Dat toerengebied kennen we als het geluid van een "tevreden" brommende motor. Als de toonhoogte (en daarmee het toerental) teveel zakt dan slaat de motor af. Hoge toerentallen en toonhoogtes ervaren we als een "gierend" geluid: de motor kan dan grote prestaties leveren maar het benzineverbruik en de slijtage aan de motor zijn navenant.

Vermogen

Een brandstofmotor werkt het best als hij flink "aan de bak" moet: als hij 70% van zijn maximumvermogen moet leveren gaat hij het efficiëntst met zijn brandstof om. Maar de motor van een sportwagen is zo groot en krachtig dat hij in het dagelijks gebruik maar een heel klein deel van zijn maximum-vermogen moet leveren. De motor van een sportwagen wordt als het ware onvoldoende "uitgedaagd" en daardoor wordt hij "nonchalant", of netter gezegd "inefficiënt".

De Tesla Roadster

Nooit meer motorpech

Niet alleen de totale auto wordt simpeler maar ook de motor zelf. De elektrische motor is daardoor betrouwbaar en onderhoudsarm.

Een benzinemotor werkt op basis van duizenden explosies per minuut. Vóór elke explosie moet er benzine in de cylinder worden geïnjecteerd. Dan moet de cylinder worden afgesloten en veroorzaken bougies de explosie. Tenslotte moeten de uitlaatgassen worden afgevoerd. Honderden onderdelen werken samen om dat goed te laten verlopen.

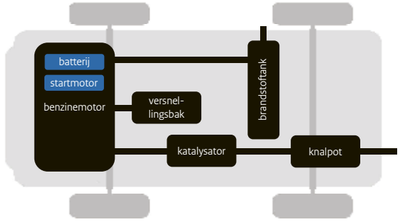
Daarmee vergeleken is een elektromotor de eenvoud zelve. De behuizing is gesloten want er hoeft geen brandstof in en geen uitlaatgas uit. Het enige bewegende onderdeel is de as die de wielen aandrijft. Het gevolg van die eenvoud is een betrouwbare en onderhoudsvrije motor.

De belangrijkste bewegende onderdelen van een benzinemotor. Zij zetten de kracht van de explosies om in een ronddraaiende beweging van de aandrijfas onder in het plaatje.

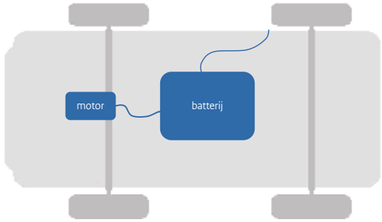
Het enige bewegende onderdeel van de elektromotor: de aandrijfas. Deze aandrijfas wordt in beweging gebracht met behulp van een ronddraaiend magnetisch veld. Dat ronddraaiende magnetische veld wordt opgewekt door steeds een ander deel van de behuizing van de motor van stroom te voorzien.[10]

Eenvoud is het kenmerk van het ware

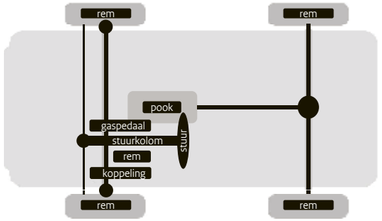
In een elektrische auto is vergaande versimpeling mogelijk.



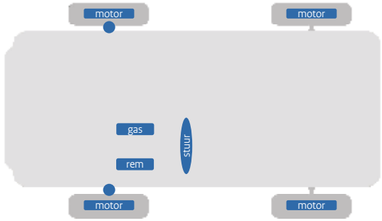
De benzinemotor wordt opgestart met een startmotor die werkt op een batterij. Een versnellingsbak houdt het toerental in het juiste bereik. De benzinemotor krijgt zijn brandstof uit de brandstoftank. Rookgassen komen eerst door een katalysator en dan door een knalpot voor ze in de buitenlucht worden geloosd.



Bij een elektrische auto worden de startmotor en batterij vergroot.



De traditionele benzineauto heeft een aantal mechanische aansturingen. De motor wordt aangestuurd via een pook, een gaspedaal en een koppelingspedaal. De motor drijft via een aandrijfas en een overbrenging de achterwielen aan (of in sommige gevallen de voorwielen of alle wielen). De aansturing van de wielen via het stuur gebeurt traditioneel ook met een mechanische overbrenging. Remmen gebeurt met remschijven in de wielen die via een hydraulisch systeem worden bediend.



Het systeem waar we uiteindelijk naartoe gaan wordt drive by wire genoemd: alle mechanische aansturingen worden vervangen door elektrische signalen. De binnenruimte kan naar believen ingedeeld worden. In dit plaatje is de meest extreme variant weergegeven.

Overigens staat de elektrische aansturing van de wielen los van het soort motor. En remmen op de elektromotor zoals hier is weergegeven is een logisch eindstation maar het zal nog vele jaren en vele testen duren voor het zover is.

Meer features

Elektrische motoren kunnen betrouwbaarder en goedkoper worden aangestuurd. Daarom zullen ze meer "features" bieden.

Elektrische auto's met een stekker (zie pagina 55) kunnen elektriciteit tanken. Ze kunnen met die elektriciteit ook op temperatuur gebracht worden zodat je altijd comfortabel en met goed zicht wegrijdt. En als de stroom uitvalt kan je auto voor de stroomvoorziening zorgen.[11]

Een heel ander aspect is *"intelligentie"*. Nieuwe auto's onderscheiden zich in toenemende mate door geavanceerde softwarematige features. Denk aan:

- Adaptive Cruise Control (ACC) en de Fileassistent, waarbij er een vaste afstand tot de voorganger wordt aangehouden;
- Automated Parking, waarbij de auto zelf inparkeert;
- Lane Assist, waarbij de auto de bestuurder helpt om de rijbaan te volgen;
- Emergency Brake Assist (EBA), waarbij de auto in gevaarlijke situaties sneller of zelfs autonoom remt;
- Dode hoek bewaking, waarbij er een lampje gaat branden als er iemand in je dode hoek zit;
- Anti-lock Braking System (ABS), dat voorkomt dat de wielen tijdens het remmen blokkeren;
- Electronic Stability Control (ESC), waarbij slippen zoveel mogelijk wordt voorkomen.

Maar als de consument meer en meer softwarematige features wil hebben dan is er bij benzineauto's een probleem: het aansturen van de brandstofmotor is duur en gecompliceerd.

De reden daarvoor is dat wij mensen best knap zijn. Wij kunnen de brandstofmotor *"aanvoelen"* en hem bedienen op een manier die voor computers lastig is. Wij kunnen het toerental van de motor regelen door met de koppeling, de versnelling en het gaspedaal te spelen. Tegelijkertijd luisteren we naar de motor en anticiperen we op wat er in het verkeer gaat gebeuren. Bijvoorbeeld tijdens een inhaalmanoeuvre of als we tegen de stoep op moeten inparkeren. Als we deze vaardigheden aan de automatische systemen in de auto willen *"leren"* is dat moeilijk en daardoor foutgevoelig en duur.

Bij elektromotoren is het ineens een heel ander verhaal. Zulke motoren kunnen eenvoudig en nauwkeurig worden aangestuurd met simpele computercommando's. Denk daarbij aan de manier waarop robotarmen razendsnel en op de honderste milimeter nauwkeurig kunnen bewegen.

De ultieme situatie wordt bereikt als elektrische auto's in de toekomst in elk wiel een elektromotor hebben. Dan kan de boordcomputer elk wiel apart nauwkeurig aansturen. Daarmee wordt een ongekend goede controle in noodsituaties mogelijk.

"Hoeveel PK hebben jouw wielen?"
Rob Visscher, afdeling innovatie & ontwikkeling, Rijkswaterstaat Dienst Infrastructuur.

2 Autorijden op zon en wind

De elektrische auto draagt bij aan een schone stille stad. Hij vermindert onze afhankelijkheid van olie en maakt tanken goedkoper. Bovenal geeft hij ons de optie om over te schakelen op duurzame energie.

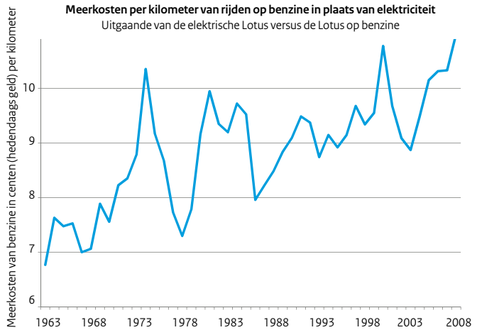
Elektriciteit is goedkoper dan benzine

Goedkoper tanken is een belangrijk argument in het voordeel van elektriciteit.

Stel je eens voor dat je twee Lotus sportauto's in de garage hebt staan. De ene rijdt op elektriciteit en de andere op benzine. Wat is dan het verschil qua energiekosten? Willem van der Kooi is in die luxe positie: hij is de Lotus importeur in Nederland en mede-oprichter van Electric Cars Europe, verantwoordelijk voor de elektrische Lotus.

Volgens hem kost de energie voor zijn elektrische Lotus hem 4 cent per kilometer en voor de gewone Lotus Elise 15 cent per kilometer. Rijden op benzine is voor hem dus bijna vier keer zo duur als rijden op elektriciteit!

En het verschil neemt al enige tijd toe...



Deze figuur laat het verschil in brandstofkosten zien in de tijd. Het absolute verschil is afhankelijk van de auto's die vergeleken worden. In dit geval de elektrische Lotus van de heer van der Kooi versus de Lotus op benzine. De trend is steeds dezelfde: elektriciteit is goedkoper en het verschil wordt steeds groter.

Geen uitlaatgassen en motorlawaai

Elektrische auto's stoten geen uitlaatgassen uit en produceren geen motorlawaai. Daardoor maken ze onze leefomgeving prettiger.

In 1898 verzamelden afgevaardigden van over de gehele wereld zich in New York voor 's werelds eerste internationale conferentie over stedenplanning. Het belangrijkste probleem op de agenda: de enorme hoeveelheid uitwerpselen op straat door de toename van het transport met paarden. Men voorspelde dat de straat weldra onder een metersdikke laag uitwerpselen zou komen te liggen. Maar er was geen alternatief en zonder paarden zouden steden letterlijk verhongeren. Na drie dagen vergaderen (in plaats van de geplande tien) wierpen de afgevaardigden de handdoek in de ring. Het probleem leek hen simpelweg onoplosbaar.

Dit verhaal is instructief voor de huidige situatie rondom auto's in de stad. Alleen nu gaat het niet om de uitwerpselen van paarden maar om uitlaatgassen en geluidsoverlast, en de elektrische auto zou die problemen in één klap oplossen.

Als fijnstof uitgebannen kon worden zouden er jaarlijks 18.000 Nederlanders extra blijven leven. Preciezer gezegd: we krijgen er dan allemaal gemiddeld één tot anderhalf levensjaar bij. Vooral voor de groeiende groep mensen met longaandoeningen zou het een grote verbetering zijn.[12]

Bestelauto's zorgen voor 80% van het fijnstof dat door het wegverkeer wordt uitgestoten.[13] Misschien moeten we die als eerste elektrificeren. Dat kan ook relatief eenvoudig. Veel bestelauto's rijden namelijk continu korte ritjes en voor korte ritjes heb je maar een kleine batterij nodig (zie pagina 57). Bovendien hebben ze vaak een vaste thuisbasis die relatief makkelijk van oplaadpunten is te voorzien. Tenslotte zijn ze technisch gezien simpel om te bouwen.[14]

Hybride auto's (zie pagina 53) zoals de Toyota Prius zijn ook een stap in de goede richting omdat ze juist bij de lagere snelheden in de stad weinig gebruik maken van hun verbrandingsmotor.

Stilte is belangrijk omdat maar liefst 30% van de Nederlanders last heeft van geluidsoverlast door verkeer.[15] Grote winst zou hier te halen zijn door het elektrificeren van brommers die ondanks hun kleine motor veel geluid produceren. Die brommers zijn ook relatief vaak 's avonds laat en 's ochtends vroeg actief. Jongeren vinden het wel stoer, want dan kunnen ze stiekem laat thuiskomen.

Overigens schept elke oplossing weer nieuwe uitdagingen, want hoe zorg je ervoor dat auto's die hun aanwezigheid niet met een brullend motorgeluid kenbaar maken toch opgemerkt worden door andere verkeersdeelnemers?

Antwoord op de olieschaarste

De elektrische auto gebruikt stroom uit een elektriciteitscentrale. Daardoor zijn we niet langer afhankelijk van schaarse en dure olie.

Olie is duur. Van 1870 tot 1970 kostte olie minder dan drie dollar per vat. Omgerekend naar hedendaags geld bleef de prijs per vat een eeuw lang onder de 20 dollar. Intussen is de prijs van een vat olie 70 dollar en stijgende.[16]

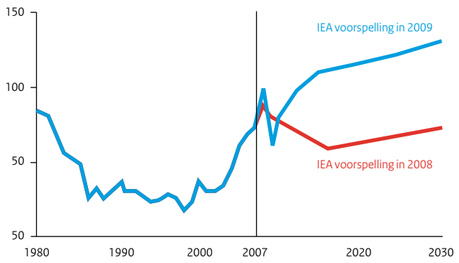
Olie is ook schaars. Ten eerste neemt de totale reserve af omdat we al 25 jaar minder olie vinden dan we gebruiken. Als we zo doorgaan is de olie over 30 jaar op. Ten tweede krijgen we waarschijnlijk binnen enkele jaren het probleem dat de productie onvoldoende is om te voldoen aan de vraag.[17]

> “Shell verwacht dat na 2015 makkelijk toegankelijke voorraden olie en gas niet langer gelijke tred houden met de vraag.”
>
> *Jeroen van der Veer, CEO Shell*[18]

Wat gaat er gebeuren als olie schaarser en duurder wordt? Nemen de spanningen in het Midden Oosten dan bijvoorbeeld nog verder toe?

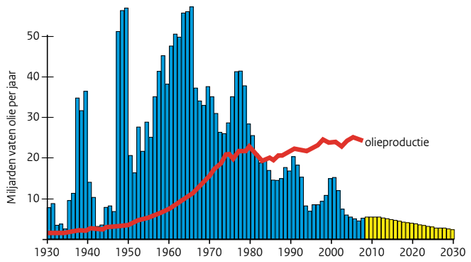
Meer dan de helft van de wereldwijde olieproductie wordt gebruikt om brandstof voor onze auto’s mee te maken. Die helft van de olie is niet meer nodig als we elektrisch gaan rijden en daarmee worden we minder afhankelijk van olie. Dat is de reden dat in Amerika mensen van zeer uiteenlopende politieke signatuur elkaar vinden als het gaat om elektrische auto’s. De ex CIA-directeur en de hippie demonstreren “arm in arm”.[19]

De prijs van olie blijft verder stijgen



Dit figuur laat de olieprijs per vat in de tijd zien. Voor 1970 was de prijs per vat steeds lager dan 20 dollar. Na de oliecrisis van 1973 begon de prijs te stijgen en tijdens de oorlog tussen Iran en Iraq bereikte hij een ongekend hoge 70 dollar per vat. Door de lagere prijzen tussen 1985 en 2003 leek het er even op dat de olieprijs weer laag zou blijven maar intussen staat de prijs op 75 euro. Dit ondanks de afgenomen vraag naar olie door de recessie. De International Energy Agency (IEA) constateerde in 2009 dat zij voorheen te optimistisch was en voorspelt dat de prijs vanaf nu alleen maar zal blijven stijgen.

Ruwe olie: jaarlijkse vondsten versus productie



De doorgetrokken lijn laat zien hoeveel olie er elk jaar geproduceerd is tussen 1930 en 2009. De blauwe balken laten zien hoeveel extra voorraden er elk jaar worden gevonden. Sinds 1965 is de trend dat er steeds minder nieuwe olie wordt gevonden en sinds 1985 vinden we minder dan we produceren. Hoe lang we door kunnen gaan voor de olie op is hangt ondermeer af van ons gebruik. Als we zo doorgaan waarschijnlijk minder dan 30 jaar.[20]

Minder uitstoot van broeikasgassen

Een elektrische auto op duurzame energiebronnen stoot geen broeikasgassen meer uit. De vermindering in uitstoot die we kunnen bereiken is enorm.

Een gewone auto verbrandt benzine en produceert daardoor CO_2, een broeikasgas dat ertoe leidt dat de aarde opwarmt.[21]

Wereldwijd neemt het autogebruik toe, vooral in landen als India en China waar nu nog relatief weinig auto’s rondrijden. Als we op de ingeslagen weg doorgaan zal het verkeer daarom steeds meer broeikasgas produceren.

Met de elektrische auto wordt de productie van broeikasgassen verplaatst naar de plaats waar de elektriciteit wordt opgewekt. Die elektriciteit kan op veel verschillende manieren worden opgewekt.

Als we de elektriciteit voor de auto opwekken in een kolencentrale dan wordt er nauwelijks minder broeikasgas uitgestoten, tenzij we ook investeren in het afvangen, transporteren en opslaan van de geproduceerde CO_2. Met een centrale op aardgas is er direct een fikse afname van de CO_2-uitstoot en met kerncentrales kan die uitstoot nog verder worden teruggebracht.

Maar de allergrootste reductie is te halen als we de extra energie op een duurzame manier gaan opwekken, bijvoorbeeld met zon en wind. Daarom zijn veel milieuorganisaties enthousiast over de elektrische auto.

Intermezzo

Ons energieverbruik met Gerard Joule

Veel mensen weten niet waar we onze energie precies aan besteden en vinden het moeilijk zich een voorstelling te maken bij energie. Ons energieverbruik omgerekend naar de menselijke maat: de Nederlander heeft gemiddeld 235 "energiebedienden".

Even voorstellen: Gerard Joule. Gerard is een volstrekt gemiddelde Nederlander die 10 uur per dag, 5 dagen in de week de longen uit zijn lijf fietst. Hij staat voor de hoeveelheid energie die we als mens kunnen produceren. Stel dat we alle energie die hij bij elkaar fietst omzetten in elektriciteit. Dat gedachtenexperiment levert ons "de menselijke maat" van energie op:

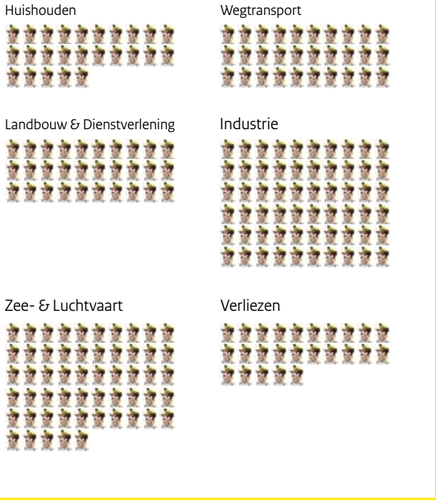
- Als u fietst wekt u gemiddeld 100 watt op.
  Dat is genoeg om een kleine pc of een laptop en een spaarlamp aan te drijven.
  (Een auto op de snelweg levert gemiddeld al snel 15.000 watt: 150 keer zoveel!)
- Omdat u tien uur per dag trapt wekt u op zo'n dag 1 kilowattuur op.
  (Genoeg om circa 5 kilometer mee te rijden in een elektrische auto.)
- Omdat u alle werkdagen trapt levert u per jaar 278 kWh ofwel 1 gigajoule.

Gerard Joule symboliseert dus de gigajoule die een mens theoretisch met spierkracht op zou kunnen wekken in een jaar. Een grappig gedachtenexperiment is om je voor te stellen hoeveel mensen er voor jou als Nederlander aan het trappen zouden zijn als je zonder fossiele energiebronnen evenveel energie wil blijven gebruiken.

Onze huishoudelijke elektriciteit valt nog wel mee: daar hebben we gemiddeld 5 man voor in dienst. Voor heet water nog eens 5 Gerard Joules. De verwarming tikt meer aan: 15 Gerard Joules. Voor ons huishouden zijn er zo al 25 man aan het fietsen. En dat is dus per gezinslid! Het wegverkeer gebruikt maar liefst 30 gigajoule per jaar per persoon. Circa 20 gigajoule daarvan is voor persoonlijk transport. Anders gezegd: onze auto verbruikt vier keer zoveel energie als de elektrische apparaten in ons huishouden. Als we met de auto overschakelen van benzine naar groene stroom dan heeft dat dus vier keer zoveel effect als wanneer we al onze andere elektrische apparaten overschakelen op groene stroom.

Overigens is het wel ontnuchterend om te zien hoeveel energie we verbruiken die we niet eens zien: 70 gigajoule voor de industrie; 55 gigajoule voor de scheepvaart en het luchtverkeer; etc. etc. In totaal hebben we 235 Gerard Joules voor ons aan het fietsen![22]

Gerard Joules actief per persoon



De elektrische auto helpt bij de invoering van zonne- en windenergie

Een supergrid zorgt dat we duurzame energie overal vandaan kunnen halen. Een smart grid zorgt dat we die energie intelligent distribueren. De elektrische auto met zijn grote batterij kan dienen als buffer om het grid mee te stabiliseren.

Het supergrid: wat je van ver haalt is lekker
Een supergrid is een elektriciteitsnetwerk waarmee de elektriciteit over lange afstanden getransporteerd kan worden. Dat is belangrijk want de beste plek om duurzame energie op te wekken is niet altijd naast de deur. Zon is er overvloedig in de Sahara. De wind waait vooral op zee of bijvoorbeeld langs de kust van Marokko.
Het supergrid brengt die energie hier naartoe.

Toen onze elektriciteitnetwerken werden aangelegd konden elektriciteitsleidingen hooguit enkele honderden kilometers lang zijn en ze konden niet door water heen gelegd worden.
Een supergrid was onmogelijk.

Tegenwoordig is elektriciteitstransport door water en over lange afstanden geen probleem meer. De truc is om gelijkstroom op zeer hoge voltages te gebruiken. Deze techniek noemt men HVDC (High Voltage Direct Current). De verliezen zijn minder dan 3% per duizend kilometer. Bovendien is het per strekkende meter goedkoper dan een wisselstroomleiding. HVDC heeft ook nadelen: hoge investeringen aan het begin en het einde van de leiding. Daarom is het met name interessant voor grote afstanden en zware leidingen.[23]

Een mooi voorbeeld van een HVDC verbinding is de NorNed leiding tussen Noorwegen en Nederland. Nederland koopt goedkoop duurzame stroom (uit waterkracht) in Noorwegen. Nederland verkoopt stroom op momenten dat in Nederland de prijzen laag zijn. Het experiment is goed bevallen want de leiding verdiende zichzelf dubbel zo snel terug als gepland.

Een rekenvoorbeeld kan het belang van het smart grid wellicht illustreren.

Een Nederlands huishouden gebruikt gemiddeld 400 watt aan elektriciteit.

Stel dat tien mensen in de straat een elektrische auto hebben waarmee ze 200 kilometer kunnen rijden; dat ze die auto allemaal om zes uur 's avonds gaan opladen; en dat die auto in twee uur opgeladen kan worden.

Een gewone elektrische auto verbruikt ongeveer 0,15 kilowattuur per kilometer. 200 kilometer opladen in 2 uur is hetzelfde als 100 kilometer per uur. Dat is dus 15 kilowattuur in een uur ofwel 15 kilowatt vermogen.

Tien elektrische auto's vragen 10 x 15 is 150 kilowatt vermogen. Dat is evenveel als 375 gemiddelde huishoudens van 400 watt.

Zo'n enorme aanslag op het elektriciteitsnet betekent dat de elektriciteitsleiding in die straat verzwaard moet worden, een dure operatie waarbij ook veel overlast ontstaat omdat overal de straat opengebroken moet worden.

Maar stel dat we een slim netwerk hebben. In dat geval kunnen we de auto's die snel opgeladen moeten zijn (omdat er nog iemand naar blokfluitles moet o.i.d.) voorrang geven en kunnen we de andere auto's later op de avond of in de nacht opladen. De straat kan dicht blijven.

Het super smart grid van de toekomst

1 Wind is een belangrijke bron van energie, ook op zee.
2 Biobrandstoffen die geen extra grond of water kosten leveren energie, bijv. overtollige mest.
3 Iedereen kan energie produceren maar de voormalige energiebedrijven zijn daarnaast de "spin in het web" van het smart grid.
4 Zonnewarmtecentrales (CSP) in onbewolkte gebieden leveren veel energie.
5 Op afgelegen plekken zorgen mensen zelf voor duurzame energie en drinkwater. Decentraal opwekken is nog maar weinig duurder.
6 Vliegers en zwevende windmolens benutten de krachtige wind op grotere hoogte. Ze nemen op de grond nauwelijks plek in.
7 Hoge voltage gelijkstroom (HVDC) zorgt voor elektriciteitstransport over grote afstanden en zelfs door zee. Het verlies is slechts 3% per 1.000 kilometer en de kosten zijn lager.
8 Waterkrachtcentrales slaan energie uit zon en wind op en leveren weer terug als de wind niet waait en zon niet schijnt.
9 Fossiele energiecentrales worden zeldzaam.
10 Veel huizen wekken met zonnepanelen (PV) meer elektriciteit op dan ze gebruiken.
11 Overtollige elektriciteit kan worden opgeslagen in batterijen of zelfs waterstof.
12 Warmtepompen besparen veel energie.
13 Electrische auto's zijn niet afhankelijk van olie, gebruiken 1/3 van de energie en stoten geen CO_2 uit. De auto's leveren desgewenst energie terug vanuit hun batterijen. Hybride auto's kunnen zelfs dienen als aggregaat.
14 Het smart grid kan energiestromen monitoren en sturen. Het "praat" met auto's, koelkasten en andere "slimme" apparaten. Internet en het energienetwerk versmelten.
15 Ook grote gebouwen hebben warmtepompen.
16 Zonnepanelen om elektriciteit op te wekken en goede isolatie zorgen ervoor dat veel gebouwen energieneutraal zijn.
17 Sommige gebouwen slaan overtollige energie op in waterstoftanks. Die energie kunnen ze later met brandstofcellen weer terugwinnen.
18 Parkeerplaatsen zijn voorzien van oplaadpunten en waar mogelijk zonnepanelen.
19 Auto's die langere afstanden moeten afleggen kunnen langs de snelweg in enkele minuten weer elektrisch worden geladen.
20 Op zee winnen we wellicht energie uit eb en vloed, oceaanstroming of uit het warmteverschil tussen oppervlaktewater en de diepzee.
21 Satelieten zorgen voor steeds nauwkeurigere weersvoorspellingen zodat we per minuut weten hoeveel energie zon en wind we gaan opwekken.

Het smart grid: een slim elektriciteitsnetwerk
"Met mijn afdeling van vijf man kan ik de BV Nederland een paar miljard helpen besparen." Han Slootweg is als innovatiemanager verbonden aan netwerkbedrijf Enexis en tevens de eerste "hoogleraar smart grids" van Nederland. In 2007 won hij de Hidde Nijland Prijs voor een promotieonderzoek dat elektriciteitsnetwerkbedrijven helpt om meer windkracht aan het elektriciteitsnet te koppelen zonder dat de kwaliteit van de geleverde elektriciteit daar onder leidt. En hij mag de dingen graag helder zeggen.

"We gaan nu nog uit van de zogenaamde *koperen-plaat-gedachte*", vervolgt hij. "Dat betekent dat het netwerkbedrijf moet zorgen dat er voldoende kabels in de grond liggen om altijd en overal aan de vraag naar stroom te voldoen. Het betekent ook dat er enorme investeringen in het netwerk nodig zijn." Slootweg pleit daarentegen voor een slim elektriciteitsnetwerk waarin de vraag naar stroom gestuurd kan worden: "Dat kost nog steeds een hoop geld, maar wel een stuk minder."

Zo'n slim elektriciteitsnetwerk of smart grid monitort continu zijn eigen functioneren en kan direct reageren op problemen. Het kan apparaten die met het netwerk verbonden zijn bijvoorbeeld vragen om tijdelijk te stoppen met het afnemen van stroom. De elektrische auto is het eerste apparaat waarmee het slimme netwerk graag zou willen communiceren. De elektrische auto is namelijk een relatief grote stroomverbruiker en het moment waarop hij wordt opgeladen is relatief makkelijk te verschuiven. Een auto staat gemiddeld namelijk meer dan 90% van de tijd stil.

De slimme koppeling met de auto kan fluctuaties in het aanbod van (duurzame) elektriciteit opvangen. Bijvoorbeeld door even snel een overschot aan wind weg te werken. Elektrische auto's helpen ook om de business case voor windmolens op zee rond te krijgen.[24]
Al met al helpen elektrische auto's om meer elektriciteit uit zon en wind te produceren. "Waarbij wel geldt dat niet alleen de techniek, maar ook de wet- en regelgeving erop voorbereid moeten zijn", aldus Slootweg.

De zon is onvoorstelbaar groot

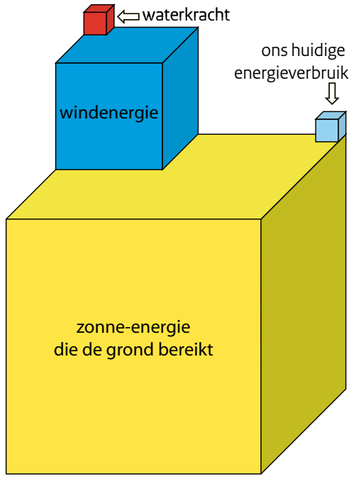
Hier zijn de aarde en zon op schaal afgebeeld. Die grote *"vuurbal"* produceert 3,89 x 10^{26} watt. Voor mensen die energie willen besparen is het misschien ontnuchterend om te beseffen dat ruim 99.9999999% van die energie zo de lege ruimte in straalt. De aarde is vanuit de zon gezien een klein stofje op 150 miljard kilometer afstand. *"Slechts"* 174 petawatt bereikt de aarde, maar het is genoeg. Het is meer dan 10.000 keer de 15 terawatt die de mensheid nu gebruikt. Onze bekende fossiele reserves zijn genoeg voor 50 tot 100 jaar.[25] Stel dat we die hele voorraad olie, gas en kolen in 1 jaar zouden delven en verbranden. Dan nog levert dat minder energie op dan 1% van de zonne-energie die elk jaar de aarde bereikt. Ongeveer 99,98% van de energie op aarde komt direct of indirect van de zon. De rest komt uit aardwarmte, getijdenkracht en kernenergie.

Er is duurzame energie in overvloed

De zon geeft ons per uur meer energie dan de mensheid in een jaar gebruikt en technisch gezien kunnen we die energie in overvloedige hoeveelheden oogsten.

Op pagina 20 toont een rekenvoorbeeld hoe een mens met spierkracht gemiddeld 30 watt kan produceren. Zelfs in ons druilerige Nederland vangt een vierkante meter grond gemiddeld 114 watt zonne-energie op: bijna vier keer zoveel. In totaal valt er 10.000 keer zoveel energie op de aarde als we nodig hebben.

> "We kijken de hele tijd naar benéden. We moeten juist omhóóg kijken!"
>
> *Herman Wijffels, door Trouwlezers gekozen tot de meest invloedrijke "duurzame Nederlander" van 2008*



Energie verbruik

De mensheid gebruikt 15 terawatt aan energie. Die energie komt nu vooral uit fossiele brandstoffen. Ze wordt onder meer gebruikt voor industrie, transport, verwarming en elektriciteit.[26]

Van de 175 petawatt zonne-energie die de aarde bereikt valt 25 petawatt op vaste grond in de vorm van stralingsenergie. Stel dat we daar 1% van gebruiken, bijvoorbeeld door 5% van het aardoppervlak te bedekken met de huidige zonnecellen of zonnewarmtecentrales die 20% efficient zijn. Dat levert 250 terawatt op: 17 keer zoveel energie als we nodig hebben.[27]

Circa een half procent van de zonnestraling wordt omgezet in luchtstromingen: 1 petawatt ongeveer. Als we daar met windmolens 2% van onderscheppen hebben we nog steeds meer dan genoeg energie.

Een klein deel van de straling en de luchtstromingen zorgt voor regen die weer voor waterkracht zorgt. Daarmee zouden we in theorie de helft van onze energiebehoefte kunnen dekken. In de praktijk zijn de meeste rivieren die zich lenen voor waterkracht al in gebruik en de groei die we hier nog kunnen realiseren is beperkt.

Andere energiestromen zoals aardwarmte, oceaanstromingen en getijden zijn qua omvang minder groot maar op bepaalde plaatsen ook zeer interessant.

Windenergie
Wind is op dit moment de goedkoopste en meest volwassen vorm van duurzame energie. Windmolens zijn per kWh het goedkoopst als ze groot zijn. We praten dan over kolossen van 150 meter hoog met een vergelijkbare rotordiameter. Groter en een stuk opvallender dan de Euromast (de bobbel zit daar op 100 meter hoogte). Zulke kolossen hebben een piekvermogen van rond de 5 megawatt maar omdat de wind fluctueert blijft daar gemiddeld maar 1 megawatt van over.[28] Een grote kolencentrale kan daarentegen wel 1.000 megawatt produceren. Er zijn dus 1.000 windmolens, elk groter dan de Euromast, nodig om een grote kolencentrale overbodig te maken!

Om die reden wordt in dichtbevolkte landen vaak voorgesteld om uit te wijken naar windmolens op zee: daar waait het veel harder; er is ruimte genoeg; en niemand hoeft dan vanuit zijn huis tegen een windmolen aan te kijken. Het nadeel is de hogere prijs. Het Energieonderzoek Centrum Nederland schat dat wind op het land in 2020 rond de 8 cent per kWh zal kosten (vergelijkbaar met de geschatte prijs van kolen in 2020) terwijl wind op zee gemiddeld ruim een cent per kWh meer kost.[29]

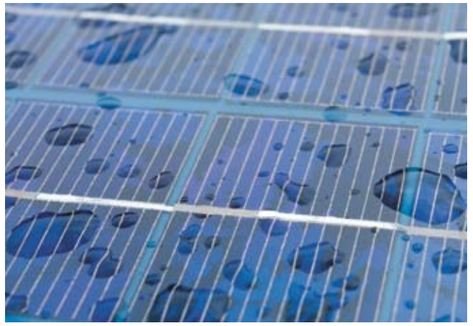
Een andere optie is om uit te wijken naar dunbevolkte gebieden met veel wind waar de prijs van windenergie nu al lager is dan die van kolen.[30] Bijvoorbeeld rond de Rode Zee, de kust van Marokko en Noord-Siberië. Voor transport naar Nederland is dan wel een zogenaamd supergrid nodig.

Tenslotte zou er gebruik gemaakt kunnen worden van vliegers en vliegende windmolens op grote hoogte. Zulke constructies zijn nauwelijks zichtbaar vanaf de grond, veilig voor vogels en ze gebruiken de bijzonder krachtige en relatief constante wind op grote hoogte. Voorstanders van vliegende windmolens claimen dat deze methode uiteindelijk veel goedkoper wordt dan bijvoorbeeld windmolens op land of op zee. Een internationaal bekend initiatief om die wind op grote hoogte te benutten komt van de Delftse hoogleraar en ex astronaut Wubbo Ockels.[31] Hij stelt voor om een laddermolen te construeren bestaande uit grote vliegers die over een afstand van 1 tot 5 kilometer boven de grond energie leveren. Hij heeft plannen gemaakt voor grote vliegers aan een enkele kabel die samen 100 megawatt kunnen leveren, genoeg stroom voor circa honderdduizend huishoudens.[32]

Concentrated Solar Power
Concentrated Solar Power (CSP) betekent het gebruikmaken van spiegels die zonlicht concentreren. Dat geconcentreerde zonlicht verwarmt vervolgens een vloeistof en uiteindelijk wordt die gebruikt om elektriciteit mee op te wekken. Sommige varianten gebruiken vlakke spiegels die de zon naar een centrale toren plaatsen. Andere werken met lange *"troggen"* van parabolische spiegels. Normaal gesproken gaat het (anders dan bijvoorbeeld bij zonnecellen) om grote centrales die een gebied van meerdere hectares of zelfs vierkante kilometers beslaan.

Spiegels werken alleen goed in gebieden waar het meestal wolkenloos is. Dus niet in Nederland maar bijvoorbeeld in Zuid-Spanje of de Sahara. De prijs is nu nog hoger dan van bijvoorbeeld kolen maar de voorstanders zijn ervan overtuigd dat dit niet zo zal blijven.

Met CSP kan je de energie op een ander moment opwekken dan aanbieden. Je kunt energie opwekken als de zon fel schijnt en die energie pas aanbieden op het moment dat de vraag naar elektriciteit het hoogst is. Dat komt omdat CSP in eerste instantie warmte opwekt. Die warmte kan je vrij eenvoudig opslaan. Wanneer je die warmte weer omzet naar elektriciteit is flexibel.



Zonnepanelen
Zonnepanelen zijn nog duur maar bieden ongekende mogelijkheden. Je kunt overal waar de zon het aardoppervlak bereikt direct elektriciteit opwekken. Het enige wat je nodig hebt is een flinterdunne film die zonnestraling omzet in energie. Dat materiaal is duurzaam en geeft 30 jaar lang energie. De methode leent zich voor een paar vierkante milimeter zonnecellen voor in een horloge; een paar vierkante meter op je dak; en een paar vierkante kilometers die een elektriciteitscentrale vervangen.

Zonnecellen kunnen in theorie de goedkoopste energiebron worden maar ze hebben nog een lange weg te gaan. Groei is belangrijk om de prijs te verlagen. Nu is die groei nog helemaal afhankelijk van subsidies en bedrijven zijn terughoudend om op basis daarvan te investeren. De industrie kijkt reikhalzend uit naar het moment dat zonnepanelen op het dak goedkoper worden dan elektriciteit uit het stopcontact. Grid parity noemt men dat. Vanaf dat moment zullen zonnecellen ook zonder subsidie rendabel zijn en vanaf dat moment is een stabiele en robuuste groei te verwachten. Zonrijke gebieden met dure stroom bereiken die grid parity het eerste. Zo is langzaamaan grid parity bereikt in Zuid-Italië en Californië. Volgens de roadmap van de Nederlandse branchevereniging van de zonne-energiesector Holland Solar wordt grid parity in Nederland bereikt in 2020.[33]

Duurzame elektriciteit wordt goedkoper dan fossiele energie

De elektrische auto geeft ons de optie om over te schakelen op duurzame energie. Die optie wordt interessanter naarmate fossiele energie duurder en duurzame energie goedkoper wordt.

Energie kan goedkoper worden geproduceerd als de productie grootschaliger wordt aangepakt of als de productie slimmer kan. Wat betekent dat voor fossiele en duurzame energie?

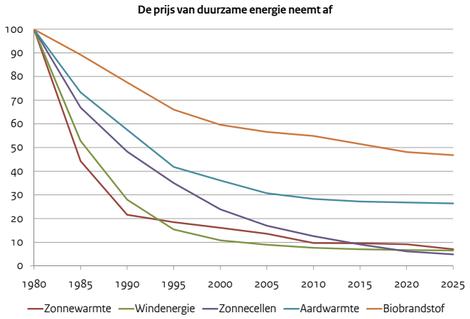
Fossiele energie kan niet meer opschalen: we halen op dit moment bijna al onze energie uit fossiele bronnen. Verder zijn de mogelijkheden om fossiele energie slimmer op te wekken ook beperkt. Bij een computerchip kan je met meer slimmigheid wel duizend keer zoveel rekenkracht uit dezelfde hoeveelheid grondstof halen. Bij een kolencentrale of een auto zijn nog belangrijke verbeteringen mogelijk, maar de winst die nog te halen valt is beperkt.

Er is eerder een trend de andere kant op: voor elke kilo kolen die zij verbrandt produceert een kolencentrale drie kilo CO_2. Als die CO_2 in de toekomst via CCS (Carbon Capture and Sequestration) wordt afgevangen dan moet er voor elke kilo kolen die wordt aangevoerd drie kilo CO_2 worden afgevoerd. Daarmee wordt het systeem in één klap vier keer zo materiaalintensief. Die CO_2 moet via een nog aan te leggen buizenstelsel getransporteerd worden naar plekken die de CO_2 duizenden jaren ondergronds zullen vasthouden: een kostbare en complexe operatie.

Duurzame technologie kan daarentegen wel schaalgroottevoordelen boeken. De afgelopen jaren daalde de prijs van zonnecellen (photovoltaic/PV) bijvoorbeeld steeds met 20% als de productie verdubbelde. Stel dat we die trend doortrekken totdat de helft van onze energie uit zonnecellen komt. Dan zou de productie nog 16 keer verdubbelen en zou de prijs dalen tot 4% van wat hij nu is. Zonnecellen zijn dan 5 keer zo goedkoop als kolen.

Duurzame energie kan ook nog veel slimmer, net als bij de computerchips. Zo kan je in theorie uit een paar gram grondstof voor zonnecellen evenveel energie halen als uit een paar ton kolen. Windmolens profiteren van slimmere productietechnieken doordat de bladen steeds langer en aerodynamischer worden. Eigenlijk geldt voor alle duurzame energiebronnen dat de technologie nog in de kinderschoenen staat en dat de efficiëntie per kilo materiaal nog veel groter zal worden.

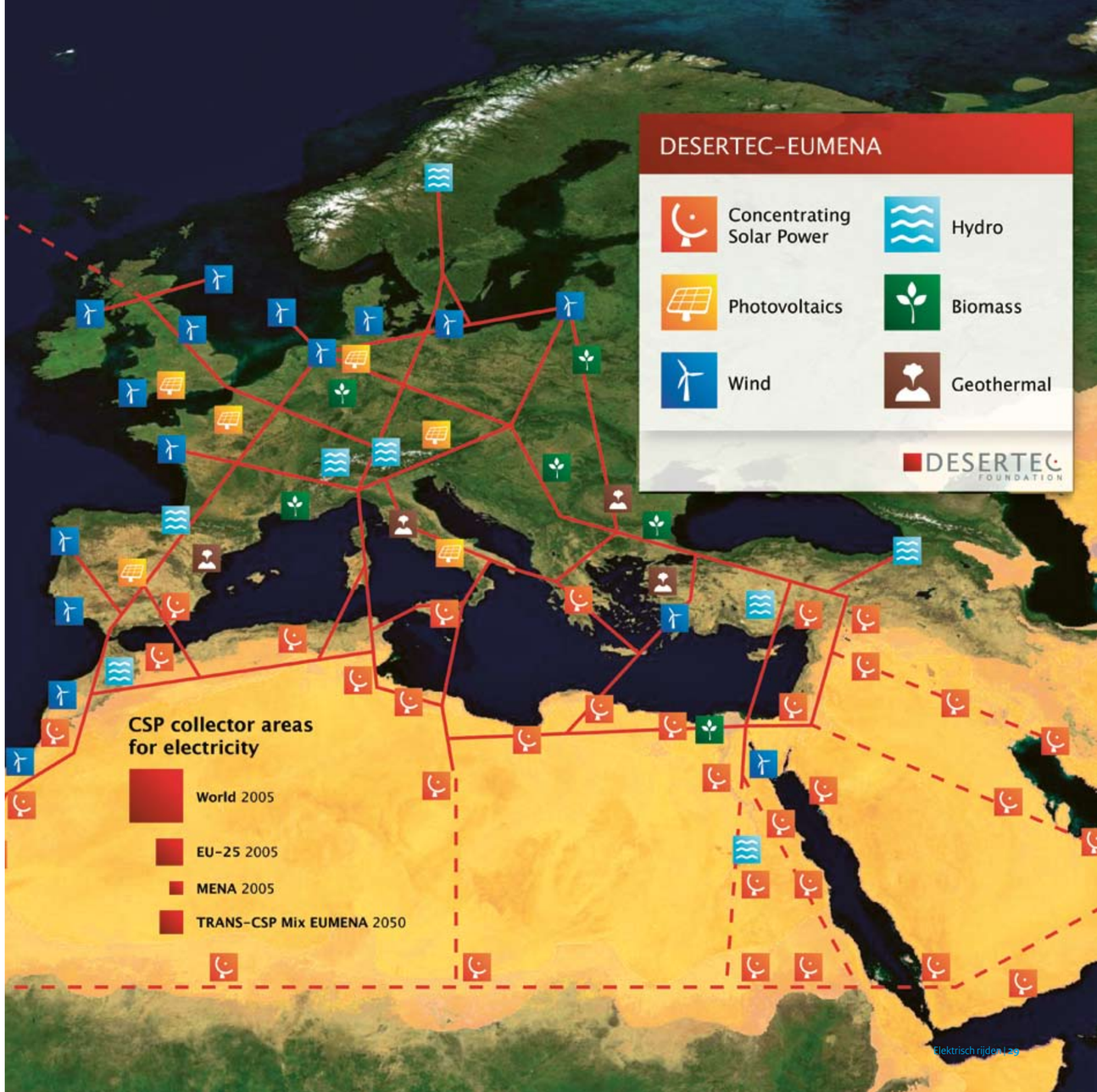
De voorzichtige energie-industrie rekent in haar planningen liever met de prijzen van vandaag dan met de prijzen van morgen. Daarom is de rol van duurzame energie in hun plannen nog beperkt. Maar naarmate de prijs daadwerkelijk zakt zal duurzame energie steeds vaker worden ingezet en zal de elektrische auto steeds vaker op duurzame elektriciteit rijden.



Duurzame energiebronnen zijn sinds 1980 sterk in prijs gedaald. Als we de prijs van de energiebronnen in 1980 op 100% zetten (de linker as) dan zien we dat ze vanaf dat moment allemaal sterk in prijs gedaald zijn. Bij windenergie (wind), zonnewarmte (Solar Thermal) en zonnecellen (PV) was de prijsdaling tussen 1980 en 2010 het sterkst. Wind is bijvoorbeeld meer dan 10 keer zo goedkoop geworden.

Het National Renewable Energy Laboratory (vergelijkbaar met het Energieonderzoek Centrum Nederland maar dan voor de Verenigde Staten) verwacht dat die prijsdaling zal doorzetten. Zonnecellen zullen volgens hen bijvoorbeeld een factor drie goedkoper worden tussen nu en 2025.[34]

Overigens is dit een sterke versimpeling van zaken. Elke bron van duurzame energie bestaat uit verschillende concurrerende technologiën en elke technologie heeft een eigen prijsontwikkeling. Zo zullen de kosten van windmolens op zee en windmolens in de lucht sneller dalen dan de rijpere technologie van windmolens op het land. Zonnecellen die op een dunne film worden geprint zullen zich sneller ontwikkelen dan de traditionele zonnecellen uit plakjes silicium.



Een plan voor een duurzaam elektriciteitsnetwerk dat een groot gebied omspant. De rode blokjes boven de Sahara geven een gevoel voor de oppervlakte die er in totaal nodig is voor duurzame elektriciteit.

3 Van benzine naar batterij

We zitten midden in de derde confrontatie tussen brandstof en batterij. De belangrijkste rol is daarbij weggelegd voor de fabrikanten van betere autobatterijen.

"De elektrische auto heeft al twee keer het onderspit moeten delven in een confrontatie met de benzineauto. Je kunt me een 'bezorgde vader' vinden maar voorzichtigheid en realiteitszin zijn geboden als we willen dat het de derde keer beter afloopt."

Richard Smokers, expert duurzame mobiliteit TNO

Intermezzo

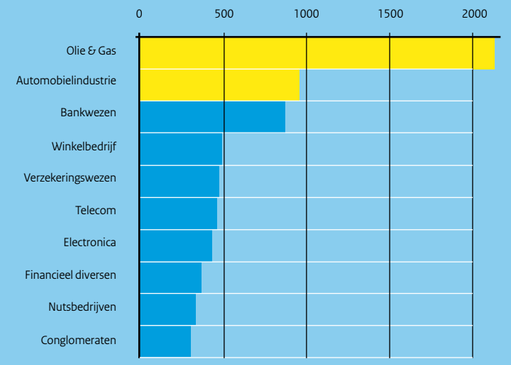
Marktpartijen met verschillende belangen

Elektrische auto's zijn een groeimarkt voor elektriciteitsmaatschappijen en batterijfabrikanten maar betekenen marktverlies voor de oliemaatschappijen.

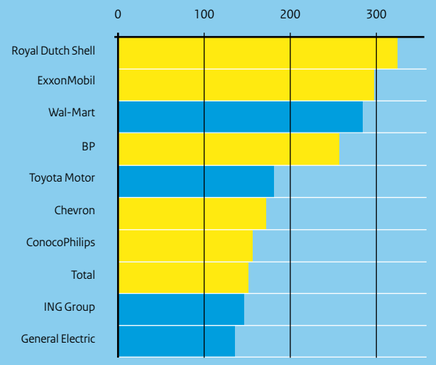
Het is logisch dat elektriciteitsmaatschappijen en batterijfabrikanten de elektrische auto proberen te stimuleren. Het is ook logisch dat oliemaatschappijen inzetten op verbeteringen in de brandstoftechniek, de overgang naar biobrandstoffen en dat zij de opkomst van de elektrische auto eerder proberen af te remmen. Het is tenslotte logisch dat de autoindustrie (net als elke andere industrie) weerstand heeft tegen verandering. Die logische weerstand komt wel van de twee grootste bedrijfstakken op aarde (volgens de Forbes top 100 van 2009).

Zes van de tien grootste bedrijven ter wereld zijn oliemaatschappijen.

De tien grootste sectoren van 2009
naar omzet in miljarden euro's



De tien grootste bedrijven van 2009
naar omzet in miljarden euro's



Eerste opkomst en ondergang

Na 1912 verdween de elektrische auto uit het straatbeeld: de benzineauto was goedkoper en bood een grotere actieradius. De introductie van de benzineauto werd verder gestimuleerd met marketing, goedkope olie, massaproductie en keiharde methoden.

In 1828 maakte de hongaar Ányos Jedlikin de eerste elektrische motor en elektrische auto. In Nederland zag men toen al dat dit goed was voor het milieu. In 1835 maakte de Groningse Professor Sibrandus Stratingh de tweede elektrische auto en hij merkte daarbij op dat deze als voordeel had dat er geen rookontwikkeling plaatsvond.

In 1859 werd de oplaadbare batterij uitgevonden door de Fransman Gaston Planté. Deze accu zit nu - 150 jaar later! - nog steeds in alle auto's.

In 1899 was het de Belg Camille Jenatzy (bijgenaamd *"de Rode Duivel"* vanwege zijn vlammende baard) die in een elektrische auto de magische grens van 100 kilometer per uur wist te doorbreken. Het raketvormige voertuig heette toepasselijk de "Jamais Contente" (nooit tevreden).

Elektrische auto's golden niet alleen als snel maar ook als luxe. Vergeleken met auto's op benzine waren ze stiller, schoner en betrouwbaarder. Bovendien hoefde je ze niet met de hand te starten, een activiteit die flink veel kracht vereiste en vaak gebroken duimen opleverde. Benzineauto's werden gezien als speelgoed voor hobbyisten die genoeg geld hadden om een vaste monteur in dienst te nemen. In 1900 werden er in Amerika 800 elektrische auto's en 400 bezineauto's verkocht. In 1912 bereikte de populariteit van de elektrische auto zijn hoogtepunt. In dat jaar waren er in de Verenigde Staten maar liefst 33.842 elektrische auto's geregistreerd.

Maar in 1920 verkocht Ford meer dan een miljoen auto's en was de elektrische auto uit het straatbeeld verdwenen. Wat was er gebeurd?

Begeerlijkheid
Benzineauto's werden begeerlijker omdat mensen steeds verder wilden rijden. De tank van een benzineauto was goed voor honderden kilometers ver rijden (tegen tien of twintig kilometer voor een batterij) en bovendien kon die tank snel worden bijgevuld. De benzinemotor werd ook steeds betrouwbaarder zodat een monteur in vaste dienst niet langer nodig was. In 1912 bedacht Charles Kettering dat je een benzinemotor kon "aanslingeren" met een kleine elektrische startmotor. Daarmee behoorden gebroken duimen tot het verleden en werd een benzineauto ook geschikter geacht voor dames.

Kostprijs
Aan het begin van deze eeuw was de Verenigde Staten de belangrijkste markt voor auto's. Op die markt introduceerde Henry Ford tussen 1908 en 1920 de eerste volksauto. Door gebruik te maken van een lopende band (destijds een revolutionair concept) kon hij de kosten spectaculair verlagen. Tekenend was ook zijn reactie toen bleek dat zwarte verf sneller droog was: "dan leveren we vanaf nu elke kleur, zolang het maar zwart is."

Ford wist met zijn visie en doortastendheid de prijs van zijn T-Ford onder de 7.000 euro te brengen. De prijs van een eenvoudige elektrische auto lag daarentegen rond de 30.000 euro! (Alles omgerekend naar hedendaags geld.)

Misschien wel net zo belangrijk was een historische gebeurtenis in 1901 in Spindletop, Texas. Hier werd een oliebron aangeboord die zo rijk was, dat de olie met grote kracht uit de grond kwam spuiten: de eeuw van "het zwarte goud" was begonnen en de prijzen zouden meer dan vijftig jaar rond de 20 dollar per vat schommelen. Lage olieprijzen vertaalden zich in lage benzineprijzen. Olie had bovendien nog een goed imago. Het stond symbool voor een nieuwe en betere tijd.

Strategie
Als we naar begeerlijkheid en kosten kijken dan had de benzineauto het tij mee. Dat de introductie zo snel ging had echter alles te maken met de strategie die de autofrabrikanten volgden. Dit waren mensen met een visie: ze zagen de auto niet als een luxe die aan de allerrijksten was voorbehouden maar als iets waarvan ook de middeklasse gebruik moest kunnen maken. Niemand belichaamde die visie beter dan Alfred P. Sloan, de directeur van General Motors (GM), de grootste autofabrikant ter wereld. Sloan drukte de missie van GM kernachtig uit als: "Een auto voor elke portemonnee en elke doelstelling."

Hij maakte gebruik van nieuwe concepten als marketing, merknamen en merkentrouw om die visie over te brengen op de consument. Zo slaagde hij erin om mensen een deel van hun identiteit aan het product te laten ontlenen en die produkten een stoer en sexy imago te geven. In het bijzonder slaagde hij er in om de lange afstanden die je met benzineauto's kon afleggen in verband te brengen met gevoelens van vrijheid en autonomie, zelfs bij mensen die vrijwel nooit ver zouden gaan rijden. Sloan bedacht ook dat je binnen een merk een reeks van steeds duurdere modellen moest hebben. Zo kon de merkentrouw gebruikt worden om een consument naarmate hij ouder en rijker werd een steeds duurdere auto te verkopen. Die visie ging hand in hand met voor die tijd geavanceerde productieconcepten zoals de lopende band waarbij grote investeringen zich vertaalden in een lage prijs per product. Zo kwam de auto ook binnen het bereik van de middenklasse en daarmee werd de afzetmarkt vele malen groter.

In Europa lukte het mede in verband met twee wereldoorlogen maar beperkt om de consument over te halen. Sloan herkende in Hitler echter een medevisionair en een man die het belang van de auto wel inzag. Hij slaagde er via dochteronderneming Opel in om het merendeel van de markt voor personenauto's en trucks in Duitsland te bemachtigen. Zeer succesvol was de truck van het type "Blitz".

Sloan werkte ook nauw samen met de zogenaamde "oliebaronnen". Ook dat waren mensen met visie die geloofden in schaalvergroting. De bekendste was John D. Rockefeller met het bedrijf Standard Oil. Rockefeller bereikte de schaalvergroting door concurrenten op te kopen. Als ze niet opgekocht wilden worden gebruikte Rockefeller zijn machtspositie om ze failliet te laten gaan. Hij zorgde er voor dat ze hun producten niet of alleen tegen zeer lage prijzen konden verkopen. Het was een onorthodoxe en soms illegale aanpak die er later toe leidde dat Standard Oil van de wetgever en rechter moest worden opgebroken. Het droeg echter wel bij aan een lagere benzineprijs en het maakte van Rockefeller de rijkste man op aarde.

Een goed voorbeeld van de daadkrachtige samenwerking tussen Sloan en de oliebaronnen was het bedrijf "National City Lines". Dit bedrijf kocht elektrische trams op en verving ze door bussen met een brandstofmotor. Die bussen en de brandstof werden uiteraard geleverd door Rockefeller en Sloan. Ook dit plan werd later illegaal bevonden maar toen had Sloan zijn doelstelling al bereikt.

Van links naar rechts. De Jamais Contente die in 1899 als eerste auto sneller ging dan 100 kilometer per uur. De Lohner-Porsche Mixte uit 1900: de eerste hybride automobiel. De spuiter van Spindletop waarmee in 1901 de eeuw van de olie aanbrak.

Van links naar rechts. Tweemaal de lopende band waarop de T-Ford werd geproduceerd. Alfred P. Sloan, de godfather van de automobielindustrie.

Tweede opkomst en ondergang

De elektrische auto kreeg tussen 1995 en 2001 een nieuwe kans. Een handjevol mensen ontketende bijna een revolutie. Ze verloren maar legden wel de basis voor huidige opkomst van de elektrische auto.

In 1993 viel er een uitnodiging op het bureau van General Motors (GM) CEO Roger Smith. Of GM deel wilde nemen aan de "solar challenge": dwars door Australië op alleen de energie van de zon. Hij had net Hughes Aviation gekocht en wilde graag laten zien wat er mogelijk was met "ruimtevaarttechnologie voor de auto" zoals hij het noemde. Hij vroeg de vicepresident van Hughes Aviation of dit niet een mooie kans was voor een showcase. De vicepresident wilde wel maar wist dat hij hulp van een externe partij nodig had. Hij huurde het kleine bedrijfje Aerovironment in en indirect de freelance ingenieur Alan Coccony.

Uiteindelijk zou het Coccony zijn die de electronica maakte voor de eerste moderne elektrische auto. Die elektronica wordt nu ook gebruikt in de Tesla en verschillende andere types elektrische auto's in de VS. Maar eerst moest er nog een auto op zonnecellen komen. GM won de race en ineens kon Aerovironment direct met Roger Smith zelf praten. Resultaat was de opdracht om een elektrische auto te maken waarmee Hughes Aviation gepromoot kon worden. Het mocht 2 miljoen euro kosten.

Toen die auto nog geen anderhalf jaar later op de autoshow verscheen leidde dat tot bijzonder goede PR voor GM en Hughes Aviation. Dat Aerovironment en Coccony het belangrijkste werk hadden gedaan werd natuurlijk niet bekend. Smith kondigde aan dat hij er misschien wel een productiemodel van ging maken.

De EV1 (de benaming was een afkorting van Electric Vehicle nr. 1) trok de aandacht van Jannana Scharpless, voorzitster van het California Air Resource Board (CARB). Zij was met het CARB verantwoordelijk voor de luchtkwaliteit in Californië en die was mede door het intensieve autoverkeer dramatisch slecht. Smog zorgt in Californië ieder jaar voor duizenden doden, 1 op 4 jongeren heeft last van zijn longen en de medische kosten van luchtvervuiling liggen tussen de 7 en 200 miljard euro per jaar.[35]

Scharpless zag de EV1 als het bewijs dat schone auto's mogelijk waren. Het CARB maakte vervolgens een simpele regel. Om in Californië te blijven verkopen moest een autofabrikant een bepaald percentage schone auto's op de markt brengen: 2% in 1998, 5% in 2001 en 10% in 2003.

Dit was absoluut niet de bedoeling van de automakers maar ze voelden zich verplicht met elektrische modellen te komen. GM kwam in 1996 met een productieversie van de EV1 op de markt en ondermeer Honda, Ford, Nissan en Toyota kwamen met elektrische conversies van bestaande modellen.

De EV1 was de eerste moderne elektrische auto en hij werd razend populair bij de paar honderd mensen die hem konden bemachtigen. Helaas had hij problemen met zijn loodbatterij. De tijd was rijp voor de bijdrage van Stanford Ovshinsky.

Ovshinsky (geboren in 1922 in Ohio als zoon van een ontwikkelde, maar arme Joodse immigrant) was zowel een geniale uitvinder (met ruim 400 patenten op zijn naam) als een bewogen idealist. In 1960 starte hij een ontwikkelbedrijfje met als missie om vervuiling en oorlog te helpen uitbannen door fossiele brandstof overbodig te maken. Dat bedrijfje ging een aantal keren bijna failliet maar Ovshinsky deed talloze uitvindingen, ondermeer op het gebied van zonnecellen. Ovshinsky besefte dat de batterij de bottleneck van de elektrische auto was en hij ontwikkelde een nieuwe batterij op basis van NikkelMetaalhydride. Deze NiMh batterij kon ruim tweemaal zoveel energie per kilo opslaan als de loodbatterij. Bovendien ging hij veel langer mee. GM herkende het belang hiervan en kocht een meerderheidsaandeel in het bedrijf.

Stanford Ovshinsky doorbrak de honderd jaar durende impasse in de ontwikkeling van batterijen door de nikkelmetaalhydride batterij uit te vinden.

Tot Ovshinsky's teleurstelling besloot GM dat de publiciteit niet gezocht diende te worden. Bovendien besloot GM rond de eeuwwisseling dat het van belang was om de wetgever in Californië ervan te overtuigen dat elektrische auto's nog niet mogelijk waren. Daarom vernietigden ze al hun elektrische auto's en verkochten ze de aandelen van het bedrijf van Ovshinsky aan de oliegigant Chevron. Ovshinky merkte later bitter op dat het niet verstandig was geweest om samen te gaan werken met een aandeelhouder die niet wil dat je bedrijf een succes wordt. Chevron maakte het de potentiële fabrikanten van elektrische auto's inderdaad lastig. Pas na een lange reeks rechtszaken mocht Toyota de batterij toepassen in de Toyota Prius. De patenten lopen in 2015 af. Misschien komt de NiMh batterij dan alsnog tot bloei.

De tweede generatie EV1 met de NiMh batterij van Ovshinsky kwam in 1999 op de markt. Hij had een actieradius van 150-200 kilometer en kon geleased worden voor 250 tot 400 euro per maand.

Maar wilden mensen hem wel leasen? GM had mensen er decennia lang van proberen te overtuigen dat ze enorme auto's met grote motoren en een grote actieradius nodig hadden om vrij te zijn en hun identiteit tot uitdrukking te brengen. Hoe zouden ze reageren op een kleine auto (twee zitplaatsen) met een beperkte actieradius die je in eerste instantie alleen thuis op kon laden?

GM nam 13 jonge mensen aan, gaf ze een training en liet ze vervolgens hun eigen gang gaan in Californië. De bekendste werd Chelsea Sexton, een knappe roodharige jonge dame die wel eens gekscherend de Nicole Kidman van de elektrische auto wordt genoemd. Zij was net als haar man (een EV1 monteur) helemaal gek van deze elektrische auto en wist dit enthousiasme goed over te brengen op potentiële kopers.

Maar uiteindelijk stopte GM met de productie. Veel mensen wilden de EV1 dolgraag kopen maar dat was geen optie. Toen Sexton in 2001 werd ontslagen was er een lange wachtlijst van mensen die de auto wilde huren of kopen maar alle EV1's werden opgehaald en naar de sloper gebracht. De andere fabrikanten volgden dezelfde weg en al snel reed er geen elektrische auto meer op de Californische weg. GM kocht vervolgens het merk Hummer (het meest benzineverbruikende merk personenauto dat ooit verkocht is) en besloot daar verder in te investeren.

Deze hele episode deed het nodige stof opwaaien. Er werd zelfs een succesvolle film aan gewijd genaamd: "Who killed the electric car?" die vooral de oliebedrijven en GM aanwees als de schuldigen.

Begeerlijkheid
Klanten gaven hoog op van de fantastische rijeigenschappen, het magische gevoel van de krachtige geleidelijke versnelling van de elektrische motor, en het fijne gevoel dat je in een auto reed die de verslaving aan olie doorbrak. Tom Hanks drukte dat gevoel tijdens de David Letterman show kernachtig uit: "Ik red Amerika David, dat is wat ik doe!" Bekende acteurs als Mel Gibson bewogen hemel en aarde om de auto te kunnen leasen. Andere bekende acteurs werden gearresteerd toen zij probeerden om de sloop van de auto's te voorkomen. Voor elke auto die GM uiteindelijk liet vernietigen was er een koper die getekend had voor de waarde van de auto. De auto heeft nog steeds (ondanks het feit dat hij niet meer te krijgen is) een fanatieke fanclub.

Kostprijs
De oorspronkelijke prijs was € 24.000,- ($ 34.000,-) of beter een huur van 200-400 euro per maand. De Toyota RAV-EV was wel (kort) te koop voor € 21.000,-. Voor beide auto's was er een wachtlijst.

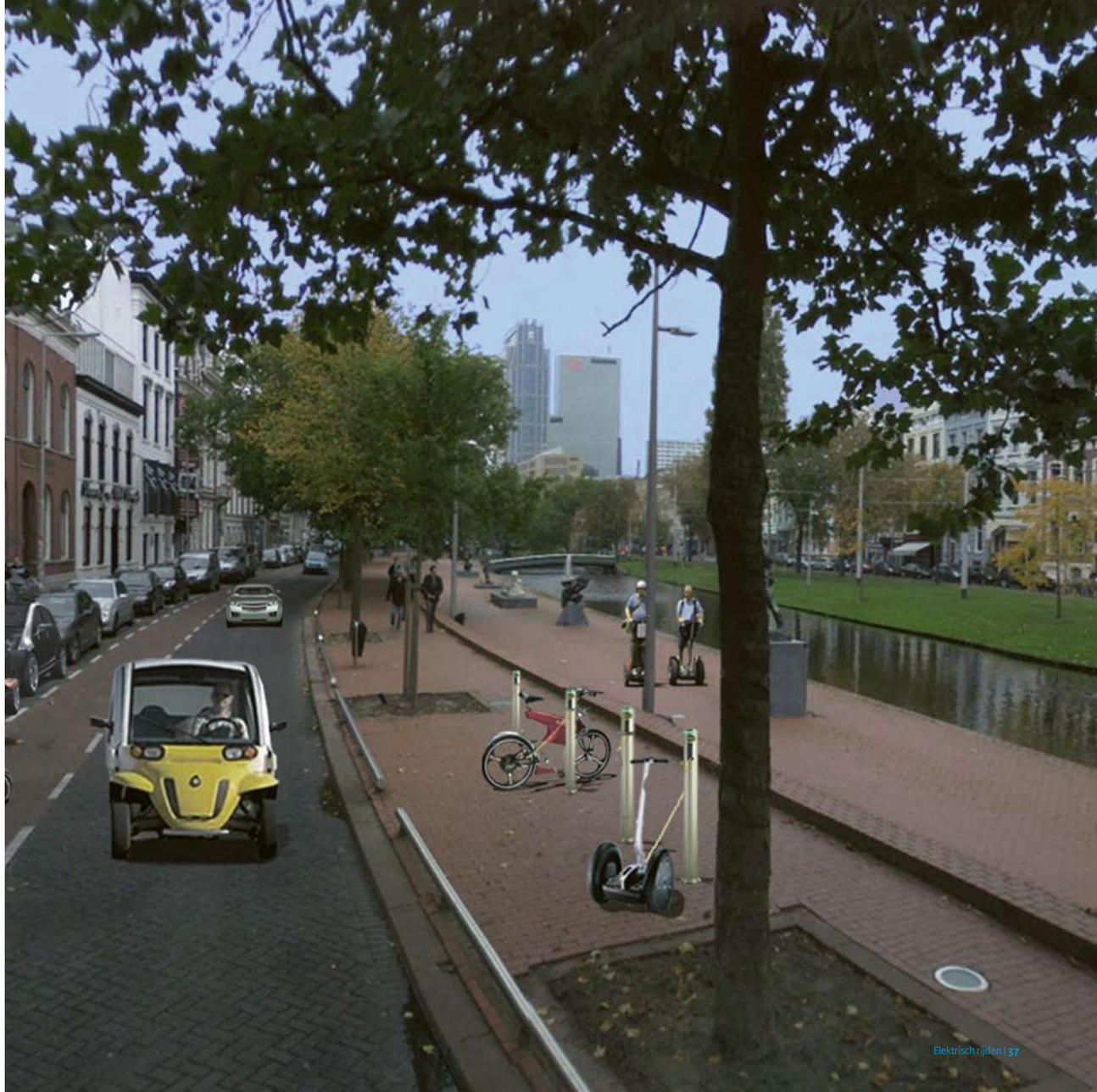
Strategie
Wat de autofabrikanten goed gedaan hadden was het aanstellen van ontwerpers die begrepen dat een elektrische auto iets nieuws was. Eigenlijk hadden de ontwerpers zichzelf aangesteld. Zij zochten het in een luxe product waarin de betere rijeigenschappen optimaal tot hun recht kwamen. Het gestroomlijnde uiterlijk en de lichte materialen benadrukten een sportief imago en zorgden ervoor dat de auto zelfs op loodbatterijen redelijk presteerde. Het was geen auto die probeerde te voldoen aan het heersende beeld. Ook een goede zet was het aanstellen van onafhankelijke verkopers die geen last hadden van de bestaande bedrijfscultuur.

Dat het CARB de auto verplicht stelde was op zich ook een positieve zet voor de elektrische auto. Loodvrije benzine, hoofdsteunen, autogordels, airbags en katalysatoren zijn er ook bij wet gekomen. In alle voorgaande gevallen hebben de CEO's van autofirma's echter gedreigd fabrieken te sluiten en claimden zij failliet te gaan als de wetgeving er zou komen. Je moet dus wel beseffen dat je weerstand oproept en je moet bereid zijn om voet bij stuk te houden en daarop ging het fout. Uiteindelijk zwichtte de nieuwe voorzitter van het CARB voor de druk van de autofabrikanten en de regering Bush. De automakers vernietigden vervolgens alle elektrische auto's. Scharpless, de voorzitter van het CARB die de regelgeving had ingevoerd stelde verbitterd dat het CARB zijn kans verspeeld had.[36]

Maar de elektrische auto had meer tegenwind, die in zekere zin was veroorzaakt door de Europese Unie. Die stelde in 1960 een invoerheffing op bevroren kippen in om boeren in de EU - vooral in West Duitsland - te beschermen. De VS reageerde met een heffing van 25% op bestelwagens, de enige soort auto die van West-Duitsland werd geëxporteerd naar de VS. De autoindustrie in de VS ontwikkelde vervolgens personenwagens die in de bestelwagen categorie vielen omdat ze groot en zwaar waren: de SUV's. In de jaren daarop kregen de automakers in de VS steeds meer concurrentie van de Japanse autoindustrie en de regeling kreeg daarmee impliciet een nieuwe doelstelling. Het eindresultaat is dat voor een zware auto (zoals een Hummer) een belastingvoordeel tot € 70.000,- mogelijk is en voor een elektrische auto slechts € 4.000,-.[37]

De waterstofauto werd door de autoindustrie met succes gepresenteerd als alternatief voor de elektrische auto. President Bush besloot de waterstofauto met miljarden te subsidieren. Oliebedrijven als Shell ontwikkelden enthousiast waterstofscenario's en BMW bouwde snel een brandstofmotor zodanig om dat hij op waterstof kon lopen. De gouverneur van Californië benoemde een voorstander van waterstof tot voorzitter van het CARB en deze verklaarde dat elektrische auto's te duur waren. De latere Gouverneur (Arnold Schwarzenegger) is ondermeer bekend van zijn Hummer op waterstof. Sceptici claimen echter dat waterstof nog een lange weg te gaan heeft en dat het enthousiasme van oliebedrijven vooral voortkomt uit het feit dat waterstof een brandstof is en dat hij nu van aardgas wordt gemaakt.

Ook biobrandstof wordt vaak gezien als een alternatief voor benzine en daarvoor als een alternatief voor elektrische auto's. De olie-industrie investeert momenteel ook op grote schaal in biobrandstof omdat zij hierin een mogelijkheid zien om op basis van hun bestaande businessmodel de markt te bedienen.



Intermezzo

Biobrandstof

Biobrandstof lijkt net als de elektrische auto een milieuvriendelijk alternatief voor de benzineauto. Helaas vraagt biobrandstof veel grondoppervlak en kunnen we tot nu toe niet voorkomen dat biobrandstof concurreert met natuur en voedsel.

Biobrandstof heeft vele voorstanders. Autofabrikanten vinden het prettig dat ze hun bestaande auto's kunnen blijven gebruiken. Oliebedrijven zien het als een manier om over te schakelen op een nieuwe brandstof. Politici willen met biobrandstof minder afhankelijk worden van dure buitenlandse olie. Boeren kunnen met biobrandstof in hun inkomen voorzien. De Europese Unie tenslotte wil met biobrandstof de CO_2-uitstoot reduceren zodat voldaan kan worden aan de eisen uit het verdrag van Kyoto. Biobrandstof als alternatief voor de auto heeft echter een aantal haken en ogen.

"Voor de productie van biobrandstoffen is land nodig om de planten waaruit de biobrandstof gewonnen wordt te verbouwen. Het liefst vruchtbaar land waarop de opbrengsten zo hoog mogelijk zijn. Vanwege zijn vruchtbaarheid, is dat soort land echter meestal al in gebruik als landbouwgrond voor de teelt van voedselgewassen. Of het is onderdeel van waardevolle natuurlijke ecosystemen zoals tropisch regenwoud. Hierdoor is er een groot risico dat de productie van biobrandstoffen ten koste van voedselproductie en/of de natuur gaat als er geen strikt en samenhangend beleid wordt gevoerd op het gebied van energie, landbouw en milieu."[38]

Aan het woord is Louise Fresco, professor duurzame ontwikkeling aan de Universiteit van Amsterdam. Zij constateert vervolgens dat dit samenhangende beleid nog ontbreekt. Lucas Reijnders (prof. Milieukunde aan de UvA) vult die opmerking vervolgens aan: "Een verhoogde vraag naar een bepaald voedselgewas als grondstof voor biobrandstof leidt onmiddellijk tot hogere prijzen op de wereldmarkt. Dit treft direct de armste mensen op aarde die van het gewas in kwestie afhankelijk zijn voor hun voedselvoorziening".

Het omzetten van tropisch regenwoud naar grond waarop biobrandstof wordt verbouwd stoot bovendien meer CO_2 uit dan er in 30 jaar wordt opgenomen door de gewassen die nu biobrandstof gaan produceren. Aangezien die biobrandstof ook weer wordt verbrand maak je dat verlies niet snel goed. Bovendien wordt biobrandstof vaak niet gebruikt op de plaats waar het wordt geproduceerd en ook bij het vervoer (bijvoorbeeld van Indonesië naar Nederland) wordt CO_2 geproduceerd. Over de hele levenscyclus bezien leidt biobrandstof daarom zelden tot minder CO_2 in de atmosfeer.

Een betere manier om biobrandstof te produceren is volgens Fresco om de cellulose in de plant om te zetten naar brandstof. Dit proces is nu nog niet marktrijp maar wordt volop onderzocht. Dit proces zou in de toekomst de mogelijkheid kunnen bieden om een groter deel van de plant te gebruiken. Zo zou bijvoorbeeld de ongebruikte steel van voedselgewassen omgezet kunnen worden naar brandstof.

Reijnders waarschuwt dat ook het deel van het gewas dat na de oogst blijft liggen een functie heeft. Het zorgt ervoor dat het koolstofgehalte in de grond op peil blijft. Fresco en Reijnders zijn dan ook beiden van mening dat je slechts een deel (Reijnders schat het op 20%) van het residu straffeloos kunt gebruiken.

Reijnders constateert dat eigenlijk alleen gedegradeerd grasland als milieuvriendelijke optie overblijft. Dit land is echter niet populair omdat het een boer slechts weinig oplevert. Hij vraagt zich daarom af of we met biobrandsstof niet op de verkeerde weg zijn: "Met een efficiëntie van 0,16 procent voor de omzetting van zonlicht naar brandstof via de fotosynthese, is suikerriet het efficiëntste gewas op aarde. Ter vergelijking, moderne zonnecellen halen een efficiëntie van 12 procent bij de omzetting van zonlicht naar energie. In termen van landgebruik is het daarom misschien wel efficiënter om zonnecellen te plaatsen op gedegradeerde gronden in plaats van ze te gebruiken voor de productie van biobrandstof."

Rijden op zonnecellen is per m² ongeveer 500 keer efficiënter dan op biobrandstof

Intermezzo

De rol van waterstof

De waterstofauto is geen korte termijn alternatief voor, maar meer een lange termijn aanvulling op de elektrische auto.

Waterstof auto's en elektrische auto's worden allebei aangedreven door elektromotoren. Een waterstof-auto neemt de energie echter mee in de vorm van (hoe kan het ook anders) waterstof die onderweg door een brandstofcel wordt omgezet in elektriciteit.[39]

Waterstof heeft de potentie om elektrische auto's een grote actieradius te geven. Het is een "range-extender" voor de elektrische auto, vergelijkbaar met een hulpmotor op benzine of biobrandstof.[40] In theorie kan er veel energie meegenomen worden. Een kilo waterstof bevat 143 megajoule per kilogram: 3 keer zoveel als benzine en honderden keren zoveel als een lithium batterij. Waterstof moet echter samengeperst worden in een gastank die vergeleken met de waterstof erg zwaar is. Op dit moment streeft de industrie naar 9 megajoule per kilo. Met een cilinder van iets meer dan 100 kilo zou een auto dan bijna 1.000 kilometer ver kunnen rijden! Die tank is overigens wel erg omvangrijk.[41]

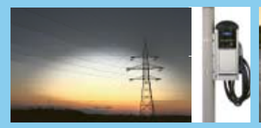
Op dit moment wordt waterstof meestal gemaakt van brandstof. Dat zorgt in de stad voor een stille schone auto maar de CO_2-uitstoot is vergelijkbaar met die van een gewone benzineauto.

Waterstof moet wel eerst gemaakt worden. Dat kan volkomen duurzaam door middel van elektrolyse maar over de hele keten heen kost dit driemaal zoveel duurzame energie als bij een puur elektrische auto. Over hybride auto's die op elektriciteit en benzine reden is betoogd dat het om verschillende redenen al snel interessant wordt om een grotere batterij in te bouwen die je op de parkeerplek kunt opladen. Wellicht is het ook voor een hybride die op elektriciteit en waterstof rijdt een interessante optie. Je rijdt dan meestal op elektriciteit maar voor de langere afstanden kan je omschakelen op waterstof.

De technologie die nodig is voor de waterstof auto staat nog in de kinderschoenen. Er zijn doorbraken nodig met betrekking tot de productie, distributie en opslag van waterstof. En de brandstofcellen moeten beter en goedkoper worden. De afgelopen jaren is er op elk van die vier gebieden grote vooruitgang geboekt, maar niet iedereen is optimistisch over de kansen van waterstof. Steven Chu, de Nobelprijswinnaar en "energie Tsaar" van de Amerikaanse president Obama verwoordde zijn scepsis als volgt: "We hebben vier wonderen nodig, en zelfs heiligen hebben maar drie wonderen nodig."

Rijden op elektriciteit is efficiënter dan rijden op waterstof

100%



transport en opladen
blijft over: 86%

elektrische auto
blijft over: 69%

100%

elektrolyse
blijft over: 70%

compressie en distributie
blijft over: 50%

brandstofcel
blijft over: 27%

elektrische auto
blijft over: 22%

De derde opkomst van de elektrische auto

De eerste ondergang van de elektrische auto rond 1920 kwam omdat de benzineauto bood wat mensen wilden en omdat olie spotgoedkoop was. De doortastende aanpak van de producenten van benzineauto's versnelde de opkomst van de benzineauto en de ondergang van de elektrische auto maar veroorzaakte haar niet.

De tweede ondergang in Californië rond 2003 was een ander verhaal. De EV1 wist in eerste instantie door te breken ondanks het feit dat er maar door een handjevol mensen aan gewerkt was. Actieve bemoeienis van de automobielindustrie, oliemaatschappijen en centrale overheid waren noodzakelijk om de introductie te dwarsbomen.

En zelfs toen bleek het een pyrrusoverwinning. Het van de weg halen van alle elektrische voertuigen riep veel weerstand op en er werd een film over gemaakt: "Who killed the electric car?" De episode wordt door General Motors nu een PR-ramp genoemd.[42]

De EV1 verkoopster Chelsea Sexton werd door de film een ster en zij werd na haar ontslag ingehuurd door verschillende partijen die de elektrische auto wilden promoten.

De maker van de electronica van de EV1, Alan Coccony, was ook niet bij de pakken neer gaan zitten en was een samenwerkingsverband aangegaan met het startende autobedrijf Tesla Motors. Dit bedrijf wist met de Tesla Roadster sportwagen de elektrische auto een compleet ander imago te geven. De EV1 was snel maar de Tesla Roadster was een echte sportwagen. Hij was gebaseerd op een Lotus Elise chassis maar hij was aanzienlijk sneller dan de "gewone" Lotus. Bovendien kon je met de lithium-ion batterijen zo'n 400 kilometer ver rijden op 1 lading. De auto was duur (75.000 euro) maar razend populair.

Zeker zo belangrijk was de opkomst van de Toyota Prius. Hoewel de autofabrikanten in de VS van president Clinton flinke sommen geld hadden gekregen om een hybride te maken besloten ze uiteindelijk om zich te concentreren op beter gesubsidieerde auto's als de benzineverslinde Hummer. Toyota wilde echter niet achterblijven bij de VS en ontwikkelde de hybride wel helemaal uit. Daarbij maakte Toyota dankbaar gebruik van de NikkelMetaalhydride batterijen die Ovshinsky ontwikkeld had.

De Toyota Prius werd misschien wel de meest succesvolle auto van het afgelopen decennium en er zijn alleen al in de VS meer dan een miljoen van verkocht. Een voormalig directielid van GM vertelde dat de directie maar niet kon geloven dat Toyota er echt winst op maakte maar dat bleek een kostbare misrekening. Mede dankzij de Prius is Toyota nu het grootse autobedrijf en hebben ze het groenste imago. GM is intussen failliet gegaan en is na een doorstart voor 61% in handen van de staat. President Obama is van plan die invloed te gebruiken om snel elektrische auto's op de markt te laten brengen en zijn Nobelprijswinnende minister van Energie Steven Chu noemt de overgang naar elektrisch rijden "onontkoombaar".

Ook Europa zit niet stil. Door hogere accijns op benzine en subsidies voor juist zuinige auto's subsidiëren gebruiken de auto's hier inmiddels maar half zoveel benzine als de autovloot in de VS (gerekend per gereden kilometer). Met de stijgende olieprijzen en milieuwetgeving in het vooruitzicht is dat economisch gezien een veel betere positie.

Intussen heeft vrijwel elke grote autofabrikant een hybride op de markt: een auto met een krachtige elektrische motor en een flinke batterij. Bovendien hebben ze vrijwel allemaal aangekondigd binnenkort met een zogenaamde plug-in hybride te komen: een hybride die je op kunt laden uit het stopcontact.

Het gaat de elektrische auto ditmaal voor de wind. Wat is er deze derde keer anders? Het simpelste antwoord daarop is: betere batterijen, uitgevonden voor de laptop en de mobiele telefoon.

Betere batterijen uit onverwachte hoek

Het gewicht van de batterijen is steeds minder een probleem. Na ruim 100 jaar "stilstand" is er nu razendsnelle vooruitgang.

Elektrische auto's met loodaccu's hebben het letterlijk zwaar. Voor een actieradius van 200 kilometer is maar liefst 1200 kilo aan loodbatterijen nodig. Meer dan 100 jaar werd algemeen aangenomen dat een betere batterij niet mogelijk was.

In 1985 zette Stanford Ovshinsky die wijsheid op zijn kop door een half zo zware batterij uit te vinden die bovendien langer mee ging en meer vermogen kon leveren. Hiervoor is al beschreven hoe die ontwikkeling door GM en later Chevron werd afgestopt.

Maar met de komst van de laptop en mobiele telefoon waren er ook andere industrieën die zaten te springen om betere batterijen en die lieten zich niet stoppen. Het was een team van Sony dat in 1991 een lithium-cobalt batterij uitvond die half zo zwaar was als de NikkelMetaalhydride van Ovshinsky. Later volgde de lithiumijzerfosfaat batterij die goedkoper was en praktisch niet kon exploderen.

Daarmee was de geest definitief uit de fles! Energieonderzoek Centrum Nederland constateerde in 2009: "De afgelopen jaren lijkt de elektrische auto in een stroomversnelling gekomen te zijn. In drie jaar tijd is een ontwikkeling gerealiseerd die normaal een jaar of 15 kost."[43]

Hoeveel kilo batterij heb je nodig om 200 kilometer ver te rijden? [44]

Energiedrager	Afkorting	Kilo	Anno	Uitgevonden door
Loodzuurbatterij	Lood	1200	1859	Gaston Planté
NikkelMetaalhydride	NiMh	600	1985	Stanford Ovshinsky
Lithiumcobaltoxide	LiCoO2	330	1991	J.B. Goodenough/Sony
Lithiumijzerfosfaat	LiFePO4	400	1996	Akshaya Padhi
Lithium-ion in laboratorium	Li-Ion	100	2005	Matsushita
Lithium-lucht in theorie	Li-Air	20	Toekomst	IBM

Tussen 1859 en 1985 stonden de ontwikkelingen op het gebied van batterijen grotendeels stil. Sinds 1985 lijkt het wel of we wakker zijn geworden. Op dit moment werken elektrische auto's vooral met de veilige en langdurig bruikbare lithiumijzerfosfaat batterijen die in 1996 werden uitgevonden door Akshaya Padhi, een medewerker van J.B. Goodenough en net als hij werkend voor Sony.

Hoe de toekomst er uit ziet weet niemand maar het respectabele bedrijf Matsushita claimt dat zij een vier keer zo lichte batterij hebben ontwikkeld. IBM claimt dat een batterij van 10 kilo per 100 kilometer actieradius mogelijk is en is met een project begonnen om dat te realiseren. En dat zijn nog maar enkele van de tientallen doorbraken die er ieder jaar plaatsvinden.

Land	Bekende reserve (in tonnen)	Aantal elektrische auto's
Verenigde Staten	410.000	50 miljoen
Australië	220.000	30 miljoen
Bolivië	5.400.000	675 miljoen
Brazilië	910.000	115 miljoen
Canada	360.000	45 miljoen
Chili	3.000.000	375 miljoen
China	1.100.000	140 miljoen
Wereld totaal	11.000.000	1.4 miljard

In deze tabel staan de nu al bekende wereldreserves aan lithium volgens de US Geological Survey.[50] *In de rechterkolom staat hoeveel batterijen met een actieradius van 200 kilometer je met die hoeveelheid kunt maken.* [51]

Geen "lithium sjeiks"

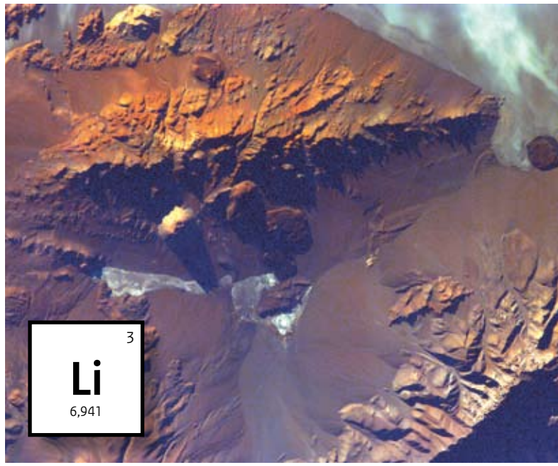
Lithium is verre van schaars: de huidige voorraden zijn genoeg voor twee keer zoveel elektrische auto's als dat er nu benzineauto's zijn.

Als de elektrische auto de benzineauto zou vervangen dan worden de batterijfabrikanten als het ware de nieuwe olie-industrie. Een veelgehoorde gedachtensprong is dat er dan vast ook "lithium sjeiks" zullen komen. Lithium is echter minder schaars dan vaak wordt gedacht. De bekende voorraden zijn goed voor 1,4 miljard elektrische auto's. Dat is meer dan twee keer zoveel als het aantal auto's dat er nu op de weg rijdt.[45]

Naarmate de vraag naar lithium toeneemt zullen we nieuwe reserves zoeken en vinden. Als de prijs van lithium stijgt zullen we extractieprocessen gaan benutten die nu niet economisch rendabel zijn. Op dit moment is lithium echter goedkoop en overvloedig.

Lithium batterijen kunnen ook gerecycled worden. Dat gebeurt bijvoorbeeld met de batterijen van de Tesla Roadster. Technisch gesproken is het waarschijnlijk eenvoudiger dan het hergebruik van lood-accu's en die worden voor 95% gerecycled.[46] De animo om lithium autobatterijen te recyclen is echter beperkt. Dat komt omdat lithium goedkoop is en omdat het aantal lithium autobatterijen nog beperkt is. Toch zijn er al recyclingsfabrieken en naarmate er meer elektrische auto's komen wordt recyclen profijtelijker.[47]

De overheid stimuleert het recyclen nog maar beperkt.[48] Lithium batterijen worden namelijk als veilig voor het milieu gezien.[49] Dat is een groot verschil met bijvoorbeeld nikkelcadmium batterijen en lood-accu's die slecht zijn voor het milieu.



Weersverwachting: dalende batterijprijzen

De prijs van autobatterijen is een geheim dat door de batterijfabrikanten gekoesterd wordt. Toch is duidelijk dat de prijs de afgelopen jaren flink gedaald is.

Dat een batterij steeds goedkoper kan worden komt ook omdat de hoeveelheid grondstof vergeleken met benzine klein is. Over de levenscyclus van een Prius kan een batterij van 100 kilo bijvoorbeeld 6.000 liter benzine en 14.000 kilo CO_2 vervangen. En daarna kan de batterij hergebruikt worden.

Informatiebron	Euro per kWh
Deutsche Bank	350 in 2015
Boston Consulting Group	1500 in 2009 en 350-500 in 2020
GM Volt	200 tot 600[52]
Detroit Electric	270 (voor een pack van 37 kWh)[53]
Thunder Sky	250[54]
David Anderson	365-600 (range in 2009)[55]
NiMh volgens Electric Power Research	220 tot 550 (afhankelijk van vermogen en massaproductie)[56]
Li-Ion volgens Electric Power Research	205 tot 920 (afhankelijk van vermogen en massaproductie)[57]
Valence Technology	255-410 (kostprijs zonder winst)[58]

Volgens het Rocky Mountain Institute is de prijs van lithiumbatterijen de laatste jaren sterk gedaald en zal hij nog verder dalen.[59] Een Carnegie Mellon studie uit 2008[60] rekent nog met 700 euro. Ze kregen van een topman van GM de kritiek dat 250 euro op korte termijn realistischer was.[61] Onduidelijkheid troef en bijna alle batterijfabrikanten houden hun prijzen strikt geheim maar in deze tabel kunt u enkele schattingen vinden.

De dageraad van een nieuwe mega-industrie

Als de elektrische auto echt doorbreekt dan groeit de productie van batterijen uit tot een enorme industrietak.

De opkomst van de olie-industrie in Amerika werd mede mogelijk gemaakt omdat Rockefeller op krachtdadige (of zelfs hardhandige) wijze voor standaardisatie zorgde (zie pagina 33). Het is onwaarschijnlijk dat een dergelijke benadering heden ten dage nog door de mededingingsautoriteit geaccepteerd zou worden maar de behoefte aan standaardisatie blijft. Daarbij kan gedacht worden aan:

- Standaarden voor de kwaliteit van batterijen zodat niemand bang hoeft te zijn om een kat in de zak te kopen of om een verhoogd risico op persoonlijk letsel te lopen.
- Standaarden met betrekking tot hoe de batterij moet kunnen worden opgeladen en hoe deze informatie door de auto aan oplaadstations wordt doorgegeven.[65]
- Standaarden die batterijen interoperabel maken tussen verschillende auto's en die batterijfabrikanten in staat stellen om batterijen te ontwikkelen zonder dat ze eerst toestemming moeten hebben en winst moeten afdragen aan de autoproducent.
- Standaarden voor het aanbrengen en verwijderen van batterijen. Dit maakt onderhoud aan de auto voor de garage eenvoudiger.

Het zijn vooral de nieuwe autofabrikanten en niet de huidige marktleiders die de noodzakelijke vernieuwingen nastreven.[66] De overheid doet er goed aan om deze nieuwelingen, ook al zijn ze nog klein, te betrekken bij het vaststellen van de standaarden en het vormgeven van de nieuwe markt.

Een mooi voorbeeld van een doortastende batterijfabrikant die niet wil wachten tot de nieuwe markt vorm krijgt is het Chinese bedrijf BYD (Build Your Dreams). BYD heeft een noodlijdende Chinese autofabrikant opgekocht om haar eigen autobatterijen te kunnen verkopen. De oprichter is inmiddels de rijkste man van China en 10% van de aandelen van BYD zijn in handen van de rijkste man ter wereld.

Rekenvoorbeeld

Stel dat de Toyota Prius 150.000 kilometer rijdt voor hij naar de sloper gaat. Hij verbruikt ongeveer 5 liter per 100 kilometer dus in totaal verbruikt hij 7.500 liter benzine.[62] Elke liter benzine produceert ongeveer 2,25 kilo CO_2. Over de hele levensduur is dat 17.000 kilo CO_2.[63]

Op pagina 57 rekenen we voor hoe een gemiddelde Prius-rijder met een batterij van 100 kilo zo'n 80% minder benzine nodig heeft. 80% van 7.500 is 6.000 en 80% van 17.000 is 14.000. De batterij gaat volgens de fabrikant de levensduur van de auto mee.[64]

Een batterij van 100 kilo vervangt dus 6.000 liter benzine en 14.000 kilo CO_2.

4 Elektrisch tanken in de praktijk

Overal oplaadpunten

Oplaadpunten zijn aantrekkelijk voor autobezitters, elektriciteitsbedrijven, netwerkbeheerders en lokale bestuurders

Oplaadpunten op parkeerplaatsen betekenen voor de autobezitter extra gemak
"Met een elektrische auto vraag je je nooit meer af: "Moet ik ondertussen weer eens tanken?" Je batterij wordt automatisch opgeladen terwijl je geparkeerd staat. Je moet alleen even het draadje aan het oplaadpunt op je auto inprikken. Dat wordt net zo'n automatisme als je tas uit de achterbak pakken. Mensen denken vaak dat opladen lastiger is dan tanken maar het is juist makkelijker. Je hoeft in principe immers nooit meer langs een tankstation!"

"Bovendien kan de stroom uit het oplaadpunt je auto op temperatuur brengen. In de zomer rijdt je weg in een koele auto waarin je niet zweet. In de winter staat er een warme auto zonder ijs of condens op de ruiten voor je klaar."

Aan het woord is André Postma van Enexis. Als het aan hem ligt zijn er straks miljoenen elektrische oplaadpunten: 1,3 per elektrische auto om precies te zijn. Volgens hem kan je dan vrijwel altijd en overal terecht. De komende drie jaar gaan de verenigde netwerkbedrijven (waar Enexis er 1 van is) met de stichting e-laad.nl 10.000 oplaadpunten neerzetten om ervaring op te doen. Dit aantal komt bovenop de initiatieven die door verschillende aparte energieproducenten en gemeenten worden ondernomen.

Voor mensen met een elektrische auto heeft Postma verder een aanlokkelijk aanbod: "Als jij een elektrische auto voor de deur zet, dan regelen wij gratis een parkeerplaats met oplaadpunt voor je deur, speciaal voor elektrische auto's." Ook plug-in hybrid electric vehicles (zie pagina 56) kunnen van dit aanbod gebruik maken.

Oplaadpunten leveren de bezitters van elektrische auto's geld op
We zagen hoe Willem van der Kooi 15 cent per kilometer betaalt als hij in zijn Lotus op benzine rijdt terwijl hij maar 4 cent aan elektriciteit betaalt als hij in zijn elektrische Lotus rijdt. (Zie pagina 16)
Zo verdient de gebruiker van een oplaadpunt geld. Wie ook op zijn bestemming elektrisch kan tanken bespaart nog meer.

Het is een interessante groeimarkt voor de elektriciteitsproducenten
Zoals olieproducenten hun geld verdienen met het verkopen van benzine, verdienen elektriciteitsproducenten hun geld met het verkopen van elektriciteit. Zij zien een enorme groeimarkt: als alle auto's op elektriciteit zouden rijden dan verdubbelt het huishoudelijke elektriciteitsgebruik. Verschillende elektriciteitsproducenten maken dan ook reclame voor het plaatsen van oplaadpunten en zij proberen hun eigen "smaak" oplaadpunten geplaatst te krijgen.

De elektriciteitsnetwerkbeheerders kunnen hun taak goedkoper en beter uitvoeren
Postma heeft een eenvoudige maar overtuigende businesscase voor de aanleg van het smart grid (zie ook pagina 22). "Wij hebben berekend dat we voor ongeveer 10 miljard euro het netwerk in Nederland helemaal kunnen upgraden en overal oplaadpunten neer kunnen zetten. Dat is een hoop geld, maar het geeft je de mogelijkheid om het net te stabiliseren door op een slimme manier de gekoppelde auto's te gebruiken. Als we het net daarentegen "dom houden" dan moeten we overal de verbindingen verzwaren. Zo'n operatie zou gemakkelijk 30 miljard kosten. Dus overal oplaadpunten neerzetten bespaart de belastingbetaler ook nog eens geld." De intelligentie moet ervoor zorgen dat elektrische auto's die van eenzelfde deel van het netwerk gebruik maken niet allemaal tegelijk op gaan laden zodat het netwerk niet overbelast raakt.

De intelligentie heeft ook nog een tweede voordeel. Het wordt goedkoper en eenvoudiger om meer duurzame elektriciteit op het netwerk toe te laten (zie pagina 21). Vandaar het initiatief van de verenigde netwerkbedrijven om de komende drie jaar 10.000 oplaadpunten te plaatsen en op termijn zelfs miljoenen oplaadpunten.

Locale overheden kunnen zo een schonere en stillere stad stimuleren
Als de bezitter van een elektrische auto makkelijker kan parkeren in de stad wordt de aankoop van een elektrische auto ineens een stuk interessanter. Als lokale overheden de elektrische auto willen aanmoedigen kunnen ze dat zeer effectief doen door parkeerplaatsen speciaal voor elektrische auto's te maken.

De heer Lubbers laadt zijn elektrische auto op bij het eerste oplaadpunt van de stichting e-laad.nl.

Snelladen langs de snelweg

Snelladen langs de snelweg: na tien minuten rijdt u weer verder.

Volgens experts is het ondenkbaar dat de consument massaal elektrische auto's gaat kopen. Hij heeft namelijk last van "range anxiety". De angst dat hij ineens een grote afstand af moet leggen terwijl zijn elektrische auto dat niet kan. Maar intussen zijn er batterijen en oplaadstations op de markt waarmee je binnen 10 minuten genoeg kunt laden om bijvoorbeeld weer 200 kilometer te kunnen rijden. Daarmee zou de "range anxiety" volledig kunnen worden weggenomen.

De prijs voor snelladers is de afgelopen jaren sterk gedaald. Snelladers met voldoende vermogen[67] die enkele jaren geleden nog meer dan een miljoen kostten zijn nu te koop voor onder de 100.000 euro. Het Nederlandse bedrijf Epyon produceert en verkoopt dergelijke snelladers.

In Amerika is het bedrijf Posicharge een belangrijke speler. Zij hebben daar intussen ruim 5.000 snelladers verkocht. Ze gebruiken de techniek die door Alan Coccony ontwikkeld werd om "de eerste moderne elektrische auto", de EV1 aan te drijven (zie pagina 34). Posicharge verkoopt de snelladers vooral aan grote magazijnen. Die magazijnen gebruiken op dit moment batterijwisselstations. Met snelladers kunnen de vorkheftrucks in het magazijn opladen tijdens de korte natuurlijke pauze's op de dag. De vorkheftruck is dan in de praktijk 24 uur per dag beschikbaar.

De batterijen zijn nog wel een probleem. Snelladen betekent nu nog peperdure batterijen en zelfs dan zijn de gevolgen voor de levensduur nog maar beperkt bekend. Sommige fabrikanten van sportauto's (die dure batterijen gebruiken) claimen nu al dat hun auto in 10 minuten opgeladen kan worden.[68] Anderen zoals Detroit Electric claimen 20 tot 30 minuten. De meeste fabrikanten houden het voorlopig op een uur of meer.

Juist op dit punt zijn de batterijen echter sterk in ontwikkeling. We kunnen voor relatief weinig geld op de komst van die betere batterijen anticiperen. Voor 100 miljoen hebben we elk tankstation voorzien van vier snelladers. Dat is 1% van de kosten die Postma claimt te moeten maken voor de oplaadpunten bij de parkeerplaatsen. En daarmee hebben we het probleem van de "range anxiety" dan de wereld uit geholpen.
Overheden kunnen in hun rol als wegbeheerder bijdragen aan het wegnemen van een knelpunt van elektrisch rijden, namelijk door het plaatsen van snellaadpunten op parkeer/verzorgingsplaatsen te stimuleren.

Hoeveel kost het om tankstations van snelladers te voorzien?

Een sterke oplader (200 kilowatt) is te koop voor 100.000 euro.[69] Een verzwaarde aansluiting op het elektriciteitsnet kost maximaal 100.000 euro per tankstation. Er zijn in Nederland nu circa 250 tankstations langs de snelweg.

De mensen tanken meestal thuis maar stel dat we op safe willen spelen en dat we alle tankstations voorzien van vier snelladers. Stel verder dat we alle tankstations een zware aansluiting op het elektriciteitsnet geven. Dan kost dat samen dus 100 miljoen euro.

Batterijen verwisselen

Met Better Place worden je lege batterijen in 2 minuten omgeruild voor volle.

In Israël wordt een netwerk van batterijwisselstations gebouwd. In 2010 start een landelijke pilot en in 2012 volgt de commerciële uitrol. Denemarken en Hawaï volgen kort na Israël. In totaal overwegen al 25 landen om een infrastructuur van batterijwisselstations aan te leggen.[70]

De optie om autobatterijen te verwisselen is zo'n beetje single handedly op de kaart gezet door Shai Agassi. Agassi stond op het punt om de hoogste baas te worden van softwaregigant SAP maar in 2007 nam hij ontslag om een droom na te jagen: hij wilde de wereld "afhelpen van zijn verslaving aan olie". Hij richtte het bedrijf "Better Place" op en haalde in recordtijd 400 miljoen dollar binnen.

Het idee achter Better Place is bedrieglijk simpel: "Je kunt de batterijen van je elektrische auto "gewoon" opladen, maar als je langere afstanden wilt reizen kan je terecht op een "tankstation" van Better Place. Op zo'n "tankstation" wordt je lege batterij binnen 2 minuten volautomatisch vervangen door een volle." De elektrische auto heeft op die manier een onbeperkte actieradius, net als een benzineauto.

Het plan gaat ervan uit dat de consument zijn batterij en misschien zelfs zijn hele auto kado krijgt bij een "mobiliteitsabonnement". De consument wordt dan niet geconfronteerd met de hoge aanschafprijs van de batterij.

Open standaarden moeten ervoor zorgen dat ook andere partijen zo'n mobiliteitsabonnement gaan aanbieden. Idealiter kan je straks al batterijen verwisselend de hele wereld rondrijden.

Batterijwisselstations

Agassi kon het idee afkijken van distributiecentra en luchthavens die zulke batterijverwisselstations op dit moment al gebruiken.

Het idee vereist ook een infrastructuur van oplaadstations. Die zijn niet goedkoop met geschatte kosten van € 350.000 per station. Wie bedenkt dat er in Nederland zo'n 250 tankstations langs de Rijkswegen staan beseft echter dat de totale kosten meevallen. Voor 125 miljoen euro heeft iedereen in Nederland een batterijwisselstation op minder dan 25 kilometer afstand. Dat is een flink bedrag maar in verhouding tot de tientallen miljarden die gemoeid zijn met de totale transitie is het een bescheiden bedrag.

Het belang van open standaarden

Als we straks batterijen gaan wisselen dan kunnen we maar beter zorgen dat die batterijen allemaal op dezelfde manier verwisseld kunnen worden. Ook is het handig als er niet teveel verschillende soorten zijn want dan hoeft een batterijwisselstation minder soorten op voorraad te houden.

Het zal niet makkelijk worden om tot zulke standaarden te komen maar als je wilt standaardiseren is nú het moment. De elektrische auto zou daarbij een voorbeeld kunnen nemen aan de manier waarop open standaarden er bij internet voor zorgen dat de verschillende marktpartijen onafhankelijk van elkaar kunnen innoveren. Op die manier kan iedereen waarde toevoegen aan het totale systeem.

De batterijindustrie lijkt bezig om een mega-industrie te worden. De maatschappelijke opbrengsten van standaardisatie zouden groot zijn. De kosten van batterijwisselstations vallen daarbij in het niet.

Hoe kan het concept van makkelijk uitwisselbare batterijen helpen om snel tot een volwassen en efficiënte markt voor elektrische auto's te komen?

Autobatterijen als mobiele telefoons

Als we autobatterijen gaan verwisselen dan kan het zijn dat een spiksplinternieuwe batterij vervangen wordt door een wat oudere. Dat is onacceptabel als die batterij persoonlijk eigendom zou zijn.

Verder is een batterij duur in aanschaf en de verwachting is dat dit voor veel consumenten een belemmering vormt.

Daarom stelt Better Place voor dat je "kilometers" koopt. Dit concept is vergelijkbaar met een contract voor mobiel bellen waarbij je de mobiele telefoon gratis krijgt en je per minuut gaat betalen.

5 Wanneer te koop?

Hoe lang moet u nog wachten voordat de elektrische auto in de showroom staat?

Hybriden

Omdat elektrisch lekker en zuinig rijdt komen er steeds meer hybrides: ze tanken brandstof maar maken onder de motorkap maximaal gebruik van de elektromotor. Dat is een eerste stap naar de volledig elektrische auto. Ze hebben echter een hogere aanschafprijs.

De bekendste hybride ter wereld is ongetwijfeld de Toyota Prius, maar sinds Charles Kettering in 1912 bedacht dat je een brandstofmotor aan kon zwengelen met een elektromotor is elke auto eigenlijk een hybride.[71]

Het verschil tussen een "gewone benzineauto" en een "echte hybride" zoals de Toyota Prius is dat de elektromotor en de accu een maatje groter gemaakt zijn en dat ze niet uitgezet worden als de motor eenmaal op gang gebracht is.[72]

De elektromotor en de brandstofmotor zijn in een hybride echt een team. Binnen dat team is er een duidelijke taakverdeling. De elektromotor zorgt ervoor dat de auto direct reageert op het gaspedaal en rempedaal. Hij doet ook de volledige aandrijving op lagere snelheden. De benzinemotor springt bij door de batterij op te laden als die leegraakt en eventueel ook als er veel vermogen gevraagd wordt. Op die manier wordt de benzinemotor alleen gebruikt in het gebied waarin zijn efficiëntie het grootst is.

Eigenlijk is een hybride een auto die wel een aantal voordelen van de elektrische auto heeft, maar waarvan het bereik niet beperkt is. Waarom heeft het zolang geduurd voordat we in een hybride gingen rijden?

Autofabrikanten gingen ervan uit dat klanten teveel schrokken van de hogere aanschafprijs. Bij een autofabrikant draait alles om kostenreductie en de meerkosten van een elektrische aandrijflijn en batterij zijn flink. Maar de besparingen in brandstof over de hele levensduur zijn in veel gevallen nog groter.

Een uitsnede van de Toyota Prius. Linksvoor is de elektromotor zichtbaar en rechtsachter de batterij.

Iemand moest de voorzichtige autofabrikanten over de drempel helpen en die iemand was de Amerikaanse president Bill Clinton. Ironisch genoeg leverde dat in de VS niets op maar maakte het de Japanse autofabrikant Toyota nerveus genoeg om de Prius te ontwikkelen. Daarmee werd wereldwijd de ontwikkeling van hybride auto's in gang gezet.

De voorstanders van de "pure" elektrische auto hadden ook een beetje hulp nodig. Zij stelden dat de meeste mensen de auto vooral gebruiken voor korte afstanden en dat dit de benzinemotor overbodig maakt. Daarbij zagen ze over het hoofd dat niet iedereen hun passie deelt en dat de hybride, zeker als hij een flinke elektrische motor heeft, de ideale eerste stap is op weg naar een volledig elektrische auto.

Richard Smokers, expert duurzame mobiliteit van TNO, vat het als volgt samen: "Het is nog te vroeg om te zeggen hoe snel volledig elektrische auto's geadopteerd gaan worden maar het is wel duidelijk dat het wagenpark de komende decennia een verregaande elektrificering door zal maken."

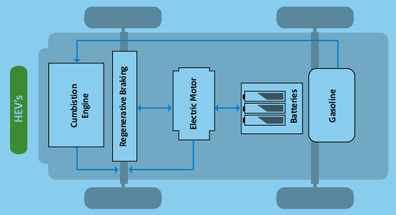
Auto	Aanschafprijs	Meerkosten	Besparing
Prius II	15775	3311	7929
Camry	18878	1606	6667
Civic	16962	1964	6829
Lexus RX400h 2WD	30693	2832	6723
Lexus RX400h AWD	31715	2832	7986
Ford Escape	20984	1361	10833

In de tabel is te zien wat autokopers naar schatting extra betaald hebben bij de aanschaf van een hybride auto. De gegevens zijn trouwens berekend voor de situatie in de VS. De besparing is gebaseerd op de mate waarin de hybridisering brandstof bespaart. Daarbij is uitgegaan van een brandstofprijs van € 1,50 en een levensduur van 200.000 kilometer.[73] *De gegevens zijn overigens niet bijzonder afwijkend van schattingen door het Energieonderzoek Centrum Nederland.*[74]

Voor Nederland gaan TNO en ECN voor 2012 uit van een meerprijs van tussen de 3.000 en 4.000 euro.[75] *Die meerprijs wordt in veel gevallen gecompenseerd door voordelen in de belasting en BPM.*

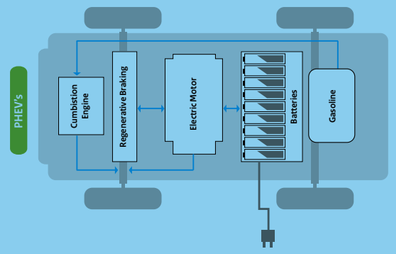
Intermezzo

Drie soorten elektrische auto's



HEV is de Engelse afkorting voor Hybrid Electric Vehicles. In Nederland spreken we ook wel van hybriden.

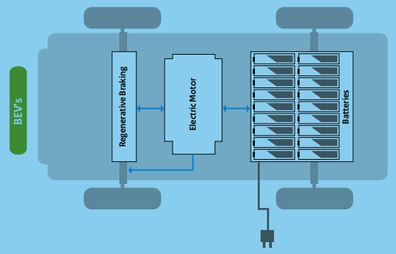
De HEV heeft als enige geen "stekker" om hem elektrisch mee op te laden. Hij heeft verder een relatief grote verbrandingsmotor en een relatief kleine elektromotor en batterij.



PHEV is de Engelse afkorting voor Plug-in Hybrid Electric Vehicle. We spreken ook wel over plug-ins.

De PHEV heeft zowel een "stekker" als een benzinetank. De elektromotor en de batterij zijn fors. De verbrandingsmotor kan relatief klein zijn omdat hij alleen de batterij hoeft op te laden.

Een plug-in die de brandstofmotor echt alleen gebruikt om de batterij op te laden wordt ook wel een ER-EV (Extended Range Electric Vehicle) genoemd.



BEV is de Engelse afkorting voor Battery Electric Vehicle. In Nederland noemen we ze vaak volledig elektrische auto's.

De BEV heeft een "stekker" en een extra grote batterij. Hij mist de verbrandingsmotor en de benzinetank.

De plug-in hybride

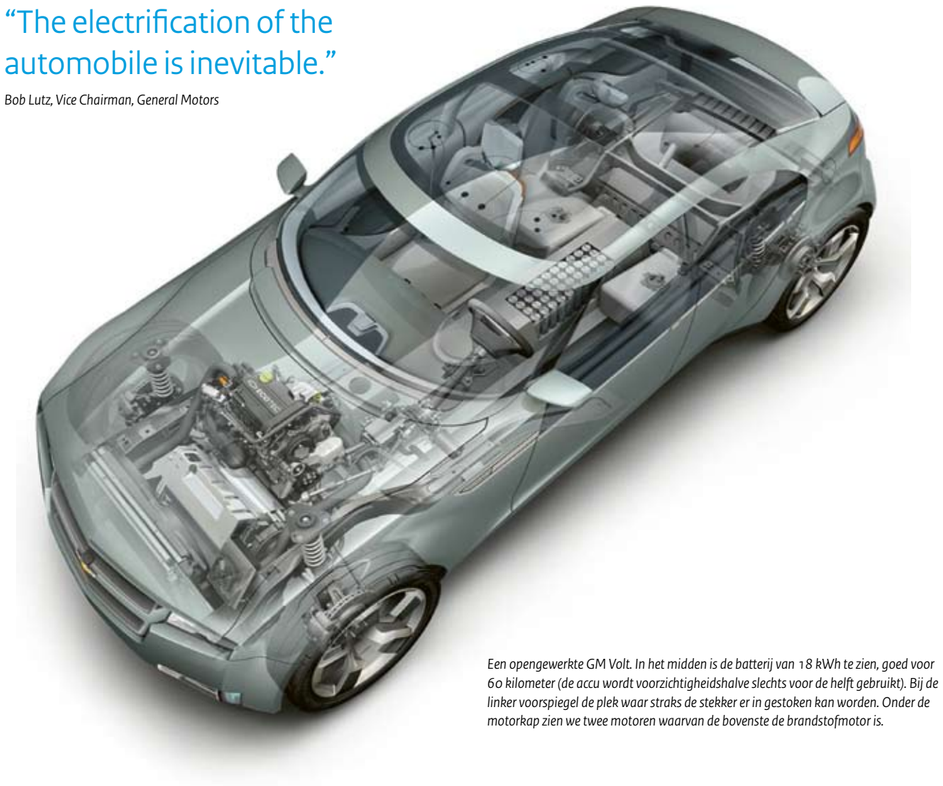
Mensen die ver willen rijden zijn - zolang er niet overal snelladers of batterijwisselstations zijn - gedwongen om benzine te tanken. Met de plug-in hybride kunnen ze ook elektriciteit uit "het stopcontact" tanken. Dat betekent wel een hogere aanschafprijs vanwege de grotere batterij.

De bekendste plug-in hybride van dit moment is de GM Volt (Opel Ampera) die midden 2010 in de VS op de markt komt voor omgerekend 30 duizend euro (na aftrek van 5.000 euro subsidie). Een mooie auto maar de aanschafprijs is fors en dit zou weleens een struikelblok kunnen worden.

Een goedkopere auto die bovendien al op de markt is, is de BYD F3DM. Deze auto heeft een kleinere batterij maar claimt desondanks een grotere actieradius te kunnen bereiken. In China is hij al te koop voor omgerekend 16 duizend euro.

"The electrification of the automobile is inevitable."

Bob Lutz, Vice Chairman, General Motors



Een opengewerkte GM Volt. In het midden is de batterij van 18 kWh te zien, goed voor 60 kilometer (de accu wordt voorzichtigheidshalve slechts voor de helft gebruikt). Bij de linker voorspiegel de plek waar straks de stekker er in gestoken kan worden. Onder de motorkap zien we twee motoren waarvan de bovenste de brandstofmotor is.

Intermezzo

Bouw een Prius om tot plug-in

De kosten en opbrengsten van een plug-in hangen sterk af van de kosten van de batterij en de mate waarin die batterij benzine uitspaart. Een algemene richtlijn is niet te geven maar hier volgt een rekenvoorbeeld.

Een goedkope lithium-ijzer-fosfaat batterij heeft een energie inhoud van ongeveer 0,1 kWh/kg. We rekenen hier met de batterijen van het Chinese merk Thunder Sky omdat daarvan de gegevens openbaar zijn.

Laten we een batterij nemen van 100 kilo en 10kWh.

De Thunder Sky batterij gaat volgens de specificaties het langste mee als je hem niet meer dan 70% gebruikt. Dat betekent dat je 7kWh effectieve capaciteit overhoudt. Een Prius verbruikt ongeveer 0,15kWh per kilometer dus met 7kWh kan je ongeveer 50 kilometer ver rijden. Volgens de fabrikant kan de batterij 3.000 keer gebruikt worden. In totaal kunnen we 3.000 x 50 = 150.000 kilometer elektrisch rijden. De goedkoopste leverancier van bovengenoemde Thunder Sky batterijen biedt ze aan particulieren aan voor 250 €/kWh. De batterij van 100 kilo en 10 kilowattuur waarmee de Prius 50 kilometer ver kan rijden kost dan 2.500 euro oftewel 50 euro per kilometer actieradius.

Wat levert het op?
Dat hangt af van het gebruik en we varen nu ook nog eens blind op de batterij-specificaties van één leverancier maar... laten wij ons rekenvoorbeeld eens dapper afmaken.

Een typische Nederlandse autobezitter maakt ruim 80% van zijn kilometers in ritjes korter dan 50 kilometer.[76] Stel dat een autobezitter in zijn Prius 12.500 kilometer per jaar zou rijden, dan zou hij 10.000 kilometer elektrisch rijden. Bij een nachtstoomtarief van 15 cent per kilowattuur kost hem dat in zijn Plug-in Prius ongeveer 225 euro.

In zijn zuinige hybride Prius verbruikt hij gewoonlijk ongeveer 5 liter benzine op 100 kilometer. Voor 10.000 kilometer 500 liter. Bij een benzineprijs van 1,45 euro kost dat 725 euro in totaal: 500 euro meer!

Met een batterij van 2.500 euro bespaart hij 500 euro per jaar en de batterij verdient zichzelf na 5 jaar terug.

Ook spaart hij in die eerste vijf jaar 2.500 liter benzine en ongeveer 6.000 kilo CO_2 uit.

Overigens geldt dit denkbeeldige rekenvoorbeeld alleen bij een auto die al in de fabriek van een batterij wordt voorzien. Wie zelf een Prius wil upgraden moet ook arbeidsloon rekenen en betaalt een hogere prijs voor de batterijen.

Wie niet wil wachten en handig is kan voor minder dan 2.000 euro zelf deze 4kWh set van Enginer importeren en inbouwen. De Prius gebruikt de eerste 50 kilometer na opladen dan ongeveer half zoveel benzine.

De volledig elektrische auto

Deze auto's hebben geen druppel benzine meer nodig.

De bekendste volledig elektrische auto (Battery Electric Vehicle/BEV) van dit moment is ongetwijfeld de Tesla Roadster. Dit is de auto die elektrisch hip maakte door sneller te gaan dan een reguliere Lotus (0-100 in 3,9 seconde) met een batterij die met de hand werd gemaakt door duizenden laptop batterijen met elkaar te verbinden. Dat pionieren had wel een prijskaartje: 75 duizend euro om precies te zijn.

Detroit Electric is een firma waar de Nederlandse Willem van der Kooi van Electric Cars Europe nauw bij betrokken is, ondermeer doordat hij (samen met het bedrijf Innosys) de aandrijving levert. Detroit Electric kan binnenkort een mooie sportieve middenklasser (0-100 in 8 seconden) met een actieradius van 180 kilometer leveren voor 18 duizend euro.

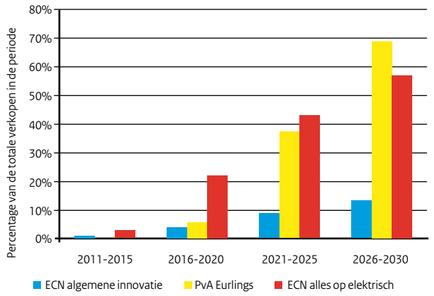
Enkele andere interessante nieuwkomers: Aerorider; Aptera; BYD; Detroit Electric; Duracar; ECE; Fisker; Lightning; Loremo; Lumeneo; Reva; Tesla; Tango; Think City; en Zap-X.

Bestaande fabrikanten kiezen vaak voor de plug-in hybride. Ook vanuit die hoek zijn er echter elektrische auto's op de markt of in ontwikkeling: BMW (Electric Mini); Citroën (C1 ev'ie); DaimlerChrystler (Smart For Two Electric); Fiat (Doblo Electric); Mitsubishi (i MiEV); Renauld/Nissan (Leaf, samen met Better Place); Subaru (Stella en nu R1e, samen met het Japanse elektriciteits-leverancier Tokyo Electric Power); en Toyota (FT-EV).[77]

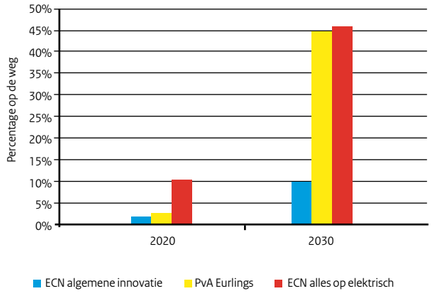
ECN gaat ervan uit dat de meerkosten bij een standaard midden-klasser van 15 duizend euro afnemen van 11 duizend euro nu naar 3 duizend euro in 2040. De meerkosten van de elektrische auto hangen vrijwel volledig samen met die van de batterij. Verder is het juist een auto die eenvoudiger en goedkoper te maken is en die veel geld bespaart in brandstof en onderhoud. Dat betekent dat juist bij onderhoudsgevoelige wagens die veel brandstof verbruiken maar die in een elektrische versie een stuk zuiniger worden (zoals sportwagens) de besparingen het grootst zijn.

Neem bijvoorbeeld de Lotussen van Willem van der Kooi (zie pagina 16). Over de levensduur bespaart de elektrische Lotus 17 duizend euro op energie.[78] Daar komen de besparingen op onderhoud en de belastingvoordelen van de elektrische auto nog bij.

Hoeveel "auto's met een stekker" worden er straks verkocht?



Welk percentage "auto's met een stekker" rijdt er straks op de weg?



In Nederland heeft minister Eurlings samen met minister van der Hoeven een Plan van Aanpak gepresenteerd. Dit plan is in bovenstaande figuur vergeleken met twee scenario's van het Energieonderzoek Centrum Nederland uit hun studie Duurzame innovatie in het wegverkeer. Het ene ECN scenario gaat uit van algemene innovatie en het tweede gaat ervan uit dat de elektrische auto de dominante technologie wordt en dat de elektrische auto in alle opzichten "de wind mee" zal hebben.

We zien dat het Plan van Aanpak en het "elektrische scenario" van ECN dicht bij elkaar komen. Als deze scenario's uitkomen rijdt in 2030 bijna de helft van ons in een elektrische auto. We zien echter ook dat de ECN scenario's veronderstellen dat er ook in de eerste 10 jaar flinke groei moet zijn om dat eindpunt te halen terwijl het Plan van Aanpak van Minister Eurlings de groei meer na 2020 verwacht.

Hoe snel zal het gaan?

De elektrische auto beleeft zijn derde opkomst en de komende paar jaar zullen uitwijzen of die opkomst stormachtig of van tijdelijke aard zal zijn. Daarbij gaat het niet alleen om de kosten maar ook om de beleving.

Over één ding zijn alle makers van prognoses en scenario's het eens: niemand weet hoe snel de elektrische auto door zal breken. Het hangt ervan af hoe de prijs van olie en batterijen zich ontwikkelen en of de oplaadinfrastructuur er snel komt. Subsidies zijn uiteraard mede-bepalend.

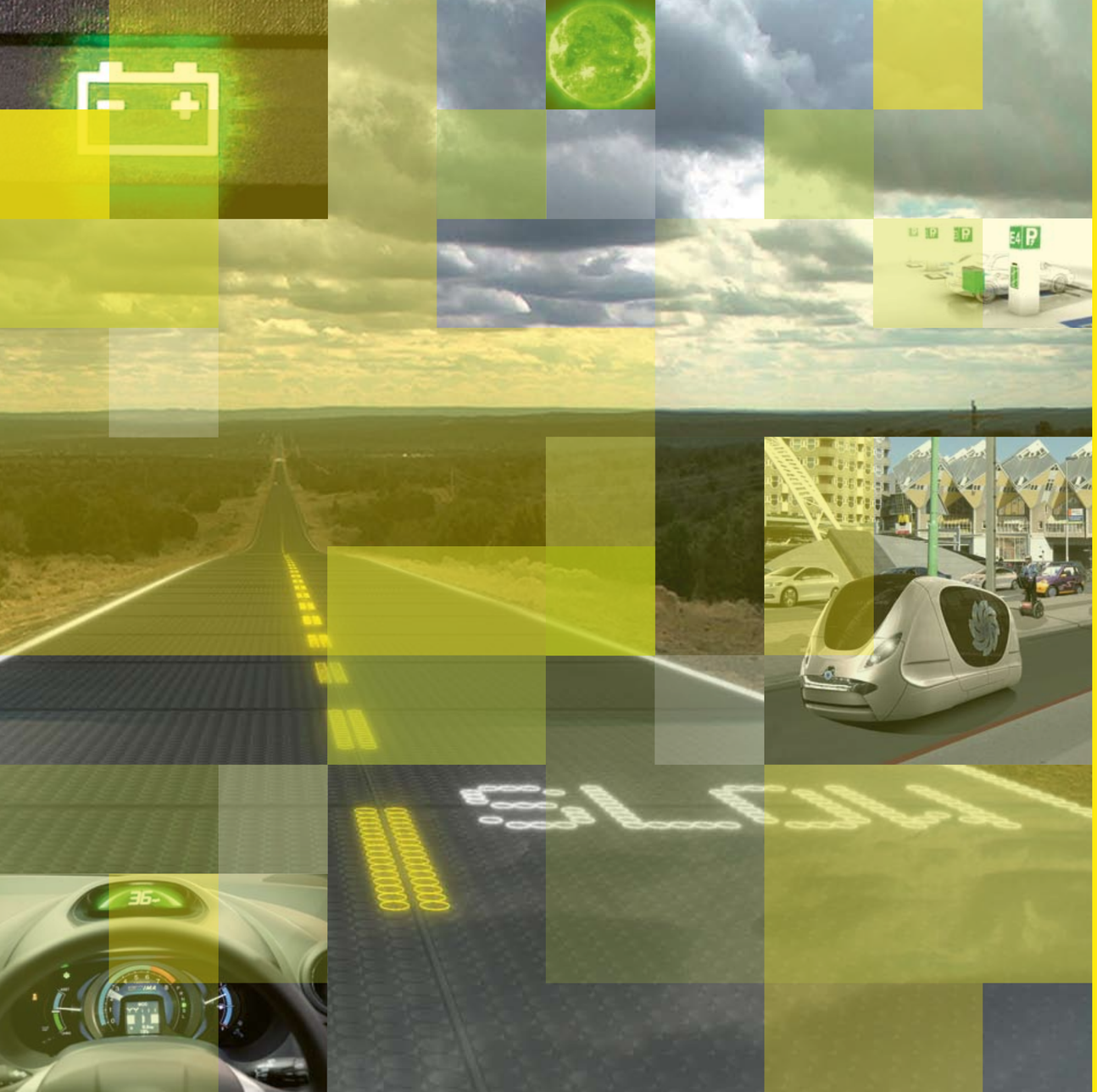
Twee grondige en gezaghebbende studies zijn van de Deutsche Bank en van de Boston Consulting Group. Zij voorspellen dat iets meer dan 5% van de auto's die in 2020 in Europa wordt verkocht een stekker heeft. De verdeling tussen PHEV's en EV's is ruwweg 50-50.

Maar in Nederland verkopen hybriden als de Toyota Prius veel beter dan gemiddeld. Als we die verhouding zouden doortrekken dan heeft 20% van de auto's die in 2020 in Nederland wordt verkocht een stekker en lopen we internationaal voorop. Daarnaast is Nederland net als Denemarken zeer geschikt voor het aanleggen van een elektrische infrastructuur en dit zou de zaak verder kunnen versnellen. Maar er kan ook een regering komen die de subsidies afschaft en de elektrische infrastructuur niet stimuleert. Dan lopen we ineens achterop in plaats van voorop.

Maar geen van deze scenario's houdt rekening met de beleving van de consument. Die moet immers nog blijken. Beleving verklaart echter waarom mensen überhaubt zoveel geld aan auto's uitgeven. Waarom ze een Rolls Royce of een Mercedes kopen in plaats van een Toyota of Dacia. Beleving was cruciaal voor het succes van elektrische auto's als de EV1 en de Tesla Roadster. Hoe zal men het rijden in de elektrische auto beleven? Hoe bevalt straks het "thuis tanken"? Worden geavanceerde features een must? Worden elektrische auto's sexy?

Misschien wordt de elektrische auto wel de iPhone onder de auto's. En dan kan het snel gaan!

De Tesla Sedan is de opvolger van de Tesla Roadster. Het is een sportieve (0-100 in 6 seconden) gezinsauto die midden 2011 in de VS op de markt komt. De auto wordt voorzien van vele features waaronder een 3G internetconnectie en 17 inch touchscreen. De prijs komt rond de 35 duizend euro te liggen (na 5.000 dollar korting van de overheid). Standaard heeft de auto een range van 250 kilometer en op de batterij zit 7 jaar garantie. Vervangende batterijen moeten na die tijd 4.000 euro kosten. Er zijn tegen meerprijs batterijen leverbaar die een actieradius geven van bijna 500 kilometer.



Elektrisch rijden in 2028

Er wordt in Nederland hard gewerkt aan het efficiënt benutten van de weg: mobiliteitsmanagement, verkeersmanagement en ABvM (Anders Betalen voor Mobiliteit) zijn daar voorbeelden van. Kan elektrisch rijden ook een bijdrage leveren?

Het jaartal 2028 is deels symbolisch gekozen. In dat jaar wil Nederland namelijk gastland zijn voor de olympische spelen. Wat zou er mogelijk zijn als we eenzelfde soort ambitie loslaten op ons vervoer?

B

6 De weg als bron van energie

De weg kan elektrische voertuigen opladen terwijl ze er overheen rijden. En theoretisch kan de energie die daarvoor nodig is ook nog eens door de weg worden opgewekt.

Opladen onderweg

We kunnen de weg zo construeren dat auto's onder het rijden kunnen opladen. Dat betekent dat auto's niet meer hoeven te tanken en dat de batterijen lichter en goedkoper kunnen worden.

Draadloos opladen terwijl je over de weg rijdt. Het lijkt iets uit de verre toekomst maar dat is het niet want het systeem wordt al op verschillende plaatsen toegepast. De firma Conductix-Wampfler verkoopt het sinds 1997, ondermeer aan fabrieken en pretparken. Het Koreaanse KAIST heeft er bussen mee uitgerust en beoogt binnen enkele jaren een brede uitrol van de *on-line vehicle*. En het grote Duitse ingenieursbureau AIV heeft grootste plannen voor dit systeem in Europa.

Het systeem werkt via inductie, hetzelfde mechanisme dat er ook voor zorgt dat elektrische tandenborstels draadloos op kunnen laden of dat pannen op een inductiekookplaat heet laat worden. Eerst worden in de rijstrook elektrische leidingen aangelegd. Zodra er een auto over de weg rijdt wordt die elektrische leiding op dat punt geactiveerd. Er ontstaat een magnetisch veld, vlak boven de weg. In de auto bevindt zich een spoel die als een soort dynamo functioneert. Zo wordt de batterij van de auto via het magnetische veld opgeladen.

Deze voertuigen kunnen zich volcontinu door de fabriek bewegen, zonder ooit te stoppen om op te laden of te tanken. Ze krijgen hun energie draadloos via inductieve strips in de vloer die geactiveerd worden zodra ze er over heen rijden. Een spoel in het voertuig zet het opgewekte magnetische veld weer om in elektriciteit. Het systeem wordt inmiddels op vele plaatsen gebruikt, ondermeer voor bussen in Turijn (Italië) die steeds als ze stilstaan om passagiers in te laten stappen snel de batterij opladen. Het systeem wordt geproduceerd door de firma Conductix-Wampfler. Volgens hen is het sinds 1997 proven technology en kan het goed toegepast worden op de snelweg.[79]

Het grote voordeel van het systeem is dat elektrische auto's aan een relatief kleine batterij voldoende zouden hebben en dat ze nooit meer stil zouden hoeven te staan om op te laden. Daarmee is het systeem dus ook geschikt voor bijvoorbeeld vrachtwagens die lange afstanden achter elkaar afleggen. En anders dan bij snelladen is er geen vooruitgang in batterijtechnologie nodig.

Voor alle duidelijkheid: het toepassen van dit systeem in het wegvervoer staat nog in de kinderschoenen. Toch is het misschien nuttig om nu alvast na te denken over hoe Nederland expertise op dit gebied op kan bouwen. Als wij inderdaad een internationale proeftuin voor elektrisch rijden willen zijn is een pilot met inductief opladen wellicht op zijn plaats, ook al om naast de technische issues een aantal praktische en organisatorische vragen te beantwoorden:

- Waar komen de eerste stroken? Gebruiken we in verband met de kosten alleen de rechter rijstrook? Wat is het effect op het rijgedrag? Gaan mensen bijvoorbeeld meer rechts rijden?
- In hoeverre maakt het systeem oplaadpunten op parkeerplaatsen, snellaadpunten en batterijwisselstations overbodig? Hoe verschuift het energiegebruik gedurende de dag?
- Hoe komt de wegbeheerder aan de energie die ervoor nodig is? Kunnen de wegen wellicht ingezet worden om de energie naar oplaadstroken en oplaadpunten te transporteren? Wordt de wegbeheerder daarmee een energieproducent en/of energiedistributeur?
- Kan het systeem gebruikt worden om spreiding in de tijd te stimuleren door op bepaalde momenten op de dag een korting op de stroomprijs te geven?

Inductiestroken plaatsen de wegbeheerder in het brandpunt van de ontwikkelingen rondom elektrisch rijden.

Het Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST) experimenteert met oplaadstroken in de wegen onder de naam OLEV (voor on-line vehicle). Het KAIST claimt dat het aanbrengen van een oplaadstrook in Korea circa 230 duizend euro per kilometer kost, vele malen goedkoper dan de aanleg van bijvoorbeeld een trambaan. Circa 30% van de weg waar een voertuig gebruik van maakt zou van inductiestroken voorzien moeten worden. Het geld wordt terugverdiend omdat elektrische voertuigen minder grote batterijen nodig hebben.

Op het proeftraject is de efficiëntie inmiddels toegenomen van 60% tot 72%, terwijl het KAIST er tegelijkertijd in slaagde om een grotere hoogte te overbruggen (van 12 naar 17 centimeter). Momenteel wordt er een shuttle service met bussen van dit systeem voorzien. Daarna volgen selecte busbanen. Als alles goed gaat volgt een brede uitrol.[80]

Een weg die geen energie kost maar oplevert

We kennen de weg als een lint door het landschap dat energie kost. Maar de weg zou in theorie meer energie kunnen opwekken dan het verkeer er overheen kost.

Windmolens in de middenberm die visueel markeren waar de snelweg zich bevindt. Automobilisten op de snelweg die weten: ik beweeg me voort met de energie die nu uit die draaiende wieken komt. Als het doel van de windmolens zo direct duidelijk is zal de acceptatie wellicht hoger zijn dan wanneer de windmolen in een weiland tussen de koeien komt te staan.

De beslissing om de middenberm van de weg van hoge windmolens te voorzien is er uiteraard niet één die de wegbeheerder in zijn eentje kan nemen. Bovendien is de rentabiliteit van de investering sterk afhankelijk van de kracht en regelmatigheid van de wind op een bepaalde locatie. Over het algemeen komen windmolens daarom het best tot hun recht als ze op een heuveltop, aan de kust of midden in een grote vlakte staan.[83]

Hoe zit het met zonne-energie? Zonnepanelen op geluidswallen worden nu al gebruikt maar slechts een deel van de geluidswallen vangt voldoende zon en het totale oppervlak is beperkt. Als we het hele wegoppervlak zouden gebruiken is de hoeveelheid energie die verkregen kan worden echter hoog. Als we allemaal elektrisch zouden rijden, dan zou het wegdek genoeg energie opleveren om alle weggebruikers van energie te voorzien.

In de VS wordt er aan deze toekomstvisie gewerkt door de firma Solar Roadways. In Nederland onderzoekt Wegen naar de Toekomst samen met TNO in hoeverre zonnepanelen in de weg geïntegreerd kunnen worden.

De vraag is wel wat die zelf opgewekte energie ons waard is. In veel gevallen is het goedkoper om energie uit het buitenland te importeren. Maar om redenen van veiligheid, betrouwbaarheid en onafhankelijkheid kan het aantrekkelijk zijn om de energie toch lokaal of in ieder geval in Nederland op te wekken.

Het "Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr" (IAV) is een Duits ingenieursbureau dat met 3.000 medewerkers en een focus op de auto-industrie een serieuze speler is in de autobranche. Volgens het AIV is elektrisch autorijden de toekomst en zal inductief opladen daaraan een belangrijke bijdrage leveren. Voordelen van opladen via inductie zijn volgens het AIV de ongevoeligheid voor weersinvloeden en mechanische slijtage en het feit dat het systeem onzichtbaar in de auto aangebracht kan worden.
Het AIV denkt binnen drie jaar een systeem met een efficiëntie van 90% productierijp te kunnen maken. De prijs blijft binnen de perken omdat slechts één rijstrook van zorgvuldig gekozen stukken weg van een oplaadstrook hoeft te worden voorzien. De rest van de tijd levert de opgeladen batterij de benodigde energie.

De auto moet wel precies midden over de oplaadstrook heen rijden. Intelligente sturing in de vorm van lane-assist (zie pagina 72) is dan ook aan te bevelen.[81]

Het IAV heeft zelf een inductieve weg op schaal aangelegd die volgens hen probleemloos werkt. Een baan op ware grootte in NiederSachsen staat intussen op stapel. Het AIV werkt nog aan een systeem waarbij de auto de inductiestroken automatisch activeert als hij er overheen rijdt. Het systeem zal ook automatisch registreren hoeveel energie de auto afneemt zodat duidelijk is hoeveel er betaald moet worden.[82]

De zon-e-weg is een concept dat wordt verkend door Wegen naar de Toekomst, samen met TNO.

Rekenvoorbeeld

Stel dat we het wegdek in Nederland zouden voorzien van zonnepanelen, hoeveel zou dat dan opleveren? In Nederland hebben we 3.260 km Rijkswegen, goed voor 82km². Laten we er vanuit gaan dat we 30 km² daarvan kunnen voorzien van "zonnetegels".[84] Verder hebben we nog 133.000 km gewone wegen waar zeker 400 km² aan zonnetegels op past.[85]

Eén m² zonnetegel wekt zo'n 17 watt op[86] dus het Rijkswegennet is goed voor 0,5 gigawatt: de helft van een grote kolencentrale. De rest van het wegennet zou zelfs 7 gigawatt of 7 kolencentrales aan energie op kunnen leveren.

In Nederland is het totale elektriciteitsgebruik 13 gigawatt: de weg zou ruim de helft daarvan kunnen leveren!

En als we allemaal elektrisch zouden rijden hadden we daarvoor ongeveer 5 gigawatt nodig. Zonnepanelen op de weg leveren meer energie dan elektrisch wegverkeer nodig heeft![87]

Met oplaadstroken zou de opgewekte energie bovendien direct aan het wegverkeer "teruggegeven" kunnen worden.

Overigens vraagt het wegverkeer op andere momenten om stroom dan de zon (of de wind) ons die geeft. Je moet dan kunnen bufferen. Daarvoor zijn het supergrid en het smart grid noodzakelijk. (Zie pagina 22)

De firma "Solar Roadways" bepleit de aanleg van een "glazen weg". Een glazen wegdek heeft een aantal voordelen: het kan stroef gemaakt worden; het is slijtvast; er kan intelligente verlichte wegmarkering onder aangebracht worden die straatlantarens overbodig maakt; en er kunnen zonnepanelen onder aangebracht worden. Glas heeft ook een nadeel: het kan niet aangebracht worden op asfalt. Asfalt is namelijk flexibel: het beweegt mee met de ondergrond. De glazen bovenlaag zou onherroepelijk breken.

Een glazen toplaag betekent dan ook dat er gebruik gemaakt zal worden van een modulair wegdek met betonnen "tegels" van meerdere vierkante meters groot. In Nederland is ModieSlab daarvan een goed voorbeeld.[88] *Zulke modules zouden in de fabriek ook van andere value added services kunnen worden voorzien. Bijvoorbeeld de inductiestrook voor draadloos opladen die we zojuist beschreven.*

In de VS heeft men zoveel wegoppervlak per bewoner dat een dergelijk systeem driemaal zoveel elektriciteit zou opleveren als men nodig heeft.[89]

7 Trends die door elektrisch rijden worden versterkt

Het is nog veel te vroeg om de toekomst van elektrisch rijden te voorspellen. Kijkend in onze “kristallen bol” zien we echter dat elektrisch rijden bijdraagt aan diversificatie van het voertuigaanbod, aan intelligente vervoersmiddelen en aan nieuwe vormen van collectief vervoer.

Diversificatie van het vervoersaanbod

Elektrisch rijden versterkt de trend tot diversificatie van vervoersopties over korte afstand.

Gechargeerd gezegd rijdt bijna iedereen het hele jaar rond in een auto die gekocht is om er met de hele familie mee op vakantie naar Spanje te kunnen gaan.

Elektrisch rijden zou daar verandering in kunnen brengen door meer diversiteit in het aanbod van persoonlijke transportmiddelen te bieden. Die diversiteit ontstaat omdat elektrische voertuigen nieuwe mogelijkheden bieden:

- Gebruik binnen (zoals bij invalidewagens) is mogelijk omdat er geen sprake is van uitlaatgassen en geluidsoverlast.
- Miniaturisering kan zover worden doorgevoerd dat de motor in een fietsnaaf of zelfs een stel elektrische benen past.
- Gebruik is mogelijk in situaties waarin er geen menselijke supervisie is, zoals in het geval van de “geautomatiseerde taxi’s”. Bij een brandstofmotor zou dit in verband met de foutgevoeligheid en onderhoudsgevoeligheid al snel onverantwoord zijn.
- Kleine series voor een specifieke toepassing of doelgroep kunnen voor relatief lage kosten worden ontworpen en geproduceerd. Bij een brandstofmotor moet rekening gehouden worden met de aan- en afvoer van rookgassen, bediening, startmotor, versnelling, koppeling en dergelijke. Dit maakt ontwerp en realisatie snel te kostbaar voor de productie van kleine series.
- Een stekker is voldoende om energie bij te laden. Je zou bijvoorbeeld een witte fietsenplan, maar dan met gemotoriseerde fietsen, eenvoudig kunnen elektrificeren door de fiets op te laten via de kabel waarmee je hem vastzet. Benzine tanken zou veel lastiger zijn.

Zolang er nog geen infrastructuur van snellaadpunten, batterijwisselstations en oplaadstroken in het wegdek bestaat is elektrisch rijden vooral aantrekkelijk voor de wat kortere afstand. De diversificatie van elektrische mobiliteit zal in eerste instantie dan ook ontstaan in de vorm van vervoersaanbod voor relatief korte afstanden in aanvulling op de gezinsauto waarmee we op vakantie kunnen. Denk aan de tweede auto, de elektrische scooter en de elektrische fiets.

Aangezien het leeuwendeel van onze verplaatsingen over een afstand van minder dan vijf kilometer plaatsvindt zouden elektrische voertuigen die vooral voor de korte afstand worden gebruikt een grote impact kunnen hebben op de leefsituatie in de stad. Het zou ook de aantrekkelijkheid van het openbaar vervoer kunnen vergroten door betere en meer persoonlijke opties te bieden voor “de laatste kilometer”.

Elektrische voertuigen

Een totaaloverzicht is niet mogelijk want het aantal bijzondere elektrische voertuigen is nu al te groot maar bij deze enkele voorbeelden:

- Ouderen en gehandicapten krijgen steeds vervoersopties. Bijvoorbeeld de Citymover: een elektrische invalidewagen waarmee je de lift en het winkelcentrum in kan maar die ook met 45 kilometer per uur over de openbare weg kan rijden.[90]
- Auto’s als de Lumeneo zijn een cross-over tussen motor en auto: zo breed als een brommer maar met de bescherming van een auto.
- De onder jongeren steeds populairdere brommobielen zijn een cross-over tussen brommer en auto en ook zij lenen zich uitstekend voor elektrificering.[91]
- Elektrische scooters zijn bij jongeren populair en spreken nieuwe doelgroepen aan. Aangezien brommergeluid veel overlast veroorzaakt is ook hiervan de impact groot.[92]
- Elektrische fietsen betekenen dat ouderen langer blijven fietsen en dat de fiets een groter bereik krijgt. Dat heeft vooral in de stad grote consequenties.
- De Segway is een categorie vervoermiddel dat tot voorkort niet bestond.
- Honda’s elektrische benen voor mensen die moeite hebben om zelfstandig te lopen of die zwaar werken moeten doen in de fabriek zijn een nieuw fenomeen.[93]
- De elektrische auto’s van Spykstaal in Abu Dabi en van het *Personal Rapid Transport* in Londen (zie pagina 74). Zij leveren een soort “openbaar vervoer met privé taxi’s”.

Wet- en regelgeving

Nieuwe voertuigen betekent ook nieuwe wet- en regelgeving. Wat doen we met een “voertuig voor voetgangers” zoals de Segway? Hoe zit het met “invalide-wagens” die zich met hoge snelheid kunnen verplaatsen? Wie is er verantwoordelijk als de bestuurder van een computergestuurde auto in slaap sukkelt en er gaat iets mis?

Het betekent trouwens ook “inleertijd” voor de weggebruikers.

De burger en de wetgever kunnen zich dus maar het beste tijdig op deze veranderingen voorbereiden.

Deze Lumeneo is een tweepersoons auto van 79 cm breed.

Met intelligente auto's minder files en ongelukken

Geavanceerde *features* verbeteren de doorstroming en voorkomen ongelukken. In de toekomst zullen auto's zich ook zonder menselijke bestuurder kunnen verplaatsen.

Elektrische auto's lopen voorop bij de introductie van geavanceerde *features* zoals: *adaptive cruise control; lane assist; automated parking; emergency brake assist; abs* en *electronic stability control* (zie pagina 12). Als iedereen zulke features gebruikt heeft dat consequenties voor de infrastructuur.

Auto-ontwerpers geven aan dat voornoemde features wat hen betreft slechts het begin zijn. Zo werkt Toyota aan een systeem waarbij de auto zelf voetgangers herkent en daarvoor automatisch remt. Volvo laat zich inspireren door de "zero-collision" filosofie van helicopters. Helicopters moeten licht zijn en zitten daarom vol met actieve veiligheidssytemen die de kans dat er een botsing kan optreden tot vrijwel 0% reduceren. Met die benadering kan de trend gekeerd worden om de auto steeds meer als een soort tank te construeren. Een tank is namelijk duur, levert meer gevaar op voor de omgeving en verbruikt veel benzine of elektriciteit.

De *features* zouden niet alleen de veiligheid kunnen vergroten maar ook de doorstroming. Met een systeem waarbij de auto automatisch afstand houdt tot de voorganger (door TNO de *file-assistent* gedoopt) zouden wegversmallingen bijvoorbeeld nauwelijks nog vertraging opleveren.

Het aantal auto's dat de weg af kan handelen wordt nog weer groter als er gebruik wordt gemaakt van *treintje rijden* waarbij een aantal auto's zichzelf tot volgauto verklaart. Hierdoor ontstaat er een rij voertuigen die als treinwagonnetjes achter elkaar rijden. Het concept wordt mogelijk door een combinatie van *drive by wire* aansturing met elektromotoren en informatietechnologie.

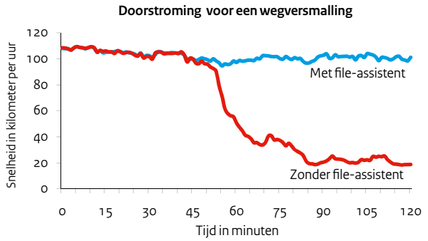
Lane assist is ook een interessante optie. Niet alleen vanwege de veiligheid en het gemak maar ook omdat de rijbanen smaller gemaakt zouden kunnen worden als iedereen dit systeem standaard zou gebruiken.

Als we vooruit kijken naar het jaar 2028 dan kunnen we nog verder gaan. Volledig geautomatiseerde aansturing is dan technisch geen probleem meer. In hoeverre automobilisten zullen accepteren dat hun auto zelf rijdt is nog een open vraag. Er zijn echter indicaties dat de diverse *driver assist systems* sneller geaccepteerd worden dan we vaak denken.[94]

Als volledig automatische aansturing er komt betekent dit dat er minder asfalt nodig is: rijstroken kunnen smaller zijn omdat computers niet over de rijstrook slingeren, en het aantal auto's dat per rijstrook afgehandeld kan worden neemt toe.

Automatische aansturing heeft ook consequenties voor verkeersdeelname. Mensen die zelf niet mogen of kunnen rijden - denk aan ouderen, jongeren en gehandicapten - zouden op deze manier toch de beschikking krijgen over een auto. Anderen zouden het systeem kunnen verwelkomen als een privé-chauffeur die het mogelijk maakt om onderweg andere dingen te doen. Met zo'n privé-chauffeur kan je bijvoorbeeld in de file de krant lezen. Tenslotte heeft iedereen zo altijd een "Bob aan boord" dus er is geen enkele reden meer om onder invloed van alcohol te gaan sturen.

Deze auto won in 2007 de DARPA Urban Challenge. De auto's moesten bij deze wedstrijd zelfstandig 100 kilometer door een stadse omgeving afleggen, waarbij ze uiteraard rekening moesten houden met de verkeersregels en met de andere weggebruikers.



In de figuur is te zien wat er gebeurt als er een wegversmalling optreedt. De rode lijn laat zien wat er normaal gesproken gebeurt: de snelheid zakt in tot circa 20 kilometer per uur. De blauwe lijn laat zien wat er gebeurt als de helft van de bestuurders een systeem gebruikt dat automatisch een afstand van 0,8 seconde tot de voorligger aanhoudt: iedereen kan vlot doorrijden.

De gegevens komen uit een simulatiemodel van TNO en van observaties op de A12. De figuur geeft de situatie weer, 700 meter voor een wegversmalling van 4 naar 3 banen.[95]

In Masdar City komen auto's op benzine de stad niet meer in. In plaats daarvan maakt men binnenkort gebruik van ruim 3.000 intelligente elektrische taxi's die 24 uur per dag beschikbaar zijn en 135.000 ritjes per dag kunnen maken.

"De luxe en het gemak van een eigen voertuig, maar congestie, parkeren, wachten, de weg kwijt raken en auto-ongelukken behoren tot het verleden."

De website van Masdar City, Abu Dhabi [97]

Collectief vervoer

Als we individueel vervoer combineren met openbaar vervoer levert de combinatie het beste van twee werelden.

De auto en de fiets worden meer gewaardeerd dan openbaar vervoer. Dat komt waarschijnlijk omdat ze individueel vervoer bieden.[96] Maar waarom zou openbaar vervoer geen individueel vervoer kunnen zijn?

Masdar City en Londen gaan een soort geautomatiseerde taxi's aanbieden. De taxi's kunnen ook zelf een oplaadpunt opzoeken en zij verplaatsen zich (net als gewone taxi's) automatisch naar de plekken waar vervoer nodig is. Dergelijke systemen hebben maar één rijstrook per rijrichting nodig. Die rijstrook kan bovendien smal en dus goedkoop zijn. Ook tunnels en verhoogde weggedeelten zijn voor die ene rijstrook relatief goedkoop. Aardig detail is dat deze stille en schone elektrische taxi's bij gebouwen naar binnen rijden.

Ruimtewinst in de stad wordt ook gerealiseerd omdat niet iedereen zijn eigen vervoermiddel in de stad hoeft te parkeren. Als iedereen het systeem zou gebruiken (zoals in Masdar City) dan zou er nauwelijks parkeerruimte in de stad nodig zijn.

Een mobiele telefoon met internet is uit veel van dit soort concepten niet meer weg te denken. Via je mobiele telefoon kan je zien waar de vervoermiddelen zich ten opzichte van jou bevinden en je kunt ze eventueel ook naar je toe dirigeren. Natuurlijk kun je met je mobiele telefoon ook vervoermiddelen reserveren en betalen.

Een intrigerende gedachte is dat "gewone" elektrische auto's met voldoende ingebouwde intelligentie in principe ook door een dergelijk systeem aangestuurd zouden kunnen worden. Je zou dan buiten de stad met auto en al het "perron" van een "taxistandplaats" op kunnen rijden. Vervolgens zou je auto zich even net zo gedragen als de andere wagentjes in het systeem. Tenslotte zou je op je bestemming van het perron af worden gereden en kan je het stuur daarna weer overnemen.

Sommige ontwerpers kijken naar de DARPA Urban Challenge (zie pagina 73). Daarin kunnen auto's zich volledig computergestuurd in het bestaande - door onvoorspelbare mensen - gedomineerde autoverkeer bewegen.

Londen is bezig met een systeem dat ULTra (Urban Light Transport) is gedoopt. ULTRa lijkt op een metro in de zin dat het een eigen "spoor" heeft met vaste "stations" waarop je in- of uitstapt. Maar het werkt met losse auto's die over een gewoon wegdek rijden. De auto rijdt weg zodra je bent ingestapt en zijn er geen tussenstops.[98]

Het Massachusetts Institute of Technology stelt voor om overal in de stad zelfrijdende elektrische auto's neer te zetten die net als boodschappenkarretjes een beetje "in elkaar passen". Zo nemen ze weinig parkeerruimte in beslag.

Dit is de CyCab van IRNIA. De compacte elektrische auto rijdt zonder menselijke bestuurder maar zou op dezelfde manier ingezet kunnen worden als een gewone taxi.

Intermezzo

De weggebruiker van 2028

Achmed en Andrea zijn twee vrienden die elkaar virtueel ontmoeten. Dat gebeurt op de virtual spot StayInTouch.com.

StayInTouch.com is een site die nog het meest lijkt op de sites die we in 2010 al kenden als Twitter of facebook.

Later die dag gaan ze samen wat leuks doen. Een sfeerimpressie van zomaar een dag uit het leven van twee mensen in 2028...

Wegen naar de Toekomst heeft een beeld ontwikkeld van hoe de weggebruiker van de toekomst zou kunnen leven, wonen en werken.

Deze toekomstige weggebruiker laat zich kenmerken door de onderstaande tien drijfveren. Deze drijfveren zijn een inspiratie-bron voor het fictieve gesprek.

1. Tijd nuttig besteden
2. Collectieve systemen
3. Keuze boven bezit
4. Service in plaats van product
5. Autovrije binnenstad
6. Keuzevrijheid
7. Netwerksamenleving
8. Ontwikkelen samen met gebruikers
9. Nieuwe generatie
10. Verzilvering

Achmed van Dijk

Profielnaam
Robbie

Status
Tijdelijk vrijgezel

Leeftijd
34

Beroep
Grafisch ontwerper (eigen bedrijf)
Rijkswaterstaat (communicatie adviseur)

Contactinfo
www.achmedvandijk.stayintouch.com

Vervoer
Lid AnyCar=Mine
Soms mijn oude old-timer Toyota prius

Andrea Bos

Profielnaam
Car=Castle

Status
Relatie

Leeftijd
31

Beroep
Eigenaar van creative design.nl
Parttime ouderenzorg

Contactinfo
www.AndreaBos.stayintouch.com

Vervoer
Volkswagen Happy traveler

Register now | do you have an account? | Sign In

StayIn Touch

Robbie Hey Andrea, jij ook hier op de A2? ☺
32 minutes ago

Car=Castle Achmed! Jij hier! Wat ben je aan het doen?
28 minutes ago

Robbie Ik kom uit Maastricht, net een pitch gegeven en op de terug weg bij starbucks gezeten. Had daar nog een meeting met collega's van Rijkswater-staat. Jij? En waar rij je precies. De navi geeft aan dat je hier ergens moet zitten maar 'k zie je niet!
27 minutes ago

Car=Castle ik zie jou ook niet, maar jij hebt ook altijd een andere auto met die anycars van je. :-p Ik was net even lekker aan het mijmeren. Had vanochtend druk op mijn werk, maar kwam niet echt vooruit. Ik ga zondagmiddag thuis wel even verder.
22 minutes ago

Car=Castle Ik rij NU de ring Utrecht op. Daar ben ik dus ☺
22 minutes ago

Robbie Ik NU!
21 minutes ago

Robbie VET! Er zijn nog kaartjes voor de Formule E races op de Veluwe vanmiddag. Ga je mee? Ik weet wel dat je niet van autosport houdt, maar het is heerlijk in de natuur. En voor jou veel mooie mannen daar natuurlijk ;-)
18 minutes ago

Car=Castle Ach ja, waarom ook niet. Ik ga wel lekker tegen een boom genieten van het mooie weer en de stilte. Gaan we daarna Mongools eten in Apeldoorn?
14 minutes ago

Robbie Leuk! Zien we elkaar bij P&R Westraven? Dan lever ik daar mijn AnyCar in.
9 minutes ago

Car=Castle Mieters. Dan zien we elkaar zo in mijn happy autootje. Machiatto of Cafe con leche?
7 minutes ago

Robbie hmmmm! Machiatto! Voor de koffie uit jouw nieuwe italian design incar-espressomachine rijd ik desnoods een halve dag om!
4 minutes ago

Car=Castle Doe dat nou maar niet. Ik sta al te wachten op je. Waar blijf je nou?
3 minutes ago

Robbie Kijk eens achter je :-p
3 minutes ago

Car=Castle Ik had je niet aan horen komen!
3 minutes ago

Robbie duhhuh! Ik rijd toch in een elektrische auto!!
3 minutes ago

InTouch Toppics

#nowplaying
Bio
#omgfacts
Weather
Solar power
Copenhagen
#in2029
#thisisgreen
#youbeblownwhen
Adventure

8 Gevolgen voor de infrastructuur

Het onderwerp elektrisch rijden is intussen van diverse kanten belicht. Maar wat betekent het voor de infrastructuur?

Energietransitie voor wegtransport

De overstap van benzine naar elektriciteit heeft grote economische consequenties. Het zal leiden tot een nieuw krachtenveld met nieuwe rollen, ondermeer voor de wegbeheerder.

De tankstations voor benzineauto's bestaan al langer dan de meeste van ons zich kunnen heugen. Voor de elektrische auto kan weliswaar gebruik worden gemaakt van het bestaande elektriciteitsnetwerk, maar alle oplaadmogelijkheden moeten nog worden geschapen.

Het is moeilijk te voorspellen welke gevolgen de energietransitie van het wegtransport allemaal zal hebben. We weten echter dat de olie-industrie de grootste industrie ter wereld is met het wegvervoer als belangrijkste klant. Alleen al wat betreft de economische verhoudingen kan de transitie dus ingrijpend zijn. De rol van de olie-industrie zal worden overgenomen door de elektriciteits-industrie en de batterijleveranciers. De weg zelf kan hierin een rol krijgen als producent van energie en als "drager" (letterlijk en figuurlijk) van het elektriciteitsnetwerk. De wegbeheerder wordt dan energieproducent en/of energiedistributeur.

Verder krijgen de bestaande autofabrikanten in dit nieuwe krachtenveld gezelschap van een reeks nieuwe autofabrikanten die zich specifiek op elektrische auto's richten. Ministeries als VenW, EZ en VROM zullen voor de nieuwe infrastructuur met deze nieuwe spelers te maken krijgen.

Een oplossing voor *range anxiety*

De wegbeheerder kan ervoor zorgen dat de elektrische auto dezelfde actieradius krijgt als een benzineauto.

Zoals we gezien hebben is de belangrijkste uitdaging van de elektrische auto om met betaalbare batterijen een voldoende grote actieradius ofwel *range* te scheppen. Een auto die geen langere afstanden kan rijden roept bij de gebruiker namelijk *range anxiety* op en dit is het voornaamste obstakel bij de verkoop van elektrische auto's.

Enige jaren terug hadden de meeste "experts" zich erbij neergelegd dat *range anxiety* een onoplosbaar probleem was omdat batterijen "nu eenmaal" te zwaar waren om lange afstanden mee af te leggen en omdat een auto "nu eenmaal" een paar uur nodig had om opgeladen te worden. Maar die aannames worden intussen door de ontwikkelingen achterhaald.

Het ziet er nu naar uit dat tankstations langs de snelwegen een prominente rol zouden kunnen spelen bij de oplossing van dit probleem. De overheid (van lokaal tot aan Europees niveau) zou de invoering van de volgende oplossingen kunnen versnellen:

1. Snelladen
   Met de huidige stand van zaken kan er voor minder dan 100.000 euro per oplaadpunt een snellader worden gerealiseerd die een auto binnen tien minuten weer oplaadt. Wanneer de 250 tankstations langs de snelwegen zo'n oplaadpunt krijgen bevindt een elektrische auto zich vrijwel altijd binnen 25 kilometer van een snellader. Daarmee is het vergeleken met de totale transitie een relatief goedkope maatregel.
   Intussen zijn er al meer dan 10.000 van dergelijke snelladers verkocht in de Verenigde Staten en ook Nederland heeft met Epyon een vooruitstrevend bedrijf dat snelladers fabriceert en verkoopt.[99] Experimenten zullen uitwijzen in hoeverre snelladen tot een versnelde veroudering van batterijen leidt.
   De overheid zou de invoering kunnen versnellen middels het stellen van eisen aan de exploitanten van tankstations.
2. Batterijwisselstations
   Door de lege batterij te vervangen door een volle kan een auto binnen twee minuten opgeladen het tankstation verlaten. Deze oplossing vereist geen geavanceerde batterijen. De firma *Better Place* heeft een open standaard ontwikkeld die ze graag in zoveel mogelijk landen ingevoerd wil zien. Zij heeft al een half miljard euro om in Israël, Denemarken en Hawaï wisselstations te plaatsen maar ziet ook kansen in Nederland. Dit concept vereist wel dat de autofabrikant er bij het ontwerp van de auto al rekening mee houdt. Europese standaarden zouden een belangrijke bijdrage kunnen leveren aan de kans van slagen van het concept. Aangezien waarschijnlijk niet alle autofabrikanten deze oplossing zullen implementeren lijkt het een concept dat naast de snellader zal bestaan.
3. Opladen tijdens het rijden
   Vooral inductief opladen lijkt op termijn een kansrijke maar kostbare oplossing en dit zou voor de wegbeheerder vergaande consequenties hebben. Het systeem vereist allereerst dat er zowel in het wegdek als in de auto apparatuur wordt ingebouwd en die apparatuur moet op elkaar afgestemd zijn.
   Dit systeem biedt ook de mogelijkheid om vrachtwagens die lange afstanden achter elkaar rijden elektrisch aan te drijven, iets wat met batterijen een bijzonder lastige opgave is. Gezien het grote benzineverbruik van vrachtwagens zouden de kosten sneller terugverdiend worden dan bij personenwagens. Waarschijnlijk zou een dergelijk systeem in Europees verband opgepakt worden, maar net als bij de batterijwisselstations zijn Denemarken en Nederland voor de hand liggende kandidaten voor de invoering van een proeftuin.
   Mocht er besloten worden tot aanleg dan moeten er rijstroken geselecteerd worden en moet er in overleg met ICT bedrijven, elektriciteitsleveranciers en netwerkbedrijven een afrekensysteem komen. Als het tarief van de elektriciteit varieert in de tijd kan daarmee het gebruik van de weg buiten de spits worden gestimuleerd.

“Intelligente” wegen en voertuigen

De software in de auto zal een steeds belangrijker rol innemen. Zowel bij het ontwerp als bij het testen en normeren.[100]

Meer intelligentie in voertuigen betekent voor VenW dat zij in toenemende mate verantwoordelijk wordt voor het testen en normeren van software. Immers: als een auto mechanisch goed functioneert maar de software die het voertuig bestuurt een fout bevat dan is de auto als geheel een gevaar op de weg.

Als er wordt gekozen voor inductief opladen dan betekent dit dat er extra intelligentie in de auto noodzakelijk is. Om de overdracht efficiënt te maken is het namelijk belangrijk dat de auto precies boven de oplaadstrook rijdt. Dit is voor een menselijke chauffeur moeilijk en inspannend maar voor een geautomatiseerd systeem niet.

Een mogelijke oplossing is een systeem van *lane assist*. De menselijke bestuurder heeft hier de eindcontrole en bepaalt wanneer er wordt ingehaald en wanneer er een afslag wordt genomen. De computer zorgt ervoor dat de auto precies boven de oplaadstrip rijdt op de momenten dat de menselijke bestuurder niet ingrijpt.[101]

Consequenties voor wegbeheer

Voor de wegbeheerder zou de elektrische auto een aantal praktische consequenties kunnen hebben.

Als er meer behoefte ontstaat aan elektriciteitsleidingen langs de weg zou dit in toenemende mate iets kunnen zijn om rekening mee te houden bij het inplannen van de weg zelf en bij het inplannen van werkzaamheden aan de weg. In de VS wordt er nu bijvoorbeeld een grote koppeling tussen de drie elektriciteitsnetten gebouwd met supergeleidende kabels die naast de snelweg worden begraven, juist omdat procedures over de “right of way” de aanleg anders zouden vertragen.[102]

Een gevolg van elektrificering zou kunnen zijn dat auto’s sneller gaan optrekken en vervolgens sterker gaan afremmen. Zodra ook vrachtwagens elektrisch gaan rijden zouden bepaalde weggedeeltes - zoals het asfalt voor stoplichten - mogelijk eerder vervangen moeten worden.

De betrouwbaarheid van elektrische auto’s is groter. Daardoor zijn er minder pechhavens nodig. Er wordt wel een nieuw fenomeen geïntroduceerd: hoe zorg je voor noodstroom aan een auto die

zonder elektriciteit zit? En ook hulpdiensten en de wegenwacht zullen zich op het fenomeen elektrisch rijden moeten instellen.

Verdichting van het wegtransport

We moeten woekeren met de ruimte, bijvoorbeeld door met de weg energie op te wekken. Elektrisch rijden maakt wegen dicht bij de leefomgeving mogelijk. Het schept ook perspectieven voor compactere wegen met meer tunnels en verhoogde weggedeelten. Wellicht hebben we minder parkeerruimte nodig.

Met verdichting van het wegtransport wordt bedoeld dat er nog meer vervoer uit elke daarvoor bestemde vierkante meter moet worden geperst. In ons volle landje is dat sinds jaar en dag een uitdaging waarvoor degenen verantwoordelijk voor de infrastructuur zich gesteld zien.

We kunnen de weg niet alleen gebruiken voor wegtransport maar ook om energie mee op te wekken. In theorie zelfs evenveel energie als er nodig is voor het wegtransport zelf. Dat oppervlak komt dan op andere plekken weer vrij.

We kunnen de afstand tussen weg en leefomgeving verkleinen. “In Nederland is de emissie van fijnstof een belangrijke kwestie. Door overschrijdingen van de grenswaarden komen nieuwe ruimtelijke ontwikkelingen, zoals woningbouw en infrastructuurprojecten, in het gedrang”, aldus het Kennisinstituut voor de Mobiliteit in het rapport Mobiliteitsbalans 2009.[103]

Wegen met overwegend elektrische voertuigen kennen die uitstootproblematiek niet. Bij lagere snelheden wordt er met elektrische voortuigen bovendien een aanzienlijke geluidsreductie bereikt.[104] Bij elektrisch rijden kan de afstand tussen leefomgeving en de weg worden verkleind en kan de grond aan weerszijden van de weg beter worden benut. Bovendien zijn er minder veiligheidsmaatregelen noodzakelijk en ook dat bespaart ruimte.

Er is een hele reeks ontwikkelingen die de weg zelf compacter zou kunnen maken.

In 2009 is de film ‘Als het stil is geworden’ gemaakt. Enkele onafhankelijke deskundigen geven hierin hun visie op de snelwegen in Nederland over pakweg 10, 20, 30 jaar. Iedere weggebruiker heeft een andere beleving van de snelweg, zijn eigen ideale snelweg. Deze film laat zien hoe je de snelweg anders kunt gebruiken dan alleen de snelste verbinding tussen A en B. De wereld die daarin geschetst wordt komt met de elektrische auto ineens dichtbij. [105]

Kleinere voertuigen hebben sowieso smallere rijstroken nodig dus diversificatie zou bij bepaalde scenario’s tot rijstroken speciaal voor smalle voertuigen kunnen leiden. Het is ook mogelijk dat er meer voertuigen komen zoals de Segway en de elektrische fiets die niet van de autoweg maar van het fietspad gebruik maken en tenslotte is het mogelijk dat we met nieuwe vervoersvormen zoals ULTra en de autonome stadsauto de behoefte aan een heel nieuw soort wegen zien ontstaan. Die wegen zullen in verhouding tot hun oppervlak veel verkeer kunnen verwerken maar als je een nieuwe infrastructuur naast een bestaande aanlegt is het natuurlijk de vraag of je tot een netto-verdichting komt.

Diversificatie zou er ook toe kunnen leiden dat steeds meer mensen gebruik maken van auto’s als de Lumeneo die net als een motor tussen de auto’s door kunnen rijden. Als dat een grote vlucht neemt zou dat wellicht tot minder files kunnen leiden al zitten er anderzijds ook veiligheidsaspecten aan.

Intelligente sturing heeft de potentie om tot grote ruimtebesparing te leiden. We zagen hoe *adaptive cruise control* het fileprobleem zonder wegverbreding kan reduceren. Het zogenaamde “treintje rijden” kan de doorvoer nog verder vergroten en met *lane assist* zijn wellicht smallere rijbanen nodig. Volledig automatische aansturing leidt tot de meeste verdichting en zou voor de wegbeheerder grote consequenties hebben.

Hoe smaller en lichter een weg is, hoe goedkoper het is om hem op palen te zetten. Dan kan de grond onder de weg een andere toepassing krijgen en kan het verkeer onder de weg net als bij een ongelijkvloerse kruising door rijden.

Smalle wegen in combinatie met emissievrije en relatief betrouwbare elektrische auto’s is ook relevant voor de aanleg van landtunnels. De kosten van dergelijke tunnels zouden voor dit soort wegen aanzienlijk lager uitvallen. Omdat elektrisch vervoer minder gevaren met zich meebrengt kan de grond boven de tunnel wellicht worden bebouwd. In dat geval zou de waarde van de grond wel eens hoger kunnen zijn dan de meerprijs van de ondertunneling.

Tenslotte nemen voertuigen ruimte in als ze stilstaan. Wanneer elektrisch rijden ertoe leidt dat we meer voertuigen kopen (bijvoorbeeld meer tweede of zelfs derde auto’s) dan zou het effect op de verdichting negatief uitvallen. Als de voertuigen echter kleiner worden en in de plaats komen van een auto dan leidt dat wel tot verdichting. Tenminste, als je er rekening mee houdt. Zo zou het jammer zijn als een scooter of een ultra-compacte auto een parkeerplaats bezet houdt waarop ook een grote elektrische auto kan staan. Dan kan je misschien beter voor extra aansluitingen op de stoep zorgen.

Nawoord

De elektrische auto speelt een sleutelrol in een groots avontuur

Onze beschaving draaide de afgelopen eeuw op fossiele brandstoffen: olie, gas en kolen. We maken die een miljoen keer sneller op dan ze ontstaan. Vooral de olie waarvan we autobrandstof maken wordt snel schaarser. De elektrische auto geeft ons de optie om de overstap van schaarse olie naar overvloedige duurzame energie te maken.

Ik ben ervan overtuigd dat we die overstap leuk zouden vinden. Want de elektrische auto rijdt volgens de meeste mensen zeker zo prettig. Bovendien is hij stil en betrouwbaar en produceert hij geen uitlaatgassen.

Op technologisch gebied gaan de ontwikkelingen de laatste jaren snel. Cruciaal is dat batterijen steeds krachtiger en goedkoper worden. Oplaadpunten bij parkeerplaatsen lijken er ook te komen: elektriciteitsmaatschappijen willen daarmee hun afzet vergroten en het elektriciteitsnetwerk robuuster maken. Lokale overheden werken er aan mee omdat zij baat hebben bij schone en stille auto's in hun stad.

Hoe zit het met de lange afstanden? Daar blijkt de wegbeheerder een centrale taak te hebben: net zoals hij nu de brandstofverkoop faciliteert kan hij in de toekomst batterijwisselstations en snelladers langs de wegen faciliteren. De wegbeheerder kan de weg ook voorzien van inductieve oplaadstrips: dan laden we op onder het rijden. Dat lijkt science fiction maar ik ben er intussen van overtuigd dat het haalbaar en betaalbaar is.

De elektrische auto is slechts één van de vele ontwikkelingen in dat grotere avontuur: de wereldwijde overstap van fossiele brandstoffen naar duurzame energie. Hoe dat avontuur af zal lopen weet nog niemand, maar het is mijn persoonlijke overtuiging - en de overtuiging van vele experts die ik voor dit boek gesproken heb - dat de elektrische auto in dat avontuur een sleutelrol zal vervullen.

Auke Hoekstra
Adviseur - Cleantech Strategies

Interviews en bijdragen

Remi Blokker, Bluerise.
Wim van den Boogaard, Rijkswaterstaat.
Gosse Boxhoorn, The Silicon Mine.
Scott Brusaw, Solar Roads.
Cornelie van Driel, Rapp Gruppe.
Jan-Willem Floor, Ministerie van Verkeer en Waterstaat.
Paula Frederiks, Rijkswaterstaat.
Françoise de Gelder, Enviu.
Alexander Hablé, Ministerie van Verkeer en Waterstaat.
Coen Hanschke, Energieonderzoek Centrum Nederland.
Lucas Harms, Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid.
Joke Jager, Rijkswaterstaat.
Wil René Jansen, Rijkswaterstaat.
Harald Kerres, Xebra lichtgevende wegmarkering.
Wouter Kersten, Enviu.
Gerdien Klunder, TNO.
Willem van der Kooi, Electric Cars Europe.
Edwin Koot, Solarplaza.
John Kuiper, TTd.
Joris Luyendijk, freelance journalist.
Olivier Overbeke, Rijkswaterstaat.
André Postma, Enexis.
Iris Roscam-Abbing, SDB.
André Schoorlemmer, Rijkswaterstaat.
Wim Sinke, Energieonderzoek Centrum Nederland.
Han Slootweg, Enexis.
Lonneke Tabak, student energy science, Universiteit Utrecht.
Rob Visscher, Rijkswaterstaat.
Ernst Vuyk, Ecofys.
Paul van der Woerd, Terts.

Afbeeldingen

Pagina 7. Passendheid van vervoerskenmerken voor auto, fiets en OV. Gebaseerd op gegevens van het Kennisinstituut voor de mobiliteit (KIM).
Pagina 7. Vervoerskilometers Gebaseerd op gegevens van het KIM. Historische gegevens uit de periode voor 1985 zijn door de auteur met enkele procenten verhoogd om de trendbreuk in de figuur te voorkomen.
Pagina 8. Elektrische Lotus. Met dank aan Electric Cars Europe.
Pagina 10. Bewegende onderdelen van een benzinemotor en elektrische motor. Met dank aan Wikipedia.
Pagina 9. Tesla Roadster. Met dank aan Tesla Motors.
Pagina 11. Illustraties gemaakt door de auteur.
Pagina 13. Illustratie is gemaakt door KuiperCompagnons.
Pagina 14. Fisker Karma. Met dank aan Fisker Automotive.
Pagina 16. Het prijsverschil tussen benzine en elektriciteit. Gebaseerd op de benzineprijs en de elektriciteitsprijs voor consumenten, zoals verstrekt door het CBS. Op beide gegevens is een inflatiecorrectie toegepast. Ook is de afstand die een elektrische Lotus op een kWh af kan leggen en de afstand die een Lotus op benzine af kan leggen op een liter benzine verdisconteerd.
Pagina 18. De stijgende prijs van olie. De gegevens zijn afkomstig van de International Energy Agency (IEA).
Pagina 18. Olievondsten versus productie. Olievondsten uit het verleden zijn gebaseerd op cijfers van ExxonMobil. Olieproductie gebaseerd op cijfers van de IEA. Deze wijze van presenteren wordt toegeschreven aan Colin Campbell een bekende expert op het gebied van peak oil. Voor verdere studie is wikipedia's artikel over "peak oil" een goed begin.
Pagina 22. Super smart grid. Het onderliggende artwork is afkomstig uit het document Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future van het European SmartGrids Technology Platform. De auteur heeft hier nog een aantal andere aspecten aan toegevoegd. De tekst is ook van de auteur afkomstig en is geen directe weerspiegeling van de tekst in het bovengenoemde rapport.
Pagina 23. Illustratie is gemaakt door KuiperCompagnons.
Pagina 24. Zon en aarde op schaal. Met dank aan de National Aeronautics and Space Administration (NASA).
Pagina 25. Kubussen met beschikbare energie. Illustratie gemaakt door de auteur op basis van diverse bronnen. Energies van Vaclav Smil biedt een goed overzicht van de omvang van de energiestromen waar het hier over gaat.
Pagina 26. Hywind. Met dank aan Statoil
Pagina 28. De waargenomen en voorspelde prijsdaling is gebaseerd op een presentatie van Dan Arvizu, directeur het National Renewable Energy Laboratory (NREL) uit 2006 genaamd Meeting the Renewable Energy Challenge.
Pagina 29. Supergrid. Met dank aan DESERTEC.
Pagina 31. Grafiek gebaseerd op de Forbes top 100 van 2009.
Pagina 31. Sloan afkomstig van de omslag van Time Weekly News-Magazine van 27 december 1926.
Pagina 34. De foto met EV1 en Hummer is een beeld uit de film Who Killed the Electric Car. Met dank aan Sony Pictures Classics.
Pagina 35. De foto van Staford Ovshinsky met dank aan Joi Ito (via Flickr).
Pagina 37. Illustratie is gemaakt door KuiperCompagnons.
Pagina 39. Rijden op zonnecellen versus biobrandstof. De figuur is gemaakt door de auteur op basis van een veelheid aan bronnen. Stroomdraden door Peter Megyeri (aka mpeterke via Flickr), Raffinaderij bij nacht door Mugley (via Flickr). Prince Charles in Saab van www.eco-rally.org (via Flickr). Shell station door Lee Jordan (via Flickr). Tesla Sedan met dank aan Tesla Motors.
Pagina 40. Rijden op elektriciteit versus waterstof. De figuur is gemaakt door de auteur op basis van een veelheid aan bronnen. Waterstof tankauto met dank aan J. Reijerkerk, Linde AG. Windmolen Hywind met dank aan Statoil. Oplaadpunt met dank aan Coulomb Technologies. Zie verder vorige afbeelding.
Pagina 45. Illustratie is gemaakt door KuiperCompagnons.
Pagina 47. De heer Lubbers laadt zijn elektrische auto. Met dank aan de Stichting e-laad.nl.
Pagina 49. Prototype batterijwisselstation. Met bank aan Better Place.
Pagina 53. Opengewerkte Toyota Prius. Met dank aan Toyota Motor Company.
Pagina 54. Doorsnede Prius. Met dank aan Toyota Motor Corporation.
Pagina 55. Illustraties van HEV, PHEV en BEV. Met dank aan de Electric Drive Transportation Association (EDTA).
Pagina 56. Opengewerkte Chevy Volt. Het betreft hier een eerdere concept versie van de auto die in 2010 verkocht zal worden. Met dank aan General Motors Company.
Pagina 57. Prius PHEV conversion kit. met dank aan Tesla Motors.
Pagina 58/61. Tesla Roadster interieur en Tesla Sedan. Met dank aan Tesla Motors.
Pagina 59. Grafieken baseren zich op data afkomstig van Energieonderzoek Centrum Nederland en specifiek de studie Duurzame innovatie in het wegverkeer. Onderliggende data is verstrekt door de auteur van het rapport de heer C. Hanschke.
Pagina 60. Tesla Sedan met dank aan Tesla Motors.
Pagina 64. Inductief opgeladen fabrieksvoertuigen. Met dank aan Conductix- Wampfler.
Pagina 65. Foto's van online electric vehicles (OLEV) met dank aan Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST).
Pagina 65. Figuur van een auto die inductief wordt opgeladen. Met dank aan het Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr (IAV).
Pagina 67. Plaatje van de zon-e-weg met dank aan Rijkswaterstaat.
Pagina 68. Artist impression van de solar roadway. Met dank aan Solar Roadways.
Pagina 71. Lumeneo Smera. Met dank aan de Lumeneo company.
Pagina 73. De DARPA Boss zelfsturende auto. Met dank aan Tartan Racing. Carnegy Mellon University.
Pagina 74. Masdar City Cab. Met dank aan Zagato.
Pagina 75. ULTRA. Met dank aan Advanced Transport Systems Ltd.
Pagina 75. Met dank aan het Massachusetts Institute of Technology en Franco Vairani.
Pagina 75. Cycab. Met dank aan het Institut national de recherche en informatique et en automatique (INRIA).
Pagina 76/77. De gebruiker van de toekomst. Dit is een impressie van een gesprek van twee weggebruikers in 2028. De dialoog is bedacht door André Schoorlemmer die zich binnen Wegen naar de Toekomst verdiept in de "Gebruiker van de Toekomst". Hij verwacht dat elektrisch rijden tegen die tijd niets bijzonders meer zal zijn, behalve als het om elektrisch autoracen gaat misschien.

Noten

[1] Het citaat van Louis Couperus en de voorgaande gegevens uit de inleiding zijn te vinden in het on-line te downloaden proefschrift "ondernemend onderweg van Lucas Harms (Harms 2008).

[2] Op prinsjesdag 2009 werd bekendgemaakt dat de elektrische auto geen wegenbelasting hoeft te betalen. Een gewone auto betaalt al snel 500 euro per jaar wegenbelasting. Een zware auto op diesel of LPG in een dure provincie betaald zelfs al snel 1.500 euro. Narekenen kan eenvoudig met een wegenbelasting calculator op Internet. (Autobyte 2009)

[3] De aanschafbelasting of BPM is tot 2018 afgeschaft voor elektrische auto's. Andere auto's krijgen een korting gebaseerd op hun energielabel. Hybrides krijgen extra korting maar zijn niet vrijgesteld. Overigens heeft de Toyota Prius bijvoorbeeld dermate veel korting dat de totale BPM (gewoonlijk € 7.600) wegvalt. (Infonu 2009)

[4] Zakelijke rijders, bijvoorbeeld mensen die een auto leasen via de zaak, moeten een deel van de cataloguswaarde van de auto bij hun belastbaar inkomen optellen. Voor de zuinigste auto's is dat 14% van de cataloguswaarde en het loopt op tot 25% bij minder zuinige auto's. Rijders van elektrische auto's hebben de komende twee jaar echter 0% bijtelling en daarna wordt het 7%. (Autoblog 2009)

[5] In de toekomst zou remmen op de elektrische motor het remsysteem overbodig kunnen maken. Zover zijn we echter nog lang niet. Eerst moet er sprake zijn van zeer krachtige motoren in alle wielen die hun vermogen ook kwijt kunnen naar een krachige batterij. Dan moet de bedrading naar die motoren aan dezelfde veiligheidseisen voldoen als de remleiding nu. En tenslotte moet er wellicht nog aangepaste wetgeving komen. Tot die tijd zal er altijd een remsysteem zijn naast remmen op de elektrische motor.

[6] Dit is een lichte versimpeling. Ook bij de elektromotor kan de efficiëncy variëren bij verschillende belastingen. Hoe hij verandert is mede afhankelijk van het soort elektromotor: AC Inductie of DC Borstelloos. Zie ook (Rippel 2007).

[7] Zie (Wikipedia)

[8] Zie (Tesla Motors n.d.)

[9] Zie (Car n.d.)

[10] Op dit moment zijn er twee elektromotoren in zwang in elektrische auto's: borstelloze gelijkstroommotoren (DC brushless motors) en inductiemotoren (AC induction motors). Vooral de elektronica die de motor aanstuurt (inverter) is de laatste jaren sterk verbeterd. Innosys uit Delft (toegepast in Electric Cars Europe en Detroit Electric) en AC propulsion (toegepast in ondermeer de Tesla Roadster en de EV1) hebben invertors ontwikkeld waarmee inductiemotoren goed kunnen worden aangestuurd. Inductiemotoren hebben een iets grotere gemiddelde efficiëncy. Zie ook (Rippel 2007) of doorzoek Wikipedia op voornoemde zoektermen voor een uitgebreide beschrijving van de werking van de elektromotor.

[11] Toen de stroom in een wijk in Harvard (in de VS) uitviel gebruikte John Sweeney zijn Toyota Prius als een generator. Zo voorzag hij zijn koelkast, vriezer, TV, verlichting en dergelijke drie dagen lang van stroom. Het kostte hem wel 20 liter benzine. (Galbraith 2008)

[12] Zie (Anne Knol n.d.)

[13] Zie (Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid 2009)

[14] De opmerking dat juist bestelauto's makkelijk tot elektrische auto's zijn om te bouwen is afkomstig van de heer John Kuiper in een interview met de auteur. De heer Kuiper is directeur van de firma TTd die regelmatig een dergelijke ombouw uitvoert.

[15] Zie (Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid 2009)

[16] Zie (Energy Information Administration n.d.)

[17] Zie (Bentley, Mannan and Wheeler 2007-35).

[18] Zie (Mortished 2008)

[19] Dit fenomeen wordt beschreven in het boek (Boschert n.d.) en in de film (Sheene 2006).

[20] Zie (Bentley, Mannan and Wheeler 2007-35).

[21] Een mooi grafisch overzicht van de wereldwijde bronnen van emissie is (Herzog 2009). De ontwikkelingen sinds 1970 (met de sterke stijging van elektriciteit en wegtransport) worden goed getoond door (Mondiale emissie koolstofdioxide per sector, 1970-2004 2007). Wereldwijd draagt wegtransport 10,4% aan de door mensen veroorzaakte broeikasgassen bij. In de VS loopt dat op tot 21,6%. Zie (World Resources Institute n.d.).

[22] Op basis van CBS 2006 en Energie.nl/Energie in cijfers (ECN).

[23] Overigens ontwikkelt de technologie zich voortdurend verder. ABB claimt dat HVDC light een belangrijke verderontwikkeling van het concept is: "HVDC Light is the most interesting power transmission system developed for several decades" en claimt dat HVDC light al bij tienden van een megawatt rendabel is. Dat is ondermeer goed nieuws voor situaties waarin we een bovengrondse leiding willen voorkomen. (Asea Brown Bovery 2009)

[24] Meerdere experts hebben deze claim gemaakt tegenover de auteur. Ondermeer André Postma van elektriciteitsnetwerkbedrijf Enexis.

[25] Zie o.a. (Wikipedia 2009).

[26] Een goed overzicht in de energiestromen op aarde kan worden verkregen uit de boeken van Vaclav Smil. Bijvoorbeeld (Smil 2008).

[27] Eigenlijk moeten we hier ook OTEC noemen, is vaak veronachtzaamde vorm van duurzame energie die de warmte die op de oceaan valt omzet in warmte en daarna in elektriciteit. Het potentieel daarvan is enorm. En wie echt groots of op lange termijn bezig wil zijn kan plannen maken voor grote zonnepanelen in de ruimte die hun energie naar de aarde overstralen. Daarmee kunnen we de 99.9999999% van de energie beginnen te vangen die nu nutteloos de lege ruimte instraalt.

[28] Zie (Wikipedia n.d.)

[29] Zie (Dril and Verdonk 2008)

[30] Zie (Czisch n.d.)

[31] Zie (Guardian 2008)

[32] Stroomverbruik neemt snel toe maar een huishouden van 2,4 personen gebruikt ruwweg 3.500 kWh per jaar of 10 kWh per dag. Dat is gemiddeld 400 watt. De 100 megawatt van de centrale van Ockels is zijn piekvermogen. De werkelijke prestatie hangt af van nog onbekende technische details en van de lokatie maar een vuistregel in Nederland is dat een windmolen 1/3 van zijn piekvermogen levert. 1/3 van 100 megawatt is 33 megawatt. Dat is genoeg voor 82 duizend huishoudens van 400 watt. Omdat we met grote onzekerheden werken is het beter om dat getal af te ronden naar circa 100 duizend. Overigens is het systeem natuurlijk ook prima te gebruiken voor een kleinere vliegermolen waarmee een dorp of boerderij van energie voorzien zou kunnen worden. Dat zou bijvoorbeeld ideaal zijn voor afgelegen lokaties die moeilijk op het elektriciteitsnet aan te sluiten zijn.

[33] Zie (Zolingen, et al. 2009)

[34] De figuur komt uit een presentatie van de directeur van het National Renewable Energy Laboratory (Arvizu 2006).

[35] Zie (Tamminen 2006) pagina 54.

[36] "They gave it away. To me, that's just sad. It's a sad commentary on the way our society and our system in the United States works." (Sheene 2006)

[37] O.a. pagina 11 in (Bradsher 2002).

[38] Alle citaten van professor Fresco en professor Reijnders komen uit (Jansen 2009).

[39] Er zijn wel uitzonderingen. Direct na 9/11 kwam BMW met een "gewone" verbrandingsmotor op waterstof op de markt. Gezien de relatief hoge prijs en moeilijke vervoerbaarheid van waterstof is de relatief inefficiënte brandstofmotor voor een waterstof auto echter minder aantrekkelijk dan een brandstofcel. De kosten van brandstofcellen zijn de afgelopen 10 jaar gedaald van circa 10.000 naar circa 1.000 euro euro per kilowatt. Producent NetStack voorspelt dat de kosten over 10 jaar gedaald zijn naar 50 euro per kilowatt. Bovendien kunnen de brandstofcellen van NetStack als zij na drie jaar (20.000 gebruiksuren) versleten zijn volledig gerecycled worden. Deze informatie is afkomstig van Rob Visscher, medewerker van Wegen naar de Toekomst en actief betrokken bij pilots met betrekking tot waterstof.

[40] De waardes in de grafiek zijn met nieuwe motoren en laders intussen achterhaald: de efficiency van de drivetrain is 93% (ook voor waterstof), van de batterij 93%, van charging 93% en van distributie 92%. Samen 74%. Waterstof wordt daarmee overall 25%. Zie o.a. (Eberhard and Tarpenning 2006).

[41] Zie (Wikipedia 2009) voor "energy density" in zijn algemeenheid en (Züttel, Borgschulte and Schlapbach 2008) voor de huidige stand van zaken rondom waterstof opslag. Na een overzicht van technologische ontwikkelingen stellen zij op pagina 170: "The target that the industry has set for itself is a 70Mpa (AH: 700 bar) cilinder with a mass of 110kg resulting in a gravimetric storage density of 6% and a volumetric storage density of 30 kg/m³." Even doorrekenend: 9 MegaJoule per kilo maal 110 kilo betekent 1 GigaJoule ofwel 278 kWh per cilinder. Een waterstof-auto is ongeveer half zo efficiënt als een volledig elektrische auto dus we nemen onze vuistregel van 0,15 kWh/km x 2 = 0,3 kWh/km. Zo'n auto rijdt 1.000 kilometer op een cilinder van 110 kilo.

[42] De slechtste beslissing van mijn periode als CEO van General Motors was "Axing the EV1 electric-car program and not putting the right resources into hybrids. It didn't affect profitability, but it did affect image." Aldus de door president Obama onlangs ontslagen Rick Wagoner in 2006. (Motortrend 2006)

[43] Pagina 50 van dit ECN rapport: "De afgelopen jaren lijkt de elektrische auto in een stroomversnelling gekomen te zijn. In drie jaar tijd is een ontwikkeling gerealiseerd die normaal een jaar of 15 kost. De snelle ontwikkeling betekent echter niet dat de elektrische auto hiermee marktrijp en concurrerend is. De accu blijft wat range, kosten en gewicht betreft nog een belangrijk knelpunt." (Hanschke, et al. 2009)

[44] Uitgaande van een middenklasser van 1.500 kilo die elektrisch aangedreven circa 0,15 kWh per kilometer gebruikt. De in de tekst vaak genoemde Toyota Prius voldoet bijvoorbeeld aan dat profiel.

[45] Zie bijvoorbeeld (Worldmapper 2007) voor een mooie kaart waarop te zien is waar er hoeveel auto wordt gereden.

[46] In (Bryce 2009).

[47] Het bedrijf Umicore heeft besloten in Hoboken, België, een installatie op industriële schaal te bouwen voor de recyclage van versleten herlaadbare batterijen (Euroinvestor 2009).

[48] Toxyo is een recycling bedrijf dat in de VS het grootste deel van de lood-accu's vervangt. Zij hebben $9.5 miljoen gekregen van de regering Obama om hun lithium recycling mee op te schalen. Batterijen van de Tesla Roadster worden hier al gerecycled (Hamilton 2009).

[49] In de meeste landen mogen lithium batterijen gewoon in het grofvuil, zeker de lithiumijzerfosfaat batterijen die momenteel in zwang zijn. Lithiumcobalt batterijen zijn iets minder milieuvriendelijk (vanwege de cobalt) maar vallen nog steeds in een veel onschuldiger categorie dan bijvoorbeeld nikkelcadmium en lood-accu's.

[50] (US Geological Survey 2009) Overigens wordt het gedolven en in batterijen gebruikt als LithiumCarbonaat, de Lithium bevattende grondstof waarmee de batterijen worden gemaakt. Om verwarring te voorkomen wordt hier echter gerekend met de Lithium die deze LithiumCarbonaat bevat.

[51] Die berekening komt goed overeen met een ouder rapport uit 2000 waarin Argonne National Laboratory het op 1,2 miljard elektrische auto's houdt en stelt: "Long-term supply should not be a major concern." (Linda Gaines; Roy Cuenca 2000). Shai Agassi, de CEO van batterij wisselbedrijf "Better Place" claimt zelfs "We have enough lithium for about 3 billion cars so I think we're safe for about 2 centuries." Zie (Colbert 2009) op 4:05 min.

[52] Zie (Edmunds Auto Observer 2009)

[53] De prijs van 10.000 euro voor een 37kWh batterij is door Willem van der Kooi van Detroit Electric genoemd in een interview met de auteur.

[54] Meerdere verkopers. Ondermeer www.evcomponents.com.

[55] Zie (D. Anderson 2009)

[56] Electric Power Research Institute according to (Warrier, Osborne and Odama 2009).

[57] Electric Power Research Institute according to (Warrier, Osborne and Odama 2009).

[58] Berekening van (Warrier, Osborne and Odama 2009) zelf op basis van gegevens over batterijproducent Valence Technology (pagina 74).

[59] (Anderson 2008) geeft in dit rapport ondermeer een spectaculair dalende prijscurve als gevolg van massaproductie.

[60] (Norman Shiau, et al. 2009) rekenen met $ 1.000 / kWh als het base-scenario in deze studie die juli 2008 werd opgestuurd en april 2009 werd gepubliceerd.

[61] Zie (Edmunds Auto Observer 2009)

[62] De Prius was in 2008 de zuinigste auto in de testen van ConsumerReports maar kwam in hun praktijktesten uit op 5,3 liter per 100 kilometer. Voor een hele lijst verbruikstesten: (Wikipedia 2009).

[63] Dit is direct gerelateerd aan het aantal koolstofatomen in benzine. Zie o.a. (Environmental Protection Agency 2005).

[64] Bij een gebruik van 70% van de capaciteit kan de batterij volgens producent Thunder Sky 5.000 keer opgeladen en ontladen worden. Dat betekent voor een batterij van 10 kWh het volgende: 10 kWh x 70% x 5.000 = 35.000 kWh. Een Prius verbruikt ongeveer 0,15 kWh per kilometer. De batterij is volgens Thunder Sky dus goed voor 35.000 / 0,15 = 233.000 kilometer. (Thunder Sky 2007)

[65] Ake Almgren van International Batteries stelt in (Bryce 2009): " What would help the industry is standards on voltage levels, communication protocols, connectors, etc, i.e. what simplifies the integration of batteries into vehicles as well stationary applications. I am also convinced that the industry will move fast in standardizing these items as was demonstrated recently with the plug-in connector for vehicles. At the same time I believe it is important to allow for flexibility in sizes. The technology is still developing and flexibility will benefit innovation and customization."

[66] Een radicale verandering als dit wordt door Shumpeter "creative destruction" genoemd. In "The Innovators Dilemma" beschrijf (Christensen 2003) hoe moeilijk het is voor marktleiders om zichzelf opnieuw uit te vinden. Een voorbeeld is dat geen enkele maatschappij voor transatlantische veerdiensten een vliegtuigmaatschappij is begonnen. Of dat geen enkele leidende fabrikant van elektrische auto's rond 1900 is overgestapt naar de productie van benzineauto's.

[67] Stel dat we een auto nemen die 0,15 kWh per km. gebruikt. Voor 200 kilometer moet je dan 30 kWh laden. Als je dat in 10 minuten wilt doen heb je 180 kWh nodig.

[68] Zie bijvoorbeeld de (Lightning Car Company 2009) die Nanosafe batterijen van Altair Nano gebruiken en de SSC Aero EV (Wikipedia 2009). Het bedrijf Aerovironment (dat o.a. snelladers produceert) demonstreerde de technologie in 2007. In Oslo lieten ze potentiële klanten en overheidsdienaars zien hoe ze een elektrische Fiat Doblo tot drie keer toe binnen tien minuten konden opladen. Zie (AeroVironment 2007) en (Green 2007).

[69] Het Amerikaanse energiebedrijf PGE zette enkele jaren geleden de prijzen van enkele opladers en-passant voor ons op een rijtje.(PGE)

[70] Wikipedia's pagina over Better Place is een goed en meestal zeer actueel startpunt: (Wikipedia 2009).

[71] Een verschil tussen een echte hybride en een gewone auto is natuurlijk ook dat de startmotor in een gewone auto niet voor de aandrijving wordt gebruikt. Toch is het in noodgevallen wel mogelijk om de auto op lage snelheid voort te bewegen met behulp van de startmotor zoals de auteur eens geconstateerd heeft toen hij enkele honderden meters voor het benzinestation zonder benzine zat.

[72] En zelfs dat idee is niet nieuw: in 1900 ontwierp en verkocht een zekere Ferdinant Porsche al een hybride auto genaamd de "Mixte".

[73] De tabel is afgeleid van (Fuhs 2009) pagina 342. Verkoopprijzen en verbruikscijfers zijn omgezet van dollars naar euro's en van MPG naar liters/km. De verkooprijzen in de VS zijn echter lager dan in Nederland dus een directe vergelijking is lastig. Als benzineprijs is gekozen voor € 1,50 per liter en de totale levensduur is gedefinieerd als 200.000 kilomter.

[74] Deze gegevens zijn in lijn met de verwachtingen van ECN dat uitgaat van een meerprijs voor hybriden van 4.400 euro in 2010, afnemend naar 1.800 euro in 2040. (Hanschke, et al. 2009)

[75] Zie (Uyterlinde, Hanschke and Kroon 2008) pagina 39-41.

[76] Het gaat hier om de gegeven waarop de Mobiliteitsmonitor gebaseerd is. (Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid 2009). De heer Lucas Harms van het KIM was zo vriendelijk om mij enkele ruwe gegevens ter beschikking te stellen.

[77] Op wikipedia zijn verschillende lijsten te vinden. Een aardige lijst is ook te vinden op Olino: (Agt 2009)

[78] Uitgaande van een levensduur van 150.000 kilometer en het genoemde verschil van 11 cent per kilometer.

[79] Zie (Wampfler 2009).

[80] Zie (KAIST 2009).

[81] Een andere optie is dat de inductielus onder de auto van links naar rechts kan bewegen om zo het slingeren van de chauffeur op te vangen. Dat vereist echter een kwetsbare en onderhoudsgevoelige mechanische constructie.

[82] Op de website vindt u naast uitleg ook een instructieve video: (AIV 2009)

[83] Wie een windkaart van Europa raadpleegt ziet dat de Noordzee en Schotland ideale plekken zijn maar het binnenland van Nederland waar de snelwegen lopen is eigenlijk minder geschikt.

[84] Dat oppervlak bestaat niet voor 100% uit asfalt en niet elke weg leent zich voor het bovengenoemde systeem.

[85] Bij een gemiddelde breedte van 2 rijstroken a 3,65 meter is dat circa 1.000 km^2 asfalt. Stel dat ongeveer 40% bruikbaar is: dan zou er 400 km^2 overblijven.

[86] Net zoals Solar Roadways gaan we hier uit van doorsnee zonnecellen met 15% efficiëntie. In Nederland levert zon 114 watt/m^2 op en daarvan houdt je dan 17 watt/m^2 over.

[87] Het huidige wegverkeer vraag 16 gigawatt maar elektrische auto's gebruiken 3 a 4 keer zo weinig energie als benzineauto's. Daarom houdt je minder dan 5 gigawatt over.

[88] Zie bijvoorbeeld: www.modieslab.nl en (Wegen Naar de Toekomst - Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat 2001).

[89] De rekensom is te vinden op www.solarroadways.com.

[90] Meer informatie op (Citymover n.d.). Een ander concept voor gehandicapten dat zich uitstekend leent voor elektrificering is de inrijmobiel waarbij de gehandicapte met rolstoel en al plaatsneemt achter het stuur: (Inrijmobiel n.d.).

[91] Voor een leuk krantenartikel over de populariteit van de brommobielen: (Veldman 2008).

[92] Dat de elektrische scooter nieuwe doelgroepen aanspreekt was een claim die in 2009 tegenover de auteur werd gemaakt door diverse leveranciers. Verschillende leveranciers vertelden bijvoorbeeld hoe klanten uit zichzelf aangeven dat ze nooit een scooter op benzine zouden kopen voor zichzelf of hun kinderen maar dat elektrisch voor hen de zaak verandert.

[93] Zie (Korzeniewski 2008).

[94] Kennis hierover is ondermeer opgedaan in het project van Wegen Naar de Toekomst genaamd "de rij-assistent" (Wegen Naar de Toekomst 2006).

[95] Meer details zijn te vinden in het proefschrift van Cornelie van Driel: (Driel 2007).

[96] Aan het begin van dit boek staan de resultaten van een enquête hierover. Soms wordt bezitswaarde genoemd als een reden dat we de auto meer waarderen. Dat verklaart echter niet waarom de fiets op korte afstanden ongeveer even populair is als de auto. De fiets heeft immers veel minder bezitswaarde dan de auto. Zie ook (Harms 2008).

[97] (Masdar City 2009)

[98] Het Nederlandse bedrijf Spykstaal levert een soortgelijk systeem aan Masdar City in Abu Dabi.

[99] De directeur van Posicharge vertelt in deze audio dat het bedrijf ruwweg de helft van de markt voor snelladers in handen heeft gekregen en dat zij al meer dan 5.000 snelladers hebben verkocht. Zij veroveren deze markt overigens vooral op batterij wisselstations die in grote magazijnen worden gebruikt om vorkheftrucks 24/7 beschikbaar te houden. (Posicharge n.d.).

[100] Er is een algemene trend tot meer informatie aan de weggebruiker via borden boven de weg en in de toekomst zal die informatie steeds meer (al dan niet via Internet) direct in de auto terecht komen. Deze informatievoorziening blijkt door de weggebruiker bijzonder op prijs gesteld te worden maar is niet specifiek voor elektrische mobiliteit en wordt daarom verder niet behandeld.

[101] Er zijn ook constructies denkbaar waarbij de inductielus die onderaan de auto bevestigd is van links naar recht bewogen kan worden. Op die manier is het de inductielus en niet de auto die de oplaadstrook volgt. Dit systeem voegt echter mechanische complexiteit toe.

[102] Zie ondermee (Bullis 2009).

[103] Zie (Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid 2009).

[104] Bij snelheden tot circa 60 kilometer per uur (en bij vrachtwagens 80 kilometer per uur) is vooral het motorgeluid bepalend voor de geluidsproductie van het verkeer. Daarboven is het band-wekdek contact de belangrijkste factor in de geluidsproductie.

[105] Zie (W. R. Jansen 2009).

Bronnen

AeroVironment. *AeroVironment, Altair Nanotechnologies, Go Green Holding and Micro-Vett Announce a Successful, Multiple Fast Charge Demonstration of an All Electric Delivery Vehicle in Oslo, Norway.* 9 10 2007. http://www.avinc.com/resources/press_release/aerovironment_altair_nanotechnologies_go_green (geopend 11 24, 2009).

Agt, Jeroen van. Overzicht elektrische personen auto's. 24 6 2009. http://www.olino.org/articles/2007/12/13/overzicht-elektrische-personen-autos (geopend 11 16, 2009).

AIV. „Strom aus der Straße." www.aiv.com. 2009. http://www.iav.com/de/index.php?we_objectID=15760&pid=227 (geopend 11 16, 2009).

Anderson, Andy. *„Status and Trends in the HEV/PHEV/EV Battery Industry." berkely.edu. 6 2008.* http://www.its.berkeley.edu/sustainabilitycenter/newsandevents/CEFISrelated_anderson.pdf (geopend 11 14, 2009).

Anderson, David. *An Evaluation Of Current And Future Costs For Lithium-Ion Batteries For Use In Electrified Vehicle Powertrains.* Masters Project, Nicholas School of the Environment of Duke University, 2009.

Anne Knol, Karel van Velze, Paul Fischer, Eva Kunseler, Leendert van Bree. „Interpretatie van vroegtijdige sterfte door luchtverontreiniging." *RIVM.* http://www.rivm.nl/bibliotheek/digitaaldepot/Knol_van_Velze_2009_Interpretatie_vroegtijdige_sterfte_luchtverontreiniging.pdf (geopend 11 10, 2009).

Arvizu, Dan. *„Meeting the Renewable Energy Challenge."* www.nrel.gov. 8 5 2006. http://www.nrel.gov/director/pdfs/40011.pdf (geopend 11 29, 2009).

Asea Brown Bovery. *www.abb.com.* 11 2009. http://www.abb.com/industries/us/9AAC30300394.aspx (geopend 11 24, 2009).

Autoblog. *autoblog.nl.* 22 8 2009. http://www.autoblog.nl/archive/2009/08/22/elektrische-auto-2-jaar-lang-geen-bijtelling (geopend 11 24, 2009).

Autobyte. *autobyte.nl.* 2009. http://www.autobytel.nl/page.ocl?pageid=76&gclid=CO3Wt_PypZ4CFdA93godHHptkg (geopend 11 24, 2009).

Bentley, R.W., S.A. Mannan, en S.J. Wheeler. *„Assessing the date of the global oil peak: The need to use 2P reserves." Energy Policy,* 2007-35: 6364–6382.

Boschert, Sherry. *Plug-in Hybrids: the cars that will recharge America.*

Bradsher, Keith. *High and mighty: SUV's - The Worlds Most Dangerous Vehicles and How They Got That Way.* Public Affairs, 2002.

Bryce, Robert. *International Battery's Ake Almgren Discusses The Future of Lithium Ion Batteries.* 16 4 2009. http://www.energytribune.com/articles.cfm?aid=1609 (geopend 11 25, 2009).

Bullis, Kevin. *Superconductors to Wire a Smarter Grid: a superstation for connecting three independent grids could help solar and wind power.* 12 11 2009. http://www.technology-review.com/energy/23928/page1/ (geopend 11 16, 2009).

Car. *Rolls-Royce wants to make an electric Phantom.* http://www.carmagazine.co.uk/News/Search-Results/Motoring-issues/Environmental/Rolls-Royce-wants-to-make-an-electric-Phantom/ (geopend 11 10, 2009).

Christensen, Clayton. *The Innovators Dilemma.* Harper Paperbacks, 2003.

Citymover. *citymover.nl.* http://www.citymover.nl/ (geopend 11 25, 2009).

Colbert, Steven. „Better Place founder & CEO Shai Agassi on the Colbert Report." *www.colbertnation.com.* 19 11 2009. http://www.betterplace.com/company/video-detail/better-place-founder-ceo-shai-agassi-on-the-colbert-report (geopend 11 25, 2009).

Couperus, Louis. „Het late leven - Eerste deel - Tweede hoofdstuk." *nl.wikisource.org.* 1901. http://nl.wikisource.org/wiki/Couperus/Het_late_leven/Eerste_deel/II (geopend 11 30, 2009).

Czisch, Dr.Ing. Dipl.Phys. G. „Low Cost but Totally Renewable Electricity Supply for a Huge Supply Area." http://www.iset.uni-kassel.de/abt/w3-w/projekte/LowCostEuropElSup_revised_for_AKE_2006.pdf (geopend 11 10, 2009).

Driel, Cornelie van. „Driver support in congestion." *utwente.nl.* 2007. http://doc.utwente.nl/58037/1/thesis_van_Driel.pdf (geopend 11 25, 2009).

Dril, A.W.N. van, en M. Verdonk. „Kosten van elektriciteitsopwekking." *ECN.* 17 9 2008. http://www.ecn.nl/docs/library/report/2008/o08024.pdf (geopend 11 11, 2009).

Eberhard, Martin, en Marc Tarpenning. „The 21st Century Electric Car." *www.veva.bc.ca.* 19 7 2006. http://www.veva.bc.ca/wtw/Tesla_20060719.pdf (geopend 11 25, 2009).

Edmunds Auto Observer. *GM Defends Chevy Volt; Calls Critical Study Faulty.* 3 3 2009. http://www.autoobserver.com/2009/03/gm-defends-chevy-volt-calls-critical-study-faulty.html (geopend 11 14, 2009).

Energy Information Administration. „International Energy Outlook 2009." http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/pdf/0484%282009%29.pdf (geopend 11 11, 2009).

Environmental Protection Agency. *Emission Facts: Average Carbon Dioxide Emissions Resulting from Gasoline and Diesel Fuel .* 2 2005. http://www.epa.gov/oms/climate/420f05001.htm (geopend 11 25, 2009).

Eurlings, Ir. Camiel, en Marja J.A. van der Hoeven. „Plan van Aanpak Elektrisch Rijden." *www.verkeerenwaterstaat.nl.* 3 7 2009. http://www.verkeerenwaterstaat.nl/Images/20094571_tcm195-257213.pdf (geopend 11 16, 2009).

Euroinvestor. *Umicore investeert in recyclage van herlaadbare batterijen.* 16 11 2009. http://www.euroinvestor.nl/news/shownewsstory.aspx?storyid=10735824 (geopend 11 25, 2009).

Fuhs, Allen E. *Hybrid Vehicles and the Future of Personal Transportation.* Boca Raton: CRC Press, 2009.

Galbraith, Kate. „Prius: It's Not Just a Car, It's an Emergency Generator." *blogs.nytimes.com.* 23 12 2008. http://greeninc.blogs.nytimes.com/2008/12/23/prius-its-not-just-a-car-its-an-emergency-generator/?hp (geopend 11 26, 2009).

Green, Hank. *Electric Delivery Truck Recharges in Ten Minutes!* 18 10 2007. http://www.ecogeek.org/component/content/article/1079 (geopend 11 24, 2009).

Guardian. *Giant kites to tap power of the high wind.* 3 8 2008. http://www.guardian.co.uk/environment/2008/aug/03/renewableenergy.energy (geopend 11 10, 2009).

Hamilton, Tyler. *Lithium Battery Recycling Gets a Boost.* 12 8 2009. http://www.technologyreview.com/energy/23215/page1/ (geopend 11 25, 2009).

Hanschke, C.B., M.A. Uyterlinde, P. Kroon, H. Jeeninga, en H.M. Londo. *Duurzame innovatie in het wegverkeer.* Onderzoeksrapport, ECN, 2009.

Hanschke, C.B., M.A. Uyterlinde, P. Kroon, H. Jeeninga, en H.M. Londo. *Duurzame innovatie in het wegverkeer.* ECN, 2009.

Harms, Lucas. „Overwegend onderweg." *www.scp.nl.* 7 2008. http://english.scp.nl/publicaties/boeken/9789037703771.shtml (geopend 11 23, 2009).

Herzog, Timothy. „World Geenhouse Gas Emissions in 2005." *www.earthtrendsdelivered.org.* 7 2009. http://www.earthtrendsdelivered.org/node/233 (geopend 11 25, 2009).

Infonu. *Financieel - infonu.nl.* 2009. http://financieel.infonu.nl/belasting/34177-zuinige-auto-scheelt-geld-bpm-co2-toeslag-bijtelling.html (geopend 11 24, 2009).

Inrijmobiel. *inrijmobiel.nl.* http://www.inrijmobiel.nl/ (geopend 11 25, 2009).

IOR. *Useful Conversion Factors.* http://www.ior.com.au/ecflist.html (geopend Augustus 18, 2009).

IPCC. 2007.

Jansen, Boris. *Biobrandstof, duurzaamheid en biodiversiteit.* 6 8 2009. http://www.uva.nl/onderzoek/index.cfm/EEE1E4A1-1321-B0BE-685B2DF9788A169D (geopend 11 30, 2009).

Jansen, Wil René (reg.). *Als het stil is geworden, een film over de passende snelweg.* Video geproduceerd in opdracht van Wegen naar de Toekomst, Innovatieprogramma van Rijkswaterstaat, geproduceerd door MCW studio's, Rotterdam, 2009. www.vimeo.com/7977889

KAIST. „OLEV International Reports." *eews.kaist.ac.kr.* 2009. http://eews.kaist.ac.kr/test/MHOLEV/C.%20OLEV%20International%20Report.pdf (geopend 11 16, 2009).

Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid. *„Mobiliteitsbalans 2009."* 2009.

Korzeniewski, Jeremy. *Honda unveils supplemental robot legs for humans.* 7 11 2008. http://www.autoblog.com/2008/11/07/honda-unveils-supplemental-robot-legs-for-humans/ (geopend 11 25, 2009).

Lightning Car Company. *Lightning Car -Technical Specifications.* 2009. http://www.lightningcarcompany.co.uk/files/Lightning-Spec-Card.pdf (geopend 11 24, 2009).

Linda Gaines; Roy Cuenca. *„Costs of Lithium-Ion Batteries for Vehicles."* www.anl.gov. 5 2000. http://www.transportation.anl.gov/pdfs/TA/149.pdf (geopend 11 25, 2009).

Lotus. *Lotuscars. 2008.* http://www.lotuscars.com/elise.html (geopend Augustus 18, 2009).

Masdar City. *Welcome tot Masdar City.* 2009. http://www.masdarcity.com/en/index.aspx (geopend 11 19, 2009).

„Mondiale emissie koolstofdioxide per sector, 1970-2004." *www.milieunatuurcompendium.nl.* 6 2007. http://www.milieuennatuurcompendium.nl/indicatoren/nl0166-Koolstofdioxide-emissie,-mondiaal.html?i=9-20 (geopend 11 25, 2009).

Mortished, Carl. *Shell chief fears oil shortage in seven years.* 25 1 2008. http://business.timesonline.co.uk/tol/business/economics/wef/article3248484.ece (geopend 11 15, 2009).

Motors, Tesla. *Well to Wheel Efficiency.* http://www.teslamotors.com/performance/well_to_wheel.php (geopend 11 10, 2009).

Motortrend. *Interview: Rick Wagoner, General Motors Co.* 6 2006. http://www.motortrend.com/features/112_0606_rick_wagoner_general_motors/stock_price_lost.html (geopend 11 14, 2009).

Newman, Rick. *Car Sales: What a Dismal 2008 Means For 2009 - US News & World Report.* 5 1 2009. http://www.usnews.com/money/blogs/flowchart/2009/1/5/car-sales-what-a-dismal-2008-means-for-2009.html (geopend 11 14, 2009).

Norman Shiau, Ching-Shin, Constantine Samaras, Richard Hauffe, en Jeremy J. Michalek. *„Impact of battery weight and charging patterns on the economic and."* Energy Policy, 2009.

PGE. ***EV CHARGING ESSENTIALS.*** http://www.pge.com/includes/docs/pdfs/about/environment/pge/electricvehicles/ev4pt2.pdf (geopend 11 24, 2009).

Posicharge.

Rippel, Wally. *Induction Versus DC Brushless Motors.* 9 1 2007. http://www.teslamotors.com/blog4/?p=45 (geopend 11 25, 2009).

Who Killed the electric car. Regisseur: Chris Paine. Uitvoerend artiest: Martin Sheene. 2006.

Smil, Vaclav. *Energy in Nature and Society.* Massachusetts Institute of Technology, 2008.

Tamminen, Terry. *Lives per gallon.* Washington: Island Press, 2006.

Tesla Motors. *Well to Wheel.* http://www.teslamotors.com/performance/well_to_wheel.php (geopend 11 10, 2009).

Thunder Sky. „Thunder Sky LiFeYPO4 Power Battery Specifications." *www.thunder-sky.com.* 1 1 2007. http://www.thunder-sky.com/pdf/2009213163 3.pdf (geopend 11 24, 2009).

US Geological Survey. „Lithium." *usgs.gov.* 2009. http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/lithium/mcs-2009-lithi.pdf (geopend 11 14, 2009).

Uyterlinde, M.A., C.B. Hanschke, en P. Kroon. „Effecten en kosten van duurzame innovatie in het wegverkeer." *www.ecn.nl.* 3 2008. http://www.ecn.nl/docs/library/report/2007/e07106.pdf (geopend 11 15, 2009).

Veldman, Willemien. *nrc.nl.* 4 8 2008. http://www.nrc.nl/binnenland/article1945995.ece/Een_bijna-auto_in_het_grote_verkeer (geopend 11 25, 2009).

Wampfler. „Product Overview IPT (Inductive Power Transfer)." *www.wampfler.nl.* 2009. http://www.wampfler.nl/data/files/downloads/KAT9000-0001-E%20Product%20Overview%20IPT.pdf (geopend 11 16, 2009).

Warrier, Dilip, Jeff Osborne, en Yumi Odama. *The Race for the Electric Car: A Comprehensive Guide To Battery Technologies And Market Development.* Thomas Weisel Partner, 2009.

Wegen Naar de Toekomst - Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat. „Modulair wegdek - pilotproject van Wegdek van de Toekomst." *www.verkeerenwaterstaat.nl.* 6 2001. http://www.verkeerenwaterstaat.nl/kennisplein/uploaded/DWW/2006-02/98245/7_0-56%20DWW%202.PDF (geopend 1119 2009).

Wegen Naar de Toekomst. *Afgeronde Pilots - Rij-assistent.* 2006. http://www.rijkswaterstaat.nl/wegen/innovatie_en_onderzoek/wegen_naar_de_toekomst/afgeronde_pilots/ (geopend 11 29, 2009).

Wikipedia. *Better Place.* 2009. http://en.wikipedia.org/wiki/Better_Place (geopend 11 29, 2009).

Bugatti Veyron. http://en.wikipedia.org/wiki/Bugatti_Veyron (geopend 11 10, 2009).
Electric motor. http://en.wikipedia.org/wiki/File:Electric_Motor_Rotor.jpg (geopend 11 10, 2009).
Energy density. 2009. http://en.wikipedia.org/wiki/Energy_density (geopend 11 29, 2009).
SSC Aero Ultimate EV. 2009. http://en.wikipedia.org/wiki/SSC_Aero#Ultimate_Aero_EV (geopend 11 24, 2009).
„Toyota Prius." *www.wikipedia.org.* 2009. http://en.wikipedia.org/wiki/Toyota_Prius (geopend 11 25, 2009).
Wind Power. http://en.wikipedia.org/wiki/Wind_power (geopend 11 11, 2009).

Wikipedia. *Fossil fuel.* 2009. http://en.wikipedia.org/wiki/Fossil_fuel (geopend 11 29, 2009).

World Resources Institute. „US GHG Emissions Flow Chart." *cait.wri.org.* http://cait.wri.org/figures.php?page=/US-FlowChart (geopend 11 25, 2009).

Worldmapper. *Passenger Cars.* 2007. http://www.sasi.group.shef.ac.uk/worldmapper/display.php?selected=31 (geopend 11 29, 2009).

Zolingen, Ronald van, Wim Sinke, Richard v.d. Sanden, Ando Kuypers, en Peter v.d. Vleuten. „Zonne-energie, roadmap 2009." 6 2009. http://www.bom.nl/include/Solar_Roadmap_DEF.PDF (geopend 11 10, 2009).

Züttel, Andreas, Andreas Borgschulte, en Louis Schlapbach. „Hydrogen as a future energy carrier." 2008. http://www.scribd.com/doc/19616262/Hydrogen-as-a-Future-Energy-Carrier (geopend 11 29, 2009).

Colofon

Auteur
Auke Hoekstra

Redactie Wegen naar de Toekomst
Wil René Jansen
Wim van den Boogaard
Bianca van de Waardt

Dit boek is gemaakt in opdracht van:
Jolande Baudet, Dienst Infrastructuur, afdeling
innovatie en ontwikkeling
Wim van den Boogaard, Wegen naar de Toekomst.

Dit is een uitgave van

Rijkswaterstaat

Kijk voor meer informatie op
www.rijkswaterstaat.nl/wnt
of bel 0800 - 8002
(ma t/m zo 06.00 - 22.30 uur, gratis)

Auteur: Auke Hoekstra

december 2009 | WNT1109ZH008

ISBN/EAN: 978-90-815096-1-9