



**Royal Belgian Academy Council  
of Applied Science**

# *Standpunten van de Klasse Technische Wetenschappen van de KVAB*

## **Elektrische voertuigen**

February 2012



**Koninklijke Vlaamse Academie van België  
voor Wetenschappen en Kunsten  
Paleis der Academiën  
Hertogsstraat 1, 1000 Brussel**

Bij zijn oprichting in 1988 bestond BACAS, de “Royal Belgian Academy Council of Applied Science”, uit een Nederlandstalige vleugel (CAWET) en een Franstalige vleugel (CAPAS) die tot begin 2009 comités waren van de Klasse Natuurwetenschappen van respectievelijk de Koninklijke Vlaamse Academie van België (KVAB) en de Académie Royale de Belgique (ARB).

In 2009 werd CAWET omgevormd tot een zelfstandige klasse van de KVAB, namelijk de Klasse van de Technische Wetenschappen (KTW). Net zoals CAWET in het verleden, is de nieuwe KTW paritair samengesteld uit vertegenwoordigers van de academische wereld en van het bedrijfsleven.

Vanuit die dialoog tussen wetenschap en bedrijfsleven wil de KTW een op de toekomst gerichte evaluatie maken van de wisselwerking tussen wetenschap (in het bijzonder techniek), maatschappij en cultuur.

Met dank voor de steun van:

**Alcatel-Lucent, Aquafin, ArcelorMittal Belgium, Bekaert, ExxonMobil, GDFSuez, Genzyme, Gevaert, Janssen Pharmaceutica, LMS International, Manasco, Merisco, Proviron, REM-B, SCK-CEN, Solvay, Umicore, Vanhout, Vlaamse Maatschappij voor Watervoorziening, VITO**



**KONINKLIJKE VLAAMSE ACADEMIE VAN BELGIE  
VOOR WETENSCHAPPEN EN KUNSTEN**

Paleis der Academiën  
Hertogsstraat 1  
1000 Brussel

*Niets uit deze uitgave mag worden veelevoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.*

No part of this book may be reproduced in any form, by print, photo print, microfilm or any other means without written permission from the publisher.

## KORTE SAMENVATTING

Na een bondig historisch overzicht van het ontstaan, het verdwijnen en het terug actueel worden van elektrische voertuigen ("EV"), analyseert het tweede hoofdstuk de actuele situatie en de toekomstperspectieven voor elektrische voertuigen, met de focus op de zuiver batterij-elektrisch aangedreven personenwagens (met uitsluiting dus van de hybride wagens). Het volgende hoofdstuk gaat in op de vraag "waarom overschakelen naar elektrische voertuigen?" Dit wordt behandeld vanuit respectievelijk een ecologische, energetische en maatschappelijke invalshoek. Hoofdstuk 4 bekijkt de technologische mogelijkheden, voordelen, nadelen en belemmeringen van de eind 2011 op de markt zijnde elektrische voertuigen, evenals de technologische uitdagingen voor een verdere ontwikkeling van deze wagens. De mogelijke impact op elektriciteitsproductie, -transmissie en -distributie van een groot-schalige introductie van elektrische voertuigen in ons wagenpark vormt het onderwerp van hoofdstuk 5. Het laatste hoofdstuk trekt een aantal conclusies, rekening houdend met de voor- en nadelen van de actueel beschikbare batterij-elektrische voertuigen, en formuleert voor de verschillende *stakeholders* een reeks aanbevelingen om enerzijds de marktintroductie en anderzijds de verdere technische ontwikkeling te bevorderen.

De voornaamste voordelen van batterij-elektrische wagens zijn:

- veroorzaken plaatselijk geen luchtverontreiniging noch geluidshinder,
- stoten minder of geen CO<sub>2</sub> uit (afhankelijk van de wijze waarop de elektriciteit wordt opgewekt),
- zijn energie-efficiënter,
- verbruiken geen eindige fossiele brandstoffen maar (eventueel koolstofvrije) elektriciteit,
- hebben een beduidend lagere brandstofkost
- vergen minder onderhoud.

Daartegenover staan de beperkingen die alle iets te maken hebben met de beschikbare batterijen, namelijk:

- de hoge aanschafprijs,
- de tot ongeveer 150 km beperkte autonomie of actieradius,
- het ontbreken van publieke laadinfrastructuur.

De relatieve nadelen van BEV zijn kleiner indien men jaarlijks een voldoende grote afstand aflegt; tegelijkertijd moet dit verzoend worden met een beperkte actieradius. De niche bestaat dus uit mensen die veel verplaatsingen afleggen over een relatief korte afstand. Een massale doorbraak van de batterij-elektrische wagens is dus niet voor onmiddellijk. De eerstvolgende

jaren zullen EV's voornamelijk in het kader van proefprojecten te zien zijn. Pas vanaf 2015 zullen ze merkbaar aanwezig worden in het stedelijk en interstedelijk verkeer, en tegen 2020 verwacht men dat ze tussen de 2% en de 10% van de jaarlijkse verkoop van nieuwe wagens zullen uitmaken. Plug-in hybride voertuigen kunnen echter het aanbod van puur elektrische voertuigen mooi aanvullen en zo voor een grotere doorbraak kan zorgen.

Om de markt van elektrische voertuigen te stimuleren, en op deze wijze de ecologische, economische en maatschappelijke voordelen maximaal te benutten, dienen in Vlaanderen een aantal maatregelen genomen te worden. De overheden, zowel federaal, regionaal als lokaal stedelijk, moeten een langetermijnstrategie uitwerken met daarin een aantal kortetermijnmaatregelen zowel langs de aanbod- als langs de vraagzijde. Binnen de voertuigsector staat Vlaanderen voor de uitdaging om de lokale constructeurs en hun toeleveranciers te ondersteunen in hun transitie naar de productie van elektrische voertuigen. Hierbij zal onderzoek, ontwikkeling en demonstratie een belangrijke rol spelen, en dit niet alleen op het gebied van meer efficiënte batterijen, maar ook op het gebied van elektrische motoren, materialen voor chassis en andere componenten, oplaadinfrastructuur en laadstations, slimme netten en bijbehorende meters. Tot slot zal ook de automobilist zijn mobiliteitsgedrag moeten aanpassen.

## EXECUTIVE SUMMARY

After a concise historical survey of the origin, the disappearance and the currently ongoing rebound of electric vehicles, the second chapter analyzes their present position and outlook, focussing on pure electric battery powered passenger cars (excluding hybrid vehicles). The next chapter tackles the question: "why should we switch to electric vehicles?" This is treated from an ecological, energetic and social viewpoint. Chapter 4 deals with the technical possibilities, advantages, disadvantages and obstacles facing electric vehicles available on the market at the end of 2011, as well as the technical challenges for a further development of these cars. The potential impact of a large scale introduction of electric vehicles on power production, transmission and distribution is the subject of chapter 5. The last chapter draws a number of conclusions, taking into account the advantages and disadvantages of the presently available battery-driven electric vehicles and formulates a series of recommendations for different stakeholders in order to favour EV introduction in the market on the one hand, and further technical development of EVs on the other hand.

The main advantages of battery-driven electric vehicles are:

- no local air pollution nor noise,
- low or no CO<sub>2</sub>-emission (depending on the kind of power generation),
- higher energy-efficiency,
- no consumption of finite fossil fuels but powered by (possibly carbon-free) electricity,
- significantly lower fuel cost,
- less maintenance costs.

In contrast they have a number of limitations which are mostly linked with the currently available batteries:

- high purchase price,
- limited driving range of about 150 km,
- absence of public battery-charging facilities.

The relative handicaps of battery-driven EVs are smaller at sufficiently high annual mileages; at the same time, though, this has to be reconciled with their limited driving range. Ideal EV users are people making a high number of rides over short distances. A massive breakthrough of EVs is unlikely in the short run. The next years EVs will mainly be used within

the framework of test projects. Only as from 2015 they are expected to represent between 2 and 10% of the annual sales of new cars. Plug-in hybrid vehicles, however, could possibly become a nice complement of battery-driven EVs and thus boost the breakthrough of electric engines.

In order to stimulate the sale of EVs, thus utilizing to the utmost their ecological, economical and social advantages, a number of measures will have to be taken in Flanders. Authorities, at federal, regional and local urban level should define a long term strategy including some short term measures both at the supply and demand side. Within the vehicle sector, Flanders is facing the challenge of supporting local carmakers and their suppliers in their transition towards EV production. Research, development and demonstration will play an important part in this, not only in the field of more efficient batteries, but also in the field of electric motors, materials for car frames and other components, battery-charging facilities and stations, smart grids and accompanying measuring instruments. At the end, the motorists will also have to adapt their mobility behaviour.

## Hoofdstuk 1:

## INLEIDING – HISTORISCHE ACHTERGROND

Het eerste wegvoertuig dat werd aangedreven met elektriciteit was een driewieler, gedemonstreerd in 1881 te Parijs door Gustave Trouvé. Dit was vijf jaar voor de vermeende “uitvinding van de auto” door Benz en Daimler. Gedurende de laatste jaren van de negentiende eeuw verschenen er elektrische “rijtuigen zonder paarden”, met de vormgeving van een klassieke koets.

De beschikbaarheid van betere batterijen, zowel loodzuur als alkalische, in het eerste decennium van de twintigste eeuw, het grotere gebruiksgemak en de technische betrouwbaarheid vergeleken met een benzinevoertuig leidden tot een grote populariteit van de elektrische auto. Deze tijd kan dan ook als een “**gouden eeuw**” voor het elektrisch voertuig worden beschouwd

De elektrische voertuigen speelden tevens een voorname rol in de beginfase van de autosport. De Belg Camille Jenatton overschreed op 1 mei 1899, op het circuit van Achères, Frankrijk, als eerste de recordsnelheid van 100 km/h met zijn beroemde “*Jamais Contente*”. De “torpedo”-vorm van zijn voertuig, met een lage luchtweerstand, ligt aan de basis van het moderne auto-ontwerp.

Elektrische voertuigen kenden verder een aanzienlijke toepassing als bedrijfsvoertuig, als vervanging voor paard en kar. Voor leveringsdiensten met veel haltes waren zij uitstekend geschikt.

De vroege twintigste eeuw zag technische ontwikkelingen die ook vandaag de dag nog als geavanceerd kunnen worden beschouwd. Wielnaafmotoren werden bijvoorbeeld al ontwikkeld in Duitsland en in het Verenigd Koninkrijk. Er werd ook geëxperimenteerd met hybride aandrijvingen, met reeds in 1896 de Belgische “*Auto-Mixte*” van Pieper, en verdere ontwikkelingen, onder andere door Krieger in Frankrijk en Lohner-Porsche in Duitsland.

Het feit dat de elektrische auto uiteindelijk zou worden verdrongen door de benzineauto was niet enkel te wijten aan economische of technische aspecten maar ook aan de psychologische reputatie van de benzineauto als een “avontuurmachine”, en de geest van “sport” en “vrijheid” die daarbij hoorde. Ironisch genoeg was het een elektrische uitvinding, namelijk de elektrische startmotor ter vervanging van de ‘zwengel’ in

1913, die de grootste aanzet gaf aan de verspreiding van de benzinemotor.

Na de eerste wereldoorlog verdween het elektrische voertuig naar de achtergrond door het sterk stijgende succes van de inwendige verbrandingsmotor. Voor specifieke, meestal industriële toepassingen bleven de batterij-elektrische voertuigen echter actueel, zoals bijvoorbeeld voor heftrucks, waar tot de dag van vandaag, de elektrische tractie een zeer sterk marktaandeel behoudt.

In bepaalde toepassingen zoals de zuiveldistributie aan huis in het Verenigd Koninkrijk werden ook nog met succes elektrische voertuigen ingezet. De elektrische personenwagen verdween vrijwel volledig, maar kende door brandstoftekorten een korte opleving tijdens de tweede wereldoorlog, ondermeer in Frankrijk en het Verenigd Koninkrijk.

Het **laatste kwart van de twintigste eeuw** betekende echter een nieuw ontwaken. De oliecrisis van 1973, het opkomend milieubewustzijn en de ontwikkeling van de vermogenelektronica deden de belangstelling voor het elektrisch aangedreven voertuig aanzienlijk toenemen. Nieuwe voertuigen en nieuwe toepassingen werden ontwikkeld, zoals de automatische uitleensystemen, met onder andere het bekende “*Brussels Electric Vehicle Experiment*” van prof. Gaston Maggetto aan de Vrije Universiteit Brussel vanaf 1979.

Veel van dit pionierswerk op elektrische voertuigen werd uitgevoerd door kleine bedrijven, zoals PGE, Volta en Boxel. Grote Europese autofabrikanten brachten dan weer omgebouwde versies van hun benzinevoertuigen op de markt, vooral daar waar er steunmaatregelen van de overheid werden voorzien. Enkele duizenden voertuigen werden ontwikkeld in de jaren negentig van de twintigste eeuw door bedrijven zoals Peugeot-Citroën (Saxo, AX 106, Partner, Berlingo), Renault (Clio, Express, Master, Kangoo), Fiat (Panda) of Volkswagen (Cityströmer). Elektrische voertuigen werden evenwel ook ingezet voor het openbaar vervoer, zoals de kleine batterij-elektrische bussen in de historische centra van Rome en Florence.

Ook in de Verenigde Staten werden er elektrische voertuigen gebouwd, vooral onder impuls van het Californische Zero Emission Vehicle (ZEV) mandaat zoals bijvoorbeeld de EV1 van General Motors. Om

politieke en economische redenen werd dit ZEV mandaat echter afgezwakt, en kwamen de EV1 voertuigen op de schroothoop terecht.

Het zou tot het **einde van het eerste decennium van de eenentwintigste eeuw** duren vooraleer de belangstelling voor de elektrische auto terug aanwakkerde, voornamelijk dankzij de beschikbaarheid van goed presterende lithiumbatterijen. De eerstkomende jaren worden er van alle grote constructeurs batterij-elektrische modellen op de markt verwacht.

Vanaf 1970 waren er ook nieuwe ontwikkelingen rond **hybride voertuigen**, door ondermeer dr. Victor Wouk in de Verenigde Staten. Het hybride aandrijfconcept werd echter aanvankelijk niet goed aanvaard, noch door de kringen die de elektrische voertuigen steunden, noch door de fabrikanten. In de laatste jaren van de twintigste eeuw werden er echter nieuwe hybride concepten voorgesteld, met als meest succesvolle voorbeeld de Toyota "Prius", waar de bijdrage van de

elektrische tractie via de hybride aandrijflijn voor een brandstofverbruik zorgde dat beduidend lager was dan bij conventionele auto's van deze klasse (zie hoofdstuk 3).

De hybride technologie bleek ook bijzonder aantrekkelijk voor zware voertuigen zoals stadsbussen, waar een seriehybride structuur een aanzienlijke vermindering van het brandstofverbruik en van de emissies mogelijk maakt. Enkele honderden dergelijke voertuigen zijn nu in dienst, ondermeer in Italiaanse en Vlaamse steden.

Een andere hybride ontwikkeling zijn de "*plug-in*"-voertuigen, die beschikken over een boordgenerator die een uitbreiding van de nuttige actieradius van het voertuig mogelijk maakt doordat de boordgenerator de batterij continu bijlaadt. Aanvankelijk beperkt tot prototypes in kleine reeks, zal deze technologie gebruikt worden in ondermeer de Chevrolet "Volt" en de Opel "Ampera" van General Motors.

## Hoofdstuk 2

## ACTUELE SITUATIE EN TOEKOMSTPERSPECTIEVEN

## 2.1. Elektrische voertuigen: actuele situatie

Een elektrisch voertuig (EV) wordt aangedreven door een elektrische motor en haalt zijn energie uit een herlaadbare batterij. Door de karakteristieken van de elektrische motor is een versnellingsbak in de meeste gevallen niet nodig. Bovendien wordt een deel van de remenergie gerecupereerd om de batterij opnieuw bij te laden. Men heeft zelfs de mogelijkheid de motor te integreren in de wielen (zowel voor een tweewiel als voor een vierwielaandrijving). Vanuit stilstand kan de elektrische motor zijn maximaal koppel ontwikkelen, wat aanleiding geeft tot een groot acceleratievermogen. Een ander fundamenteel verschil met conventionele wagens is dat de motor hier niet draait wanneer de wagen stilstaat en dus geen energie verbruikt.

Voor elektrische voertuigen bestaan drie types laadinfrastructuur, namelijk de "gewone", de "semisnelle" en de "snelle" laadinfrastructuur. Bij het gewone type wordt gebruik gemaakt van een standaard stopcontact (230 V, 16 A, 3,5 kW) en duurt een volledige lading 5 tot 8 uur. Bij het semisnelle type (7 kW) duurt het half zo lang en bij het snelle type (20 kW en meer) slechts een tiental minuten. Naast de huishoudelijke stopcontacten, die ruim aanwezig zijn in woningen en in garages, kunnen ook publieke laadstations of laadpalen gebruikt worden.

De huidige batterij-elektrische voertuigen hebben een beperkte autonomie en kunnen met een volledig opgeladen batterij gemiddeld 80 tot 150 km afleggen. Ze zijn bijgevolg zeer geschikt voor gebruik in de stad of voor toepassingen waarbij korte trajecten afgelegd worden (bijvoorbeeld 2<sup>de</sup> gezinswagen).

Het grootste financiële obstakel voor het doorbreken van elektrische voertuigen is de dure batterij. De meerkost voor de eindgebruiker kan echter over de tijd gespreid worden door het huren van de batterij. Men verwacht dat de kostprijs van de batterij zal dalen, dankzij massaproductie en verdere technische ontwikkelingen. Aan de andere kant is elektriciteit in vergelijking met diesel, benzine, LPG en biodiesel, veruit de goedkoopste energiebron. Rekening houdend met een gemiddelde elektriciteitsprijs van € 0,175<sup>1</sup> per kWh (dagtarief) bedraagt de elektriciteitskost per 100 km ongeveer € 2,5 voor kleine gezinswagens, en ongeveer € 1,5 indien men 's nachts zou laden. De brandstofkost van dieselvoertuigen per 100 km is 2 tot

4 maal hoger dan wat er moet betaald worden voor het bijladen van elektrische voertuigen.

## 2.1.1. Beschikbare en toekomstige elektrische voertuigen

In 2011 komen verschillende automerken met nieuwe elektrische voertuigen op de markt. Vroeger werden ook reeds elektrische voertuigen geïntroduceerd, zij het in zeer beperkte oplages of als prototypes. Vanaf 2012 zal het aantal beschikbare voertuigen gevoelig toenemen en, mede dankzij de start van massaproductie, zullen de elektrische voertuigen geleidelijk op de voorgrond komen. Onderstaande figuren illustreren enkele elektrische voertuigen die in 2011-2012 beschikbaar zijn.

## 2.1.2. Potentieel marktaandeel van elektrische voertuigen

In de wetenschappelijke literatuur werden reeds verschillende vooruitzichten gemaakt om het marktaandeel van elektrische voertuigen in te schatten. De resultaten fluctueren tussen 2 en 10% van de nieuw verkochte wagens in 2020 en zelfs 20% indien men ook de *plug-in* hybride voertuigen in aanmerking neemt. Een van de meest interessante en meest geavanceerde scenario's is dat van ERTRAC, European Road Transport Research Advisory Council, zoals voorgesteld in figuur 3.



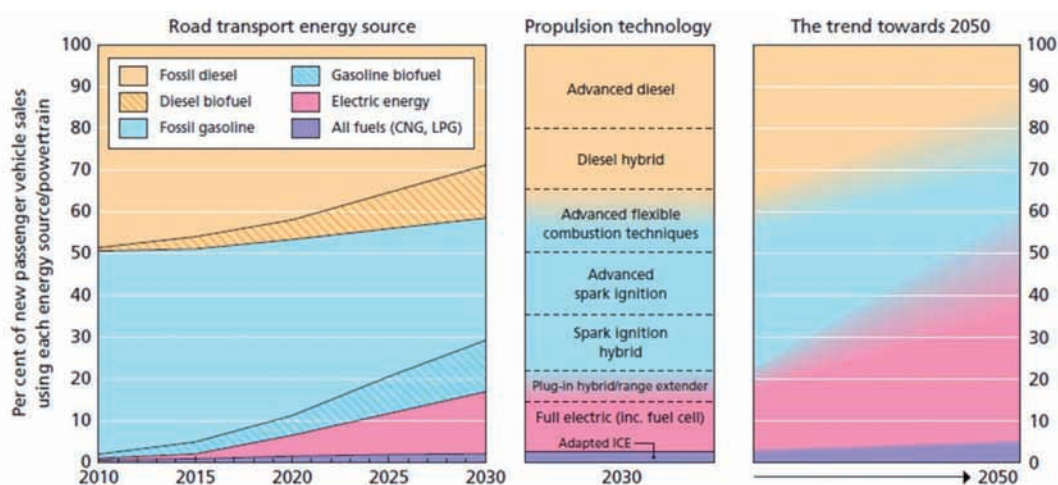
Figuur 1: Elektrische bestelwagens

<sup>1</sup> VREG: <http://www.vreg.be/hoeveel-kost-1-kwh-elektriciteit-en-aardgas> (geraadpleegd op 2 maart 2011).





Figuur 2: Elektrische personenwagens



Figuur 3: Evolutie van energie- en aandrijftechnologieën voor personenvervoer tot 2050 (ERTRAC, 2010)

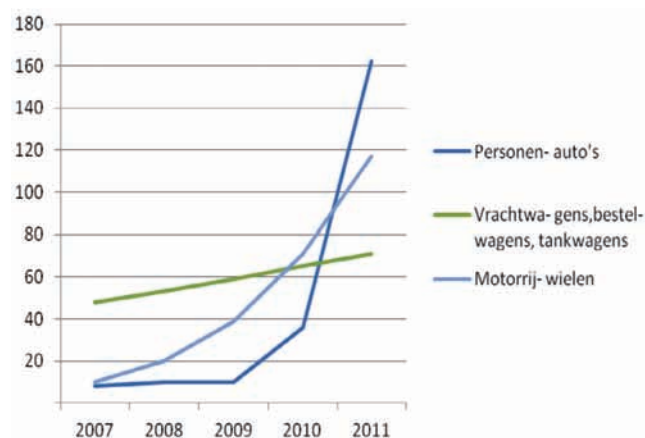
De klassieke benzine- en dieselmotoren zullen volgens ERTRAC nog zeker tot 2030 de markt blijven domineren, al wordt hun aandeel wat aangevuld met geavanceerde biobrandstoffen en hybride varianten. Het aantal elektrische voertuigen (PHEV's<sup>2</sup> en EV's) zal vanaf 2015 geleidelijk aan toenemen, maar hun markt-aandeel zal weliswaar gering blijven.

### 2.1.3. EV's in België

Half 2011 rijden er reeds enkele elektrische voertuigen op de Belgische wegen. Volgens cijfers van de VUB (op basis van Statbel) rijden er in België 160 elektrische personenvoertuigen, 3 elektrische autobussen en 71 elektrische (lichte) vrachtwagens. Opmerkelijk is het hoge aantal elektrische speciale voertuigen (1.174). Echter, het merendeel hiervan zijn elektrische vorkliften, die ingeschreven zijn bij de DIV (Directie Inschrijving Voertuigen), en dus een voertuignummerplaat hebben, omdat ze ook op de openbare weg rijden.

### 2.1.4. Opladen van EV's

In België zijn er 3,4 miljoen garages, parkings of overdekte staanplaatsen bij woningen. Figuur 5 illustreert het aantal garages en parkings per woongelegenheden

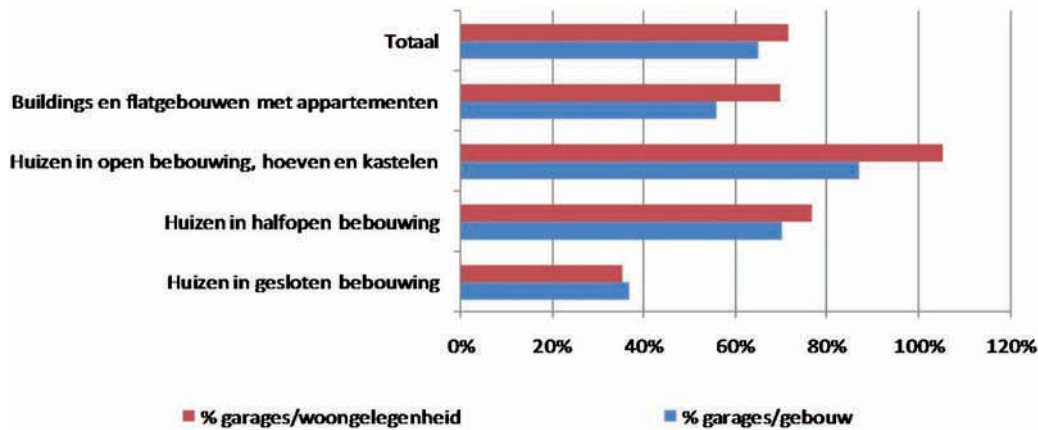


Figuur 4: Vloot elektrische wagens in België (bron: eigen bewerking VUB op basis van FOD mobiliteit).

en per gebouw. Hieruit blijkt dat een groot aantal wagenbezitters niet de mogelijkheid zullen hebben om hun wagen in een eigen garage aan het net te koppelen. Er zal dus nood zijn aan publieke laadinfrastructuur.

<sup>2</sup> PHEV = plug-in hybrid electric vehicle.





Figuur 5: Aantal garages per woongelegenheden

Bron: Eigen bewerking VUB op basis van Statbel.

Daarenboven blijkt uit onderzoek (Takafumi, 2010) dat bestuurders van elektrische auto's hun wagen beter gebruiken indien ze gerustgesteld zijn door het feit dat hun batterij op publieke plaatsen kan opgeladen worden.

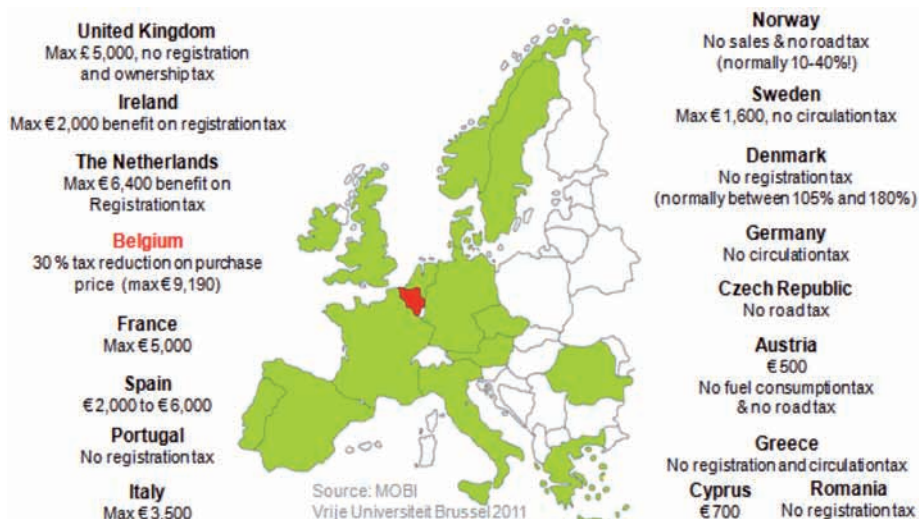
## 2.2. Financiële stimuli en actieplannen voor EV's

### 2.2.1. Financiële stimuli voor de aankoop van EV's

Om de verkoop van elektrische personenauto's te stimuleren, proberen verschillende Europese overheden de hoge aankoopprijs van EV's te verzachten door middel van een financiële tussenkomst. Dit gaat van een directe korting (percentage) op de aankoopprijs van het voertuig, tot een vermindering of zelfs algemene vrijstelling van de registratiebelasting en verkeersbelasting voor dit type voertuig. Figuur 6 illustreert West-Europese fiscale initiatieven die de aankoopprijs van EV's verlagen.

Zoals in bovenstaande figuur aangetoond, wordt ook in België de aanschaf van een EV financieel gestimuleerd. Tabel 1 illustreert een belastingvermindering van 30% op de aankoopwaarde die wordt toegekend wanneer het personenauto uitsluitend door een elektrische motor wordt aangedreven. De maximale vermindering voor het aanslagjaar 2012 (inkomsten 2011) bedraagt € 9.190. Voor de belasting op inverkeerstelling (BIV) en de verkeersbelasting (VB) wordt het laagst mogelijke tarief betaald (BIV van € 61,50 en VB van € 71,28).

Aangezien bedrijfswagens in België instaan voor een significant deel van de gereden kilometers, en in de hoop om de introductie van EV's te stimuleren, werd de autofiscaliteit voor bedrijfswagens aangepast. De CO<sub>2</sub>-bijdrage (verschuldigd van zodra privékilometers worden gereden met het bedrijfsvoertuig en betaald door de werkgever) voor EV's bedraagt € 23,53 per maand, hetgeen het laagst mogelijk tarief is. Bovendien



Figuur 6: Fiscale stimuli voor de aankoop van een elektrisch voertuig in Europa (Lebeau et al., 2011)

Tabel 1: Financiële stimuli voor de aankoop van een particulier elektrisch voertuig in België in 2011<sup>3</sup>.

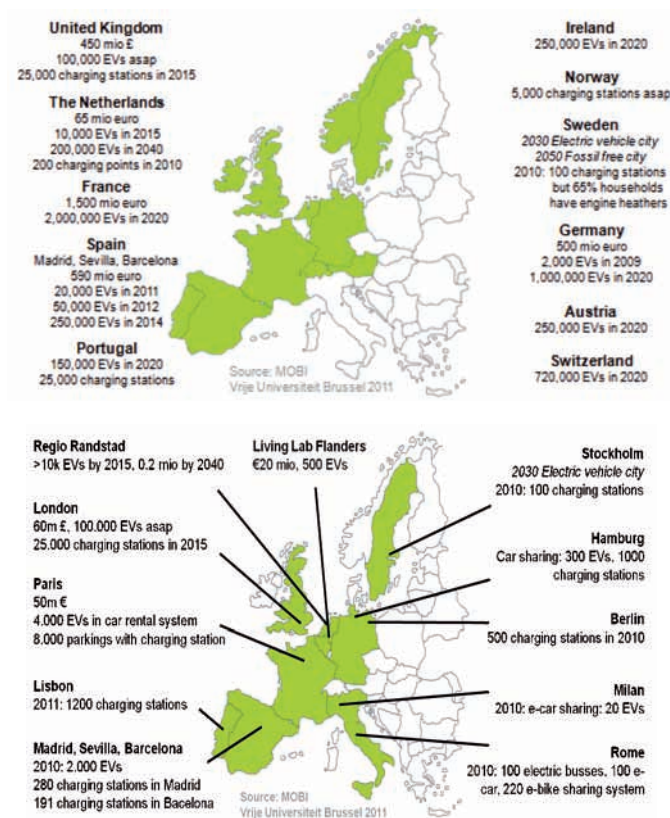
	Korting	Maximum
Quadricycle	15%	€ 4.640
EV	30%	€ 9.190
Laadpaal	40%	€ 250

zijn EV's voor 120% fiscaal aftrekbaar. Anderzijds betaalt de werknemer een bijdrage voor het belastbaar voordeel van de wagen. Ook hier geniet een EV een

speciaal tarief, zijnde een forfaitair bedrag van € 0,10 per km.

### 2.2.2. Actieplannen voor EV's in Europa

Op verschillende plaatsen in Europa hebben landen en steden zeer ambitieuze plannen om elektrische wagens te introduceren. Er zijn verscheidene roll-outscenari'o's ontwikkeld tot 2020 en verder. Figuur 7 illustreert een niet exhaustief overzicht van grootschalige demonstratieprojecten van EV's, investeringsbudgetten en streefdoelen voor het aantal oplaadpunten en EV's in Europa. Het Europese 'Green Car Initiative' geeft financiële steun aan onderzoeksprojecten over groene voertuigtechnologieën voor personenwagens, vrachtwagens en bussen. De financiële steun komt van het onderzoeksbudget van de Europese Commissie of uit leningen bij de Europese Investeringsbank (EIB).



Figuur 7: Investeringsbudgetten en demonstratieprojecten van EV's in Europa (Lebeau et al., 2011)

<sup>3</sup> Federale Overheidsdienst Financiën: <http://www.minfin.fgov.be/portail2/nl/themes/transport/vehicules-electric.htm> (geraadpleegd op 2 maart 2011).

## Hoofdstuk 3

## WAAROM OVERSCHAKELLEN OP ELEKTRISCHE VOERTUIGEN?

Zowel gezinnen als bedrijven genieten vandaag van de vele voordelen die de moderne transportmiddelen hen bieden. Meer en meer worden we echter ook geconfronteerd met een aantal problemen die veroorzaakt worden door onze toegenomen vraag naar mobiliteit. Files verminderen de toegankelijkheid van onze bestemmingen en de betrouwbaarheid van ons vervoer. Verkeersongevallen veroorzaken veel menselijk leed. Daarnaast creëert transport belangrijke milieuproblemen in de vorm van klimaatverandering, luchtverontreiniging en geluidshinder. Tot slot is de energievraag van transport niet onbelangrijk, en is onze afhankelijkheid van ingevoerde en eindige fossiele brandstoffen groot.

Elektrische voertuigen kunnen een alternatief bieden voor de bestaande voertuigen en zo helpen om een aantal van deze problemen aan te pakken. Hun potentieel is vooral groot voor de vermindering van de milieuproblemen en om minder afhankelijk te worden van fossiele brandstoffen.

### 3.1. Milieubelasting door het wegtransport in Vlaanderen

#### 3.1.1. Uitstoot van broeikasgassen en luchtverontreinigende stoffen

In Vlaanderen draagt transport sterk bij tot de globale emissies van pollutanten. De uitstoot van *broeikasgassen* draagt bij tot de klimaatverandering. De emissies van  $\text{NO}_x$  en NMVOS (niet-methaan vluchtige organische stoffen) zijn verantwoordelijk voor de vorming van *troposferisch ozon*. Het inademen van verhoogde concentraties ozon kan ernstige schade toebrengen aan de gezondheid en heeft een daling van de levensverwachting tot gevolg. Het inademen van *fijn stof* kan meer hart- en luchtwegklachten veroorzaken. Fijn stof in de lucht is een mengsel van deeltjes van uiteenlopende samenstelling en afmeting.  $\text{PM}_{10}$  en  $\text{PM}_{2,5}$ <sup>4</sup> zijn deeltjes met een aërodynamische diameter kleiner dan respectievelijk  $10\ \mu\text{m}$  en  $2,5\ \mu\text{m}$ . Hoe kleiner de deeltjes, hoe meer last ze veroorzaken. De emissies van  $\text{SO}_2$  en  $\text{NO}_x$  dragen bij tot de verzuring van het leefmilieu. Onrechtstreeks leidt de luchtvervuiling door *verzurende stoffen* ook tot negatieve gezondheidseffecten. Tenslotte hebben verhoogde ozonconcentraties en verhoogde verzurende deposities ook negatieve gevolgen voor de vegetatie.

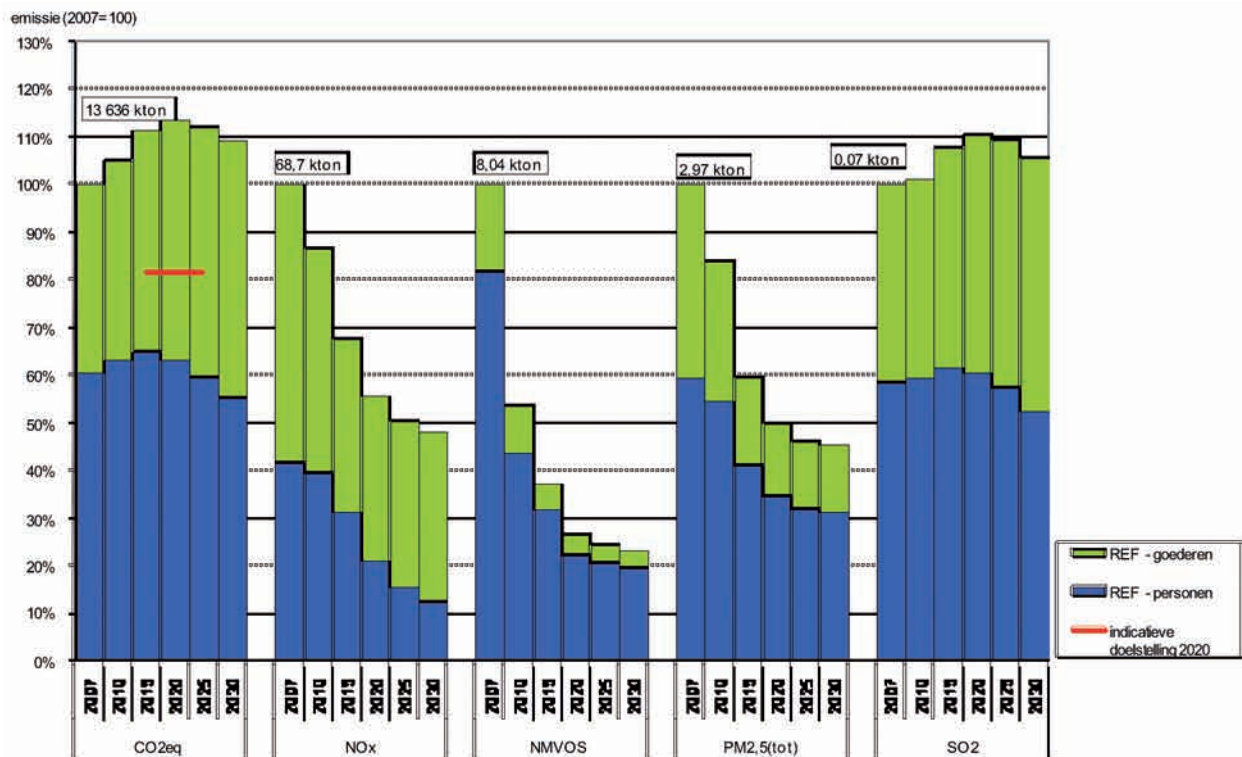
In 2009 bedroeg het aandeel van transport in de totale emissies in Vlaanderen (VMM, 2009b) 16,2% voor de broeikasgassen, 8% voor NMVOS, 26% voor  $\text{PM}_{10}$ , 32% voor  $\text{PM}_{2,5}$  en 49% voor  $\text{NO}_x$ . De bijdrage van het autoverkeer hierin is groot, met de dieservoertuigen als voornaamste verantwoordelijken voor de  $\text{NO}_x$  en  $\text{PM}$ -emissies. Door de steeds verder doorgedreven ontzwaveling van de brandstoffen bedragen de  $\text{SO}_2$ -emissies van de transportsector slechts 3% van de totale zwaveldioxide-emissies in Vlaanderen.

Figuur 8 geeft het verloop van de emissies door het wegtransport in het referentiescenario (REF-scenario) van de Milieuverkenning 2030 (VMM, 2009a). Het referentiejaar is 2007. Voor  $\text{PM}_{2,5}$  worden zowel de uitlaat- als de niet-uitlaatemissies (slijtage van banden, remmen en wegdek, evenals resuspensie van straatstof) opgenomen. Het REF-scenario gaat uit van het bestaande milieu- en transportbeleid. Het scenario verwacht tegen 2030 een stijging van het Vlaamse voertuigenpark met 27% t.o.v. 2006. Het aantal reizigerskilometer over de weg zou stijgen met 27%, terwijl het aantal voertuigkilometer voor het goederenvervoer over de weg 43% hoger zou liggen.

In het REF-scenario dalen alle emissies, met uitzondering van de broeikasgasuitstoot, gestaag in de periode 2007-2030. Behalve voor  $\text{NO}_x$ , blijft het personenvervoer de voornaamste vervuiler binnen het wegverkeer. Het aandeel van het goederenvervoer in de  $\text{NO}_x$ -uitstoot stijgt van 58% in 2007 naar 74% in 2030. Dit is het gevolg van enerzijds de relatief sterkere stijging van het aantal voertuigkilometer voor het zwaar vervoer en anderzijds de lagere graad van technologische vernieuwing.

De  $\text{PM}_{2,5}$ -emissies dalen tussen 2007 en 2030 met meer dan 50%. De emissies van broeikasgassen stijgen in het REF-scenario tot 2020 om daarna langzaam te dalen tot 2030. De emissies blijven evenwel hoger dan in 2007. De daling na 2020 komt er vooral dankzij technologische verbeteringen, die de stijging van het aantal afgelegde kilometers compenseren. Hierbij speelt de overeenkomst tussen de autoconstructeurs en de Europese Commissie, om de  $\text{CO}_2$ -uitstoot van nieuwe personenwagens systematisch te verminderen in functie van de tijd, een belangrijke rol, evenals de toenemende hybridisatie.

<sup>4</sup> PM = particulate matter (fijn stof).



Figuur 8: Evolutie van de emissie van broeikasgassen, NO<sub>x</sub>, NMVOS, PM<sub>2,5</sub>(tot) en SO<sub>2</sub> door wegtransport in het REF-scenario van de Milieuverkenning 2030 en de uitstoot in 2007 (omkaderd) – Vlaanderen (2007 tot 2030)

Bron: De Vlieger et al. (2009).

Zelfs bij ongewijzigd beleid is er een sterke daling van de NO<sub>x</sub>-emissies in de tijd, als gevolg van strengere emissiestandaarden in combinatie met vlootvernieuwing. De introductie van Euro VI bij zwaar wegvervoer in 2014, een maatregel die ondertussen is goedgekeurd maar nog niet in het REF-scenario is opgenomen, zou zorgen voor een verdere daling.

VMM (2009a) geeft aan dat dankzij de emissiereducties in de transportsector en de andere sectoren, de luchtkwaliteit in het REF-scenario voor de meeste pollutanten verbetert in functie van de tijd. Sommige normen worden echter niet gehaald. Er blijven ook lokale pijnpunten bestaan. In het geval van ongunstige meteorologische condities wordt het bovendien zeer moeilijk om de geldende luchtkwaliteitsnormen voor ozon en fijn stof te respecteren.

### 3.1.2. Geluidshinder

Volgens VMM (2009a) was 7% van de Vlaamse bevolking in 2006 blootgesteld aan geluidsniveaus boven 65 dBA (Lden) en ongeveer 0,9% en 0,04% aan niveaus hoger dan 70 en 75 dBA. "Lden" is de Europese indicator voor geluidsbelasting en houdt rekening met de behoefte aan rust 's avonds en 's nachts. Ondanks de invoering van geluidstechnische maatregelen, zoals stillere banden, en meer hybride voertuigen, verwacht

het REF-scenario een sterke stijging van het percentage blootgestelden voor de hoogste blootstellingsniveaus: 11,6% aan meer dan 65 dBA, 2,2% aan meer dan 70 dBA en 0,14% aan meer dan 75 dBA. De negatieve evolutie is het gevolg van de toename van het wegverkeer, en in het bijzonder van het zwaar verkeer (vrachtverkeer en bussen) dat weinig beïnvloed wordt door de maatregelen uit het REF-scenario.

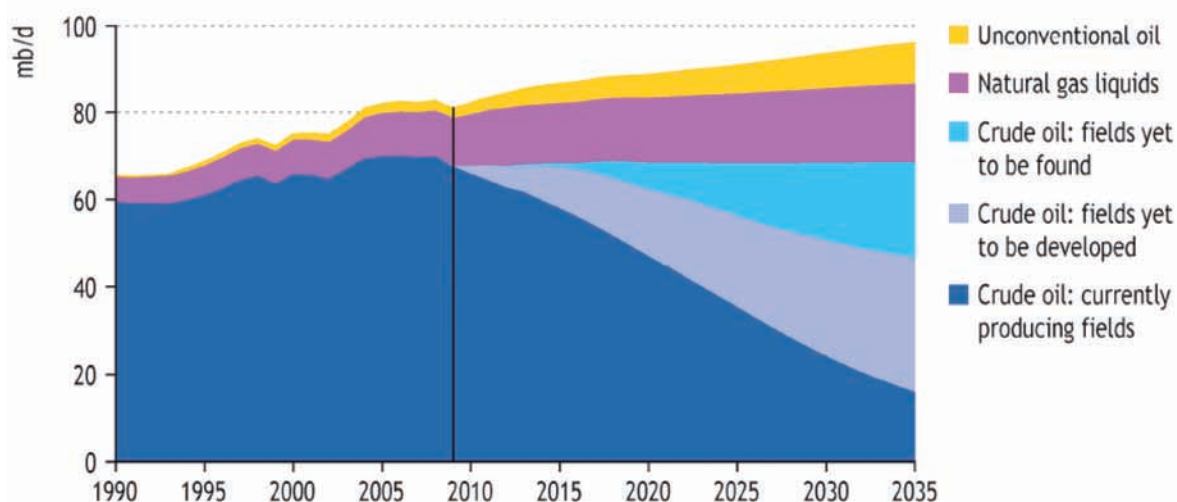
## 3.2. Energieafhankelijkheid van transport

In 2008 stonden fossiele brandstoffen in voor 97% van het energieverbruik van de transportsector in België zowel als in Vlaanderen (IEA, 2011; VITO, 2010) en transport stond in voor 21,6% (15,5%) van het finaal energieverbruik in België (Vlaanderen).

De EU-27 is sterk afhankelijk van de import van energie. Deze afhankelijkheid is bovendien toegenomen van ongeveer 45% tot 55% tussen 1995 en 2007. De mate van afhankelijkheid varieert volgens de energiebron: meer dan 80% voor aardolie, ongeveer 60% voor aardgas en iets minder dan 50% voor steenkool (EC, 2010).

De vooruitzichten van de IEA (2010) wijzen erop dat de olieprijs, waarbij vraag en aanbod in evenwicht zijn,





Figuur 9: Globale olieproductie volgens type in het “New Policies” scenario van de IEA

Bron: IEA (2010).

in de toekomst zullen stijgen. In het centrale scenario (“New Policies” scenario) voorziet men een stijging tot \$ 113 per vat tegen 2035 (in prijzen van 2009) tegenover ongeveer \$ 60 per vat in 2009. Daarnaast wijst men erop dat de volatiliteit van de olieprijs waarschijnlijk groot blijft. De productie van conventionele ruwe olie zou ongeveer constant blijven (figuur 9), terwijl vloeibaar aardgas en onconventionele oliebronnen de groeiende vraag zouden kunnen opvangen. Dit heeft tot gevolg dat de productiekost stijgt en het economisch belang van olie groeit. In het centrale IEA scenario is er ook een groeiende kwetsbaarheid voor aanbodschokken en zijn er grote negatieve gevolgen voor het milieu.

### 3.3. Europese beleidscontext

In maart 2010 heeft de EU “Europa 2020” voorgesteld, een groeistrategie geformuleerd voor het volgende decennium. De EU wil een slimme, duurzame en inclusieve economie worden. Dit plan omvat de 20-20-20 doelstellingen: een vermindering van de CO<sub>2</sub>-emissies tegen 2020 met 20% t.o.v. 1990 (en met 30% in het geval van een sterk internationaal verdrag), een aandeel van 20% van hernieuwbare energiebronnen in de energiemix en een toename met 20% van de energie-efficiëntie. Daarnaast is er veel aandacht voor innovatie gericht op belangrijke uitdagingen waarmee we geconfronteerd worden, namelijk klimaatverandering, energie-efficiëntie en grondstoffenefficiëntie.

Het Europees Witboek van maart 2011 stelt tegen 2050 ambitieuze doelstellingen voor, waarbij er gestreefd wordt naar een reductie van de emissies van broeikasgassen met 80 tot 95% t.o.v. 1990. In de vervoerssector moet de uitstoot van broeikasgassen

tegen 2050 met minstens 60% dalen ten opzichte van 1990. Dit komt overeen met een reductie van ongeveer 70% ten opzichte van de niveaus van 2008. Tegen 2030 wordt voor vervoer gestreefd naar een daling van de broeikasgasemissies met 20% ten opzichte van 2008. Het gebruik van voertuigen met conventionele verbrandingsmotor in stedelijke centra moet gehalveerd worden tegen 2030 en tot nul gereduceerd worden in 2050.

### 3.4. Hoe vergelijken elektrische voertuigen zich tot andere voertuigen?

#### 3.4.1. Energetische vergelijking

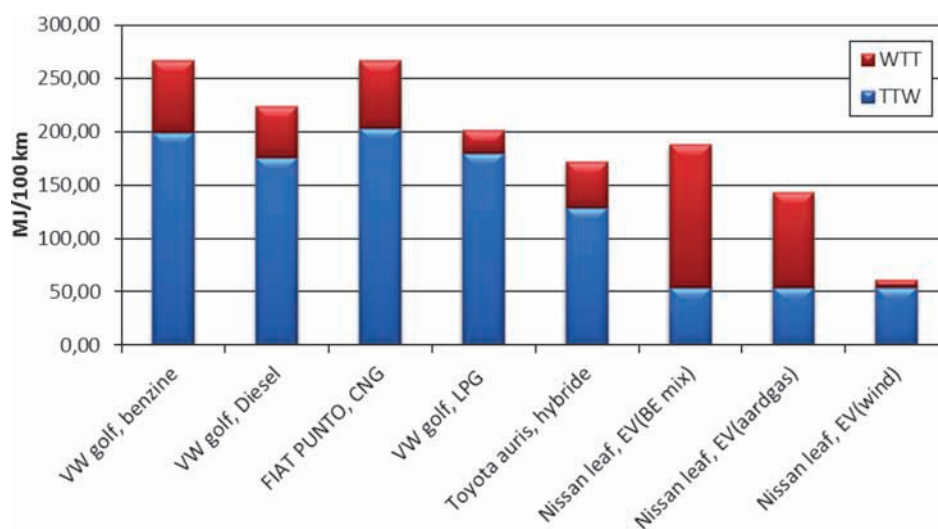
Hoe verhouden voertuigen met alternatieve brandstoffen en aandrijvingen zich nu t.o.v. conventionele brandstoffen? Hiervoor wordt gebruik gemaakt van een “Well-to-Wheel” (WTW) benadering. In een “Well-to-Wheel” benadering wordt zowel de brandstofproductie of “Well-to-Tank” (WTT), als het voertuiggebruik “Tank-to-Wheel” (TTW) in rekening gebracht.

De voertuigen in tabel 3 zijn vergelijkbaar in grootte, zijn representatief voor de specifieke brandstofgroep en voldoen allen aan de meest recente Euro 5 emissienorm (voor alle nieuwe voertuigen van kracht vanaf 01/01/2011). Alle voertuigen werden op basis van een zelfde rijcyclus vergeleken. Het rijgedrag heeft een bepalende invloed op de milieuprestatie van een wagen. Om de verschillende wagens op een objectieve wijze onderling te vergelijken wordt een gestandaardiseerde rijcyclus gebruikt. Deze rijcyclus wordt de NEDC (*New European Driving Cycle*) cyclus genoemd en elke wagen die op de Europese markt wordt aangeboden, moet deze test ondergaan. Het werkelijke verbruik van

Tabel 3: Overzicht van de gekozen Euro5 voertuigen met verschillende brandstoffen of aandrijftechnologieën

Voertuig	Verbruik [l/100km, Nm <sup>3</sup> /100km of kWh/100km]	Gewicht [kg]	ecoscore
Volkswagen Golf, benzine	5,8	1.189	70
Volkswagen Golf, diesel	3,8	1.239	75
Volkswagen Golf, LPG	7,1	1.247	71
Fiat Grande Punto, CNG	6,4	1.185	77
Toyota Auris, hybride	4,0	1.370	77
Nissan Leaf, EV (BE mix)	15	1.587	86

Bron: Eigen bewerking VUB en VITO.



Figuur 10: WTW energieverbruik van de voertuigen uit tabel 3

Bron: MOBI – Vrije Universiteit Brussel (2010).

een wagen ligt wel altijd hoger dan deze officiële testcijfers. Bij een elektrisch voertuig heeft de airconditioning een negatief effect op het elektriciteitsverbruik omdat de compressor vaak aangedreven wordt via de tractiebatterij. In elektrische voertuigen is een andere warmtebron nodig dan de warmteverliezen van de thermische motor zoals bij een klassiek voertuig met verbrandingsmotor. Hiervoor kunnen verschillende oplossingen toegepast worden. Een mogelijke oplossing is het gebruik van een kachel die werkt op benzine. Hiervoor is dan een aparte (kleine) benzine tank voorzien en zijn er ook (bepaalde) emissies van deze kachel.

Het benzine-, diesel- en LPG-voertuig<sup>5</sup> is een Volkswagen Golf. Het hybride benzinevoertuig is de Toyota Auris en het batterij-elektrische voertuig (EV) is de Nissan Leaf. Bij een gebrek aan de homologatiegegevens van de Volkswagen Golf, werd voor het CNG-voertuig<sup>6</sup> een Fiat Grande Punto genomen.

De elektrische auto laat een grotere diversificatie van de energiebronnen toe, met inbegrip van een verschuiving naar groene energiebronnen. Figuur 10 toont het energieverbruik van de verschillende voertuigen, opgedeeld naar energie nodig voor de brandstofproductie (WTT of *Well-to-Tank*), respectievelijk voor het voertuiggebruik (TTW of *Tank-to-Wheel*).

Hieruit blijkt het belangrijke voordeel van de hybride aandrijving, alsook de invloed van de productiewijze van de elektriciteit op het primaire energieverbruik van batterij-elektrische voertuigen (EV's). Een elektrische wagen die zijn batterij oplaadt op basis van elektriciteit uit windenergie levert de beste WTW energieprestatie van de acht voertuigen.

<sup>5</sup> LPG = liquefied petroleum gas.

<sup>6</sup> CNG = compressed natural gas.



Tabel 4: Uitlaatgasemissies van de verschillende voertuigen (g/km)

Voertuig	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>	CO	HC	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	PM
VW golf, benzine	134	0,005	0,02	0,24	0,023	0,021	0,0044	0
VW golf, diesel	99	0,008	0,01	0,38	0,038	0,130	0,0032	0,001
VW golf, LPG	169	0,005	0,02	0,33	0,032	0,012	0,0012	0
Fiat Grande Punto, CNG	115	0,005	0,124	0,531	0,042	0,022	0	0
Toyota Auris, hybride	93	0,005	0,02	0,17	0,034	0,006	0,0030	0
Nissan Leaf, EV (BE mix)	0	0	0	0	0	0	0	0

Bron: Eigen bewerking VUB.

Uit een gedetailleerde test uitgevoerd door VITO, bleek dat de hybride versie van de Toyota Auris op een typische rit van Antwerpen naar Brussel over het gehele traject 18% minder CO<sub>2</sub>-uitstoot dan de zuinigste benzineversie, en 11% minder dan de versie met dieselmotor. Op bepaalde deeltrajecten (stadsverkeer met motor op bedrijfstemperatuur) en onder de meest gunstige omstandigheden (volle batterij) liep het verschil zelfs op tot 46% voor de benzineversie, en 38% voor de dieselversie (VITO, 2011).

### 3.4.2. Milieu

In tabel 4 worden de Tank-to-Wheel emissies gekwantificeerd van de voertuigen in tabel 3. De batterij-elektrische Nissan Leaf loost uiteraard geen uitlaatgassen tijdens het gebruik. Verder is duidelijk dat dieselvoertuigen op het gebied van CO<sub>2</sub>-emissies beter scoren dan benzinevoertuigen, maar minder gunstig zijn voor de NO<sub>x</sub>- en PM-emissies.

Tabel 5 geeft een overzicht van de *Well-to-Wheel* (WTW) emissies. Hierbij worden de *Tank-to-Wheel* emissies uit tabel 4 aangevuld met de *Well-to-Tank* emissies afkomstig van de brandstofproductie. De data

voor de productie van benzine, diesel, LPG en CNG zijn afkomstig uit Ecoinvent (Dones et al., 2007). De emissies afkomstig van elektriciteitsproductie in 2009 werden bepaald in (*hier ontbreekt een woord*) (Boureima et al., 2010). De *Well-to-Wheel* emissies van de verschillende voertuigen worden steeds vergeleken met de emissies van het benzinevoertuig.

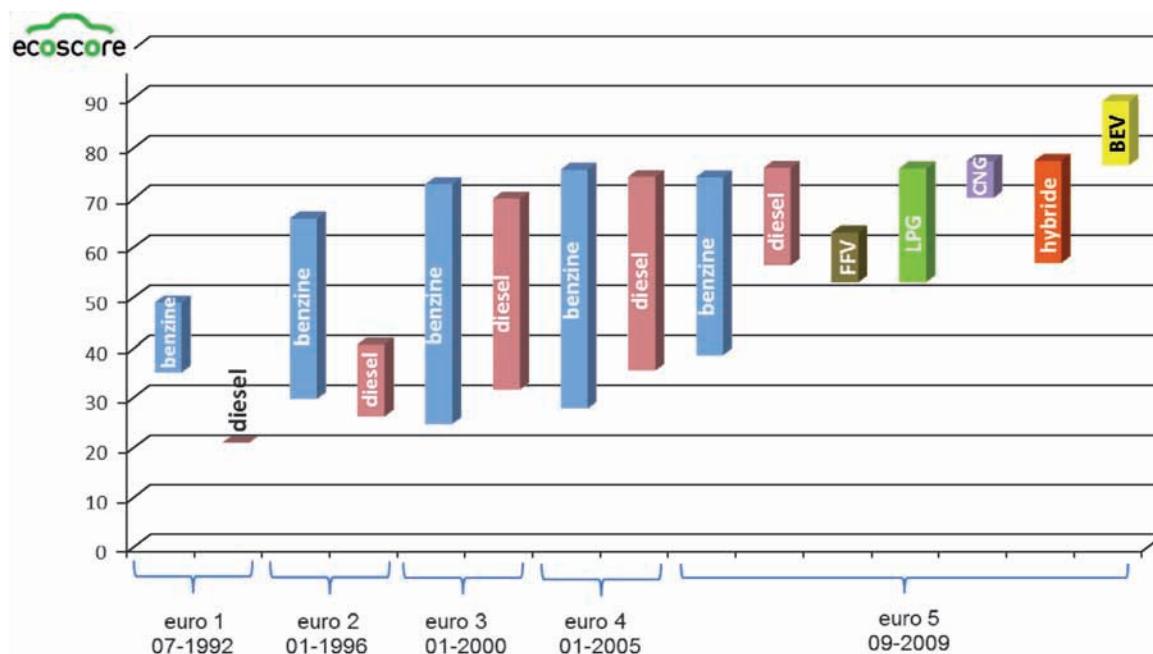
Uit tabel 5 blijkt dat de hoogste reductie in CO<sub>2</sub>-emissie kan behaald worden door elektrische voertuigen, maar dat de grootte van deze vermindering uiteraard afhangt van de wijze waarop de elektriciteit wordt opgewekt. Tabel 5 beschouwt drie gevallen: de gemiddelde elektriciteitsmix in België (BE mix), elektriciteit geproduceerd met aardgas en groene elektriciteit geproduceerd met windenergie.

In opdracht van het departement Leefmilieu, Natuur en Energie van de Vlaamse overheid hebben de VUB, VITO en de ULB de ecoscore ([www.ecoscore.be](http://www.ecoscore.be)) ontwikkeld, een methode voor de beoordeling van de milieuvriendelijkheid van voertuigen (Van Mierlo et al., 2004; Timmermans et al., 2005). Bij de ecoscore-methodologie worden verschillende schade-effecten in rekening gebracht. Het broeikas effect telt voor 50%

Tabel 5: 'Well-to-Wheel' emissies van personenvoertuigen

Voertuig	CO <sub>2</sub>	CO	HC	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	PM	N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>
VW golf, benzine	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
VW golf, diesel	70%	143%	164%	171%	104%	64%	152%	63%
VW golf, LPG	109%	122%	138%	34%	6%	28%	94%	44%
Fiat Grande Punto, CNG	72%	192%	183%	25%	0%	3%	93%	123%
Toyota Auris, hybride	69%	70%	147%	61%	15%	69%	98%	75%
Nissan Leaf, EV (BE mix)	19%	3%	4%	38%	2%	42%	4%	17%
Nissan Leaf, EV (aardgas)	48%	8%	5%	75%	0%	14%	26%	32%
Nissan Leaf, EV (wind)	1%	4%	0%	5%	1%	32%	1%	5%

Bron: Eigen bewerking VUB.



Figuur 11: Ecoscore van personenvoertuigen met verschillende brandstof/aandrijflijn en ouderdom, maar met eenzelfde cilinderinhoud

Bron: MOBI – Vrije Universiteit Brussel (2010).

mee in de eindscore, gezondheidseffecten voor 20%, effecten op ecosystemen voor 20% en geluidshinder voor 10%. De bijdragen van de verschillende polluenten tot de schade-effecten worden respectievelijk berekend op basis van GWP (*Global Warming Potential*), externe kosten en decibels. De milieuevaluatie maakt het mogelijk de verschillende effecten te combineren in één enkele indicator. De ecoscore geeft een cijfer weer tussen 0 en 100, waarbij 100 het meest milieuvriendelijke is. De methodologie is gebaseerd op een “*Well-to-Wheel*” analyse. Tabel 3 geeft de ecoscore weer van de verschillende wagens, waarbij duidelijk is dat de batterij-elektrische wagen (BEV) de hoogste score heeft (86), gevolgd door het hybride (77) en CNG-voertuig (77).

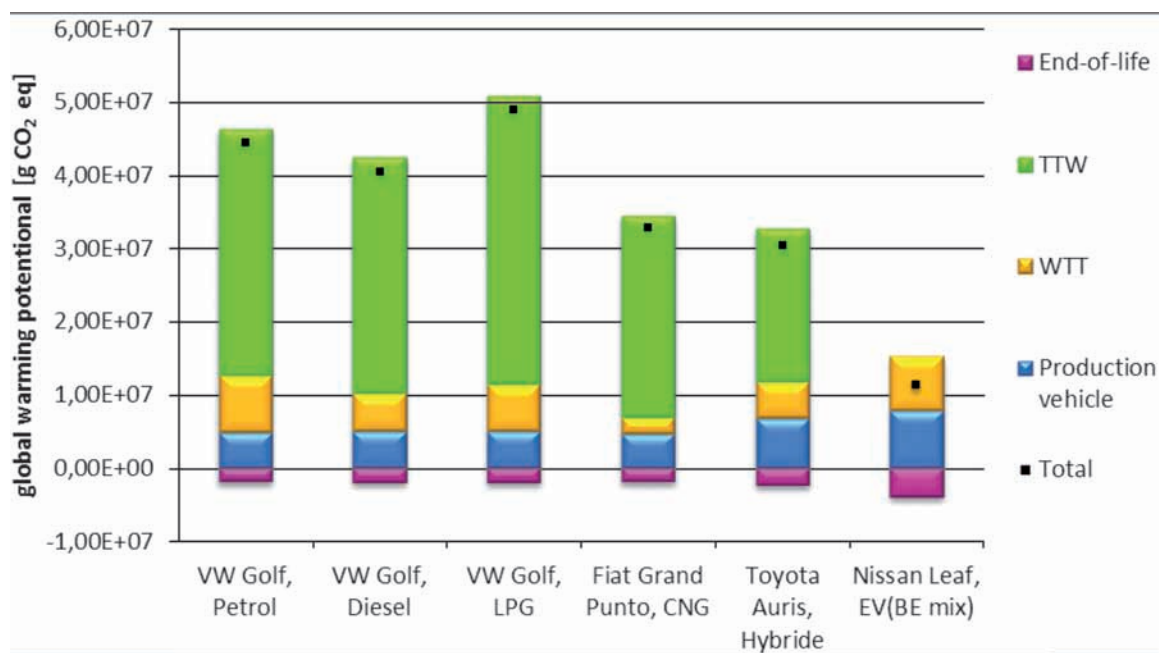
Figuur 11 illustreert de minimum- en maximumecoscore van de verschillende voertuigtechnologieën. Op basis van leeftijd scores recentere voertuigen beter dan oudere voertuigen, wat vooral te danken is aan de opeenvolgende strengere Europese normen wat betreft uitlaatemissies. Ook de positieve evolutie in de tijd van de geluidsemissies zorgt voor een verbetering van de ecoscore, hoewel de bijdrage van geluid slechts beperkt doorweegt in het eindresultaat. De emissie van CO<sub>2</sub>, die gerelateerd is aan het brandstofverbruik, vermindert niet steeds bij recentere voertuigen.

Het positieve effect van een verbeterde motortechnologie wordt soms tenietgedaan door een toename van het voertuiggewicht of een verhoogd energieverbruik door bepaalde accessoires, waaronder airco (Van

Mierlo et al., 2005). Opvallend is dat de nieuwste generatie dieselveertuigen haar achterstand inzake ecoscore op de benzinevoertuigen aan het inhalen is. Ook het verschil tussen die voertuigen en de LPG-voertuigen is kleiner geworden.

Ecoscore is een WTW analyse waarin de volledige brandstofcyclus wordt beschouwd. Bij de introductie van alternatieve voertuigen is het relevant om na te gaan wat de impact is van de productie van specifieke componenten zoals batterijen. Een levenscyclusanalyse (LCA) bestudeert de invloed van een product of een dienst op het milieu over zijn gehele levenscyclus, van wieg tot graf (*cradle-to-grave*). Een LCA zal alle levensfasen (delven van de grondstoffen, productie, distributie, gebruik, afvalverwerking) van een product in acht nemen. Zo kan men nagaan of bv. veranderingen in het productontwerp of de technologie leiden tot een verschuiving van de milieu-impact van de ene levensfase naar de andere.

In figuur 12 wordt de impact van verschillende voertuigtechnologieën op het fenomeen klimaatverandering weergegeven. De *productie* van een hybride voertuig en een batterij-elektrisch voertuig (EV) heeft een grotere impact op klimaatwijziging dan de productie van een conventioneel voertuig omdat tevens een bijkomend batterijpakket moet worden geproduceerd. Echter, het totaal houdt rekening met de vermeden impact (negatieve impact) afkomstig van het *recycleren* van het batterijpakket. Deze negatieve impact zit vevat in de ‘eindelevensduurfase’ in figuur 12 en reduceert de



Figuur 12: Invloed van de verschillende voertuigtechnologieën op de emissies van broeikasgassen (Messagie et al. 2010).

impact van de productie van een batterij sterk. Verder blijkt dat de totale CO<sub>2</sub>-emissies voor HEV's en EV's lager liggen dan voor de andere technologieën en dit voornamelijk door de lage WTW-emissies.

### 3.4.3. Maatschappelijke kostenanalyse en 'life cycle cost' analyse

Er bestaan verschillende mogelijkheden om het energieverbruik en de CO<sub>2</sub>-emissies van auto's te verminderen, elk met een verschillende kost. Niet elke optie is even aantrekkelijk. De aantrekkelijkheid van de opties kan bekeken worden vanuit het standpunt van de maatschappij, of vanuit het standpunt van de automobilisten.

#### Maatschappelijke kostenanalyse

Een voorbeeld van een maatschappelijke kostenanalyse wordt gegeven in IEA (2009). De studie bekijkt verschillende oplossingen: aanpassing aan conventionele voertuigen, hybride voertuigen, plug-in hybride voertuigen, batterij-elektrische voertuigen en verschillende brandstoftypes. De resultaten verschillen naargelang de toestand op de oliemarkt, zoals weerspiegeld in de olieprijs, en of men kijkt naar de kosten op korte of lange termijn. De langetermijncosten zijn lager dan die op korte termijn door leereffecten, schaafeffecten, enz.

De IEA-studie illustreert hoe men kan beoordelen of bepaalde opties interessant zijn. Belangrijk is dat de conclusies afhankelijk zijn van de veronderstellingen over de (onzekere) kostprijs van de technologieën, de

levensduur van de voertuigen, het aantal afgelegde kilometers, de gehanteerde discountvoet, enz.

In IEA (2009) leiden alle opties bij een olieprijs van \$ 60/vat op korte termijn tot een netto stijging van de voertuigkosten over de hele levensduur van het voertuig. Als men rekening houdt met de kostendaling die men op langere termijn voor de technologieën kan verwachten, worden alle alternatieven aantrekkelijker, maar blijft er een netto meerkost. De hoogste meerkost wordt opgetekend voor elektrische voertuigen (tot \$ 5.000 per voertuig).

De studie geeft ook een inzicht in de kost per bespaarde ton CO<sub>2</sub>-emissie. Bij een olieprijs van \$ 60/vat en met kortetermijntechnologiekosten bedraagt de kost per ton CO<sub>2</sub>-reductie \$ 30 tot \$ 80 voor geavanceerde ICE en ICE-HEV voertuigen. Voor de overige technologieën ligt de kost veel hoger, namelijk \$ 140 tot \$ 300 per ton CO<sub>2</sub>-reductie voor PHEV's en \$ 400 à \$ 500 per ton voor EV's met respectievelijk de Franse en de EU-mix voor de elektriciteitsproductie. Deze kosten liggen veel hoger dan de huidige prijzen waaraan CO<sub>2</sub> momenteel verhandeld wordt en zijn ook veel hoger dan de inschatting van de schadekosten van broeikasgassen in de Europese impactstudie (Impact, 2008). Bij een kostendaling van de technologieën op lange termijn zijn de reductiekosten per ton CO<sub>2</sub> vanzelfsprekend lager. Voor PHEV's, in het beste geval met een elektriciteitsproductie die weinig broeikasgassen uitstoot, zouden ze ongeveer \$ 60 per ton CO<sub>2</sub>-reductie bedragen en voor de batterij-elektrische voertuigen rond de \$ 120/ton CO<sub>2</sub>.

De resultaten hangen sterk af van de context die men beschouwt. Bij een structureel hogere olieprijs van bijvoorbeeld \$ 120/vat zijn er vanuit maatschappelijk standpunt zelfs bij de hoge kortetermijnkosten netto kostenbesparingen mogelijk door de toepassing van geavanceerde ICE- en ICE-HEV-voertuigen. Afhankelijk van de technologie liggen deze besparingen tussen de \$ 100 en \$ 3.000 over de levensduur van een voertuig. Bij een daling van de technologiekosten op lange termijn zou de netto incrementele kost van een EV nul benaderen of licht negatief zijn, terwijl er, afhankelijk van de technologie, een netto kostenbesparing tot maximaal € 5.000 zou optreden voor geavanceerde ICE's, ICE-HEV's en PHEV's. De ermee gepaard gaande kost per ton CO<sub>2</sub>-reductie zou dan op lange termijn voor de meeste technologieën negatief zijn, namelijk van ongeveer -\$ 20 tot - \$ 250 per ton CO<sub>2</sub>-reductie.

De hypothesen die in dergelijke oefeningen gemaakt worden, hebben dus een grote invloed op de resultaten. Een bijkomende caveat is dat de IEA studie alle technologieën vergelijkt met een auto met ontstekingsmotor met de technologie van 2005. Indien men een voertuig met meer geavanceerde technologie als vergelijkingspunt zou nemen, zou de CO<sub>2</sub>-reductie van de alternatieven kleiner zijn en de kost per ton CO<sub>2</sub>-reductie groter.

#### Private kostenanalyse

Men kan de technologieën ook vanuit het standpunt van de automobilisten bekijken in een *life cycle cost (LCC) analyse*. Een LCC-analyse brengt alle kosten gerelateerd aan de aankoop en het gebruik van een wagen in rekening. Dit zijn enerzijds vaste kosten, onafhankelijk van het gebruik van het voertuig zoals afschrijving, belasting op de inverkeerstelling (BIV), verkeersbelasting (VB) en verzekering. Anderzijds zijn er ook variabele kosten, afhankelijk van het gebruik van het voertuig, zoals brandstof, onderhoud, batterij (in geval van een elektrisch voertuig), etc. Doordat de vaste en variabele kosten zich op diverse momenten in de tijd situeren, wordt de actuele waarde (discontovoet 4%) van alle kosten berekend (EPA, 2000; Pearce et al., 2006). Er wordt uitgegaan van het feit dat de consument zijn voertuig gemiddeld 7 jaar gebruikt alvorens hem door te verkopen, met een gemiddelde jaarlijks afgelegde afstand van 15.000 km (NIS, 2008).

Figuur 13 illustreert een LCC-analyse waarin 22 voertuigen met verschillende technologieën (benzine, diesel, LPG, CNG, hybride, plug-in hybride (PHEV) en batterij-elektrisch (EV)) met elkaar vergeleken worden<sup>7</sup>. Opmerkelijk is dat voor de moderne technologieën (meer specifiek voor EV en PHEV) de initiële aankoopprijs, uitgerekend in jaarlijkse depreciatie, veel groter is dan voor de andere technologieën. Daartegenover staat wel een lagere brandstofkost. De

balkjes in het negatieve gedeelte van de y-as stellen de overheidsgebonden premies voor. Deze zijn de roetfilterpremie, de premie voor voertuigen met lage CO<sub>2</sub>-uitstoot (3% en 15%) en de premie voor batterij-elektrische voertuigen (30%). De oranje balkjes illustreren de batterijkosten. Voor sommige elektrische voertuigen behelst dit de vervanging van de batterij (Tazzari Zero), terwijl dit voor de Renaults Fluence en Zoé het maandelijkse leasingbedrag weerspiegelt. De andere EV's hebben geen meerkost voor de batterij, wat wil zeggen dat hun batterij gedurende de onderzochte periode van 7 jaar en 15.000 km per jaar niet vervangen dient te worden. De LCC voor de plug-in hybride voertuigen (Toyota Prius en Opel Ampera) werden in twee gevallen berekend: "*short distance*" (SD, 40 km per dag, 365 dagen per jaar, 15.000 km per jaar) en "*long distance*" (LD, 100 km per dag, 150 dagen per jaar, 15.000 km per jaar). De reden hiervoor ligt bij de verschillende actieradius van deze voertuigen. De Toyota kan 20 km puur elektrisch rijden, terwijl de Opel het 60 km volhoudt.

Concluderend kan men aannemen dat in 2011 de elektrische en plug-in hybride voertuigen voor de eigenaars nog steeds duurder zijn per gereden kilometer. Toekomstige schaafeffecten, betere batterijtechnologieën, meer beschikbare voertuigen met EV- en PHEV-technologie, hogere olieprijs (negatief effect voor conventionele voertuigen) kunnen het prijsverschil echter reduceren of zelfs elimineren.

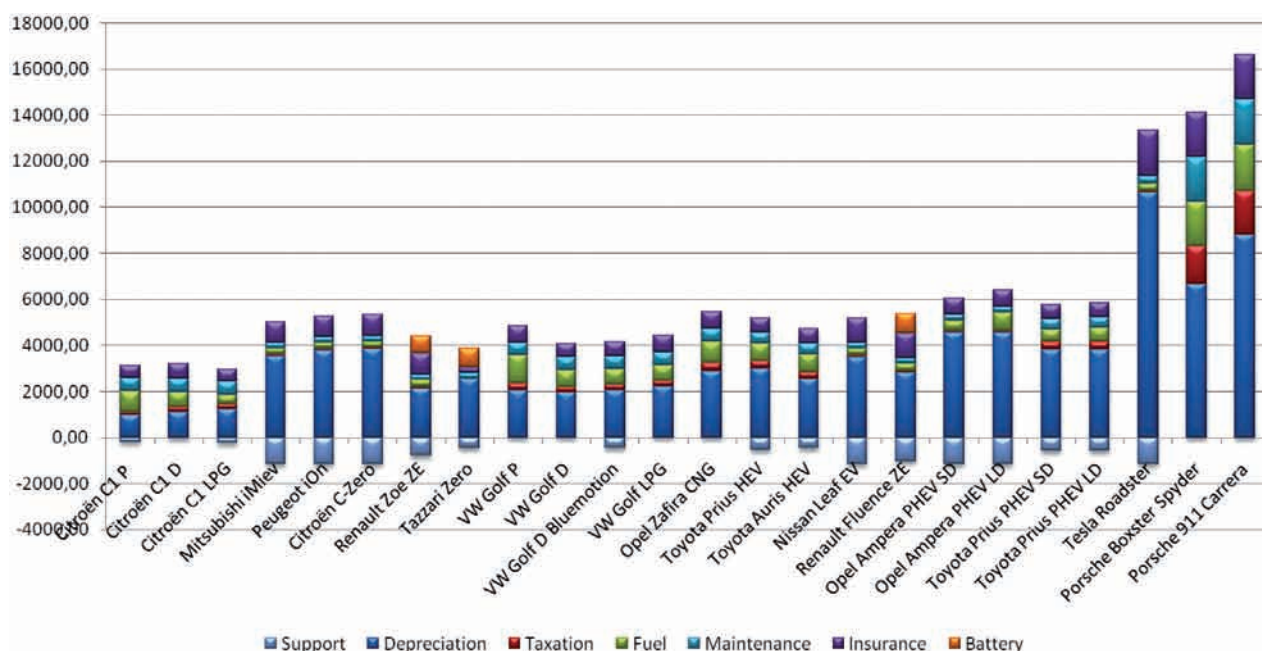
#### 3.4.4. Het elektrisch voertuig vanuit het standpunt van de consument

In de komende maanden en jaren zullen de spelers in dit economisch verhaal (vooral producenten maar in zekere mate ook de regulerende overheid) moeten beslissen of de potentiële markt groot genoeg en imminent genoeg is om er volop in te stappen. Een elektrisch voertuig is immers voldoende "anders" inzake technologie, kostenstructuur en gebruikspatroon om te kunnen spreken van een ingrijpende innovatie in de markt van de personenauto's. Dit betekent dat de consument uit een overvloed van vaak ingewikkelde, en dikwijls tegenstrijdige informatie voor zichzelf zal moeten uitmaken of het elektrisch voertuig als product zijn mobiliteitsbehoefte mee kan helpen dekken.

Een innovatief product kan echter maar succesvol zijn indien een voldoende aantal van de volgende voorwaarden vervuld zijn in de ogen van de consument (Wunker S., 2010):

<sup>7</sup> Gehanteerde brandstof- en elektriciteitsprijzen: benzine (€ 1,50/l), diesel (€ 1,24/l), LPG (€ 0,54/l), CNG (€ 0,90/kg) en elektriciteit (€ 0,15/kWh).





Figuur 13: Life Cycle Cost analyse voor voertuigen met verschillende aandrijfsystemen (€/jaar)

Bron: MOBI, Vrije Universiteit Brussel, 2011.

- Men kan een goed afgebakende niche in de markt vinden waarvoor het nieuw product aantrekkelijk is, zodat aanbieders hun marketing- en verkoopinspanningen kunnen focussen.
- De voornaamste technologische problemen zijn opgelost, zodat het product naadloos past in de fysieke en economische infrastructuur nodig voor zijn gebruik.
- De voordelen van het nieuwe product zijn aangetoond door “early adopters” die door de massamarkt als geloofwaardig worden beschouwd.
- Het risico om het nieuwe product te proberen lijkt klein.
- De aankoopbeslissing is eenvoudig gehouden.
- Met het kopen van het innovatieve product zijn er kortetermijnvoordelen te behalen die interessanter zijn dan het wachten om te zien hoe de markt zal evolueren.

De laatste keer dat men in de automobilwereld een min of meer vergelijkbare situatie kende was in 1997 met de introductie van Toyota’s Prius, de eerste massageproduceerde hybride wagen. Toen bleven alle andere constructeurs afwachtend toekijken, om al gauw vast te stellen dat het hybride model insloeg als een bom. Inderdaad, ondanks de hoge prijs waren er eind 2010 meer dan 2 miljoen exemplaren verkocht.

De hybride wagen is ongetwijfeld innovatief in zijn techniek, maar zijn gebruikspatroon past quasi naadloos bij de “normale” auto’s wat betreft autonomie, prestatieprestaties en brandstof. Daarbij werkt de elek-

trische aandrijving ook volautomatisch – wat het geval is voor de meeste hybride personenwagens – zodat ook op het gebied van rijden de gebruiker nauwelijks enig verschil merkt t.o.v. de klassieke wagen met verbrandingsmotor. Dezelfde redenering kan men toepassen op de elektrische fiets: wordt gereden zoals een fiets, maar met minder inspanningen, en de markt-focus ligt op de senioren: een marktniche met veel vrije tijd en voldoende koopkracht.

Voor de elektrische wagen geldt dit echter allemaal niet: de huidige technologie dwingt de gebruiker compromissen te sluiten inzake autonomie, rijbereik, laadvermogen en prestaties, wat in de eerste jaren een wijziging in het gebruikspatroon van de wagen zal opleggen. Deze hinderpaal zal men moeten overwinnen met argumenten zoals: betere luchtkwaliteit, energiezuiniger, positief voor het milieu, lagere kost per gereden kilometer, het voertuig van de toekomst, enz... Blijft nochtans de hoge aankoopprijs, die daarenboven dubbel doorweegt omdat er veel minder kilometers mee gereden zullen worden gezien de (actueel nog vrij) beperkte actieradius. Daarenboven zijn er ook nog een aantal psychologische drempels (Chan, 2002) voor de consument. De beperkte autonomie van de batterij, de mogelijke invloed van extreme meteorologische omstandigheden op de batterij, de onzekere levensduur van de batterij en de hoge kostprijs ervan, het al dan niet tijdig vinden van een oplaadstation en de angst om onderweg stil te vallen met een lege batterij, de snelle technologische evolutie die de eerste modellen snel uit de markt zal verdrijven, de geavanceerde

communicatiemiddelen die worden ingezet om elektrische voertuigen permanent te volgen, ...zijn heel wat elementen die de consument de indruk, of zelfs de overtuiging kunnen geven dat de aankoop van een elektrisch voertuig een avontuur wordt.

De typische gebruikers waarop men actueel mikt vallen uiteen in de volgende twee segmenten:

- de lokale chauffeur die zijn wagen in stedelijk verkeer gebruikt voor korte verplaatsingen, of voor een verbindingsrit naar het openbaar vervoer. Zij rijden typisch minder, of beduidend minder dan 15.000 km per jaar. In deze groep bevinden zich heel wat senioren, die wellicht niet tot de “*early adopters*” mogen gerekend worden;
- de werknemers die op een beperkte afstand van hun werk wonen en dagelijks de verplaatsing heen en terug per auto maken. Of elektrisch rijden voordelig zal zijn voor deze groep automobilisten is een open vraag. Het fileprobleem zal alvast niet opgelost worden door het elektrisch rijden, en meer en meer wagens beschikken over een start/stop-systeem om het verbruik bij stilstand ook bij verbrandingsmotoren uit te schakelen. Het sterk verhoogde verbruik, en de corresponderende verhoogde emissies wanneer verbrandingsmotoren niet op regimetemperatuur zijn, worden uiteraard wel geëlimineerd door over te schakelen op elektrisch rijden.

Rekening houdend met de zes hoger vermelde voorwaarden voor succes, kunnen onder andere volgende

concrete maatregelen positief inspelen op de marktontwikkeling van elektrische voertuigen:

- De sterke groei van de elektriciteitsproductie met zonnecellen heeft aangetoond dat de Vlaamse markt voldoende koopkrachtige “*early adopters*” en milieubewuste consumenten telt.
- Het snel voorzien van publieke laadinfrastructuur, en een goedkope oplossing voor het thuisladen, is een noodzakelijke voorwaarde.
- De deelname van prominente personen, en “bekende Vlamingen” (BV’s) aan testcampagnes zal ongetwijfeld een positief effect hebben.
- De organisatie van diverse ondersteunende diensten en initiatieven, zoals wegwacht met reservebatterijen, informatie over de locatie van laadpalen in GPS-systemen, reservatiesystemen voor de laadpalen, draadloze communicatie met de voertuigen, enz..., kunnen de door de consument gevreesde risico’s verkleinen.
- De hoge initiële aankoopprijs kan gereduceerd worden via subsidies, of kan gespreid worden in de tijd via huurcontracten. De huurformule elimineert bij de consument ook de vrees dat hij vrij snel met een verouderde technologie zal rijden. Door het huren i.p.v. het kopen van de batterijen kan de consument ook dat risico elimineren.
- Subsidies, lagere brandstofkosten, bepaalde voordelen qua parkeren, specifieke rijstroken, rekeningrijden,... zijn allemaal mogelijkheden om de consument een onmiddellijk voordeel te geven.



## Hoofdstuk 4

## TECHNOLOGISCHE BELEMMERINGEN, MOGELIJKHEDEN EN UITDAGINGEN

In dit hoofdstuk wordt een kort overzicht gegeven van de hoofdcomponenten, technologische uitdagingen en mogelijke kosteffecten van de elektrische aandrijving, evenals van uitdagingen en kansen betreffende de voertuigintegratie.

Voor het puur elektrisch rijden bestaat de aandrijflijn uit drie hoofdonderdelen: een elektrische motor (eventueel met een multigangtransmissie), de vermogen-elektronica, en een energie-opslagsysteem. De complexiteit wordt verhoogd als een “*range extender*” of “rijbereikuitbreider” wordt toegevoegd.

#### 4.1. Elektrische motoren

In termen van prestaties hebben elektrische motoren een aantal voordelen tegenover traditionele aandrijflijnen. Verbrandingsmotoren zijn niet in staat om voldoende koppel bij lagere snelheden te genereren, en hebben meestal minstens een derde van hun maximaal toerental nodig om het piekkoppel te bereiken. Een grotere motor is dus noodzakelijk voor versnelling vanuit stilstand. Dit vertaalt zich in een lagere efficiëntie. Ongeveer 10% van het motorvermogen is nodig voor het handhaven van een constante snelheid van 50 km/h, terwijl de resterende 90% alleen wordt gebruikt voor het accelereren of voor het rijden op zeer hoge snelheden. Een elektrische motor levert, gezien zijn werkingsprincipe, zijn maximumkoppel bij stilstand, en laat dus een vermindering in motorvermogen toe. Elektrische motoren zijn efficiënt met een uitzonderlijk hoge kracht-gewichtsverhouding en leveren een adequaat koppel over een breed snelheidsbereik.

De vereisten voor elektrische motoren voor voertuigen verschillen van die voor industriële elektrische motoren; in het bijzonder zijn zij onderworpen aan hogere beperkingen qua gewicht en *packaging*, moeten een hogere efficiëntie hebben, vereisen een superieur vermogen en vergen een ruimer snelheidsbereik.

Koelsysteemefficiëntie heeft een belangrijke invloed op de motorprestaties, vooral bij hogere snelheden. De motor verhit omwille van elektrische, magnetische en mechanische verliezen, en de bedrijfstemperatuur moet worden gecontroleerd om de output te handhaven en om onderdelen te beschermen tegen hitte-schade. Vloeistofkoeling is aangewezen, daar zij efficiënter is en minder ruimte vereist dan luchtkoeling.

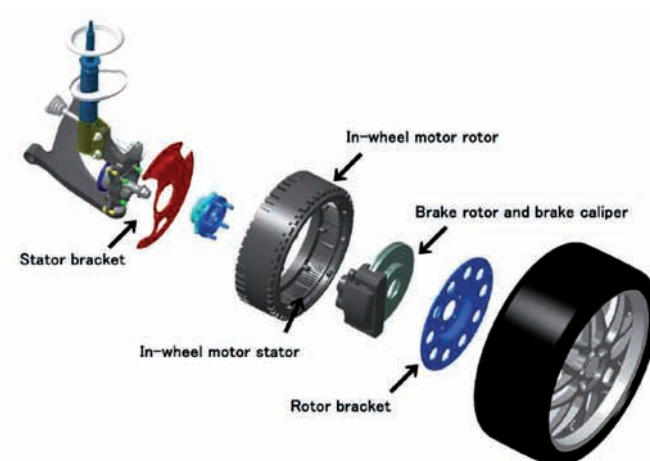
Kost eerder dan technologie is de reden voor de OEM's<sup>8</sup> om in-huis ontwikkeling van elektromotoren op te starten. Ze zijn ook gefocust op het reduceren van de inhoud aan zeldzame-aardmetalen in motoren. Zeldzame-aardelementen zoals lanthanum, neodymium, dysprosium en terbium worden gebruikt in permanente magneten, die kritische componenten zijn van elektrische motoren. Zeldzame-aardelementen zijn zeer duur vanwege de moeilijkheden om ze uit ertsen te extraheren. Elke baanbrekende vervanging van deze elementen kan de kost van elektrische motoren tot 25% verminderen. Bovendien is veel van de wereldbevoorrading van deze metalen gecontroleerd door China, en gezien het feit dat een van de beweegredenen voor de ontwikkeling van elektrische voertuigen een vermindering is van het energierisico door strategische afhankelijkheid van schaarse grondstoffen, is het wisselen van olie voor zeldzame-aardmetalen in dit opzicht een minder dan aantrekkelijk vooruitzicht. Olie is echter niet recycleerbaar, maar materialen in motoren (en batterijen) zijn wel grotendeels recycleerbaar.

Naast het ontwerpen van de motor zelf, hebben OEM's en toeleveranciers ook geëxperimenteerd met de inbouw ervan en met de *layout* van de voertuigarchitectuur. In plaats van één grote motor die in een traditionele configuratie de wielen aandrijft, hebben OEM's variaties met wielnaafmotoren uitgetest. In deze configuraties is een elektrische motor in het wiel geïntegreerd en drijft dit direct aan. Twee motoren kunnen dan een wielpaar voor één as aandrijven, of ook vier motoren kunnen worden ingezet, één in elke “hoek” van het voertuig. Door de invoering van vier naafmotoren kan een elektrische aandrijving worden geconfigureerd om het effect van een 4-wiel aandrijving te verwezenlijken.

Het integreren van de motoren in de wielen heeft alvast de volgende voordelen:

- het elimineert de noodzaak van een differentieel en een aandrijfjas (of van kettingen en tandwielen);
- het biedt controle over elk wiel afzonderlijk, wat kan leiden tot een verbeterd voertuiggedrag en prestaties;

<sup>8</sup> OEM = original equipment manufacturer.



Figuur 14: wielmotoren

Bron: Mitsubishi Motors.

- en het laat een ander voertuigontwerp toe; ontwerpers kunnen meer ruimte aan de bestuurder en passagiers geven zonder verhoging van de totale omvang en van het gewicht van het voertuig.

Omdat elektrische motoren het meest efficiënt zijn bij hoge toerentallen, kunnen naafmotoren met directe aandrijving van de wielen echter inherent inefficiënt zijn. Derhalve worden soms ook geïntegreerde planetaire tandwieltransmissies toegevoegd, maar deze voeren dan opnieuw transmissieverliezen in.

Vermits wielmotoren een voertuig afremmen en versnellen met één enkel elektrisch/elektronisch systeem, kunnen vele actieve veiligheidsfuncties als software-extensies toegevoegd worden, in plaats van bijkomende systemen/hardware te moeten installeren zoals ESC (*Electronic Stability Control*) of analoge systemen. Dit zou tot goedkopere actieve dynamische veiligheidssystemen moeten leiden voor met wielmotor uitgeruste voertuigen. Bovendien kan het nadeel van het extra niet afgeveerd gewicht benut worden, door de motoren te gebruiken om de trillingen van het wiel te absorberen. De elastisch gemonteerde motoren zelf functioneren als trillingsdempers, doordat hun eigen afgestemde starmassatrillingen de trillingen van de weg en de banden compenseren, wat resulteert in een betere tractie en een beter rijcomfort.

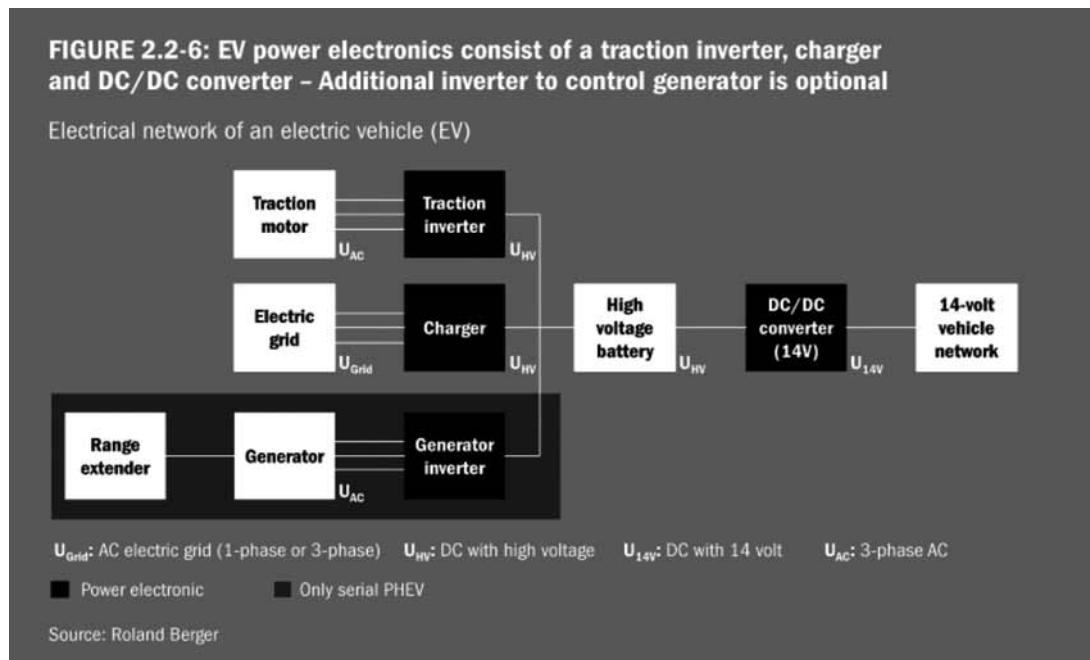
Anders dan bij batterijen is de keuze van technologie voor elektrische motoren beperkt. In wezen kunnen ze worden onderverdeeld in DC- (*Direct Current* – gelijkstroom) en AC- (*Alternating Current* – wisselstroom) motoren, hoewel met variaties bij beide, wat ze meer of minder geschikt maakt voor EV-toepassingen.

Gezien de vereisten voor elektrische motoren voor voertuigen, in het bijzonder wat betreft compactheid en vermogendichtheid, gebruiken de meeste auto-

fabrikanten nu vooral permanente-magneet-synchrone motoren (PMSM's). De gehele stroomtoevoer kan worden gebruikt om het statorveld te genereren, waardoor zij meer koppel per ingangsvermogen leveren dan asynchrone motoren, vooral bij lage motorsnelheden. PMSM's hebben echter ook nadelen zoals hogere productiekosten (te wijten aan de dure permanente magneten en het meer complexe fabricageproces), een lagere efficiëntie bij hogere snelheden (te wijten aan ongewenste stromen in de stator veroorzaakt door de permanente magneten) en een hoog remmoment in geval van kortsluiting. Stroomgeëxciteerde synchrone motoren zijn een alternatief voor PMSM's, waardoor het gebruik van permanente magneten wordt vermeden.

Naast asynchrone motoren en PMSM's, de twee belangrijkste motortypes momenteel gebruikt bij automobiel-toepassingen, onderzoeken ingenieurs momenteel een aantal andere soorten elektrische motoren. De gelijkstroommotoren worden over het algemeen niet meer weerhouden voor voertuigtoepassingen, gezien hun laag specifiek vermogen, beperkte efficiëntie en behoefte aan onderhoud wegens de aanwezigheid van borstels. Twee andere motortypes zijn momenteel nog in ontwikkeling, namelijk de geschakelde reluctantiemotoren (SRM's) en de transversale fluxmotoren (TFM's).

SRM's hebben zeer lage productiekosten, zelfs lager dan bij asynchrone motoren. Dit is te danken aan hun zeer eenvoudige rotorstructuur en het ontbreken van permanente magneten. SRM's gebruiken magnetische reluctantie om koppel te genereren. Het stator magnetisch veld veroorzaakt een magnetische flux doorheen de speciaal ontworpen rotor. Om het pad van de geringste magnetische weerstand (d.w.z. magnetische reluctantie) te volgen, begint de rotor te bewegen en genereert koppel. Het reluctatiefenomeen veroorzaakt



Figuur 15: Vermogenelektronica in een EV met range extender

Bron: Roland Berger, Powertrain 2020 – The future drives electric, Study 09/2009.

echter ook microbewegingen binnen de structuur van het rotorijzer, waardoor ze vrij lawaaierig worden en hoge koppelschommelingen vertonen.

TFM's vertonen soortgelijke lawaai- en koppelfluctuatieproblemen, maar ze presteren beter dan SRM's in termen van specifiek vermogen en efficiëntie. Helaas is het motorontwerp zeer complex en zijn ze momenteel erg duur om te produceren.

De axiaalfluxmotor met permanente magneet is een aantrekkelijk alternatief voor de cilindrische radiaalfluxmotor, met zijn "pannenkoek" vorm, compacte bouw en hoge vermogensdichtheid, en is daarom bijzonder geschikt voor EV's. Bij een centrale motoropstelling kan de rotor zijn ingebed in de transmissiecomponent, om inbouwwolume, massa, vermogentransmissie en assemblagetijd te optimaliseren. Bij EV's met ingebouwde wielmotoren ligt het voordeel in een eenvoudiger elektromechanisch aandrijfsysteem, een hogere efficiëntie en lagere kosten.

Een kritiek ontwerpnaadeel bij wielmotoren is het niet afgeveerd gewicht. Vermits buitensporig niet afgeveerd gewicht tot een minder dan optimaal voertuigweggedrag kan leiden, hebben verschillende recente wielmotorontwerpen de elektrische staalinhoud van de motor geminimaliseerd door gebruik te maken van een kernloos ontwerp, met Litzdraadspoelwindingen om de wervelstroomverliezen te reduceren.

Het optrekken van de O&O-budgetten zal leiden tot verdere vooruitgang in het specifieke vermogen van

alle motortypes. Tegelijkertijd zal een hogere markt-penetratiegraad de kost van een standaard 50 kW elektromotor (permanent vermogen) duidelijk onder € 1.000 drukken. Hierdoor wordt de productie van dergelijke motoren uiterst concurrentieel in vergelijking met ICE's<sup>9</sup>.

## 4.2. Vermogenelektronica

De vermogenelektronica van een elektrische aandrijflijn bestaat uit vier hoofdcomponenten: een tractieomvormer om de elektromotor te controleren en het van de batterij vereiste vermogen te leveren, een batterijlader om de batterij via een externe stroomvoeding op te laden, een DC/DC omvormer om het vereiste vermogen voor het standaard elektrische systeem in het voertuig te leveren, en een generator plus omvormer indien in de wagen een *range extender* wordt gebruikt voor het bijladen van de batterij tijdens het rijden.

### Tractieomvormer

De elektrische motoren gebruikt in voertuigtoepassingen zullen voornamelijk AC motoren zijn. Daarom moet een tractieomvormer de DC hoogspanning uit de batterij omzetten in AC voor de motor. Een elektronische motorcontroller vertaalt het door de bestuurder (met het gaspedaal) gevraagde vermogenniveau naar

<sup>9</sup> ICE = internal combustion engine (klassieke interne-verbrandingsmotor).

de nodige niveaus van stroomamplitude en frequentie voor elk van de drie AC fasen naar de motor.

De eigenlijke controle van de stroom die naar de statorwikkelingen wordt gestuurd, wordt uitgevoerd door drie elektronische schakelingen, één voor elke AC fase, waarin halfgeleiderschakelaars (IGBT's<sup>10</sup> of MOSFET's<sup>11</sup>) en hoogvermogencondensatoren sleutelcomponenten zijn.

De tractieomvormer is ook verantwoordelijk voor het omzetten in DC van de elektrische energie die tijdens het remmen door de elektrische motor wordt opgewekt. Deze wordt vervolgens gebruikt voor het heropladen van de batterij.

Het meeste onderzoek richt zich vandaag op het ontwikkelen van compactere en kostenefficiëntere ontwerpen. Dit zal op lange termijn waarschijnlijk leiden tot speciaal voor de auto-industrie gemaakte tractieomvormers die duidelijk minder dan 10 kg wegen en veel minder dan € 500 per stuk kosten.

#### Batterijlader

Wanneer een EV of PHEV is aangesloten op het externe stroomnet, zet een acculader de enkel- of drie-fasige wisselstroom om in een gelijkstroom om de batterij te laden. Laders variëren aanzienlijk inzake systeemspecificaties, gewicht en kosten. Kleine laders kunnen amper 2,5 kg wegen, terwijl grote laders met meer dan 4,5 kW vermogen ongeveer 11 kg aan het totale voertuiggewicht kunnen toevoegen.

Inspanningen zijn momenteel aan de gang om de laadmogelijkheden van de tractieomvormer met de batterijlader te combineren in een enkele component, en daardoor dus zowel kosten als bouwruimte uit te sparen.

#### DC/DC omvormer

De tractiebatterij in EV's en PHEV's levert ook vermogen aan het standaard elektrische systeem in het voertuig. De DC/DC omvormer gebruikt halfgeleiderschakelaars, vergelijkbaar met die in de tractieomvormer.

Uiteindelijk zal de DC/DC omvormer een "normale" lood/zuur starteraccu overbodig maken, aangezien hij het gepaste vermogen kan leveren om de motor te starten en het interne stroomnet van het voertuig te voeden. Afhankelijk van de spanningen en de exacte systeemspecificatie, kan het gewicht van de DC/DC omvormer variëren van ongeveer 2 tot 4 kg.

#### Generator-omvormer

Elektrische voertuigen met een ICE-gebaseerde *range extender* hebben een aparte generatoromvormer

nodig om de AC die tijdens het rijden door de generator wordt geproduceerd, te converteren in de DC voor het opladen van de batterij. Omdat de generatoromvormers feitelijk slechts in één richting werken, bieden zij gewichts- en kostenvoordelen ten opzichte van tractieomvormers.

Om samen te vatten: de vermogenelektronica voor automobieltoepassingen staat nog in haar kinderschoenen. Zij toont nog aanzienlijke ruimte voor verbetering inzake prestaties, grootte, gewicht, integratie en productiekosten.

#### 4.3. Batterijen en Energieopslag

Om een nog grotere penetratie van EV's te realiseren, zijn vooral belangrijke ontwikkelingen nodig bij de derde zeer belangrijke component van elektrische aandrijfsystemen, het batterijsysteem.

Batterijen voor automobieltoepassing moeten niet alleen een hoog vermogen en hoge energie-inhoud bieden. Ze worden ontladen in minder dan een uur, in vergelijking met enkele uren of dagen voor typische consumententoepassingen. Ook is een lange levensduur vereist van ten minste 10 jaar, wat sterk verschilt met de vereisten in de consumentenmarkt zoals laptops of mobiele telefoons, die om de 2 à 3 jaar vervangen worden. Bovendien moeten de batterijcellen gebruikt voor een autobatterijsysteem een verhoogde misbruiktolerantie vertonen. De gebruikelijke automobielindustrienormen moeten worden gehaald met betrekking tot omgevingstemperatuurbereik, schokken, trillingen en kwaliteitsspecificaties. Ook moet de batterij worden ontworpen voor een kosteneffectieve onderhoudbaarheid. Ten slotte is een compleet systeem met geïntegreerde thermische en elektrische regeling vereist om aan de milieu-invloeden te weerstaan. Dit toont aan dat batterijsystemen voor voertuigen fundamenteel van batterijsystemen voor consumententoepassingen verschillen.

#### Energie- en vermogensdichtheid

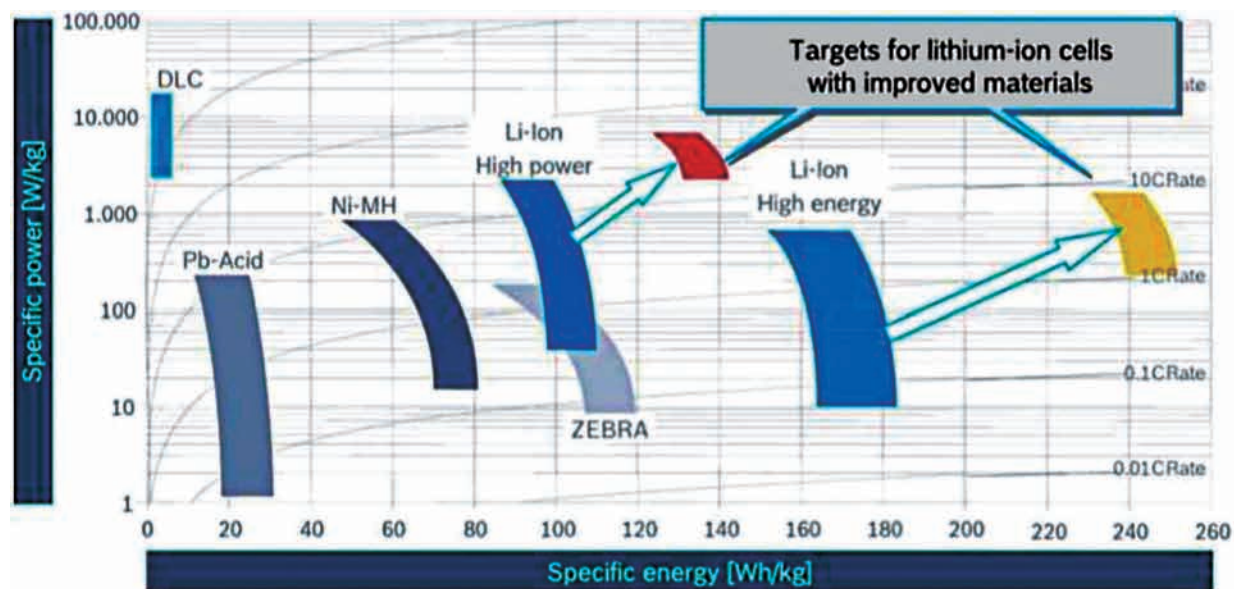
De meest kritieke kwesties die vandaag de batterijontwikkeling betreffen zijn de kostgerelateerde energie- en vermogensdichtheid. De relatie tussen specifiek vermogen en energiedichtheid wordt geïllustreerd in onderstaande figuur, waaruit blijkt dat de momenteel overwegende lithium-ionetechnologie nog steeds aanzienlijk potentieel tot verdere verbetering heeft.

Energiedichtheid is de hoeveelheid energie die is opgeslagen per massa-eenheid (gravimetrische dichtheid) of volume-eenheid (specifieke dichtheid) in een

<sup>10</sup> IGBT = insulated-gate bipolar transistor.

<sup>11</sup> MOSFET = metal-oxide-semiconductor field-effect transistor.





Figuur 16: Ragone diagram: specifiek vermogen versus specifieke energie

Bron: Bosch.

energie-opslagapparaat. Elektrische energie-eisen voor hybride elektrische voertuigen verschillen van die voor batterij-elektrische voertuigen (EV's), en deze vereisten beïnvloeden het cel- en batterijontwerp.

Voor EV's moet een grote hoeveelheid energie kunnen worden opgeslagen om het voertuig over een acceptabele afstand te verplaatsen. De energie die in de batterij is opgeslagen vervult in essentie dezelfde functie als de benzine in de brandstoftank van een conventioneel voertuig. Typische EV accu's slaan zo'n 25-35 kWh op, wat het equivalent is van rond de 3 liter benzine.

In het verleden gebruikten EV's loodzuurbatterijen met een lage specifieke energie van minder dan 90 Wh/l of 50 Wh/kg. Lithium-ioncellen kunnen vandaag worden vervaardigd met energiedichtheden tot 175 Wh/l (144 Wh/kg), en als streefwaarde geldt 200 Wh/kg. Het theoretische maximum voor lithium-ion ligt bij meer dan 300 Wh/kg, maar, omwille van een aantal redenen zijn de cellen niet 100% efficiënt, en bereiken daarom dit theoretische maximum niet. Een langetermijndoelstelling om batterijtechnologie dicht tot het niveau van vloeibare brandstoffen te brengen is 700 Wh/kg, maar dit zal nieuwe batterijchemie vergen.

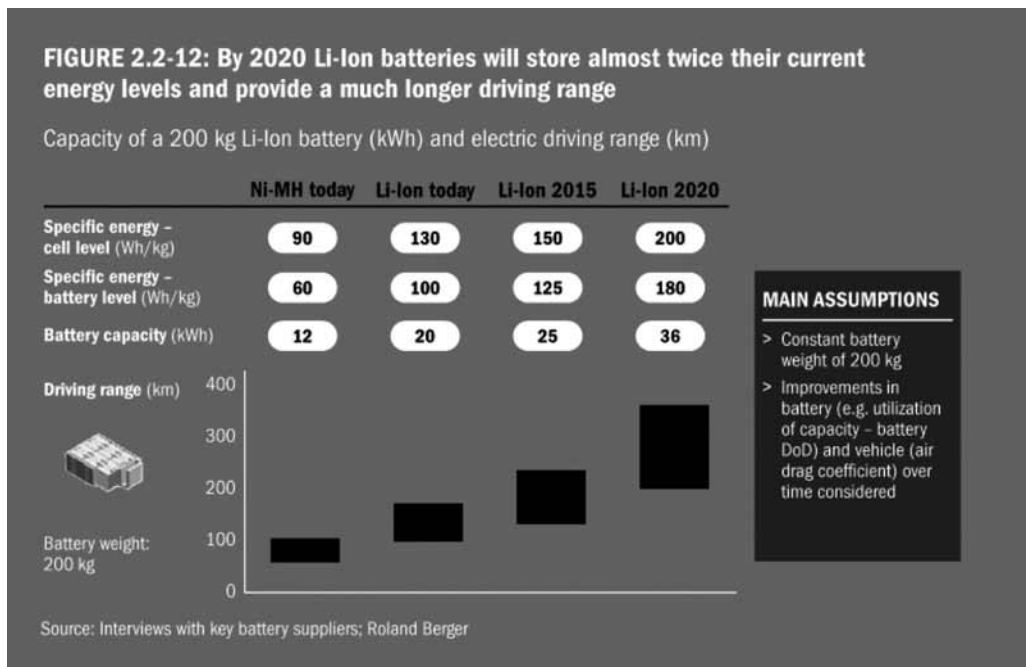
Anderzijds, voor toepassingen zoals HEV's leveren de batterijen in essentie een "power-boost" voor snelle acceleratie. In dit geval is een hoge vermogendichtheid wenselijk, die grotendeels kan worden bereikt door middel van bestaande technologie zoals NiMH-batterijtechnologie.

In feite bestaan er in totaal meer dan 50 lithium-ion-gebaseerde chemische processen wanneer alle combinaties van kathode, anode, separator en elektrolyt worden beschouwd. De twee belangrijkste chemische processen die momenteel voor EV's worden ingezet zijn lithium-ijzerfosfaat (LFP) ( $\text{LiFePO}_4$ ) en lithium-titanaat (LTO). Ijzerfosfaataccu's zijn in staat tot meer dan 1.500 cycli en zijn beschikbaar als vermogen- en als energiecellen. Lithium-titanaat heeft een veel hogere levensduur van meer dan 5.000 cycli, maar met ongeveer 30% lagere energie.

Lithium-lucht heeft het hoogste potentieel voor standaard batterijtypes. Een lithiumanode gebruiken met een luchtkathode om de zuurstof te leveren, kan leiden tot de hoogst mogelijke energiedichtheid in een metaal-gebaseerde batterij, en beschikt over een overvloedige luchttoevoer, hoge milieuvriendelijkheid en een redelijke veiligheid. Er is echter veel werk nodig om ze kosteneffectief te produceren. Een probleem met lithium-lucht is de lage vermogendichtheid, en de povere operationele eigenschappen bij lage en hoge temperatuur. De celspanning bedraagt 3,0 V. Opladbare versies zijn mogelijk, zodat zij als primaire en als secundaire batterij beschikbaar zou zijn. De hoge specifieke theoretische energie van de Li-lucht-batterij ligt dicht bij die van vloeibare koolwaterstoffen zoals benzine.

### Elektrische dubbellaagcondensatoren

Al naargelang van de toepassing en de energievereiste, zijn elektrische dubbellaagcondensatoren (EDLC, meestal aangeduid met de commerciële benamingen "supercondensatoren" of "ultracondensatoren")



Figuur 17: Batterij-eigenschappen

Bron: Roland Berger, Powertrain 2020 – The future drives electric, Study 09/2009.

energieopslagsystemen die zowel concurrerend als complementair zijn met batterijen.

De elektrische dubbellaagcondensator, behorend tot de zogenaamde elektrochemische condensatoren, gebruikt een soort 'swiss roll' constructie, bestaande uit een rolvormige elektrode bedekt met een laagje actieve koolstof en ingekapseld in een klein apparaat.

Er worden condensatoren ontwikkeld voor een aantal hybridevoertuigtoepassingen. In deze toepassing zouden de condensatoren worden gebruikt in combinatie met batterijen. Voor andere toepassingen kunnen de condensatoren als ondersteunende energieopslag worden gebruikt, bijvoorbeeld voor stabilisering van het boordnet in het voertuig. Condensatoren kunnen ook worden gebruikt als autonoom energie-opslagapparaat.

EDLCs hebben een slechte energiedichtheid, maar hun vermogendichtheid kan hoger zijn dan 25 kW/kg, veel hoger dus dan de huidige batterijtechnologieën. Ze bieden ook uitstekende prestaties over een breed spectrum van temperaturen en hebben een lage zelf-ontlading, een hoge cyclilevensduur, een uitstekende laad/ontlaad efficiëntie en -snelheid. Bij stopstart toepassingen beweert Maxwell (bedrijf dat supercondensatoren maakt) dat hun condensatoren meer dan 700.000 starts en meer dan een miljoen regeneratieve oplaadmicrocycli kunnen bereiken. Ze zijn relatief veilig, maar kunnen worden beschadigd door overbelasting. Hoewel ze technisch goede prestaties voor

hybride toepassingen lijken te bieden, zijn ze duur. Leveranciers proberen de kosten naar beneden te brengen om ze voor automobieltoepassingen geschikt te maken.

### Cyclilevensduur

De cyclilevensduur is een maat voor de duurzaamheid van de batterij op basis van het aantal laad- en onlaadcycli die ze kan bereiken. Kalenderlevensduur is een aparte maat op basis van de kalenderleeftijd van de batterij. De laagste laadstatus (SOC – *State of Charge*) is bekend als de onlaaddiepte (DOD – *Depth of Discharge*). Voor EV-toepassingen is een hoge DOD vereist om het voertuigbereik te maximaliseren.

### Veiligheid

Veiligheid is een kritieke zorg voor autofabrikanten. Elektrische voertuigen hebben twee grote veiligheidszorgen, ten eerste vanwege het batterijsysteem en ten tweede vanwege de hogere systeemspanning.

De veiligheid van batterijsystemen varieert sterk in functie van het systeemtype. Al de voor EV's geprefereerde lithium-ionbatterijen hebben daarom generiek verscheidene veiligheidsvoorzieningen in de cel nodig, zoals de thermische beveiliging om te hoge temperaturen te voorkomen, de veiligheidsklep om de interne druk te verminderen of de drukaflaat te ventileren, en de thermische onderbreking om overstrom of overladen te vermijden. Thermische stabiliteit is een grote



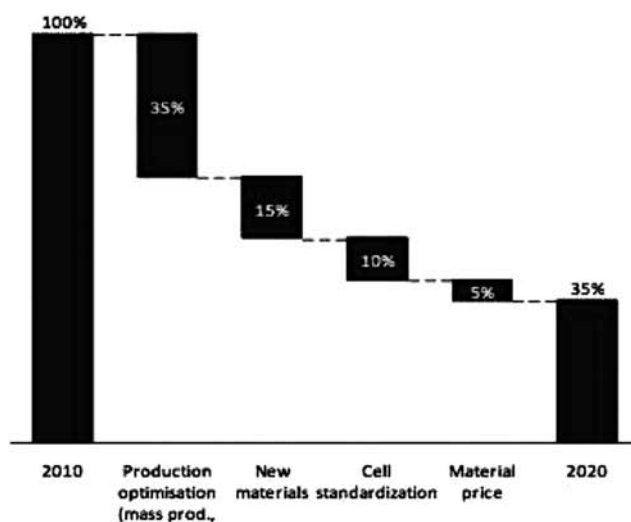
zorg, toe te schrijven aan het historisch voorkomen van batterijen die exotherme oplopende reacties vertoonden. Naast thermische stabiliteit zijn er nog een aantal andere veiligheidskwesties zoals kortsluiting, crashweerstand, nagelperforatie en overladen. Hiervoor worden heel wat testen uitgevoerd en controle-systemen zijn ontwikkeld om ze maximaal te voorkomen. In elk van deze omstandigheden mag de batterij niet falen: er mag geen brand ontstaan, of er mogen geen hete of schadelijke gassen vrijkomen. Zowel nieuwere chemische processen als verpakkingen helpen in dit opzicht. Hoge systeemspanningen, tot 400 V bij sommige EV's, kunnen in geval van een crash, of wanneer ondeskundige gebruikers met het systeem knoeien, belangrijke veiligheidsproblemen creëren. De veiligheid van de batterijsystemen is dan ook actueel het onderwerp van internationaal normaliseringswerk.

### Technologiekost

Huidige industrieschattingen voor de batterijkost per kWh lopen sterk uiteen. Cijfers geciteerd voor lithium-iontechnologie gaan van \$ 2.000 tot slechts \$ 750 tegen huidige prijzen, afhankelijk van pakketgrootte en chemie. De toevoeging van controlesystemen, koeling en verpakking zou echter de kost voor een klein systeem kunnen verdubbelen. Streefcijfers voor het reduceren van de batterijkost mikken op meer dan 70% vermindering bij een toename van de productie-volumes.

Twee derden van de materiaalkost van Li-ionbatterijen is momenteel toe te schrijven aan de elektroden en de separator. Het anodemateriaal voor lithium-ion zal vandaag het meest waarschijnlijk lithium-kobalt of lithium-ijzerfosfaat zijn, en dit is de grootste afzonderlijke grondstofkost binnen de celchemie. Deze kan bovendien sterk variëren in functie van de heersende grondstoffenprijzen, en betekent daarmee een significant risico voor batterijproducenten en hun klanten. Als gevolg hiervan zijn veel ontwikkelaars op zoek naar goedkopere anodematerialen. Kathodematerialen zijn momenteel op vrij goedkoop grafiet gebaseerd, maar ook hier zijn de fabrikanten op zoek naar betere prestaties en kostenreductie. Niet alle kathodematerialen, gebaseerd op koolstof, silicium, of lithium-titanaat, die worden onderzocht, zijn per se goedkoop. Een hogere energiedichtheid kan echter een vermindering van de totale batterijkost opleveren door het verminderen van het aantal vereiste cellen. De andere grote kost bij een accu is de separator, die een basisvereiste voor de veiligheid van lithium-ion is.

Batterijkostenreductie is ook afhankelijk van de productiekosten. Japanse fabrikanten worden geacht een voorsprong te hebben in de markt, gevolgd door Chinese fabrikanten, omwille van de ervaring die bij niet-automobielbatterijproductie werd opgebouwd. Nu



Figuur 18: Batterijcel kostvermindering doelstelling voor lithium-ion

Bron: Continental.

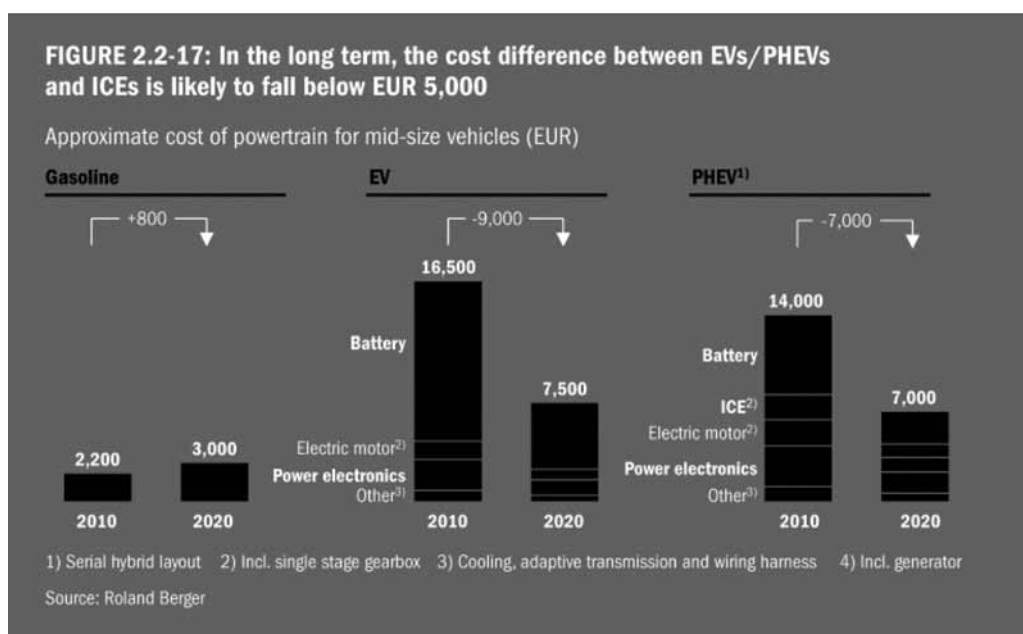
worden de elektrodensamen gewikkeld en ingesloten in een vloeibare elektrolyt. Deze processen zullen in de toekomst grotendeels worden geautomatiseerd. Er is voor automobielaccu's ook een verschuiving geweest, weg van metalen blikken die prismatisch of cilindrisch van vorm zijn, naar metaalpolymeer-gelamineerde verpakkingen. Deze gelamineerde verpakkingen zijn gemakkelijker te produceren door er gevouwen ontwerpen in te verwerken en door het aantal onderdelen te verminderen.

Op dit moment kopen Westerse batterijleveranciers de meeste van hun productie-installaties voor de vervaardiging van Li-ionbatterijen uit hogekostenlanden zoals de VS en Japan. Omwille van de hoge kwaliteitseisen hebben ze weinig alternatieven. Chinese concurrenten zijn echter begonnen lokaal of intern ontwikkelde apparatuur in te zetten voor minder kritische productie-stappen. Dankzij de lage arbeidskosten zijn zij ook sommige van de geautomatiseerde stappen aan het vervangen door handmatige taken.

Continental heeft haar doelstellingen voor celkostvermindering openbaar gepresenteerd, zoals geïllustreerd in bijgaande figuur. Het bedrijf streeft naar een vermindering van de kosten door optimalisering van de toeleverketen, celontwerp en materialen.

Verwacht wordt dat tegen 2020 de batterijkost aanzienlijk zal dalen van het huidige niveau van ongeveer 400-€ 500 per kWh naar ongeveer € 200 per kWh op celniveau.

Zoals beschreven, bestaat er een aanzienlijk ontwikkelingspotentieel in de belangrijkste aandrijfcomponen-



Figuur 19: Potentiële kostenreductie

Bron: Roland Berger, Powertrain 2020 – The future drives electric, Study 09/2009

ten van EV's en PHEV's. Zoals steeds voor nieuwe technologieën zal de eerste generatie van producten groot, zwaar en duur uitvallen. Maar met een zo krachtige industrie als de globale automobielsector, zullen de zaken waarschijnlijk snel vooruitgaan. In het bijzonder mag worden verwacht dat in de periode tot 2020 uiterst competitieve componenten ter beschikking zullen zijn tegen aantrekkelijke prijzen.

Overheidssteunprogramma's en wereldwijde concurrentie voor technologisch leiderschap zullen dit proces versnellen. Bedrijven moeten proberen van succesvolle prototypes in het laboratorium over te gaan naar kwalitatief hoogwaardige, massaproductie-onderdelen.

Samenvattend: de batterijtechnologie is veruit de meest kritische factor bij het bepalen van het succes van EV's. Recente technologische verbeteringen lijken een groot aantal belemmeringen voor het gebruik van Li-ionbatterijen in voertuigen te hebben geëlimineerd. Verdere verbeteringen zijn echter nog nodig op cruciale punten. Om een massaproductie te bereiken zullen bedrijven enorme investeringen in zowel O&O als productietechnologie moeten doen.

Er bestaat een goede kans dat tegen 2020 een *state-of-the-art* EV, met of zonder *range extender*, kan beschikken over een compacte accu die niet veel meer dan 100 kg weegt. Dit zou het totale voertuiggewicht vergelijkbaar maken met hedendaagse ICE-aangedreven concurrenten. Dergelijk voertuig zou ook een elektrische rijbereik van ongeveer 150 km bieden, met een

onderhoudsvrije aandrijflijn en superieure rijeigenschappen. Dit alles zou mogelijk zijn met een batterijkost van niet meer dan € 5.000.

#### 4.4. Voertuiglay-out, -structuren en aandrijf-integratie

Auto's met puur elektrische aandrijving vereisen een zeer verschillende voertuig*packaging* (gebruik van aangepaste materialen) dan auto's met conventionele aandrijving. Dit is te wijten aan de verschillende ruimtelijke en fysieke eisen inzake trillingen, lawaai, koeling, aerodynamica, enzovoort. Het compacte ontwerp van de elektrische componenten (met uitzondering van de batterij) biedt de OEMs mogelijkheden voor innovatieve carrosserieconcepten, bijvoorbeeld met de invoering van nieuwe lichtgewichtmaterialen en innovatieve interieuro oplossingen.

Om hun voertuigen lichter te maken hebben EV-ontwikkelingsteams zich in toenemende mate toegelegd op structuren gemaakt van met koolstofvezel versterkte polymeermaterialen (CFRP), die uitstekende sterkte-versus gewichtseigenschappen bieden. Koolstofcomposieten zijn 50% lichter dan staal voor een gegeven onderdeel en tegelijkertijd superieur qua sterkte en stijfheid.

Sommige onderzoekers volgen een meer radicale benadering voor het gewichtprobleem van elektrische voertuigen. Zij denken dat de oplossing ligt in het maken van auto-onderdelen uit koolstofgebaseerde composieten die ook als batterij kunnen fungeren. Dit

materiaal met duale functie, gelijktijdig mechanische structuur en energiebron, zou batterij-elektrische voertuigen en hybride voertuigen lichter, compacter, en energie-efficiënter kunnen maken.

Er wordt gespeculeerd dat als de composietbatterijstructuren zoveel energie als de huidige lithium-ion-

batterijen zouden kunnen opslaan, alleen al het auto-dak, de motorkap en het kofferdeksel zouden volstaan om een EV een rijbereik van 130 km te geven. Deze nieuwe, gedistribueerde vermogenstechnologie zou ook enigszins de uitgebreide bedrading, die nu in auto's gebruikt wordt, kunnen verminderen.

## Hoofdstuk 5

## IMPACT VAN ELEKTRISCHE VOERTUIGEN OP HET ELEKTRICITEITSSYSTEEM

### 5.1. Energie- en vermogenvraag

Na het afleggen van een rijcyclus, moeten elektrische voertuigen aan het net gekoppeld worden om elektrische energie op te slaan in het batterij-energieopslagsysteem in de wagen. Eens gekoppeld aan het net, is het elektrisch voertuig een elektrische last in het net. Het opladen van het batterij-energieopslagsysteem gebeurt in twee typische stappen (Shafiei et al., 2010). In een eerste fase gebeurt het laden aan een quasi constant vermogen<sup>12</sup>, op het einde van de laadcyclus zal het laadvermogen gradueel of in stappen afnemen en uiteindelijk tot nul gereduceerd worden als het opladen klaar is<sup>13</sup>.

Het opladen van een Belgische vloot elektrische voertuigen zal effecten veroorzaken die in de verschillende delen van het elektriciteitssysteem voelbaar zullen zijn. Vier factoren zijn van primordiaal belang in het bepalen van de impact: het aantal voertuigen, het laadvermogen, de energieconsumptie en de gelijktijdigheid ten opzichte van andere lasten in het net.

Het effectief laadvermogen wordt beperkt door de lader die gebruikt wordt. Een typische trage thuislader kan niet meer vermogen opnemen dan wordt toegestaan door het huishoudelijke elektrische veiligheidssysteem. Kortsluitstroomschakelaars in normale huishoudelijke circuits hebben een rating van typisch 16A of 20A, wat overeenkomt met een toegestaan laadvermogen van 3,68 kW en 4,6 kW. De oplaadtijd hangt af van de gebruikte capaciteit van het batterij-energieopslagsysteem.

De term snelladen wordt voorbehouden voor het opladen van leeg tot 80% van de maximale capaciteit in maximaal enkele uren (Bauer et al., 2010). Het laadvermogen bedraagt dan in grootteorde enkele tientallen kW. Snelladen is niet implementeerbaar bij een normale huishoudelijke elektriciteitsaansluiting, omdat het totale vermogen van de normale huishoudelijke aansluiting (230V, 40A of 400V, 32A) maar ongeveer 10 kW is, en er ook steeds andere bijkomende elektrische lasten zijn.

Het opladen van voertuigen, bijvoorbeeld op piekmomenten voor het net, kan problemen veroorzaken, maar het moet niet. Piekverbruik kan gecompenseerd worden door lokale hernieuwbare energiebronnen: bijvoorbeeld na aankomst op het werk wordt het voertuig

opgeladen, op het moment dat de daar aanwezige fotovoltaïsche installatie elektriciteit produceert. Echter, als de marges van het net klein zijn, kunnen lijnen of transformatoren overbelast geraken ten gevolge van die gelijktijdigheid. De hoogste lastpiek in het distributienet zal men tegenkomen als men op het einde van de werkdag thuiskomt, zijn voertuig inpluigt en tezelfdertijd nog gaat koken, wassen, strijken, stofzuigen, enz... Een oplossing is dan om de laadperiode te verschuiven naar de nacht of de vroege ochtend.

Een voertuig dat 15.000 km rijdt aan 5 km/kWh verbruikt jaarlijks 3000 kWh, als elke kilometer volledig elektrisch wordt aangelegd. Het jaarlijks verbruik van een gemiddeld Vlaams huishouden dat niet elektrisch verwarmt is 3500 kWh ([www.vreg.be](http://www.vreg.be)). Een dergelijk huishouden dat zijn elektrisch voertuig systematisch elke dag thuis oplaadt, ziet zijn elektriciteitsverbruik dus bijna verdubbelen.

### 5.2. Impact op het transmissienet

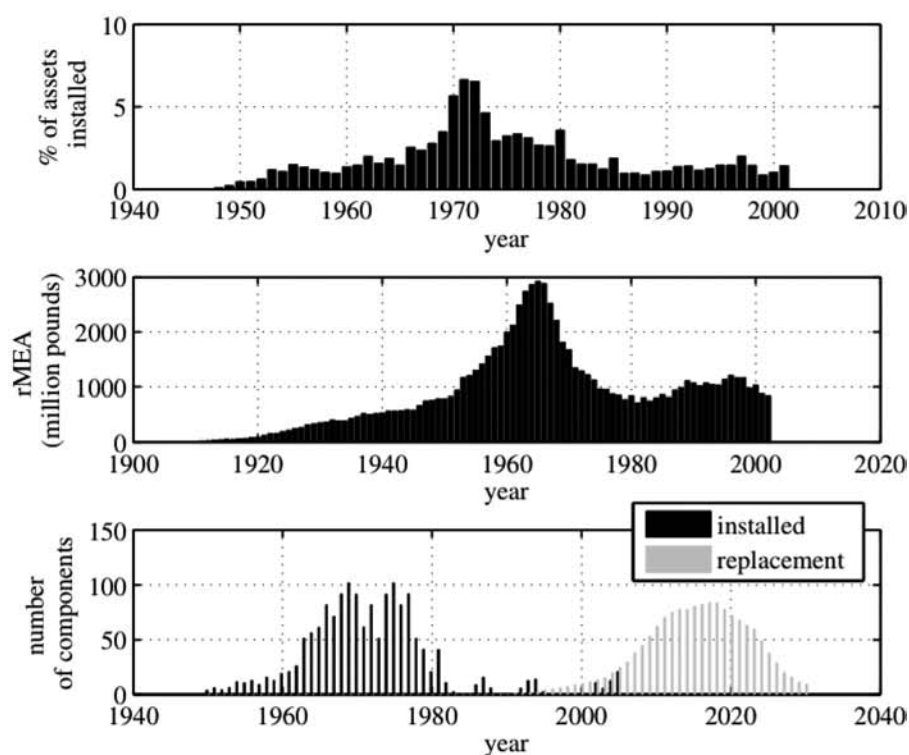
Het transmissienet voorziet in het “lange afstand, groot volume” transport van elektrische energie, tussen landen en van centrale energiecentrales naar de cabines die de aansluiting met het distributienet voorzien. De transmissienetbeheerder verzekert de stabiliteit en het efficiënt gebruik van het netwerk, en coördineert ook met buitenlandse transmissienetbeheerders in die materie.

Twee vragen over de impact op het transmissienet worden gesteld: is er voldoende beschikbare capaciteit en blijft het systeem stabiel. Voor een Belgische PHEV-vloot in 2030, zal de bijkomende energievraag slechts 5.1% betekenen (Clement et al., 2007). Als een coördinatiemechanisme wordt geïmplementeerd om buiten de piekmomenten op het transmissienet te laden, zal de benutting van het transmissienet verhoogd worden. Meer energie transporteren met behulp van dezelfde infrastructuur, en dus zelfde investering, betekent een hogere economische efficiëntie. Het gebruik van bepaalde netelementen zal wel veranderen. Een transformator die overdag hoog belast wordt, moet 's nachts voldoende kunnen afkoelen. Als het gebruik gedurende de nacht te sterk toeneemt, zullen de marges

<sup>12</sup> Constantestroomregime bij slechts licht stijgende spanning.

<sup>13</sup> Indien slechts een beperkt deel van de capaciteit van de batterij gebruikt wordt, kan de tweede laadfase vermeden worden.





Figuur 20: Veel distributienetinfrastructuur werd in de jaren '60 en '70 geïnstalleerd (Haesen, 2009)

overdag moeten worden bijgesteld (Blumsack et al., 2008).

### 5.3. Impact op het distributienet

Het distributienet voorziet de levering van elektriciteit aan consumenten op het midden- (industrie), en laagspanningsniveau (residentieel). Middenspanning duidt op spanningen van 1 kV tot 50 kV; laagspanning vertegenwoordigt alles onder de 1 kV (typisch 230 V/400 V). Het middenspanningsnet begint bij de aansluiting naar het transmissienet, het laagspanningsnet begint aan de midden- naar laagspannings-transformator. Op deze bus worden verschillende radiale *feeders* verbonden. Deze *feeders*, ondergrondse kabels of bovengrondse luchtlijnen, hebben mogelijk een paar takken. Huishoudens of kleine zakelijke verbruikers worden met de *feeder* verbonden, maar met een veel kleinere kabeldiameter dan de *feeder* zelf.

De gemiddelde leeftijd van distributienetten is vrij hoog. In de jaren '60 en '70 werd veel van de huidige infrastructuur geïnstalleerd. Figuur 20 bovenaan toont wanneer de netgerelateerde activa van RWE in 2005 werden geïnstalleerd. In het midden van dezelfde figuur wordt de evolutie van de vervangingskost van de *Modern Equivalent Asset Value* (rMEA) voor distributienetten in het Verenigd Koninkrijk getoond, en onderaan wordt de vervangingsgolf getoond zoals verwacht door een Nederlands DSO<sup>14</sup> als zijn corrigerende onderhoudsstrategie verder wordt uitgevoerd

(Haesen, 2009). In België is de situatie gelijkaardig aan die van de besproken landen.

Deze oude distributienetinfrastructuur zal geleidelijk vervangen of versterkt worden. Technologie voor slimme netten kan meer elasticiteit brengen in dit systeem, waardoor bepaalde investeringen kunnen worden uitgesteld of vermeden. Slimme elektriciteitsmeters zorgen voor een verbeterde observeerbaarheid van het distributiesysteem en maken het mogelijk om een exacte maandelijkse afrekening te maken. Actieve vraagsturing maakt het mogelijk om de elektriciteitsconsumptie bij te stellen aan de moeilijk voorspelbare productie van wind en zon. Intelligente netgekoppelde batterij-energieopslagsystemen kunnen spannings- en congestieproblemen oplossen alsmede de gevolgen van het falen van een netelement beperken. Het laden van voertuigen intelligent coördineren, is een van de manieren om overbelasting van het lokale net te vermijden.

Distributienetten worden nu reeds anders gebruikt dan waar ze oorspronkelijk voor ontworpen werden (Pepermans et al., 2005). Gedistribueerde energiebronnen, bijvoorbeeld fotovoltaïsche installaties en warmtekrachtkoppelingssystemen, injecteren energie op laag- en middenspanningsniveaus. Laagspanningsnetten hebben een resistief karakter<sup>15</sup> en bijgevolg

<sup>14</sup> DSO = distribution system operator.

<sup>15</sup> Bij de kabels is de weerstand  $R$  groter dan de reactantie  $X$ .

gaat de injectie van energie gepaard met lokale spanningsstijging. Zware lasten, zoals voertuigladers, veroorzaken dan weer een spanningsdaling.

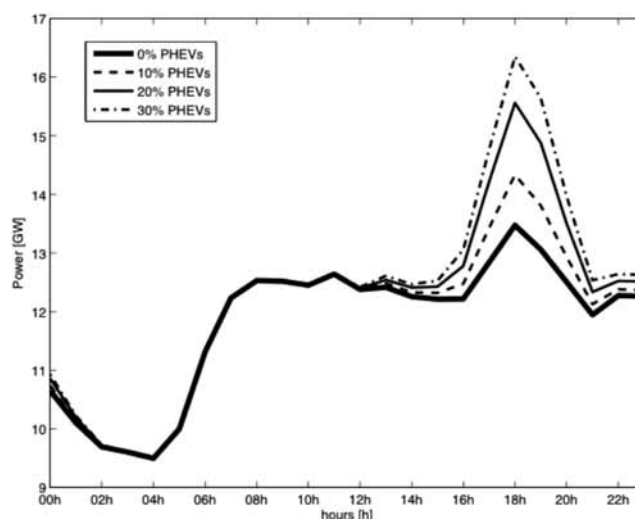
Het laden van voertuigen in distributienetten kan dus problemen veroorzaken maar even goed helpen vermijden. Op het werk kan men het voertuig bijvoorbeeld opladen met zonne-energie, op het moment dat die geproduceerd wordt, en vermijdt men zo belasting van het net. Bij thuisladen kunnen er spanningsproblemen opduiken. De lokale zonne-energieproductie is stilgevallen als men thuiskomt na het werk. Als men dan zijn voertuig begint op te laden valt dit samen met de normale verbruikspiek ten gevolge van alle andere, elektriciteitsverbruikende huishoudelijke activiteiten die ook starten. Het deskundig coördineren van de flexibiliteit die de gebruikers hebben om de batterijen van hun EV's bij te laden is dus ook een manier om netinvesteringen te vermijden. De gebruikers kunnen op verschillende manieren flexibiliteit aanbieden. Voor geplande korte trips is het bijvoorbeeld niet nodig om de batterij volledig op te laden. Men kan dan het volledige opladen uitstellen tot de volgende nachtperiode.

Het coördineren van het laden kan voordelen opleveren voor zowel de netuitbaters, als de producenten en de eindgebruikers. Voor producenten en netgebruikers kan de laadperiode verschoven worden naar niet piekmomenten voor het *net* om spanningsproblemen en overbelasting te vermijden, en voor de eindgebruikers naar periodes waarin de elektriciteitsprijs lager is.

#### 5.4. Impact op de productie

De elektriciteit die de voertuigen gebruiken om te laden moet geproduceerd worden. De totaal geïnstalleerde productiecapaciteit in België in 2011 is 16,8 GW. Hierbij zijn nucleaire, gas- en kolencentrales de belangrijkste bronnen. Het snel moduleren van de nucleaire centrales is moeilijk en wordt vermeden. Deze centrales voorzien de basislast. De productie is dus ongeveer constant, seizoensvariaties en onderbreking voor onderhoud niet in acht genomen. De productie van gas- en kolencentrales wordt meer gevarieerd. Wind- en zonne-energie zijn niet controleerbaar<sup>16</sup>, dus de productie van andere bronnen wordt bijgesteld om de variaties hierop te compenseren. Pompcentrales worden uitgebaat om vraag en aanbod in evenwicht te brengen. Een teveel aan elektriciteitsproductie, bijvoorbeeld gedurende de nacht, wordt gebruikt om water van een laag- naar hoger gelegen bassin te pompen. Op momenten van grote vraag, functioneert dezelfde installatie als een gewone hydraulische centrale, en genereert ze elektriciteit.

Figuur 21 toont de impact van niet gecoördineerd laden, als een functie van de penetratie van plug-in hybrides per huishouden. Het totale Belgische piekvermogen neemt toe ten gevolge van de gelijktijdigheid



Figuur 21: Totale belasting bij ongecoördineerd laden (Clement, 2010)

met de piek in residentieel verbruik. Niet coördineren is niet haalbaar voor een penetratie van 20% of meer (Clement, 2010). Als coördinatie wordt toegepast, zal een substantieel deel van de energievraag voor het laden verschoven worden naar de nacht, wat lagere eisen stelt aan de productiecapaciteit. Op deze manier kan ook elektriciteit voorzien worden bij een hogere penetratie van elektrische voertuigen, zoals verwacht tegen 2030 en later.

Er wordt hoe dan ook, los van de ontwikkeling van elektrische voertuigen, een verdere toename van de vraag naar elektriciteit verwacht. Het rapport van de Groep Gemix (Dufresne et al., 2009) verwacht een groei van de bruto elektriciteitsvraag<sup>17</sup> van 95,6 TWh in 2007 naar 112 TWh in 2020 (equivalent met 105 TWh eindvraag). Het generatiepark zal sowieso moeten groeien om de vraag bij te houden.

De samenstelling van het productiepark evolueert continu omwille van verandering van grondstoffenprijzen, mechanismen om externe kosten te internaliseren, internationale marktkoppeling, enz... Door de toepassing van een coördinatiemechanisme kan men onbenutte capaciteit toch aanwenden. De bijhorende toename in basislast biedt opportuniteit voor langetermijnproductie-investeringen.

#### 5.5. Besluit

Het laden van een Belgische vloot elektrische voertuigen is een haalbare kaart. Op korte termijn, voor 2020, zal er geen merkbare impact zijn, behalve op enkele ongelukkige locaties, bijvoorbeeld in lokale netten die al op het punt stonden in problemen te komen. Op

<sup>16</sup> mogelijk wel reduceerbaar.

<sup>17</sup> Eindvraag + gebruik pompcentrales + verliezen.

langere termijn zal de impact ook beperkt zijn, zolang er enige vorm van coördinatie wordt toegepast. De mate waarin investeringen kunnen worden vermeden of uitgesteld wordt bepaald door een reeks factoren, zoals bijvoorbeeld de leeftijd van het net, de topologie, de aanwezigheid van lokale bronnen en de karakteristieken van de lasten. Die moeten dus net per net geanalyseerd worden.

Als elektrische voertuigen een belangrijke fractie van het wagenpark worden, zullen er maatregelen moeten getroffen worden om de verschillende partijen in het elektriciteitssysteem te aligneren. Het toepassen van coördinatiestrategieën is een gradueel proces in de tijd, maar ook in complexiteit van de gebruikte technologie, en de elektriciteitsvoorziening die gewaarborgd moet blijven.

Bijvoorbeeld, in een tijdelijke overgangssituatie zoals bijvoorbeeld een spanningsdip, kan de medewerking van eindgebruikers worden afgedwongen via intelligente laders. Het laden kan oninteressant gemaakt worden in bepaalde periodes door middel van prijszetting. Aan de andere kant moeten de netbeheerders de netsituatie beoordelen en de nodige investeringen doen, of aantonen dat er geen structurele problemen zijn. De verbeterde observeerbaarheid van de netproblematiek, dankzij slimme elektriciteitsmeters en slimme netten, kan hier nuttig worden aangewend.

Het coördineren van het laden, en de samenwerking tussen de verschillende partijen zijn essentieel om tot een kosteneffectieve oplossing te komen. Technologische innovatie en aangepast beleid kunnen de overgang naadloos maken.

## Hoofdstuk 6

## CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

## Conclusies

In de vorige hoofdstukken is duidelijk aangetoond dat elektrische voertuigen wereldwijd een ‘hot topic’ zijn. De geschiedenis toont echter aan dat het niet de eerste keer is dat elektrische voertuigen in het straatbeeld verschijnen, en dat tal van factoren een invloed hebben op het al dan niet doorbreken van deze “nieuwe” technologie.

Actuele maatschappelijke problemen zoals de luchtverontreiniging in steden, de globale klimaatverandering en de eindige oliereserves zorgden een paar jaar terug voor een hernieuwde interesse voor elektrisch rijden. De succesvolle lancering van Toyota’s hybride Prius illustreerde het bestaan van een markt, en een beperkt aantal constructeurs hebben daar vrij snel op ingespeeld. In 2011 bereiden alle belangrijke autoconstructeurs zich voor om hun modellen van elektrische en/of hybride voertuigen te lanceren.

De eerstvolgende jaren zal het aantal elektrische wagens (hybride en batterij-elektrische) uiterst bescheiden blijven, en pas vanaf 2015 merkbaar beginnen toe te nemen. Tegen 2020 verwacht men op basis van verschillende, soms sterk uiteenlopende prognoses dat minimaal 2%, en maximaal 10% van de nieuw verkochte wagens elektrisch zullen zijn.

Er moet een duidelijk onderscheid gemaakt worden tussen hybride voertuigen, waarin zowel een elektrische motor als een verbrandingsmotor kracht leveren om de wielen aan te drijven, en batterij-elektrische voertuigen waarin geen verbrandingsmotor aanwezig is. De hierna volgende conclusies, en het grootste gedeelte van het rapport, hebben -tenzij anders vermeld- betrekking op batterij-elektrische voertuigen.

De belangrijkste voordelen van batterij-elektrische voertuigen zijn:

- hoger rendement omdat elektrische motoren veel efficiënter zijn dan verbrandingsmotoren;
- remenergie wordt gebruikt om batterij bij te laden;
- geen lokale emissies van luchtverontreinigende stoffen zoals NO<sub>x</sub>, PM en NMVOS;
- lage CO<sub>2</sub>-emissies zeker indien de elektriciteit van nucleaire of hernieuwbare oorsprong is;
- minder afhankelijk van aardolie door een veelheid van mogelijke energiebronnen voor de productie van elektriciteit;

- tijdens het rijden weinig geluidshinder daar elektrische motoren praktisch geruisloos zijn;
- goedkoop rijden gezien gering verbruik en actuele elektriciteitsprijzen;
- minder onderhoud door afwezigheid oliefilters, luchtfilters, versnellingsbak, minder draaiende delen, lagere slijtage remmen;
- kan thuis of op het werk opgeladen worden;
- minder trillingen en een hoog startkoppel.

De belangrijkste actuele nadelen van batterij-elektrische wagens zijn:

- door de dure batterij zijn ze beduidend duurder in aankoop dan vergelijkbare benzine- en dieselwagens;
- een beperkte autonomie of rijbereik van maximaal 150 km;
- de vrees om onderweg stil te vallen door een lege batterij (range anxiety);
- lange oplaadtijden (proportioneel aan batterijgrootte en rijafstand)
- impact van rijgedrag, verkeerssituatie en verwarming/airco op energieverbruik, en dus rijbereik, is nog onvoldoende bekend;
- het ontbreken van een publieke laainfrastructuur om batterijen onderweg op of bij te laden (incl. snelladers);

## Aanbevelingen

In vergelijking met een aantal andere Europese landen loopt Vlaanderen met betrekking tot de elektrische mobiliteit achter. Nochtans heeft Vlaanderen een aantal sterktes op dit vlak. De afstanden zijn klein, er zijn een beperkt aantal grote spelers die beslissingen over aankopen kunnen nemen (leasebedrijven, overheden,...), het klimaat is gunstig (niet te extreem koud of warm), het elektriciteitsnet heeft een redelijk grote capaciteit, België telt veel eengezinswoningen met garages en dus mogelijkheden om te laden,...

De grootste uitdaging bij de introductie van elektrische voertuigen ligt in de noodzaak om een **brede groep van belanghebbenden en sectoren** bij het proces te betrekken om tot succesvolle resultaten te komen. Om een massale introductie van elektrische voertuigen in een land of regio te realiseren dienen de krachten gebundeld te worden.

Om de markt van elektrische voertuigen te stimuleren, en op deze wijze de milieuvoordelen maximaal te be-

nuten, dienen de juiste beleidsmaatregelen genomen te worden, zowel langs aanbodzijde als langs vraagzijde. De dure aankoopprijs dient gecompenseerd te worden door aankoopincentives, en vrijstelling van BIV en jaarlijkse rijtaks. Voor bedrijven dienen ook de nodige fiscale stimuli voorzien te worden. Ook specifieke voordelen zoals gratis parkeren, toelaten tot stedelijke milieuzones en voorbehouden rijstroken (busstroken) hebben een zeer positief effect op de aantrekkelijkheid van elektrische voertuigen. Eveneens dient de mogelijkheid voorzien te worden om te laden op de openbare weg voor die personen die zelf niet over een garage beschikken. Op langere termijn dient het gebruik van hernieuwbare energiebronnen voor het laden van de batterij van het voertuig maximaal gestimuleerd te worden om het milieuvoordeel van elektrische wagens te maximaliseren. De overheid kan ook een belangrijke voorbeeldfunctie vervullen, door zelf elektrische voertuigen in haar vloot op te nemen en voorbehouden parkeerplaatsen te voorzien voor werknemers met een elektrisch voertuig. De overheid heeft ook haar rol te spelen in het faciliteren van bouwvergunningen voor laadinfrastructuur en het stimuleren van de plaatsing van laadinfrastructuur in nieuwbouw.

Hoe kan Vlaanderen een voordeel halen uit de introductie van elektrische voertuigen? Het is duidelijk dat het belang voor Vlaanderen op drie niveaus kan liggen: **economisch, ecologisch en maatschappelijk**.

Elektrische voertuigen kunnen een bijdrage leveren tot het reduceren van de luchtverontreiniging en de broeikasgasemissies (zie hoofdstuk 3). Dit is voor Vlaanderen belangrijk in het kader van de Europese milieudoelstellingen en het Europees klimaat- en energiebeleid. Vlaanderen is een zeer dichtbevolkt gebied en elektrische voertuigen kunnen, door het reduceren van luchtverontreiniging en geluidshinder, de leefbaarheid in steden sterk verhogen. Elektrische voertuigen kunnen Vlaanderen dus helpen om aan de Europese luchtkwaliteitsnormen te voldoen en om de gezondheid van haar bevolking nog beter te beschermen.

Ook op mobiliteitsvlak bieden elektrische voertuigen opportuniteiten en uitdagingen. De beperkte actieradius, maar ook de goedkopere kilometers, kunnen leiden tot een andere mobiliteit. Nieuwe mogelijkheden dienen gestimuleerd te worden waarbij elektrische wagens, maar ook elektrische tweewielers, in combinatie met het openbaar vervoer gebruikt worden. Op deze manier kan ook het fileprobleem (deels) aangepakt worden. De focus dient dus ook niet enkel te liggen op personenwagens. Elektrische bestelwagens kunnen een nuttige rol spelen in logistieke ketens en voor stadsdistributie, terwijl elektrische bussen kunnen ingezet worden in het openbaar vervoer.

Maar naast het ecologisch en maatschappelijk belang, is het economisch belang voor Vlaanderen natuurlijk

zeer belangrijk. Elektrische voertuigen hebben een directe impact op minstens drie sectoren die voor Vlaanderen zeer belangrijk zijn, namelijk de autosector, de energiesector en de mobiliteitssector.

De Vlaamse Proeftuin Elektrische Voertuigen speelt net in op onderzoeksvragen uit deze drie sectoren. Op 15 juli 2011 keurde de Vlaamse regering, op voorstel van minister van innovatie, Ingrid Lieten, vijf proeftuinplatformen goed met een maximaal subsidiebedrag van 16,25 miljoen euro. Deze proeftuin zal de invoering van elektrische voertuigen in Vlaanderen versnellen en tal van onderzoeksvragen gaan bestuderen. Bedrijven of organisaties zullen innovatieve technologieën, producten, diensten en concepten kunnen testen via een representatieve testpopulatie in hun echte leef- en werkomgeving. Het doel is om de innovatie bij te sturen en/of te versnellen en/of om toekomstige noden te captureren en zo innovatie uit te lokken en/of het gebruik van elektrische voertuigen te stimuleren. De 'real life' ervaringen van de gebruikers zijn zeer belangrijk voor bedrijven en de overheid om zo de aanvaarding en verspreiding van elektrische voertuigen verder te stimuleren.

Binnen deze drie sectoren heeft Vlaanderen een **sterke industriële basis**, aangevuld met de nodige **“kennisplatformen” (universiteiten, onderzoekscentra, competentiepolen, sectororganisaties,...)**. Vlaanderen moet het van zijn kennis hebben want dat is de belangrijkste troef en ‘asset’ voor de toekomstige economische activiteiten. Deze drie sectoren dienen enerzijds elk voor zich in te spelen op de uitdagingen en opportuniteiten die elektrische voertuigen met zich meebrengen, maar anderzijds ook zoeken naar de synergie tussen de drie sectoren. Het is dus duidelijk dat al deze sectoren voor een forse transformatie staan.

Binnen de voertuigsector staat Vlaanderen voor de uitdaging om de lokale OEMs en de talrijke toeleveranciers te ondersteunen in hun transitie naar milieuvriendelijkere voertuigen. Voor de klassieker voertuigen wordt de wereldwijde concurrentie alsmaar sterker en heeft Vlaanderen een loonhandicap. Voor de elektrische voertuigen ligt deze markt nog meer open en zal er een sterke behoefte zijn aan specifieke kennis. Vlaanderen dient echter ook te mikken op het opbouwen en valoriseren van kennis binnen een, liefst volledige, en alleszins meer geclusterde waardeketen. Een uitdaging waar o.a. met interesse naar gekeken wordt is bijvoorbeeld het opzetten van een lokale activiteit op vlak van batterijen voor elektrische voertuigen.

De huidige waardeketen van de voertuigindustrie kan nog verder versterkt worden door rond het voertuig van de toekomst een waardenetwerk met verschillende dimensies uit te bouwen:



- Infrastructuur voor het voertuig van de toekomst;
- Communicatie rond het voertuig van de toekomst;
- Het voertuig van de toekomst in mobiliteitsconcepten.

Het is belangrijk dat Vlaanderen onderzoek en ontwikkeling voor de transformatie van de Vlaamse auto-industrie steunt, niet enkel binnen de zuivere auto-industrie maar ook daarbuiten, waarbij we denken aan batterijontwikkelingen, recyclageprocessen, slimme netten, en de energie- en de ICT-sector. Daarboven dienen de onderhouds- en deparagesectoren, evenals de interventiediensten, zoals brandweer, politie, en andere getraind te worden om met deze technologie op een veilige manier overweg te kunnen.

Tot slot dienen de nodige ontwikkelingen te gebeuren op het gebied van laadinfrastructuur. Meer specifiek betreft het hier zowel eenvoudige, maar veilige laadmogelijkheden thuis, als een voldoende uitgebreid netwerk van publieke laadpalen en snelladers.

Binnen de energiesector staat Vlaanderen ook voor enkele enorme uitdagingen. Om de bevoorradingszekerheid in de toekomst te handhaven zullen de elektriciteitsnetten de injectie van een massale productie van hernieuwbare elektriciteit moeten aankunnen, om continu vraag en aanbod op elkaar af te stemmen en de eindgebruikers verder te stimuleren om hun elektriciteitsgebruik te optimaliseren en te reduceren. Dit zal enkel mogelijk zijn met slimme netten en de bijbehorende slimme meters. Ook op dat gebied zijn de uitdagingen, maar ook de opportuniteiten niet gering voor Vlaanderen en kunnen elektrische voertuigen een belangrijke "actieve speler" op de energiemarkt worden op langere termijn. De combinatie van smart grids en elektrische voertuigen zal de komende jaren beperkt zijn, maar kan op termijn tot nieuwe producten en diensten leiden met een economische en ecologische meerwaarde voor de Vlaamse industrie.

## Referenties

- Bauer P., Y. Zhou, J. Doppler & N. Stemberge (2010), Charging of electric vehicles and impact on the grid, MECHATRONIKA, 13th International Symposium, pp. 121-127, 2-4 June 2010.
- Blumsack S., C. Samaras & P. Hines (2008), Long-term electric system investments to support Plug-in Hybrid Electric Vehicles," in 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. IEEE, pp. 1-6.
- Boureima F.-S., N. Sergeant, M. Messagie, V. Wynen & J. Van Mierlo (2010), Well-to-wheel analyses of new vehicle technologies for future vehicle markets, internal report. MOBI, Vrije Universiteit Brussel.
- Chan CC. (2002), The state of the art in electric vehicles, Proceedings IEEE, vol. 90, nr. 2.
- Clement K. (2010), Impact of Plug-In Hybrid Electric Vehicles on the Electricity System. Ph.D. thesis, KU-Leuven, Oct. 2010.
- Clement K., K. Van Reusel & J. Driesen (2007), The consumption of electrical energy of plug-in hybrid electric vehicles in Belgium," EET-European Ele-Drive Transportation conference, Brussels, Belgium, 30th May - 2nd June, 2007.
- De Vlieger I., L. Pelkmans, L. Schrooten, J. Vankerkom, M. Vanderschaeghe, R. Grispen, D. Borremans, K. Vanherle, E. Delhaye, T. Breemersch & C. De Geest (2009), Transport: referentie- en Europa-scenario, Wetenschappelijk rapport Toekomstverkenning MIRA 2009.
- Dones R., C. Bauer, R. Bolliger, B. Burger, M. Faist Emenegger, R. Frischknecht, T. Heck, N. Jungbluth, A. Röder & M. Tuchschnid (2007), Life Cycle Inventories of Energy systems: Results for Current Systems in Switzerland and other UCTE Countries, Ecoinvent report No. 5. Dübendorf, CH: Paul Scherrer Institut Villingen, Swiss Centre for Life Cycle Inventories.
- Dufresne L., D. Woitrin, M.P. Fauconnier, D. Devogelaer, J. Percebois, L. De Paoli, J. De Ruyck & W. Eichhammer (2009), Welke is de ideale energiemix voor België tegen 2020 en 2030, Report Groep Gemix, 30 September 2009.
- EC (2010), State of Play in the EU Energy Policy, Accompanying Document to "Energy 2020 A Strategy For Competitive, Sustainable And Secure Energy", COM(2010) 639.
- EPA (2000), Guidelines for Preparing Economic Analysis, United States Environmental Protection Agency.
- Europese Commissie (2005), Impact assessment guidelines, [http://ec.europa.eu/governance/impact/docs/key\\_docs/sec\\_2005\\_0791\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/governance/impact/docs/key_docs/sec_2005_0791_en.pdf), 2005.
- ERTRAC Strategic Research Agenda 2010, Towards a 50% more efficient road transport system by 2030
- Haesen, E. (2009), Multi-Objective Optimization of the Integration of Stochastic Distributed Energy Resources in Electricity Grids. PhD thesis, KULeuven, Augustus 2009.
- IEA (2009), Transport, Energy and CO<sub>2</sub>, Moving Towards Sustainability. IEA, Paris.
- IEA (2010), World Energy Outlook.
- IEA (2011), Energy statistics ([www.iea.org/stats/index.asp](http://www.iea.org/stats/index.asp)).

IEA (2011), Technology Roadmap: Electric and plug-in hybrid electric vehicles, [www.iea.org](http://www.iea.org).

IMPACT (2008), Handbook on Estimation of External Costs in the Transport Sector. Internalisation Measures and Policies for All External Costs of Transport (IMPACT). Maibach M., Schreyver C., Sutter D., van Essen H.P., Boon B.H., Smokers R., Schrotten A., Doll C., Pawlowska B., Bak M., CE Delft.

Lebeau K., C. Macharis, L. Turcksin, J. Van Mierlo & B. Lievens (2011), Testing electric vehicles in real life: Living Labs in. BIVEC Congres. Namur, Belgium.

Messagie M., F.-S. Boureima, N. Sergeant, J. Matheys, L. Turcksin, C. Macharis & J. Van Mierlo (2010), Life Cycle Assessment of conventional and alternative small passenger vehicles in Belgium, Edition: IEEE VPPC 2010, Vehicle Power and Propulsion Conference, Lille, France.

MOBI, Vrije Universiteit Brussel (2011), Trans2House – Transition Pathways to efficient (electrified) transport for households. Intern rapport.

NIS – Nationaal Instituut voor Statistiek (2008), Statistieken Mobiliteit: [http://www.statbel.fgov.be/figures/d37\\_nl.asp](http://www.statbel.fgov.be/figures/d37_nl.asp).

Pearce D., G. Atkinson & S. Mourato (2006), Cost benefit analysis and the environment, OECD.

Pepermans G., J. Driesen, D. Haeseldonckx, R. Belmans & W. D'haeseleer (2005), Distributed generation: definition, benefits and issues. Energy Policy, Elsevier, vol. 33(6), pp. 787-798, April 2005.

Shafiei et al. (2010), Plug-in hybrid electric vehicle charging: Current issues and future challenges, *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2010 IEEE*, pp. 1-8, 1-3 September 2010.

Takafumi Anegawa (2010), Characteristics of CHAdeMO Quick Charging System, EV'S25.

The Royal Academy of Engineering (2010), Electric Vehicles: charged with potential, [www.raeng.org.uk](http://www.raeng.org.uk).

Timmermans J.-M., J. Van Mierlo, L. Govaerts, J. Verlaak, D. De Keukeleere, S. Meyer & W. Hecq (2005), Bepalen van een ecoscore voor voertuigen en toepassing van deze ecoscore ter bevordering van het gebruik van milieuvriendelijke voertuigen, studie uitgevoerd in opdracht van AMINAL, Eindverslagen Taak 1 - Taak 6, Project aminal/MNB/TVM/ECO, 31 maart 2005.

Van Mierlo J., Maggetto, P. Van den Bossche, S. Meyer, W. Hecq, J.-M. Timmermans, L. Govaerts, J. Verlaak (2004), Environmental rating of vehicles with different alternative fuels and drive trains: a comparison of two different approaches, Transportation Research Part D: Transport and Environment; Vol 9/5 pp. 387-399.

Van Mierlo J., J.-M. Timmermans, A. Guignard & W. Hecq (2005), Coûts financiers directs et indirects engendrés par l'installation de systèmes d'air climatisé dans les voitures particulières, eindverslag VUB-ETEC & CEESE-ULB, opdracht BIM.

VITO (2010), Energiebalans Vlaanderen 2008, [www.emis.vito.be/energiebalans-vlaanderen](http://www.emis.vito.be/energiebalans-vlaanderen).

VITO (2011), De combinatie van een koude dieselmotor en druk stadsverkeer is een drama op vlak van verbruik en uitstoot. VITO-VAB-persbericht, 23/03/2011.

VMM (2009a), Milieurapport Vlaanderen, Indicatorrapport 2010.

VMM (2009b), Milieurapport Vlaanderen, Indicatorrapport 2010, Kerndataset.

Wunker S. (2010), Market penetration in new markets: how fast for electric vehicles, New Markets Advisors Blog, mei 2010.

## Bijlage: Begrippenlijst

A	Ampère
BEmix	Belgische mix van elektriciteitscentrales
BEV	Batterij-elektrisch voertuig
BIV	Belasting op inverkeerstelling
CNG	Compressed Natural Gas
CO2	Koolstofdioxide
dB	Decibel
DIV	Directie Inschrijving Voertuigen
EhB	Erasmus hogeschool Brussel
ERTRAC	European Road Transport Research Advisory Council
EV	Elektrisch Voertuig
GWP	Global Warming Potential
HC	Koolwaterstoffen
HEV	Hybride Elektrisch Voertuig
ICE	Internal Combustion Engine
IEA	Internationaal Energie Agentschap
km	Kilometer
kWh	Kilowattuur
LCA	Levenscyclusanalyse
LCC	Levenscycluskost
LPG	Liquefied Petroleum Gas
MOBI	Mobility and Automotive Technology Research Group
NEDC	New European Driving Cycle
NMVOS	Niet Methaan Vluchtige Organische Stoffen
NO <sub>x</sub>	Stikstofoxiden
OEM	Original Equipment Manufacturer (voertuigfabrikant met producten onder eigen merknaam)
PHEV	Plug-in Hybride Elektrisch Voertuig
PM	Particulate Matter
SO2	Zwaveldioxide
TTW	Tank-To-Wheel
ULB	Université Libre de Bruxelles
V	Volt
VB	Verkeersbelasting
VITO	Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek
VMM	Vlaamse Milieumaatschappij
VUB	Vrije Universiteit Brussel
W	Watt
WTT	Well-to-Tank
WTW	Well-to-Wheel
ZEV	Zero Emission Vehicle

## Leden van de Werkgroep

Ronnie Belmans, K.U. Leuven, KTW/KVAB  
 Tobias Denys, VITO  
 Ludo Gelders, KTW/KVAB  
 Frederik Geth, KULeuven  
 Jan Kretzschmar, KTW/KVAB  
 Kenneth Lebeau, VUB  
 Jan Leuridan, LMS  
 Cathy Macharis, VUB  
 Inge Mayeres, VITO  
 Maarten Messagie, VUB  
 Carlo Mol, VITO/Smart Grids Flanders  
 Dirk Roesems, LMS  
 Peter Van den Bossche, VUB  
 Hendrik Van Landeghem, UGent, KTW/KVAB  
 Joeri Van Mierlo, VUB



# KLASSE VAN DE TECHNISCHE WETENSCHAPPEN

## LEDEN

### Bestuur

Jan Kretzschmar, Bestuurder  
Ludo Gelders, Aftredend Bestuurder  
Jacques Willems, Onderbestuurder  
Paul Verstraeten, Verteegenwoordiger in de bestuurscommissie van de KVAB

### Gewone leden

Guido Beazar  
Ronnie Belmans  
Jean Berlamont  
Alain Bernard  
Luc Bossyns  
Bart De Moor  
William D'Haeseleer  
Dirk Fransaer  
Ludo Gelders  
Derrick Gosselin  
Hilde Heynen  
Monica Höfte  
Jan Kretzschmar  
Paul Lagasse

Jan Leuridan  
Egbert Lox  
Christiane Malcorps  
Leo Michiels  
Paula Moldenaers  
André Oosterlinck  
Johan Schoukens  
Luc Taerwe  
Erik Tambuyzer  
Achiël Van Cauwenberghe  
Erick Vandamme  
Jozef Vanderleyden  
Joos Vandewalle  
Hendrik Van Landeghem

Willy Van Overschée  
Joost Van Roost  
Ivo Van Vaerenbergh  
Eric Van Walle  
Pascal Verdonck  
Ronny Verhoeven  
Ignaas Verpoest  
Willy Verstraete  
Paul Verstraeten  
Dirk Wauters  
Martine Wevers  
Jacques Willems

### Ereleden

Etienne Aernoudt  
Jean Beeckman  
Stanislas Beernaert  
Hugo De Man  
Jozef Deman  
Jean-Pierre Depaemelaere  
Herman Deroo  
Dirk Frimout  
Gilbert Froment  
Robert Gobin

Guy Haemers  
Jan Jongbloet  
Rob Lenaers  
Roland Maes  
Urbain Meers  
Michel Naze  
Marcel Soens  
Stanislas Ulens  
Norbert Van Belle  
Jean Van Bladel

Hendrik Van Brussel  
Valentin Van den Balck  
Daniël Vandepitte  
Georges Van der Perre  
Jan Van Keymeulen  
Jacques Van Remortel  
Pierre Verbaeten  
Roland Wissaert

### Buitenlandse leden

Robert Byron Bird  
Adrianus T. de Hoop  
Alessandro Ferrero

Iven Mareels  
Sophie Vandebroek  
Luc Van Wassenhove

Roland Waterman  
Willy Zwaenepoel

## ERELEDEN CAWET

Lucien De Schamphelaere  
Marc Francken

René Jacques  
Alfons Peeters

Paul Van der Spiegel