

Earth, Life & Social Sciences

Van Mourik Broekmanweg 6

2628 XE Delft

Postbus 49

2600 AA Delft

www.tno.nl

T +31 88 866 30 00

TNO-rapport**TNO 2015 R10386****Energie- en milieu-aspecten van elektrische
personenvoertuigen**

Datum	7 april 2015
Auteur(s)	Ir. R.P. Verbeek Dr. M. Bolech Ing. R.N. van Gijlswijk Ir. Jordy Spreen
Exemplaarnummer	2015-TL-RAP-0100283673
Aantal pagina's	26 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	1
Opdrachtgever	Rijksdienst voor Ondernemend Nederland
Projectnaam	RVO.nl - Factsheet elektrisch rijden
Projectnummer	060.13862

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2015 TNO

Samenvatting

Elektrische voertuigen spelen een belangrijke rol in het overheidsbeleid voor het reduceren van de CO₂-uitstoot van de transportsector en het verbeteren van de luchtkwaliteit. In Nederland neemt het aandeel volledig-elektrische auto's in de totale Nederlandse voertuigvloot in hoog tempo toe, en met het aantal voertuigen groeit ook de belangstelling voor het elektrisch rijden.

RVO.nl, de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland, heeft aan TNO gevraagd de nu bekende feiten over elektrische voertuigen in een beknopte studie te verzamelen en in dit rapport weer te geven. Het omvat vooral de onderwerpen broeikasgasemissies (CO₂-uitstoot) van het gebruik en de fabricage van het voertuig en de verontreinigende emissies van het gebruik van het voertuig en de productie van de brandstof. Daarnaast wordt een samenvatting gegeven van aspecten rondom materiaalschaarste en veiligheid.

Onderstaand volgt een overzicht van de conclusies van het onderzoek.

Broeikasgasemissies

Er is een analyse gedaan van de energieketen (Well-To-Wheel of WTW) en de materiaallevenscyclus (fabricage en sloop van het voertuig). De conclusies zijn als volgt (uitgaande van praktijkgemiddelden):

- De CO₂-emissie gerelateerd aan de materiaallevenscyclus (de fabricage van het voertuig en de accu, onderhoud en recycling) is met ca. 45 g/km het laagst voor een conventioneel voertuig en neemt toe tot maximaal ca. 65 g/km voor een volledig elektrisch voertuig.
- Voor conventionele voertuigen varieert de CO₂-emissie van de totale energieketen (WTW) van minimaal ca. 150 g/km voor een hybride voertuig tot 200 g/km voor een standaard benzinevoertuig. Voor plug-in en volledig elektrische voertuigen is de WTW CO₂-emissie sterk afhankelijk van de herkomst van de geproduceerde stroom. Het varieert van minimaal ca. 10 g/km voor een volledig elektrisch voertuig op groene stroom tot bijna 150 g/km voor een plug-in hybride voertuig dat gebruik maakt van overwegend grijze stroom.

Met betrekking tot de totale CO₂-emissie van energie- (WTW) en materiaallevenscyclus geldt het volgende:

- De totale CO₂-emissie varieert van maximaal bijna 250 g/km voor een gemiddeld benzinevoertuig tot minimaal ca. 70 g/km voor een elektrisch voertuig op groene stroom (-70%). Een elektrische auto heeft nog altijd een ca. 30% lagere CO₂-emissie bij gebruik van overwegend grijze stroom. Ten opzichte van een hybride benzinevoertuig of een dieselveertuig vallen deze reductiepercentages ca. 15% lager uit. Uiteraard kunnen de CO₂-emissies van conventionele voertuigen ook sterk verlaagd worden door de toepassing van biobrandstof (biogas, ethanol of biodiesel).
- De totale CO₂-winst van een PHEV bij gebruik van overwegend grijze stroom is met ca. 15% ten opzichte van een benzinevoertuig relatief bescheiden, omdat ervan uitgegaan wordt dat gemiddeld maar 30% volledig elektrisch gereden wordt. Rijdt dit PHEV-voertuig op groene stroom, dan geldt een reductie van de CO₂-emissie van ca. 25%.

De PHEV heeft meer potentie als de accu groter wordt en de verbrandingsmotor kleiner. Bij een tweemaal grotere accu zou de volledig elektrisch gereden afstand kunnen verdubbelen. Hierdoor wordt ten opzichte van een conventioneel benzinevoertuig de totale CO₂-emissie gereduceerd met ca. 25% bij gebruik van overwegend grijze stroom of met ca. 45% bij gebruik van groene stroom.

Verontreinigende emissies

Ten aanzien van de directe verontreinigende emissies van de voertuigen zijn de conclusies als volgt:

- De NO_x en PM (fijnstof) motoremissies zijn nul voor het elektrische voertuig en voor het plug-in hybride voertuig voor het aandeel dat elektrisch gereden wordt (ca. 30%). Alleen voor een dieselveertuig zijn de NO_x-emissies erg hoog.
- De PM (fijnstof) slijtage-emissies (banden- en remmenslijtage) zijn minimaal een factor drie hoger dan de PM motoremissies. Voor de PM slijtage-emissies wordt ervan uitgegaan dat deze voor elektrische en plug-in hybride voertuigen ca. 25% lager zijn dan voor conventionele voertuigen (vanwege het grotendeels elektrische remmen).

De conclusies ten aanzien van de indirecte verontreinigende emissies (van elektriciteitscentrale en olieraffinaderij) zijn als volgt:

- Indirecte emissies zijn veel minder belangrijk dan de directe voertuigemissies, omdat ze alleen sterk verdund meetellen op locaties met luchtkwaliteitsproblemen. Desalniettemin zijn ze vaak hoger dan de directe voertuigemissies.
- De emissies voor gemiddelde stroom (leveringsmix) en benzine en diesel zijn over het algemeen vergelijkbaar in grootte, alhoewel er flinke verschillen zijn tussen de individuele componenten NO_x, PM en SO_x.
- Voor groene stroom zijn de indirecte emissies globaal een factor tien lager.
- Zowel bij recycling alsook bij de winning van materialen is goede emissiewetgeving van belang om milieuproblemen te voorkomen. In Europa valt dit onder de algemene milieuwetgeving voor de industrie en zijn geen problemen te verwachten.

Schaarste van materialen

- De productie van zowel elektrische als conventionele voertuigen leidt tot uitputting van grondstoffen. De spreiding tussen verschillende studies is echter groot; van min of meer gelijk tot flink hoger voor het elektrische voertuig.
- Recycling van materialen bij de sloop van het voertuig kan uitputting voorkomen. Dit wordt geregeld in verschillende Europese richtlijnen. Daarnaast kunnen accu's in een andere toepassing worden hergebruikt.

Veiligheid

- Uit tests en snel toenemende praktijkervaring blijkt dat de veiligheid van elektrische voertuigen over het algemeen tenminste even goed is als die van conventionele voertuigen.
- Er blijkt geen toenemend hoger risico op aanrijding van voetgangers vanwege het ontbreken van motorgeluid.

- Er zijn cursussen waarin hulpverleners leren adequaat op te treden bij een ongeval met een elektrisch voertuig.
- Bij brand lijkt een elektrisch voertuig vooralsnog minstens even veilig als een conventioneel voertuig.
- Bij tewaterlating van een elektrisch voertuig is er een kleine kans dat zich door elektrolyse waterstof- en zuurstofgas in het voertuig ophopen. Het daaruit volgende risico kan worden weggenomen door deuren te openen of ramen in te tikken.

Inhoudsopgave

	Samenvatting	2
1	Inleiding	6
1.1	Aanleiding	6
1.2	Doel van dit rapport	6
1.3	Afbakening	6
2	Eigenschappen van elektrische voertuigen	7
2.1	Definitie en eigenschappen	7
2.2	Toekomstige ontwikkelingen	8
3	Broeikasgasemissies van elektrische personenauto's	9
3.1	Overzicht levenscyclus personenauto	9
3.2	Fabricage en materiaalgebruik	10
3.3	Productie van elektriciteit en brandstof	11
3.4	CO ₂ -emissie van elektrische en conventionele voertuigen	12
3.5	Toekomstige ontwikkelingen	15
4	Luchtverontreinigende uitstoot van voertuigen	16
4.1	Toekomstige ontwikkelingen	17
5	Veiligheid van elektrische voertuigen	18
5.1	Voetgangersveiligheid	18
5.2	Auto te water	18
5.3	Brand	19
5.4	Ernstige botsing	19
6	Conclusies	20
7	Referenties	22
8	Ondertekening	25
	Bijlage(n)	
	A Productie elektriciteit en brandstoffen	

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Elektrische voertuigen spelen een belangrijke rol bij het reduceren van de CO₂-uitstoot van de transportsector en het verbeteren van de luchtkwaliteit. In Nederland neemt het aandeel volledig-elektrische auto's in de totale Nederlandse voertuigvloot in hoog tempo toe, en met het aantal voertuigen groeit ook de belangstelling voor het fenomeen elektrisch rijden.

RVO.nl, de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland, ondersteunt het Nederlands bedrijfsleven onder meer door haar te voorzien van kennis over duurzaam ondernemen. Goede informatie over elektrische voertuigen stelt bedrijven in staat de juiste keuzes te maken bij de verduurzaming van hun vloot. RVO heeft aan TNO gevraagd de nu bekende feiten over elektrische voertuigen te verzamelen en te rapporteren, omdat over elektrische voertuigen nog veel vragen leven, met name op het gebied van milieuaspecten en de veiligheid.

1.2 Doel van dit rapport

Dit rapport heeft tot doel de nu beschikbare kennis over de milieuprestaties, geluid en veiligheid van elektrische voertuigen in een document overzichtelijk te presenteren. Het laat ook duidelijk zien op welke bronnen het rapport zich baseert en welke overwegingen en aannames zijn gedaan bij het vaststellen van belangrijke kengetallen met betrekking tot elektrische voertuigen.

1.3 Afbakening en scope

De eigenschappen van elektrische voertuigen worden vergeleken met die van conventionele voertuigen met een verbrandingsmotor op benzine of diesel en met die van plug-in hybride personenauto's. De vergelijking is vrijwel volledig op praktijkresultaten gebaseerd, zoals bijvoorbeeld voor het energieverbruik en de verontreinigende uitstoot van voertuigen. Desalniettemin is er voor sommige parameters zeer beperkt informatie beschikbaar of laten bronnen een flinke spreiding zien. Dit zou in de toekomst tot aanpassing van de resultaten kunnen leiden.

Vrachtwagens en bussen met elektrische aandrijving en voertuigen met brandstofcelaandrijving maken geen deel uit van deze studie. Duurzame brandstoffen voor conventionele voertuigen (ethanol, biodiesel en biogas) worden niet meegenomen in deze studie.

2 Eigenschappen van elektrische voertuigen

2.1 Definitie en eigenschappen

In dit rapport wordt gekeken naar volledig-elektrische voertuigen met een oplaadbare batterij (accu). Deze worden ook wel aangeduid als BEV (voor Battery Electric Vehicle) of FEV (voor Full Electric Vehicle).

Naast volledig-elektrische voertuigen zijn er op dit moment verschillende plug-in hybride voertuigen op de markt. Deze voertuigen kunnen zowel volledig elektrisch alsook volledig op benzine of diesel rijden.

Elektrische voertuigen zijn over het algemeen zwaarder dan conventionele benzine- en dieselvoertuigen. Hetzelfde geldt voor voertuigen met een hybride en met een plug-in hybride aandrijflijn. Op basis van een vergelijking van de opgegeven gewichten van een tiental voertuigtypen welke in verschillende varianten leverbaar zijn, wordt het volgende geconcludeerd ten opzichte van het conventionele voertuig:

- Voertuigen met een hybride aandrijflijn zijn gemiddeld 125 kg zwaarder;
- Plug-in-hybride en volledig-elektrische voertuigen zijn gemiddeld 275 kg zwaarder.

Het hogere gewicht van de elektrische voertuigen is niet geheel te verklaren op grond van het hoge accugewicht. Waarschijnlijk spelen ook het gewicht van de beschermende behuizing en de overige elektrische componenten een rol. Een hoger gewicht heeft met name een tweetal nadelen. Ten eerste is er meer energie nodig om het voertuig aan te drijven. Dit wordt evenwel gecompenseerd door de efficiëntere elektrische aandrijving. Ten tweede kan het tot meer fijnstof-uitstoot leiden als gevolg van de slijtage-emissies van de banden. Zie hoofdstuk 4.

Tabel 1 geeft een overzicht van praktische gegevens zoals actieradius, aanschafprijs en energiekosten. Deze zijn vooral gebaseerd op praktijkervaringen met en beschikbare informatie over de Nissan Leaf, de VW Golf en de Opel Ampera.

Het elektrisch voertuig wordt gekenmerkt door een korte actieradius, die bovendien vrij sterk afhankelijk is van het gebruik van de verwarming, rijstijl en rit type (TNO, 2012), (De Vroey, 2013)¹. Naar verwachting zal de actieradius in de toekomst verbeteren.

¹ In de praktijkproef van Rijkswaterstaat (2012) werd een verschil in verbruik gemeten van 170 Wh/km in de lente tot 330 Wh/km in de winter [2]. In de proeftuin 'Rotterdam test elektrisch rijden' werd gemiddeld over een diversiteit aan voertuigen 50% meer energie gebruik per kilometer gevonden bij 0° C buitentemperatuur ten opzichte van 15° C [11].

Tabel 1: Praktische gegevens voor middenklasse voertuigen.

	Benzine	Elektrisch	PHEV
Actieradius (km)	600-1000	70 - 170 ¹	600-1000
Prijs voertuig (€)	28.000	36.000	38.000
Energiekosten (€ct/km) particulier	8 - 12	3.6 - 7	3.6 - 12 ²

2.2 Toekomstige ontwikkelingen

Lithium-ion-accu's worden in de toekomst lichter en compacter. Dat is vooral te danken aan grote inspanningen op het gebied van onderzoek en ontwikkeling van accu's. Door nieuwe, verbeterde en dunnere elektrode materialen zullen hogere celspanningen mogelijk worden, waardoor het volume en gewicht van de accu's afnemen (Grafoïd, 2015). Momenteel lijkt het erop dat lithium-ion-techniek nog zeker een decennium dominant zal blijven. Maar voor de periode daarna worden doorbraken met nieuwe techniek verwacht zoals magnesium-ion-accu's of metaal-lucht-accu's (Saft, 2015).

Verschillende autofabrikanten en leveranciers verwachten dat de energie-inhoud van accu's in de komende 10-15 jaar met een factor twee zal toenemen.

Naar verwachting zal in dezelfde periode de prijs dalen van een huidige prijs van 300 tot 400 EUR/kWh naar ca. 200 EUR/kWh. Ook voor de prijsontwikkeling voor het complete elektrische voertuig zijn de vooruitzichten goed. In een rondvraag bij een groot aantal fabrikanten in de automobielindustrie kwam naar voren dat in 2025 de kostprijs voor conventionele en elektrische auto's ongeveer gelijk zullen zijn (McKinsey, 2010).

Gezien de verwachte prijsdaling van de accu's ligt het voor de hand dat de accucapaciteit en daarmee de actieradius van elektrische auto's in de toekomst zal toenemen. Dit wordt bevestigd door het feit dat bij sommige voertuigen het nieuwe modeljaar al een 20% grotere accucapaciteit heeft³.

² Afhankelijk van de verhouding elektrisch en op benzine rijden.

³ Aangekondigde toename accucapaciteit van Nissan Leaf en GM Volt / Ampera.

3 Broeikasgasemissies van elektrische personenauto's

3.1 Overzicht levenscyclus personenauto

Broeikasgas- of CO₂-emissies treden op in de verschillende onderdelen van de levenscyclus van een voertuig.

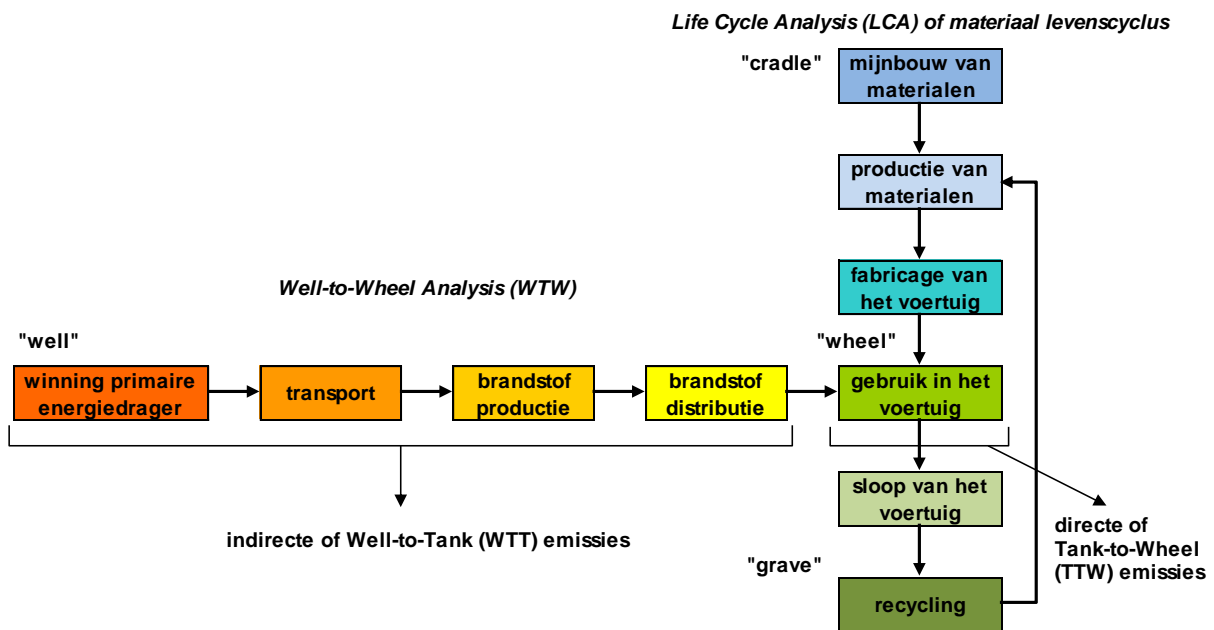
Dit omvat dan zowel de energie- als de materiaallevenscyclus. De energielevenscyclus wordt meestal onderverdeeld in twee delen (horizontale keten in figuur 1):

- Well-to-Tank (WTT): de CO₂-emissie van de productie van de brandstof;
- Tank-to-Wheel (TTW): de CO₂-emissie van het gebruik van het voertuig.

Het totaal van de energielevenscyclus wordt aangeduid met Well-to-Wheel (WTW) analyse.

De materiaallevenscyclus kan globaal in drie fasen onderverdeeld worden (verticale keten in figuur 1):

- Winning en productie van materialen en fabricage van het voertuig;
- Gebruik van het voertuig;
- Sloop van het voertuig en recycling van de materialen en onderhoud.



Figuur 1: Overzicht ketens van een personenauto.

Voor het bepalen van de totale CO₂-emissies dienen alle stappen in zowel de energieketen als de voertuigketen meegenomen te worden. Daarbij wordt bijvoorbeeld de broeikasgasemissie bij productie en afdanking van het voertuig verdeeld over alle gereden kilometers in de levensduur van het voertuig.

3.2 Fabricage en materiaalgebruik

3.2.1 Fabricage van het voertuig

De CO₂-uitstoot bij de productie van een voertuig wordt bepaald door de winning en productie van de benodigde materialen, het transport van materialen en de assemblage.

De CO₂-emissie die gepaard gaat met de productie van een Li-ion-accu hangt enigszins af van de gebruikte technologie en de configuratie, maar als richtwaarde kan 150 kg CO₂ per kWh accucapaciteit worden aangehouden [Van Gijlswijk, 2014]⁴.

Voor een middenklasse-personenauto met een accu van 24 kWh betekent dit een CO₂-uitstoot van ca. 3,6 ton voor de accu.

Er wordt van uitgegaan dat de productie van het elektrische voertuig exclusief de accu leidt tot een CO₂-uitstoot van 7 tot 10 ton. Dat is ongeveer evenveel als voor de productie van een conventioneel voertuig, alhoewel verschillende bronnen niet op een lijn zitten (Ecoinvent, 2014), (Hawkins, 2013), (Odeh, 2013), (Notter 2010), (Helms, 2010). De laatste twee bronnen geven een duidelijk lagere CO₂-uitstoot op voor het conventioneel voertuig.

Voor deze analyse is uitgegaan voor een basiswaarde van 8,5 ton CO₂ voor de fabricage van het voertuig en vervolgens is een toeslag berekend voor de accu en de overige elektrische componenten. Vervolgens is ook een toeslag berekend voor het onderhoud (1.2 ton over de levensduur) en voor recycling (sloop) aan het einde van de levensduur. Het eindresultaat is gegeven in Tabel 2.

In totaal komt de CO₂-uitstoot van de productie, onderhoud en recycling uit op ca. 10 tot 14 ton, waarbij de PHEV en BEV rond de 14 ton zitten. De tabel laat ook zien dat de fabricage van het voertuig leidt tot een relatief hoge bijdrage aan de CO₂-emissies per kilometer van ordegrrootte 50 tot 60 gram CO₂ per km.

Tabel 2: Berekende CO₂-emissie voor fabricage van het voertuig, onderhoud en recycling (sloop). Op basis van 220.000 km.

		Benzine en diesel	Benzine hybride	PHEV	BEV
CO ₂	ton	10.2	11.0	13.7	14.3
	g/km	46	50	62	64

3.2.2 Schaarse grondstoffen en recycling

Het gebruik van zowel elektrische als conventionele voertuigen leidt tot uitputting van grondstoffen. Het gaat daarbij in het bijzonder om schaarse materialen zoals koper, nikkel, kobalt, mangaan en sommige zeldzame aarden. In conventionele voertuigen wordt daarnaast platina, palladium, rhodium en cerium gebruikt in de katalysatoren. En wordt voor elektrische voertuigen gebruik gemaakt van

⁴ Gemiddeld van 6 waarden uit 5 bronnen. Spreiding is aanzienlijk met uitschieters naar ca 50 en 265 kg CO₂/kWh.

dysprosium, neodymium, samarium en lanthaan in met name de elektromotoren en accu's. Het veel gebruikte lithium is niet schaars. Vanuit milieukundig oogpunt is de uitputting van grondstoffen een belangrijk onderwerp, omdat dit ertoe kan leiden dat materialen in de toekomst niet meer beschikbaar zijn, of tenminste dat het meer energie zal kosten om de grondstoffen te kunnen winnen. Het gebruik van sommige schaarse grondstoffen heeft ook politieke implicaties, vanwege de afhankelijkheid zijn van een bepaald land of regio. Dit geldt bijvoorbeeld voor lithium, omdat Europa geen lithiumvoorraad heeft. Recycling vermindert deze afhankelijkheid, en voorkomt verdere uitputting van grondstoffen. Voor wat betreft de impact van het type voertuig op het gebruik van schaarse materialen, is er veel spreiding tussen verschillende studies. Dit varieert van ongeveer gelijk tot een factor drie hoger voor het elektrische voertuig (Hawkins, 2013), (Notter, 2010).

Een tweetal Europese richtlijnen moeten ervoor zorgen dat op zijn minst een deel van de accu's van elektrische voertuigen gerecycled worden. Dit zijn de Europese richtlijn 2012/493/EG voor accu's en de richtlijn 2000/53/EC voor complete voertuigen (Timmers, 2015). De eerste vereist dat Li-ion accu's op zijn minst voor 50% gerecycled worden. De tweede schrijft voor dat 95% van het voertuig nuttig gebruikt moet worden aan het einde van de levensduur. In Europa zijn momenteel vier recycling bedrijven technisch in staat om Li-ion accu's te recyclen.

Bij recycling is het wel belangrijk om de milieueffecten, zoals de mogelijke uitstoot van schadelijke stoffen, af te wegen tegen de milieugevolgen van productie van bijvoorbeeld metalen uit erts. Schadelijke milieueffecten kunnen sterk verminderd worden door goede wetgeving op dit gebied. In Europa vallen schadelijke emissies onder de algemene milieuwetgeving voor de industrie en zijn geen problemen te verwachten. Bij winning of recycling van materialen buiten Europa kan ook gedacht worden aan kwaliteitscertificering in de keten.

Voor geavanceerde accu's zijn recyclingprocessen in ontwikkeling; sommige recyclinginstallaties zijn al in bedrijf, bijvoorbeeld bij Recupyl in Frankrijk. Het UNEP somt de problemen op van het recyclen van lithium (Buchert, 2009). Zij concluderen onder andere dat de mijnbouwgrondstof te goedkoop is om recycling economisch haalbaar te laten zijn, en dat de concentraties lithium in toepassingen laag zijn - hetgeen recycling duur maakt. Wel kan een accu een tweede leven krijgen in een andere toepassing. Verschillende fabrikanten, zoals Nissan, GM en ABB, werken aan zo'n tweede leven, met name voor elektriciteitsopslag voor huizen (bijvoorbeeld in combinatie met zonne-energie). Zie ook (Timmers, 2015).

3.3 Productie van elektriciteit en brandstof

3.3.1 Productie van elektriciteit

In (Otten, 2015) is een overzicht gemaakt van de CO₂-emissies van verschillende typen elektrische stroom. Hierin is ook de voorketen meegenomen. De voorketen omvat de CO₂-emissies van de productie en aanvoer van de brandstof voor de elektriciteitscentrale (bijvoorbeeld bij kolen, gas en biomassa) en de verliezen van het elektriciteitsnetwerk. In Tabel 6 van bijlage A is een overzicht gegeven voor de verschillende elektriciteitsopties met daarbij behorende specifieke CO₂-emissies.

De keuze van het type elektrische stroom en de daarbij behorende, sterk variërende CO₂-emissie, is eigenlijk een kwestie van afspraak. Ga je uit van groene stoom, omdat eigenaren van elektrische voertuigen dit over het algemeen inkopen, of ga je juist uit van één van de standaard elektriciteitsproductiemixen?

Deze analyse hanteert verschillende uitgangspunten, zodat wordt nagegaan of elektrische voertuigen CO₂-voordeel blijven bieden bij variërende aannamen.

De volgende opties voor elektriciteitsproductie zijn voor de hand liggende keuzes:

1. Groene stroom: Nederlandse en buitenlandse groene stroom in de huidige verhouding van 1:3 en met een gemiddelde CO₂-emissie van 36 g/kWh;
2. Leveringsmix grijze en groene stroom. Nederlandse en geïmporteerde grijze en groene stroom⁵. De verhouding grijs-groen is ongeveer 65%-35%. De gemiddelde CO₂-emissie is 355 g/kWh;
3. Nederlandse grijze en groene stroom in de verhouding van 85%-15% (Nederlands gemiddelde). De gemiddelde CO₂-emissie is 447 g/kWh.

De analyse in paragraaf 3.4 wordt uitgevoerd met optie 1 en 3, zodat inzicht verkregen wordt in de CO₂-emissie bij sterk variërende aannamen.

3.3.2 *Productie van brandstoffen*

Voor de productie van brandstoffen wordt (fossiele) energie gebruikt en dus ook CO₂ geproduceerd. In

Tabel 7 in bijlage A is een overzicht gegeven van de Well-to-Tank (WTT) en Tank-to-Wheel (TTW) emissies voor verschillende vloeibare en gasvormige brandstoffen. Om de totale CO₂-emissie van een voertuig te kunnen berekenen moeten de getallen uit de tabel nog vermenigvuldigd worden met het energieverbruik per gereden kilometer. Dit energieverbruik is afhankelijk van het type brandstof en aandrijflijn, zie paragraaf 3.4.

3.4 **CO₂-emissie van elektrische en conventionele voertuigen**

In deze paragraaf wordt een vergelijking gemaakt van de CO₂ emissies van verschillende type voertuigen en voor elektrische voertuigen met verschillende elektriciteitsproductie-opties.

Er wordt uitgegaan van het echte praktijkgebruik, dus niet van de opgave van de fabrikant (gebaseerd op de typekeuring). Voor de conventionele en hybride voertuigen is uitgegaan van de analyses aan de hand van tankpasdata van een groot aantal voertuigen (Ligterink, 2014a), (Ligterink, 2013a). De gebruikte getallen zijn gebaseerd op het laatste referentiejaar 2013. Het energieverbruik van het middenklasse elektrisch voertuig is gebaseerd op de praktijkproef van Rijkswaterstaat [TNO, 2012] en de proeftuin elektrisch rijden in Rotterdam [De Vroey, 2013]. Het gemiddelde energieverbruik is gebaseerd op de 12 Nissan Leafs uit de eerste proef en 3 Volvo's C30 en 3 Nissan Leafs uit de tweede proef. Het gemiddeld verbruik komt op 236 Wh/km (23,6 kWh/100 km). De totaal afgelegde afstand van deze voertuigen was bijna 230.000 km.

Voor de plug-in hybride voertuigen is de CO₂-emissie gebaseerd op 30% elektrisch en 70% op benzine rijden, gebaseerd op een analyse van zakelijke rijders van dit type auto (Ligterink, 2013a), (Ligterink, 2013b) en op recenter onderzoek⁶. Uit het laatste blijkt eveneens dat de 25% 'beste rijders' gemiddeld bijna 60% elektrisch rijden.

⁵ In Nederland wordt relatief veel groene stroom geïmporteerd waardoor de gemiddelde CO₂-emissie relatief laag is.

⁶ Lopend onderzoek voor ministerie I&M.

Voor het elektrisch rijden wordt uitgegaan van twee typen elektrische stroom gebaseerd op de gemiddelde mix in Nederland van a) groene stroom en b) in Nederland geproduceerde grijze en groene stroom, zie paragraaf 3.3.1.

In Tabel 3 en Figuur 2 is een overzicht gegeven van het energieverbruik van een middenklasse voertuig (C-segment) met verschillende aandrijfliijnen en brandstoftypen. Er wordt onderscheid gemaakt tussen drie typen CO₂-emissies (zie ook figuur 1, paragraaf 3.1):

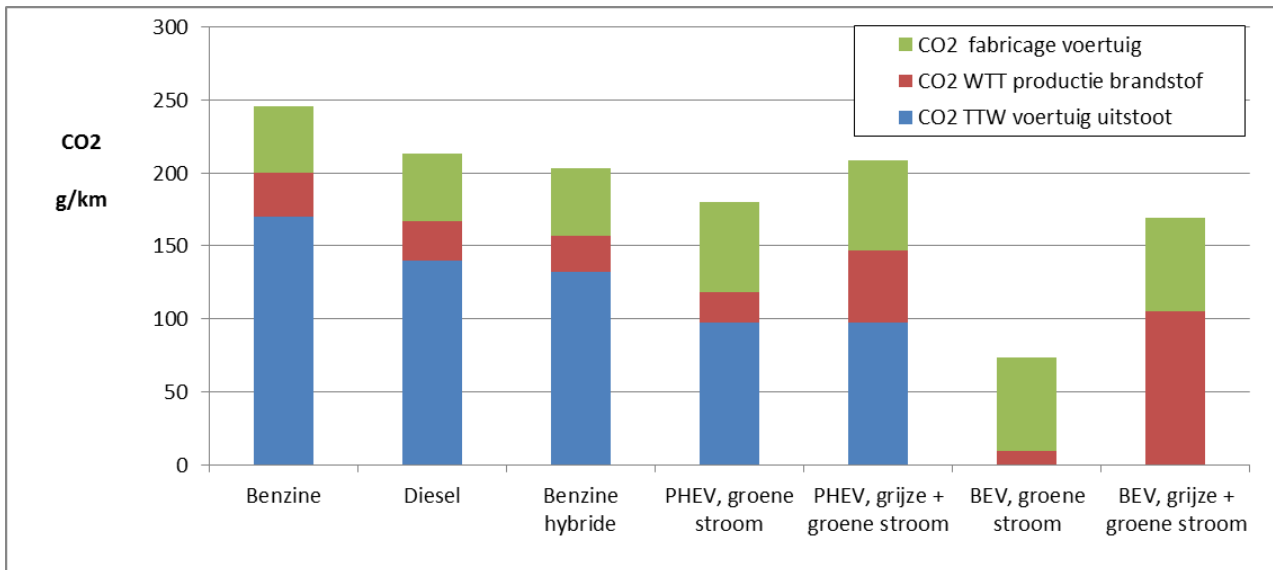
- Tank-to-Wheel (TTW): de directe CO₂-emissie van alleen het voertuig;
- Well-to-Wheel (WTW): de indirecte CO₂-emissie van het voertuig als gevolg van de productie van de brandstof;
- Well-to-Wheel + fabricage van het voertuig (energie- + materiaallevenscyclus inclusief onderhoud en recycling).

Tabel 3: CO₂-emissie per km voor een middenklasse voertuig met verschillende brandstoffen (referentiejaar 2013).

CO ₂ (g/km)	Benzine	Diesel	Benzine hybride	PHEV, groene stroom*	PHEV, grijze + groene stroom	BEV, groene stroom*	BEV, grijze + groene stroom
CO ₂ TTW	170	140	132	97	97	0	0
CO ₂ WTW	200	167	157	118	147	9	105
CO ₂ WTW + fabricage voertuig ⁷	246	213	207	180	209	73	169

* Het merendeel van de gebruikers koopt groene stroom

⁷ Inclusief onderhoud en recycling van voertuig en accu. Er wordt vanuit gegaan dat de accu de levensduur van het voertuig mee gaat. Een extra accuervanging leidt tot een extra CO₂-emissie van ca 20 g/km. Voor onderhoud is voor alle voertuigtypen dezelfde waarde aangenomen van ca 5 g CO₂ per km.



Figuur 2: CO₂-emissies van conventionele en elektrische auto's op basis van 220.000 km. Fabricage voertuig is inclusief onderhoud en recycling (sloop)⁸.

De resultaten kunnen, uitgaande van praktijkgemiddelden, als volgt worden samengevat:

- De CO₂-emissie gerelateerd aan de materiaallevenscyclus (fabricage van het voertuig en accu, onderhoud en recycling) is met ca. 45 g/km het laagst voor een conventioneel voertuig en neemt toe tot maximaal ca. 65 g/km voor een volledig elektrisch voertuig.
- Voor conventionele voertuigen varieert de CO₂-emissie van de totale energieketen (WTT) van minimaal ca. 150 g/km voor een hybride voertuig tot 200 g/km voor een standaard benzinevoertuig. Voor plug-in en volledig elektrische voertuigen is de WTT CO₂-emissie sterk afhankelijk van de herkomst van de geproduceerde stroom. Het varieert van minimaal ca. 10 g/km voor een volledig elektrisch voertuig op groene stroom tot bijna 150 g/km voor een plug-in hybride voertuig dat gebruik maakt van overwegend grijze stroom.
- De totale CO₂-emissies van energie- (WTT) en materiaallevenscyclus variëren van maximaal bijna 250 g/km voor een gemiddeld benzinevoertuig tot minimaal ca. 70 g/km voor een elektrisch voertuig op groene stroom (-70%). Een elektrische auto heeft nog altijd een ca. 30% lagere CO₂-emissie dan een benzinevoertuig bij gebruik van overwegend grijze stroom. Ten opzichte van een hybride benzinevoertuig of een dieselveertuig vallen deze reductiepercentages ca. 15% lager uit. Uiteraard kunnen de CO₂-emissies van conventionele voertuigen ook sterk worden verlaagd door de toepassing van biobrandstof (biogas, ethanol of biodiesel).
- De totale CO₂-winst, van energie- en materiaallevenscyclus, van een PHEV bij gebruik van overwegend grijze stroom is met ca. 15% ten opzichte van een benzinevoertuig relatief bescheiden, omdat ervan uitgegaan wordt dat gemiddeld maar 30% volledig elektrisch gereden wordt. Rijdt dit PHEV-voertuig op groene stroom, dan geldt een reductie van de CO₂-emissie van ca. 25%.

⁸ Als de accu van het BEV tijdens de levensduur van het voertuig vervangen moet worden, leidt dat tot een extra CO₂ emissie van ca 20 g/km (in toekomst mogelijk lager door verbetering recycling).

De PHEV heeft meer potentie als de accu groter wordt en de verbrandingsmotor kleiner, naar het voorbeeld van de BMW I3. Bij een tweemaal grotere accu zou de volledig elektrisch gereden afstand kunnen verdubbelen. Hierdoor wordt ten opzichte van een conventioneel benzinevoertuig de totale CO₂-emissie gereduceerd met ca. 25% bij gebruik van overwegend grijze stroom of met ca. 45% bij gebruik van groene stroom⁹.

3.5 Toekomstige ontwikkelingen

Voor de directe CO₂-emissies (dus exclusief de fabricage en recycling van het voertuig) zijn flinke ontwikkelingen te verwachten in de komende 10-20 jaar. Als belangrijkste ontwikkeling zien we de verbetering van de energie-efficiency van alle voertuigtypen en de verbetering van de duurzaamheid van vooral elektriciteit.

Bij benzine- en dieselveertuigen zijn verbeteringen te verwachten vanwege de wettelijke druk op CO₂-emissies. De elektrische auto staat aan het begin van zijn ontwikkeling; met name met betrekking tot het energieverbruik voor verwarming en ook het gewicht van het voertuig zijn rendementsverbeteringen mogelijk.

Voor elektriciteit is de verwachting dat dit steeds meer uit duurzame bronnen geproduceerd wordt, waardoor de CO₂-emissie voor de productie van elektriciteit in Nederland in de toekomst flink daalt¹⁰. Door een slimme laadstrategie van elektrische voertuigen kunnen duurzame bronnen waarschijnlijk beter benut worden.

Voor de fossiele brandstoffen, diesel en benzine, wordt geen snelle verlaging van de CO₂-emissie verwacht, vooral vanwege het ontbreken van duidelijk Europees of Nationaal beleid om het aandeel biobrandstof flink te verhogen. Weliswaar kan het aandeel biobrandstof richting 2020 nog iets toenemen, tot ca. 6%; daartegenover staat dat de winning en productie van de fossiele brandstof in de toekomst wat meer energie zal kosten waardoor ook meer CO₂ geproduceerd wordt.

Op het gebied van recycling van accu's, wordt wel een verbetering verwacht omdat processen daarvoor nog in ontwikkeling zijn. Daarnaast zijn er initiatieven om aan het einde van de levensduur van het voertuig, de accu's direct in te zetten voor een andere toepassing (zie paragraaf 3.2.2.).

⁹ Deze getallen gelden op dit moment eveneens voor de 25% 'beste rijders' van plug-in hybride voertuigen.

¹⁰ SER brandstofvisietraject: achtergrondgegevens en aannames 2015.

4 Luchtverontreinigende uitstoot van voertuigen

Er wordt onderscheid gemaakt tussen a) de directe uitstoot van het voertuig en b) de uitstoot als gevolg van de productie van de brandstof en elektriciteit. Dit is weergegeven in respectievelijk Tabel 4 en Tabel 5.

Tabel 4: Directe verontreinigende praktijkemissies van personenauto's, in mg/km (conventionele voertuigen uitgaande van Euro 6). Bron I&M emissiefactoren, 30% stad- en 70% snelwegkilometers.

mg/km	NO _x	PM ₁₀ motor	PM ₁₀ slijtage
Benzine	21	5	17
Diesel	365	1	17
PHEV ¹¹ (benzine)	15	4	13
BEV	0	0	13

Tabel 5: Emissies ten gevolge van de productie van de brandstof, uitgedrukt in mg/km. Bronnen (Afman, 2014)¹², (Otten, 2015).

mg/km	NO _x	PM ₁₀	SO ₂
Benzine	70	7	150
Diesel	40	4	100
PHEV, groene stroom	55	5	110
PHEV, leveringsmix	90	7	130
BEV, groene stroom	12	1	6
BEV, leveringsmix	120	5	60

Voor de fijnstofemissies (PM₁₀, Tabel 4), wordt onderscheid gemaakt tussen motor- of uitlaatemissies en slijtage-emissies (van banden en remmen). De slijtage-emissies zijn veel hoger dan de fijnstofemissies van de motor zelf¹³. Voor het elektrisch voertuig zijn de slijtage-emissies ca. 25% lager, omdat ervan uitgegaan wordt dat voor 95% elektrisch geremd wordt. Daardoor daalt de remslijtage-emissie met 95%. Dit is gebaseerd op simulaties en uitspraken van fabrikanten (Ligterink, 2014b). Soms wordt uitgegaan van een lager aandeel elektrisch remmen, maar dat lijkt meer op een aanname dan een onderbouwde keuze¹⁴. In Tabel 4 is ook te zien dat de directe NO_x-emissie van een dieselveertuig erg hoog is, ca. 15 maal hoger dan van een benzinevoertuig. De fijnstofemissie uit de motor is lager dan van een benzinemotor, omdat de dieselmotor voorzien is van een efficiënt roetfilter.

In Tabel 5 is te zien dat de indirecte uitstoot voor de productie van elektriciteit, benzine en diesel hoog is. Voor het benzine en elektrische voertuig is de NO_x-

¹¹ Voor PHEV wordt uitgegaan van elektrisch rijden voor gemiddeld 30% van de afstand.

¹² Gegevens van benzine en diesel dateren van 2003, en komen heel globaal overeen met de Ecoinvent 3.1 database. Het wordt aanbevolen om nieuwe Europese getallen te berekenen.

¹³ Op basis van Euro 6 motoren.

¹⁴ In (Helms, 2010) wordt een aanname van 50% gedaan voor het aandeel elektrisch remmen, waarmee de totale slijtage-emissies voor een elektrisch en conventioneel voertuig vrijwel gelijk uitkomen.

uitstoot van de productie van de brandstof hoger dan de directe emissies. Daarnaast wordt ook zwaveldioxide geproduceerd. De indirecte emissies voor het elektrisch voertuig zijn nul bij gebruik van groene stroom.

Er is echter een groot verschil tussen de directe, lokaal door het voertuig uitgestoten emissies en emissies van een elektriciteitscentrale of raffinaderij. Verontreinigende emissies zijn over het algemeen een lokaal (*'hot-spot'*) probleem nabij drukke verbindingswegen. Het ontbreken van motoremissies van een elektrisch voertuig is dan een groot voordeel. De door de centrale uitgestoten emissies komen in de achtergrondemissies terecht en tellen maar heel beperkt mee in de concentraties bij hot-spots.

Samenvattend wordt ten aanzien van de directe emissies van de voertuigen het volgende geconcludeerd:

- De NO_x- en PM (fijnstof) -motoremissies zijn nul voor het elektrische voertuig en voor het plug-in hybride voertuig voor het aandeel dat elektrisch gereden wordt (ca. 30%). Alleen voor een dieselveertuig zijn de NO_x-emissies erg hoog.
- De PM (fijnstof) slijtage-emissies (banden- en remmenslijtage) zijn minimaal een factor drie hoger dan de PM-motoremissies. Voor de PM-slijtage-emissies wordt ervan uitgegaan dat deze voor elektrische en plug-in hybride voertuigen ca. 25% lager zijn dan voor conventionele voertuigen, vanwege het grotendeels elektrische remmen.

De conclusies ten aanzien van de indirecte verontreinigende emissies (van elektriciteitscentrale en olieraffinaderij) zijn als volgt:

- Indirecte emissies zijn veel minder belangrijk dan de directe voertuigemissies, omdat ze alleen sterk verdund meetellen op locaties met luchtkwaliteitsproblemen. Desalniettemin zijn ze vaak hoger dan de directe voertuigemissies.
- De emissies voor gemiddelde stroom (leveringsmix) en benzine en diesel zijn over het algemeen vergelijkbaar in grootte, alhoewel er flinke verschillen zijn tussen de individuele componenten NO_x, PM en SO_x.
- Voor groene stroom zijn de indirecte emissies globaal een factor tien lager.

4.1 Toekomstige ontwikkelingen

De verontreinigende emissies van voertuigen in de praktijk worden vooral bepaald door de emissiewetgeving. Slijtage-emissies zijn hierin echter niet opgenomen. Voor dieselpersonenauto's wordt wel gewerkt aan effectievere regelgeving voor het beperken van de NO_x-uitstoot. Vanaf 2020 zou dat kunnen leiden tot een 1,5 tot 2x lagere NO_x-uitstoot¹⁵. De waarden blijven echter relatief hoog.

¹⁵ TNO-schatting op basis van voorgestelde opties om regelgeving te verbeteren.

5 Veiligheid van elektrische voertuigen

Onderstaand volgt een korte toelichting met betrekking tot de volgende veiligheidsaspecten van elektrische voertuigen:

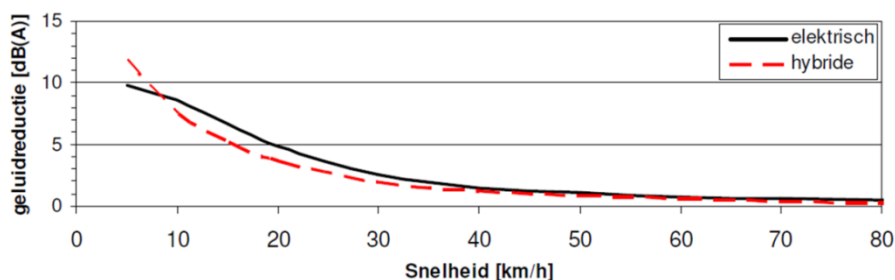
- Voetgangersveiligheid;
- Auto te water;
- Brand;
- Ernstige botsing.

Voor verdere informatie over veiligheid van elektrisch aangedreven voertuigen wordt tevens verwezen naar het veiligheid-datablad (IFV, 2015), (MGS, 2015). Alle meest up to date info en filmpjes staan op Infopunt Veiligheid:

<http://www.infopuntveiligheid.nl/Publicatie/Rubriek/85/6/feiten-en-cijfers.html>.

5.1 Voetgangersveiligheid

De voetgangersveiligheid zou kunnen afnemen omdat het geluidsniveau van elektrische voertuigen lager ligt dan dat van conventionele voertuigen. Figuur 3 laat zien dat het geluidsniveau van elektrische voertuigen tot ca. 40 km/uur een stuk lager ligt. Daarboven zijn band- en windgeluid dominant en is het verschil met een conventioneel voertuig klein.



Figuur 3: De geluidsreductie van hybride personenauto's (rood) en van volledig-elektrische personenauto's (zwart). Bron (Verheijen, 2009).

Recente onderzoeken laten zien dat elektrische en hybride auto's niet verkeersonveiliger zijn vanwege het lagere geluidsniveau. De resultaten van twee recente studies laten geen significant grotere ongevalsrisico's (objectief) voor voetgangers zien (SWOV, 2011), en ook geen significant verschil in de onveiligheidsbeleving (subjectief) van voetgangers bij verkeerslichten en oversteekplaatsen in vergelijking met auto's met moderne verbrandingsmotoren en start-stop-systemen (Dudenhöffer, 2011).

5.2 Auto te water

De risico's van elektrische voertuigen die volledig onder water gedompeld zijn, zijn behoorlijk goed bekend (MGS, 2015). Hieruit blijkt dat het risico op elektrocutie nihil is. Er is een kleine kans dat zich door elektrolyse waterstof- en zuurstofgas in het voertuig ophopen. Daarom dienen bij verwijdering uit het water de deuren van het voertuig te worden geopend of de ruiten te worden ingetikt.

5.3 Brand

Uit proeven en langzaam groeiende praktijkervaring blijkt dat elektrische en hybride elektrische voertuigen bij brand minstens zo veilig zijn als voertuigen met verbrandingsmotoren en conventionele accu's. De zogenoemde brandlast is lager dan bij een conventionele auto. Voor het blussen van een brandend elektrisch voertuig of accupakket is een overvloed aan water geschikt.

5.4 Ernstige botsing

Bij een ongeval bestaat bij elektrische voertuigen het gevaar dat delen onder stroom staan of dat er door kortsluiting brand ontstaat, al is de kans daarop door veiligheidsvoorzieningen en constructie zeer klein. Voor hulpverleners zijn er cursussen technische hulpverlening bij ongevallen met alternatief aangedreven voertuigen. Daarin komen zaken aan bod als het benaderen, veiligstellen en afhandelen van elektrische en hybride voertuigen bij incidenten.

6 Conclusies

TNO heeft een beknopte studie gedaan naar milieuaspecten en veiligheid van elektrische personenauto's. Dit heeft geleid tot de onderstaande conclusies.

Broeikasgasemissies

Er is een analyse gedaan van de energieketen (Well-To-Wheel of WTW) en de materiaallevenscyclus (fabricage en sloop van het voertuig). De conclusies zijn als volgt (uitgaande van praktijkgemiddelden):

- De CO₂-emissie gerelateerd aan de materiaallevenscyclus (de fabricage van het voertuig en de accu, onderhoud en recycling) is met ca. 45 g/km het laagst voor een conventioneel voertuig en neemt toe tot maximaal ca. 65 g/km voor een volledig elektrisch voertuig.
- Voor conventionele voertuigen varieert de CO₂-emissie van de totale energieketen (WTW) van minimaal ca. 150 g/km voor een hybride voertuig tot 200 g/km voor een standaard benzinevoertuig. Voor plug-in en volledig elektrische voertuigen is de WTW CO₂-emissie sterk afhankelijk van de herkomst van de geproduceerde stroom. Het varieert van minimaal ca. 10 g/km voor een volledig elektrisch voertuig op groene stroom tot bijna 150 g/km voor een plug-in hybride voertuig dat gebruik maakt van overwegend grijze stroom.

Met betrekking tot de totale CO₂-emissie van energie- (WTW) en materiaallevenscyclus geldt het volgende:

- De totale CO₂-emissie varieert van maximaal bijna 250 g/km voor een gemiddeld benzinevoertuig tot minimaal ca. 70 g/km voor een elektrisch voertuig op groene stroom (-70%). Een elektrische auto heeft nog altijd een ca. 30% lagere CO₂-emissie bij gebruik van overwegend grijze stroom. Ten opzichte van een hybride benzinevoertuig of een dieselvoertuig vallen deze reductiepercentages ca. 15% lager uit. Uiteraard kunnen de CO₂-emissies van conventionele voertuigen ook sterk verlaagd worden door de toepassing van biobrandstof (biogas, ethanol of biodiesel).
- De totale CO₂-winst van een PHEV bij gebruik van overwegend grijze stroom is met ca. 15% ten opzichte van een benzinevoertuig relatief bescheiden, omdat ervan uitgegaan wordt dat gemiddeld maar 30% volledig elektrisch gereden wordt. Rijdt dit PHEV-voertuig op groene stroom, dan geldt een reductie van de CO₂-emissie van ca. 25%.
De PHEV heeft meer potentie als de accu groter wordt en de verbrandingsmotor kleiner. Bij een tweemaal grotere accu zou de volledig elektrisch gereden afstand kunnen verdubbelen. Hierdoor wordt ten opzichte van een conventioneel benzinevoertuig de totale CO₂-emissie gereduceerd met ca. 25% bij gebruik van overwegend grijze stroom of met ca. 45% bij gebruik van groene stroom.

Verontreinigende emissies

Ten aanzien van de directe verontreinigende emissies van de voertuigen zijn de conclusies als volgt:

- De NO_x en PM (fijnstof) motoremissies zijn nul voor het elektrische voertuig en voor het plug-in hybride voertuig voor het aandeel dat elektrisch gereden wordt (ca. 30%). Alleen voor een dieselveertuig zijn de NO_x-emissies erg hoog.
- De PM (fijnstof) slijtage-emissies (banden- en remmenslijtage) zijn minimaal een factor drie hoger dan de PM motoremissies. Voor de PM slijtage-emissies wordt ervan uitgegaan dat deze voor elektrische en plug-in hybride voertuigen ca. 25% lager zijn dan voor conventionele voertuigen (vanwege het grotendeels elektrische remmen).

De conclusies ten aanzien van de indirecte verontreinigende emissies (van elektriciteitscentrale en olieraffinaderij) zijn als volgt:

- Indirecte emissies zijn veel minder belangrijk dan de directe voertuigemissies, omdat ze alleen sterk verdund meetellen op locaties met luchtkwaliteitsproblemen. Desalniettemin zijn ze vaak hoger dan de directe voertuigemissies.
- De emissies voor gemiddelde stroom (leveringsmix) en benzine en diesel zijn over het algemeen vergelijkbaar in grootte, alhoewel er flinke verschillen zijn tussen de individuele componenten NO_x, PM en SO_x.
- Voor groene stroom zijn de indirecte emissies globaal een factor tien lager.
- Zowel bij recycling alsook bij de winning van materialen is goede emissiewetgeving van belang om milieuproblemen te voorkomen. In Europa valt dit onder de algemene milieuwetgeving voor de industrie en zijn geen problemen te verwachten.

Schaarste van materialen

- De productie van zowel elektrische als conventionele voertuigen leidt tot uitputting van grondstoffen. De spreiding tussen verschillende studies is echter groot; van min of meer gelijk tot flink hoger voor het elektrische voertuig.
- Recycling van materialen bij de sloop van het voertuig kan uitputting voorkomen. Dit wordt geregeld in verschillende Europese richtlijnen. Daarnaast kunnen accu's in een andere toepassing worden hergebruikt.

Veiligheid

- Uit tests en snel toenemende praktijkervaring blijkt dat de veiligheid van elektrische voertuigen over het algemeen tenminste even goed is als die van conventionele voertuigen.
- Er blijkt geen toenemend hoger risico op aanrijding van voetgangers vanwege het ontbreken van motorgeluid.
- Er zijn cursussen waarin hulpverleners leren adequaat op te treden bij een ongeval met een elektrisch voertuig.
- Bij brand lijkt een elektrisch voertuig vooralsnog minstens even veilig als een conventioneel voertuig.
- Bij tewaterlating van een elektrisch voertuig is er een kleine kans dat zich door elektrolyse waterstof- en zuurstofgas in het voertuig ophopen. Het daaruit volgende risico kan worden weggenomen door deuren te openen of ramen in te tikken.

7 Referenties

Afman, 2014

M.R. (Maarten) Afman L.M.L. (Lonneke) Wielders: "Achtergrondgegevens stroometikettering" CE Delft (mei, 2014)

Buchert, 2009

Buchert, M., D. Schüler en D. Bleher, Critical metals for future sustainable technologies and their recycling potential, Öko-instituut, UNEP rapport, juli 2009.

Den Boer, 2008

L.C. (Eelco) den Boer, F.P.E. (Femke) Brouwer, H.P. (Huib) van Essen: STREAM: Studie naar Transport Emissies van Alle Modaliteiten. Rapport Delft, September 2008

De Vroey, 2013

RTER Themarapport: Voertuigen (voertuig- en rij-aspecten) – Eindrapport, in kader van proeftuin 'Rotterdam test elektrisch rijden'. Juli 2013. Laborelec nr. LBE02902421-3.0

Dudenhöffer, 2011

F. Dudenhöffer, K. Dudenhöffer, L. Hause: Elektroautos genauso sicher wie Autos mit moderne Verbrennungsmotoren. GAK 8/2011, Jahrgang 64. https://www.uni-due.de/~hk0378/publikationen/2011/2011_08_GAK.pdf

Ecoinvent, 2014

Ecoinvent database, version 3.1, Swiss Centre for Life Cycle Inventories (2014)

Grafoid, 2015

[Mesograph's hoge energiedichtheid grafeen. http://investorintel.com/graphite-graphene-intel/](http://investorintel.com/graphite-graphene-intel/)

Hawkins, 2013

Hawkins, T.R. et al., Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles, Journal of Industrial Ecology, Volume 17, issue 1, pp. 53-64 (2013).

Helms, 2010

Helms, H., M. Pehnt, U. Lambrecht en A. Liebich, Electric vehicle and plug-in hybrid energy efficiency and life cycle emissions, 18th International symposium transport and air pollution (2010)

IFV, 2015

<http://www.infopuntveiligheid.nl/Publicatie/Rubriek/85/6/feiten-en-cijfers.html>

Ligterink, 2013a

Ligterink, N.E. and Smokers R.S.M, Praktijkverbruik van zakelijke auto's en plug-in auto's, TNO report 2013 R10703.

Ligterink, 2013b

Norbert E. Ligterink, Artur Patuleia, Update analysis of real-world fuel consumption of business passenger cars based on Travelcard Nederland fuelpass data. TNO report number R11063 juli 2013

Ligterink, 2013c

Norbert E. Ligterink, Richard T.M. Smokers and Mark Bolech, Fuel-electricity mix and efficiency in Dutch plug-in and range-extender vehicles on the road, EVS27, 2013.

Ligterink, 2014a

Norbert E. Ligterink, U. Stelwagen, J.J.P. Kuenen: Emission factors for alternative drivelines and alternative fuels. TNO report TNO 2014 R11309, September 2014.

Ligterink, 2014b

Norbert E. Ligterink, Arjan R.A. Eijk: Travelcard Nederland BV data source document: fuel consumption of Dutch passengers cars in business use 2004-2012. TNO report number R11165 juli 2014

McKinsey, 2010

"A portfolio of power-trains for Europe: a fact-based analysis,"McKinsey (2010)

MGS, 2015

<http://www.mgstech.net/new-vehicle-technology-awareness-for-public-safety-divers>

Nissan, 2015

Aangekondigde toename accucapaciteit van Nissan Leaf en GM Volt / Ampera

Notter, 2010

Notter, D.A., M. Gauch, R. Widmer, P. Wäger, A. Stamp, R. Zah en H.J. Althaus, 2010: Contribution of Li-Ion batteries to the environmental impact of electric vehicles, Environ.Sci.Technol. 44, 6550-6556 (2010).

Odeh, 2013

Odeh, N., N. Hill en D. Forster, Current and future lifecycle emissions of key [1'low carbon' technologies and alternatives, Ricardo-AEA (2013).]

Otten, 2015

Otten, M.B.J. en M.R. Afman, Emissiekentallen elektriciteit – kentallen voor grijze en 'niet-geormerkte stroom' inclusief upstream-emissies, CE Delft (2015)

Saft, 2014

European Green Vehicles Initiative: "Research challenges for post Li-Ion batteries" JC Saft technology white paper, Brussels, January 21 (2014)

SWOV, 2011

Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid (SWOV), 2011: <http://www.swov.nl/rapport/R-2011-11.pdf>

Timmers, 2015

H. Timmers, GJ van der Have, B. in 't Groen, K. Broess, A. Tiggelman. Kansen voor het Nederlandse bedrijfsleven op het gebied van batterijtechnologie voor Elektrische Voertuigen. project nr. 74106973, ARN/ DNV-GL, datum maart 2015 (concept).

TNO, 2012

"Afsluitende rapportage praktijkproef elektrisch rijden RWS," TNO 2012 R10624 (2012)

Van Gijlswijk, 2014

Gijlswijk, R. van, G. Koornneef, H. van Essen en S. Aarnink, "Indirecte en directe CO₂-uitstoot van elektrische personenauto's, TNO/CE Delft (2014)

Verbeek, 2014

Verbeek, R., S. van Zyl, A. van Grinsven en H. van Essen, Factsheets brandstoffen voor het wegverkeer, kenmerken en perspectief. 2^e versie, juni 2014. TNO/CE Delft (2014)

Verheijen, 2009

Verheijen, E., en Jabben, J., "Stille auto's nader bekeken", RIVM Rapport 68030000X (2009)

Viavision, 2014

VIAVISION, Electrifying the e-Golf (March 2014)

VW, 2014

The e-Golf, Environmental commendation – background report, Volkswagen AG, Group Research (2014)

Zeebroeck, 2014

Bruno Van Zeebroeck: Elektrische auto veroorzaakt evenveel fijn stof als conventionele auto omdat..., analyse op basis van bestaande literatuur 08-11-2013 (update van 10-11-2014).

8 Ondertekening

Delft, 7 april 2015

TNO

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'J.S. Spreen'.

Ir. J.S. Spreen
Projectleider

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'R.P. Verbeek'.

Ir. R.P. Verbeek
Auteur

A Productie elektriciteit en brandstoffen

Tabel 6: CO₂-emissies voor verschillende typen elektriciteit overeenkomstig de stroometikettering. Otten, 2015.

Brandstofmixen stroometikettering 2013 Brandstofmix	Toelichting	Aandeel in leveringsmix	CO ₂ -emissie	CO ₂ -emissie in de voor-keten	Totaal CO ₂ g/kWh
Leveringsmix, grijze en groene stroom	Brandstofmix van de geleverde elektriciteit aan klanten, inclusief Nederlandse en geïmporteerde groene stroom	-	300	54	355
Productiemix, grijze stroom	Brandstofmix van de elektriciteit die in 2013 in Nederland werd geproduceerd uit fossiele bronnen	53%	447	58	505
Importmix, grijze stroom	Brandstofmix van de in Nederland netto geïmporteerde elektriciteit (netto import; import minus export)	12%	537	87	624
Import, groen	Hernieuwbare stroom uit het buitenland	26%	0	13	13
Productie Nederland, groen	Hernieuwbaar NL (9%)	9%	0	102	102
Handelsmix, grijze stroom	Brandstofmix van de in Nederland verhandelde elektriciteit tussen leveranciers (op APX en OTC)		468	62	530
	Productiemix Nederland grijs en groene stroom (resp. 85%/15%)				447

Tabel 7 is een overzicht gegeven van de Well-to-Tank (WTT) en Tank-to-Wheel (TTW) emissies voor verschillende vloeibare en gasvormige brandstoffen.

Tabel 7: Well-To-Tank (WTT) en Tank-To-Wheel (TTW) CO₂-emissies voor voertuigbrandstoffen¹⁶.

Emissiefactor CO ₂ (g/MJ)	WTT Gemiddeld 2010-2020	TTW (verbanding van brandstof)	WTW (totaal)
Benzine	13.5	72.0	85.5
Diesel	15.0	74.3	89.3
LPG	8.1	66.7	74.8
CNG	12.9	56.6	69.5

¹⁶ SER brandstofvisietraject: achtergrondgegevens en aannames 2015