



UHASSELT

KNOWLEDGE IN ACTION

Faculteit Bedrijfseconomische Wetenschappen

master in de toegepaste economische wetenschappen

Masterthesis

Op welke manier kan de uitbouw van oplaadpunten voor elektrische wagens op een rendabele manier gerealiseerd worden?

Wout Swings

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de toegepaste economische wetenschappen, afstudeerrichting beleidsmanagement

PROMOTOR :

Prof. dr. Wim MARNEFFE

COPROMOTOR :

dr. Benneth DIRKX



UHASSELT

KNOWLEDGE IN ACTION

www.uhasselt.be

Universiteit Hasselt
Campus Hasselt:
Martelarenlaan 42 | 3500 Hasselt
Campus Diepenbeek:
Agoralaan Gebouw D | 3590 Diepenbeek

2020
2021



Faculteit Bedrijfseconomische Wetenschappen

master in de toegepaste economische
wetenschappen

Masterthesis

Op welke manier kan de uitbouw van oplaadpunten voor elektrische wagens op een rendabele manier gerealiseerd worden?

Wout Swings

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de toegepaste economische wetenschappen,
afstudeerrichting beleidsmanagement

PROMOTOR :

Prof. dr. Wim MARNEFFE

COPROMOTOR :

dr. Benneth DIRKX

COVID-19

Deze masterproef werd geschreven tijdens de COVID-19 crisis in 2020. Deze wereldwijde gezondheids crisis heeft mogelijk een impact gehad op het schrijf- en verwerkingsproces, de onderzoekshandelingen en de onderzoeksresultaten die aan de basis liggen van dit werkstuk.

Woord vooraf

De elektrische wagen en daaraan gerelateerde innovaties behoren ongetwijfeld tot de belangrijkste ontwikkelingen die zich zullen voordoen in de komende decennia. Ik ben dan ook dankbaar dat ik dit onderwerp heb mogen onderzoeken voor mijn masterproef. Ik zou dan ook graag mijn eerste promotor, dr. Jorg Roosen, willen bedanken om me in contact te brengen met de interessante wereld van de elektrische wagen. Hij heeft me veel vrijheid gegeven om mijn eigen interesses te mogen verkennen en verwerken in deze masterproef en stond steeds klaar om mijn vragen te beantwoorden. Ook dr. Benneth Dirx, die de begeleiding van dit werkstuk overnam in het tweede academiejaar, wil ik bedanken voor zijn interesse in het onderwerp alsook zijn gerichte feedback. Zijn mentorschap zorgde ervoor dat de masterproef succesvol kon worden afgerond.

Dit werkstuk vormt het sluitstuk van mijn opleiding aan de Universiteit Hasselt, waar ik met veel voldoening op terugkijk. Tijdens mijn periode aan de universiteit heb ik veel mensen ontmoet die me op verschillende manieren hebben bijgestaan. Zowel vrienden als academisch personeel hebben me geïnspireerd en gevormd tot de persoon die ik vandaag ben. Een volledige oplijsting zou te omvangrijk worden, maar weet dat ik jullie allemaal dankbaar ben.

Tot slot zou ik een speciaal dankwoord willen geven aan mijn vader. Zijn belangstelling voor de elektrische wagen en diens toepassingen hebben vaak gediend als bron van inspiratie waarop ik kon bouwen.

Samenvatting

De elektrische wagen geniet belangstelling vanuit verschillende hoeken. Naarmate er een steeds grotere belangstelling komt vanuit onder andere het milieu- en gezondheidsperspectief, zal de rol van de elektrische wagen in onze maatschappij de komende jaren enkel maar toenemen. Er zijn momenteel drie grote revoluties die zich ontplooiën in de mobiliteitssector: gedeelde mobiliteit, autonoom rijden en elektrificatie. Bij de planning van toekomstige oplaadinfrastructuur voor elektrische voertuigen is het belangrijk om de mogelijke interacties en synergiën tussen deze drie opkomende systemen in overweging te nemen. Een voertuig dat elektrisch en autonoom rijdt en bovendien ook gedeeld wordt, noemt men een shared autonomous electric vehicle (SAEV). Dit soort voertuigen zullen in de toekomst vormgeven aan een omschakeling van voertuigbezit door particulieren naar mobiliteit als een service (MaaS). Om te kunnen spreken van een volledig autonoom systeem zal naast het besturen ook het laden van deze voertuigen autonoom moeten gebeuren. Hier komen de inductiepaden naar voor als een oplossing.

De inductieve laadmethode wordt al toegepast in kleine elektronica zoals gsm-toestellen en tandenborstels onder de noemer "draadloos opladen". Deze laadmethode steunt op het principe van inductieve koppeling, waarbij een magnetisch veld wordt gecreëerd door elektrische stroom doorheen een spoel te sturen. Wanneer een tweede spoel (bijvoorbeeld die van een elektrische wagen) in de buurt van de eerste wordt geplaatst, vindt er een overdracht van energie plaats. Met andere woorden, het apparaat met de tweede spoel wordt opgeladen. Hoewel de inductieve laadmethode zeer gebruiksvriendelijk en relatief makkelijk toepasbaar is, staat deze technologie nog in haar kinderschoenen. Naast een verdere ontwikkeling op technologisch vlak is er ook nood aan meer economisch gerichte analyses. Deze masterproef tracht hier een bijdrage aan te leveren door na te gaan of een laadstation met inductiepaden rendabel kan zijn in een wereld van autonoom rijdende wagens.

Onze berekeningen tonen aan dat een inductief laadstation wel degelijk rendabel kan zijn. Specifiek zijn we op zoek gegaan naar de maximale kostprijs van een inductiepad voor een exploitant in functie van het gebruik (bezettingspercentage) en het laadvermogen van de pad. Die twee parameters zijn cruciaal om de maximale kostprijs te berekenen. Hoe hoger het bezettingspercentage, hoe hoger de maximale kostprijs van de inductiepad. Het allocatiealgoritme van een vloot autonoom rijdende wagens kan zorgen voor een efficiënte toekenning van de laadtijd en zo zorgen voor een hoge bezettingsgraad. Het laadvermogen van de pad is een technische parameter die in de toekomst steeds verbeterd kan worden naarmate nieuwe technologieën en verbeterde productieprocessen dit toelaten. Hoe hoger het laadvermogen van de pad, hoe korter de benodigde tijd om een batterij weer op te laden. Dat zorgt ervoor dat een inductiepad meer wagens kan bedienen en er minder pads per elektrisch voertuig nodig zijn om te kunnen voldoen aan de laadbehoefte van elektrische voertuigen. Toekomstige exploitanten kunnen aan de hand van onze berekeningen nagaan of de kostprijs van de inductiepaden waarover zij kunnen beschikken laag genoeg is om tot een rendabele investering te komen. Bij een winstmarge van 0,20 €/kWh ligt de maximale kostprijs van een inductiepad tussen de €966,20 en €84.449. De ondergrens van dat

interval betreft een inductiepad die laadt aan 3,7 kW en een allocatiegraad heeft van 10%. De bovengrens betreft een laadpad die laadt aan een vermogen van 11 kW en 90% van de tijd gealloceerd is. Een kritische bemerking die we hierbij moeten maken is dat de gemaakte berekeningen steunen op een reeks assumpties die mogelijk afwijken van de werkelijkheid. Zo wordt er bepaalde kostendata uit Nederland gebruikt en hanteren we een winstmarge van 0,20 €/kWh.

Verder neemt deze masterproef ook het beleidsmatig kader rond de elektrische wagen en haar laadinfrastructuur onder de loep. In België rijden slechts 2,80% van de nieuw ingeschreven wagens volledig elektrisch. We doen het daarmee een pak slechter dan de Europese koplopers Nederland en Noorwegen. Dat is opmerkelijk, aangezien ons laadpalennetwerk wel voldoet aan de Europese doelstelling van 1 publieke laadpaal per 10 laadbare voertuigen (hybride wagens en volledig elektrische wagens). We zouden daaruit kunnen afleiden dat er wel genoeg laadpalen zijn voor de elektrische wagens die vandaag in België rondrijden, maar dat het aantal elektrische wagens nog te beperkt is. Toch moeten we vaststellen dat de Europese doelstelling van 1 publieke laadpaal per 10 laadbare voertuigen gebreken vertoont. Zo wordt er geen rekening gehouden met de kwaliteit van de laadpaal (het vermogen waartegen geladen kan worden) alsook infrastructuurverschillen tussen landen (zoals de capaciteit van het elektriciteitsnet en het aantal losstaande woningen). In Noorwegen is de capaciteit van het elektriciteitsnet voldoende groot en zijn er veel losstaande huizen, wat de toegang tot private laadinfrastructuur vergemakkelijkt. Noorwegen zet dan ook vooral in op het plaatsen van snelladers op strategische punten. Dit in tegenstelling tot Nederland, waar het publieke laadnet vaak een volwaardig alternatief moet vormen voor private laadinfrastructuur. De Europese federatie voor transport en milieu (T&E) stelde dan ook een verbeterde indicator, de sufficiency indicator, voor die wel rekening houdt met de voordien genoemde gebreken.

Wanneer we België vergelijken met Nederland en Noorwegen, stellen we vast dat er in België nog ruimte is om de elektrische wagen beleidsmatig te ondersteunen. De beleidsinitiatieven die onze overheid neemt, zijn namelijk beperkt. Voorbeelden zijn het toekennen van een subsidie bij de aankoop van de elektrische wagen, zoals veel andere Europese lidstaten dat doen, of een vrijstelling van BTW zoals in Noorwegen. Een andere mogelijkheid is om de aankoop en het gebruik van fossiele wagens extra te belasten en zo de competitiviteit van de elektrische wagen te verhogen. Beide methodes kunnen ook simultaan toegepast worden. Ook Europa tracht de adoptie van elektrische wagens te ondersteunen door het opleggen van emissiestandaarden aan fabrikanten. Een emissienormering op Europees niveau vormt een voorbeeld van beleid dat de auto-industrie aanmoedigt om uitstootvrije wagens aan te bieden aan de consument en tegelijkertijd verder te investeren in de ontwikkeling van groene technologieën.

Inhoudsopgave

COVID-19	1
Woord vooraf	2
Samenvatting	3
Inhoudsopgave	6
Lijst van tabellen	8
Lijst van figuren	9
Hoofdstuk I: Probleemstelling en methodologie	11
1.1 Probleemstelling	11
1.2 Onderzoeksvragen	13
1.3 Onderzoeksopzet	14
Hoofdstuk II: Het laden van de elektrische wagen	15
2.1 De batterij	15
2.1.1 Bestanddelen van de batterij	15
2.1.2 Kostprijs en verbruik	17
2.1.3 Recyclage	19
2.2 Laadtechnieken	20
2.2.1 Conductief laden	20
2.2.2 Swaps	23
2.2.3 Inductief laden	24
Hoofdstuk III: Beleid	26
3.1 Oriëntatie	26
3.2 (Inter)nationale kijk	27
3.2.1 België	29
3.2.2 Noorwegen	31
3.2.3 Nederland	33
3.3 Dekkende laadinfrastructuur	34
Hoofdstuk IV: Autonoom rijdende wagens: een casestudy	39
4.1 Voordelen van autonoom rijdende voertuigen	39
4.2 Beschrijving van het model	41
4.3 Uitwerking van het model	42
4.3.1 Kosten	42
	6

4.3.2 Opbrengsten	42
4.3.3 Groeiscenario	43
4.3.4 Winstberekening	44
4.3.5 Break Even punt	45
Hoofdstuk V: Conclusie	51
Bibliografie	54

Lijst van tabellen

Tabel 1: Kostprijsvergelijking per 100km	17
Tabel 2: Kostprijsvergelijking per 100km	18
Tabel 3: Conductieve laadmodi en hun vermogen in België.....	22
Tabel 4: Verdeling nieuwe ingeschreven elektrische wagens per gewest in 2018	30
Tabel 5: Wagens per oplaadpunt in 2019	36
Tabel 6: Legende	45
Tabel 7: Invulling van de parameters.....	47
Tabel 8: Maximale jaarlijkse kostprijs in functie van allocatie- en padefficiëntie. Periode: 1 jaar .	47
Tabel 9: Eenmalige en jaarlijkse kosten in Nederland.....	49
Tabel 10: Maximale jaarlijkse kostprijs in functie van allocatie- en padefficiëntie, inclusief jaarlijkse kosten. Periode: 1 jaar	49
Tabel 11: Maximale kostprijs in functie van allocatie- en padefficiëntie, inclusief jaarlijkse kosten en eenmalige kosten. Periode: 5 jaar.	50

Lijst van figuren

Figuur 1: Werking van een lithium-ion batterij	16
Figuur 2: Verschillende laadmodi van de elektrische wagen	21
Figuur 3: Verschillende typen laadconnectoren.....	22
Figuur 4: Batterij swap illustratie	24
Figuur 5: Illustratie inductief laden	25
Figuur 6: Adoptiegraad in Europa	29
Figuur 7: Adoptiegraad in België	31
Figuur 8: Belangrijkste reden tot adoptie elektrische wagen volgens Noorse consumenten	32
Figuur 9: Adoptiegraad van elektrische - en hybridewagens in Noorwegen	33
Figuur 10: Gewichten in de sufficiency indicator	37
Figuur 11: Berekening van de supply metric	37
Figuur 12: Maximale jaarlijkse kostprijs in functie van allocatie- en padefficiëntie.....	48

Hoofdstuk I: Probleemstelling en methodologie

1.1 Probleemstelling

De afgelopen decennia heeft de milieu-impact van op aardolie gebaseerde transportmethoden geleid tot een belangstelling voor elektrische wagens. Elektrische voertuigen verschillen van voertuigen die op fossiele brandstoffen rijden in die zin dat de elektriciteit die ze verbruiken kan worden opgewekt uit een brede waaier van bronnen waaronder ook fossiele brandstoffen maar ook kernenergie en hernieuwbare bronnen zoals getijdenenergie, zonne-energie en windenergie of eender welke combinatie daarvan.

Conventionele wagens met interne verbrandingsmotoren dragen in grote mate bij aan de luchtvervuiling door de uitstoot van vervuilende stoffen zoals koolstofdioxide (CO₂), stikstofoxide (NO_x) en fijne stofdeeltjes (PM_{2,5} en PM₁₀) (Hausberger, 2010). Een vervanging van conventionele wagens door elektrische wagens kan een positief effect hebben op het milieu en het klimaat door een vermindering in uitstoot van broeikasgassen (vooral CO₂), maar ook op onze volksgezondheid door de vermindering in uitstoot van fijne stofdeeltjes (Thiel et al., 2016). Onderzoekers berekenden dat met de Europese elektriciteitsmix van 2018, de uitstoot van een elektrische wagen slechts de helft bedraagt van de uitstoot van een wagen met een interne verbrandingsmotor (Faria, Moura, Delgado & de Almeida, 2012). Volgens een studie van Cambridge Econometrics zou Europa door de invoer van elektrische wagens goed op weg zijn om de CO₂ uitstoot afkomstig uit auto's met 88% te verlagen tegen 2050. Ook de uitstoot van stikstofoxiden zou kunnen dalen van 1,3 miljoen ton per jaar naar 700.000 ton per jaar (Cambridge Econometrics, 2018).

Koolstofdioxide (CO₂) is een van de belangrijkste broeikasgassen die bijdraagt tot de opwarming van de aarde. Bij de verbranding van fossiele brandstoffen, zoals dat gebeurt in auto's met een interne verbrandingsmotor, komt CO₂ vrij. In 2016 bedroeg de uitstoot van broeikasgassen door de transportsector in Vlaanderen 14.606 kiloton CO₂-eq. Dit bedraagt 19% van de totale broeikasgasemissies. De uitstoot van het wegverkeer (d.i. het goederenverkeer en het personenvervoer) is goed voor 78% van de totale uitstoot van de transportsector (De Coster, 2019). De uitstoot van het wegverkeer blijft echter een stijgende trend vertonen. Tussen 2000 en 2016 stegen de CO₂-emissies van het wegverkeer met 11%. De Vlaamse Milieumaatschappij stelt vast dat personenwagens hier verantwoordelijkheid dragen. Hoewel het aantal verkochte wagens met een lage CO₂-uitstoot blijft stijgen, blijven ook het aantal wagens en het aantal gereden kilometers op jaarbasis groeien. Dit zorgt ervoor dat de totale CO₂-emissies van het wegverkeer nog geen dalende trend vertonen (Vlaamse Milieumaatschappij, 2018b).

Naast een invloed op het milieu hebben voertuigen met interne verbrandingsmotoren ook een invloed op de volksgezondheid. Volgens de VMM is het wegverkeer verantwoordelijk voor 35% van de uitstoot van stikstofdioxide, 33% van de roetuitstoot en respectievelijk 14% en 13% van de fijne stofdeeltjes kleiner dan 10µm (PM₁₀) en 2,5 µm (PM_{2,5}) (Vlaamse Milieumaatschappij, 2018a). Die

fijne stofdeeltjes veroorzaken irritaties en ziekten aan de longen en luchtwegen. Zo berekende het Vlaamse Milieuraapport van 2019 dat de levensverwachting van de Vlaming met 1,2 jaar verkort wordt door een levenslange blootstelling aan het niveau van fijn stof gemeten in 2017 (Vandevenne, 2019). De grootste maatschappelijke kost van fijn stof ligt echter niet bij de vroegtijdige sterftes, maar bij het verhoogde aantal doktersbezoeken, ziekenhuisopnames, medicatiegebruik en onopgemerkte fysische veranderingen (Vlaamse Milieumaatschappij, 2019).

Hoewel elektrische wagens kunnen helpen om de druk op ons klimaat en de volksgezondheid te verlichten is de mate waarin dit gebeurt grotendeels afhankelijk van de elektriciteitsmix die tot stand komt. Zoals hierboven reeds besproken kan de elektriciteit die gebruikt wordt in elektrische wagens worden opgewekt uit een brede waaier aan energiebronnen. Wanneer elektrische auto's conventionele auto's vervangen, vindt er een verschuiving van de uitstoot plaats. De uitstoot van vervuilende stoffen zal toenemen op de plaatsen waar energie geproduceerd wordt terwijl de lokale vervuiling uitgestoten door het voertuig zelf afneemt. Die verschuiving zorgt voor een verschil in het type uitstoot alsook in de grootte en locatie ervan. Die verschillen moeten tegen elkaar worden afgewogen (Thiel et al., 2016). Voor België kan dit problemen opleveren. Door de kernuitstap, die gepland is in 2025, zal België de energie opgewekt uit kernreactoren moeten vervangen door andere energiebronnen die vaak vervuilender zijn dan kernenergie. Dit zorgt voor een toename van de uitstoot bij de introductie van elektrische wagens voor 2030 (Buekers, Van Holderbeke, Bierkens & Int Panis, 2014).

Anno 2019 rijden er in België 5.889.210 personenwagens rond. Daarvan zijn 110.984 hybride wagens en 15.338 rijden volledig elektrisch. Hoewel het aandeel elektrische wagens klein lijkt, neemt dit aandeel jaar na jaar toe. Zo reden er in 2015 slechts 2.871 wagens volledig elektrisch (Statbel, 2019). Toch is er voor de omschakeling naar een groener en elektrisch wagenpark nog veel werk aan de winkel. Naast de kostprijs, die in veel gevallen hoger blijft dan conventionele wagens, geeft autofederatie Febiac aan dat het gebrek aan laadinfrastructuur consumenten ervan weerhoudt een elektrische wagen aan te schaffen (Santens, 2019). Ook in de literatuur bestaat er empirisch bewijs dat de aanwezigheid van oplaadinfrastructuur een belangrijke voorspeller vormt voor de adoptiegraad van elektrische wagens (Sierzchula, Bakker, Maat & van Wee, 2014). België telt in het totaal 10.000 laadpalen. Een kleine helft daarvan staat bij bedrijven, particulieren bezitten 2.500 laadpalen en de overige 3.000 zijn publiek (Vanacker, 2019). Daarmee doet België het een stuk slechter dan buurland Nederland, koploper in Europa. Hoewel de verkoop van residentiële laadinfrastructuur vooral gedreven wordt door de verkoop van elektrische wagens, komt de commerciële variant er door overheidssteun of investeringen van private bedrijven (Bansal, 2015). Hoewel de eigenaars van elektrische wagens voornamelijk private oplaadinfrastructuur verkiezen, is publieke laadinfrastructuur van belang om *range anxiety* te voorkomen (Morrissey, Weldon & O'Mahony, 2016).

Ondanks dat publieke laadinfrastructuur belangrijk is, is deze niet altijd economisch zinvol. De kapitaalkosten zijn hoog en de bezettingsgraad en winstmarge zijn laag (Zhang et al., 2018). Een casestudie uit Duitsland wees uit dat de publieke laadstations niet of weinig winstgevend waren door

de lage adoptiegraad van elektrische wagens en de hoge investeringskost (Schroeder & Traber, 2012). Een andere casestudie uit China wees uit dat ook daar laadstations niet in staat waren om winst te maken. Om winstgevend te worden, zou de prijs voor een laadbeurt met 25% verhoogd moeten worden (Li & Ouyang, 2011). Daarenboven zullen gebruikers rekening moeten houden met langere laadtijden. Het opladen van een elektrische batterij duurt aanzienlijk langer dan het tanken van een conventionele wagen. Zelfs de meest geavanceerde snelladers, zoals de Tesla V3 supercharger, die met zijn 250kw in staat is ongeveer 120 kilometer op te laden in 5 minuten, laden nog steeds minder kilometers per minuut op dan een tankbeurt met een gewone benzinepomp (Tesla, 2019).

1.2 Onderzoeksvragen

Uit de probleemstelling kan opgemaakt worden dat de elektrische wagen vandaag al een plaats in de maatschappij veroverd heeft en een bloeiende toekomst tegemoet gaat. De elektrische wagen en zijn componenten ondergaan ook constante innovaties. Een van die componenten is de laadinfrastructuur, die een centrale rol speelt bij de bruikbaarheid en prestaties van de elektrische wagen. De innovaties rond elektrische wagens zijn echter vaak in elkaar verwickeld. Zo kunnen de recente ontwikkelingen rond autonoom rijdende wagens voordeel putten uit de ontwikkelingen in laadtechnologie. De inductieve laadmethode maakt het mogelijk om elektrische wagens op te laden, zonder dat hier enige menselijke tussenkomst aan te pas komt. Enkel wanneer autonoom rijdende wagens ook zichzelf kunnen opladen, wordt het autonome verhaal volledig sluitend. Echter blijkt, zoals hierboven reeds vermeld, dat laadstations vaak weinig of niet winstgevend zijn. Omdat elektrische wagens niet voor altijd op overheidssteun zullen kunnen rekenen, is het belangrijk dat zowel de elektrische wagens als perifere toepassingen (zoals laadstations) economisch interessant worden en blijven voor de consument. Het is dan ook nuttig om na te gaan of laadstations economisch rendabel kunnen zijn voor exploitanten, wanneer elektrische wagens zich volledig autonoom kunnen verplaatsen. De centrale onderzoeksvraag luidt dan ook:

“Is een inductief laadstation economisch rendabel in een wereld van autonoom rijdende wagens?”

Om deze centrale onderzoeksvraag zo volledig mogelijk te beantwoorden, worden tevens enkele deelvragen opgesteld.

“Wat zijn de verschillende laadtechnieken voor de elektrische wagen?”

Naast de gekende conventionele laadtechniek en het inductieladen bestaan er ook nog batterijswaps. Een bespreking van de verschillende laadtechnieken en hun eigenschappen dragen bij tot een beter begrip hiervan.

“Welke beleidscontext bestaat er rond de elektrische wagen?”

De elektrische wagen veroverd gestaag een grotere plaats in onze maatschappij. Dit brengt niet alleen gevolgen met zich mee voor de eigenaars van elektrische wagens, maar ook voor niet-eigenaars en de overheid. Het beleid van de overheid omtrent elektrische wagens wordt onder de loep genomen. Hiervoor kijken we niet enkel naar Vlaanderen maar ook naar Europa.

1.3 Onderzoeksopzet

Het onderzoek van deze masterproef kent twee stappen. Ten eerste wordt een literatuurstudie uitgevoerd met betrekking tot de elektrische wagen. Deze literatuurstudie tracht een beeld te schetsen over de huidige situatie omtrent de elektrische wagen alsook de evoluties die we zien in deze industrie. Hierbij worden verscheidene laadtechnieken onder de loep genomen alsook het beleid dat gevoerd wordt op verschillende niveaus. De informatie die aan de basis van deze literatuurstudie liggen wordt ingezameld via online zoekmachines en databases zoals Google Scholar en EBSCOhost.

Vervolgens zal er een case study worden uitgevoerd met betrekking tot het inductieladen in het kader van zelfrijdende wagens en de deeleconomie. Aan de hand van een mathematisch model trachten we een inschatting te maken over de rendabiliteit van een netwerk van inductiepaden die kunnen gebruikt worden om autonoom rijdende wagens op te laden.

Hoofdstuk II: Het laden van de elektrische wagen

2.1 De batterij

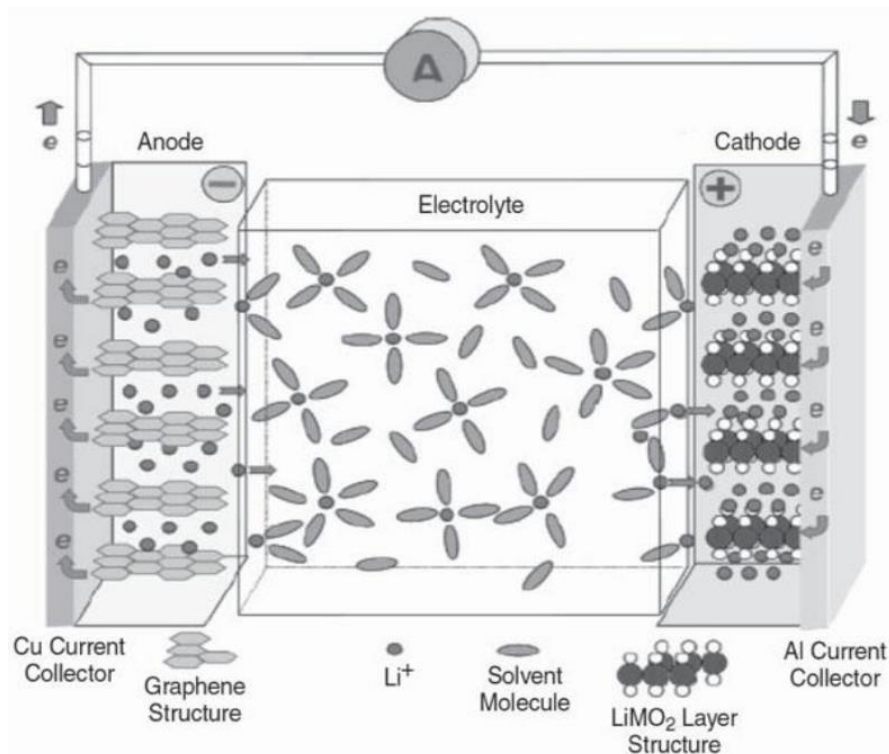
De batterij is een centraal onderdeel van de elektrische wagen. De hoeveelheid energie die in de batterij is opgeslagen bepaalt de actieradius van de wagen. Op dit moment vormt het gebrek aan een grote actieradius een belangrijke beperking voor de adoptie van elektrische voertuigen. Evoluties in batterijtechnologie zullen dan ook een belangrijke rol spelen in de komende jaren. Omdat de meeste elektrische voertuigen lithium-ion batterijen gebruiken zal ook de werking van dit soort batterij besproken worden.

2.1.1 Bestanddelen van de batterij

Lithium-ion batterijen worden gekenmerkt door een hogere energiedichtheid, een lange levensduur en een hogere vermogensdichtheid dan de meeste alternatieve batterijen. Het batterijpakket dat in de elektrische wagen geplaatst wordt is een eindproduct waar verschillende intermediaire producten aan vooraf gaan. We onderscheiden de volgende drie niveaus: de batterijcel, de batterijmodule en het (finale) batterijpakket.

De kleinste, maar belangrijkste component van de lithium-ion batterij is de elektrochemische cel. Die bestaat uit vier belangrijke onderdelen: een kathode en een anode (de elektroden), een separator tussen die twee elektroden en een elektrolyt die de rest van de ruimte in de batterij vult. Zowel de kathode als de anode kunnen lithium ionen opslaan. Ionen zijn atomen met een lading. Deze lading kan zowel positief als negatief zijn door respectievelijk een overschot of tekort aan elektronen. Wanneer de batterijcel ontlad, stromen de lithium ionen opgeslagen in de anode naar de kathode doorheen de elektrolyt. Door de beweging van de lithium ionen naar de kathode ontstaan er vrije elektronen in de anode. De separator zorgt dat de elektronen niet rechtstreeks naar de kathode vloeien, maar een omweg moeten maken. Die omweg bestaat uit het apparaat die de stroming dient te ontvangen (in dit geval de elektromotor van de elektrische wagen). Nadat de deeltjes door het apparaat gepasseerd zijn, worden de elektronen weer opgevangen in de kathode. Wanneer de batterij opgeladen wordt, vindt het omgekeerde proces plaats. Lithium ionen worden dan door de kathode vrijgegeven en door de anode ontvangen (Coffin & Horowitz, 2018; Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, 2017).

Figuur 1: Werking van een lithium-ion batterij



Bron: Overgenomen uit Coffin & Horowitz (2018).

Wanneer meerdere cellen samen in een frame worden geplaatst (bijvoorbeeld om ze te beschermen tegen externe schokken zoals hitte of trillingen) wordt dit een module genoemd. Het aantal cellen dat in een module wordt geplaatst verschilt van fabrikant tot fabrikant. Zo heeft de Samsung SDI-batterij (gebruikt in de Fiat 500e en de BMW i3) 12 cellen in een module terwijl de Nissan Leaf 4 cellen per module gebruikt (Coffin & Horowitz, 2018).

Wanneer een aantal modules samenkomen onder een *Battery Management System* (BMS) en een koelapparaat die de temperatuur, spanning, etc. van de batterij regelt en beheert, spreken we van een batterijpakket. Door meer of minder modules samen te zetten in een batterijpakket, kan een fabrikant inspelen op de noden van de consument. De modulaire aanpak maakt het mogelijk om op een relatief eenvoudige manier te voorzien in verschillende behoeften in actie radii tussen consumenten (Coffin & Horowitz, 2018).

In het komende decennium zullen lithium-ion batterijen waarschijnlijk de batterijmarkt blijven domineren. Toch zijn er een aantal technologische ontwikkelingen die de prestaties van de lithium-ion batterijen kunnen verbeteren. Batterijen met andere bestanddelen (zoals bijvoorbeeld lithium-zwavel, natrium-ion en lithium-lucht batterijen) zijn in staat om betere prestaties te leveren dan de lithium-ion batterij op het vlak van kostprijs, energiedichtheid, levenscyclus etc. Toch slaagt op dit moment geen van deze alternatieve batterijen erin om op al die vlakken tegelijk beter te presteren. Daarenboven moet er ook rekening gehouden worden met de moeilijkheden die zich voordoen bij de uitrol en de *scale-up* van deze nieuwe technologieën. De lithium-ion batterij wordt vandaag de

dag op zeer grote schaal geproduceerd door fabrikanten die, naast aanzienlijke investeringen, ook al veel ervaring hebben met de huidige productietechnologie (IEA, 2020).

2.1.2 Kostprijs en verbruik

Bij een conventionele wagen hangt de actieradius af van de inhoud van de tank (liter) en het verbruik van de wagen (l/100 km). Voor een elektrische wagen wordt dit uitgedrukt in respectievelijk de capaciteit van de batterij (kWh) en het verbruik (kWh/100km). De meeste elektrische wagens slagen erin om met 15 kWh 100 kilometer af te leggen (Virta, 2018). Een elektromotor kan ongeveer 90% van de energie die hij opwekt omzetten in drijfkracht. Dat is een groot verschil in vergelijking met een brandstofmotor, die slechts 25 tot 30% van de brandstof omzet in aandrijving. De rest van de energie gaat verloren als warmte (EVdatabase, s.d.). In 2019 bedroeg de gemiddelde benzineprijs in ons land (loodvrij super 95) 1,4574 €/liter (Ondernemingsdatabank, 2020). De prijs van een kWh elektriciteit is vaak afhankelijk van het verbruik. De VREG berekende dat in 2019 42% van de Vlaamse huishoudens een verbruik hadden dat overeenstemt met het Europese referentieprofiel Dc (VREG, 2020). Dit is het profiel met het laagste jaarverbruik. Zij betalen dan ook meer per kWh dan de andere profielen. Voor hen bedroeg het gemiddelde tarief in januari 2019 0,39 €/kWh. Met deze informatie kunnen we een vergelijking maken van de kostprijs per 100 km.

Tabel 1: Kostprijsvergelijking per 100km

	Benzinewagen	Elektrische wagen
Gemiddeld verbruik	5 liter/100km	15 kWh/100km
Gemiddelde prijs	€1,4574 €/liter	0,39 €/kWh
Totale kost	7,287 €/100km	5,85 €/100km

Een bestuurder die jaarlijks 15.000 km aflegt zal dus gemiddeld 1093,05 euro uitgeven aan brandstofkosten bij een benzinewagen tegenover 877,5 euro bij een elektrische wagen.

Hoewel er een besparing optreedt tijdens de levenslengte van een elektrische wagen blijft deze vaak duurder bij de aankoop. Bij de aankoop ondergaat de consument met zekerheid een hogere kost vandaag voor een onzekere besparing in de toekomst. De grootte van de besparing hangt immers af van verschillende factoren zoals de meerprijs van benzine ten opzichte van elektriciteit en het aantal gereden kilometers. Verder blijkt uit onderzoek in de gedragseconomie dat mensen meer gewicht geven aan huidige gebeurtenissen dan aan toekomstige gebeurtenissen. In de aankoopbeslissing zal de extra kost van de elektrische wagen dan ook meer gewicht krijgen dan de besparingen die deze oplevert in de toekomst (Frederick, Loewenstein & O'Donoghue, 2002). De meerprijs die men moet betalen bij de aankoop werd dan ook (samen met de actieradius) door McKinsey onderlijnt als de grootste barrière tot een bredere adoptie van elektrische wagens bij de consument (McKinsey, 2017).

Onderzoekers voorspellen echter dat de meerprijs voor elektrische wagens in het volgende decennium zal verdwijnen. De kost van de batterij speelt hierbij een belangrijke rol. Tussen 2010 en 2018 daalde de kostprijs van een batterijpak met ongeveer 85%. Zo bedroeg de kostprijs per kWh in 2010 gemiddeld 1160 \$/kWh. In 2018 bedroeg de kostprijs per kWh 176 \$/kWh om in 2019 verder te dalen tot \$154 \$/kWh. Analisten voorspellen dat deze dalende trend zich verderzet, en de kostprijs in 2023 100\$/kWh bereikt. Dit is een belangrijke drempelwaarde. Rond deze prijs zouden elektrische wagens prijspariteit bereiken met conventionele wagens, waardoor de meerprijs die de consument moet betalen verdwijnt (Goldie-Scot, 2019; Henze, 2019). Een andere maatstaf is het aandeel van de batterij in de totale kost van de wagen. In 2015 was de batterij nog verantwoordelijk voor 57% van de totale kost. Er wordt voorspelt dat dit aandeel tegen 2025 zal dalen tot 20% (Bullard, 2019).

De consument betaalt echter niet de kostprijs van de batterij. Lee & Clark beschrijven de kostprijs voor een batterij in de verschillende productiestadia, van het aankopen van de batterijcellen tot de uiteindelijke prijs van een batterijpakket voor de consument. Zij schatten dat de prijs die de consument betaalt \$130 hoger ligt dan de kost voor de batterijcel (Lee & Clark, 2018).

Tabel 2: Kostprijsvergelijking per 100km

Productiefase	Geschatte kost per kWh
Kost van de batterijcellen	\$145
Conversie van cellen naar batterijpakket + installatie in de wagen	\$215 - \$245
Kost voor de consument	\$245 - \$345

Bron: Eigen verwerking uit Lee & Clark (2018).

De exacte prijs verschilt echter tussen de fabrikanten en is afhankelijk van de *supply chain*, de gehanteerde mark-up en de schaal waarop de batterijen geproduceerd worden. Lee & Clark gaan er echter van uit dat in dit interval een bepaalde korting aanwezig is die fabrikanten doorrekenen om de vraag naar elektrische wagens te stimuleren, marktaandeel te veroveren en ervaring op te doen met het bouwen van elektrische wagens. Dit betekent dat fabrikanten geen financieel duurzame winstmarge doorrekenen aan de consument. Wanneer dit wel zou gebeuren, schatten zij de prijs voor de consument in tussen de \$300 en \$400 per kWh (Lee & Clark, 2018).

Huidige innovaties in de batterijmarkt zijn zowel gericht op het drukken van de kosten verbonden aan de productie als op het verhogen van de waarde ervan. Dit is een concept dat in de literatuur bekend staat als *Value Innovation* (Dervitsiotis, 2008; Smith, 2019). De intrinsieke waarde van en de technologie in een batterij bevatten *an sich* zeer weinig waarde voor de consument. Een consument is geïnteresseerd in de prestatie die een elektrische wagen kan leveren ten gevolge van de batterij. Deze prestatie bestaat onder andere uit de actieradius van de wagen. De actieradius kan

verhoogd worden door het plaatsen van een batterij met een grotere capaciteit. *Ceteris paribus* zorgt dit ervoor dat de batterij zwaarder zal worden en meer volume zal innemen, wat een negatief effect heeft op de actieradius van de wagen. Om de capaciteit te verbeteren zonder het volume te vergroten kan men verbeteringen maken op chemisch niveau. Elektroden van een batterijcel kunnen verbeterd worden om ze in staat te stellen een grotere hoeveelheid energie op te slaan. Een andere mogelijkheid is om te werken aan de manier waarop de modules in een batterij zijn gerangschikt om het volume dat aan de cellen wordt gegeven te maximaliseren (Renault, 2019). Het Internationaal Energie Agentschap (IEA) schat dat de gemiddelde actieradius tegen 2030 350 tot 400 km zal bedragen. Dat komt overeen met een batterijgrootte van 70 tot 80 kWh (IEA, 2020).

Naast de capaciteit wordt het bereik van een elektrische wagen ook beïnvloed door de omstandigheden waaronder de batterij werkt. Zo verhoogt een koude omgeving de interne weerstand van de cellen in de batterij, waardoor de beschikbare energie en output vermindert. Ook de verwarming van de auto bij koude temperaturen verbruikt energie van de batterij, waardoor de actieradius afneemt. Auto's met verbrandingsmotor voorzien in deze behoefte met warmte van de motor, maar elektrische voertuigen moeten hiervoor een deel van hun batterijcapaciteit gebruiken (Renault, 2019).

2.1.3 Recyclage

Volgens het IEA zullen er tegen 2030 naar schatting 100 tot 120 GWh aan accu's voor elektrische voertuigen buiten gebruik gesteld worden. Dit volume is ongeveer gelijk aan de huidige jaarlijkse batterijproductie. Naarmate het volume van gebruikte batterijen toeneemt, zal de ontwikkeling van een doeltreffende recyclingindustrie de sleutel vormen tot de duurzaamheid van lithium-ion batterijen. Door middel van een recyclagesysteem kunnen essentiële materialen worden teruggewonnen. Hierdoor kan er een neerwaartse druk worden gezet op de vraag naar nieuwe grondstoffen, de uitstoot van broeikasgassen en de negatieve lokale effecten van mijnbouw en raffinage. Tot nu toe zijn de economische levensvatbaarheid en marktprikkels voor recycling beperkt gebleven. Dit gebrek aan economische prikkels vloeit voort uit lage grondstofprijzen en de kleine hoeveelheid gebruikte batterijen uit elektrische voertuigen tot nu toe. Goedkope grondstofprijzen zorgen voor een (te) klein prijsverschil tussen de ontginning van nieuwe grondstoffen en het hergebruiken van reeds ontgonnen grondstoffen. Om deze grondstoffen uit hun vorige toepassingen te onttrekken, zijn heel wat complexe processen nodig. Een groeiende markt voor elektrische voertuigen biedt echter een oplossing. Wanneer de primaire ontginningsbronnen onder druk gezet worden door een toenemende productie, kunnen de grondstofprijzen stijgen en/of volatieler worden. Zo zouden materialen die door recycling worden teruggewonnen prijscompetitief kunnen worden. Naast de economische waarde kan ook de strategische waarde van essentiële grondstoffen recycling stimuleren en het recyclingbeleid sturen. Zo stelt binnenlandse recycling landen in staat om hun afhankelijkheid van de invoer van essentiële materialen uit het buitenland te verminderen (IEA, 2020).

2.2 Laadtechnieken

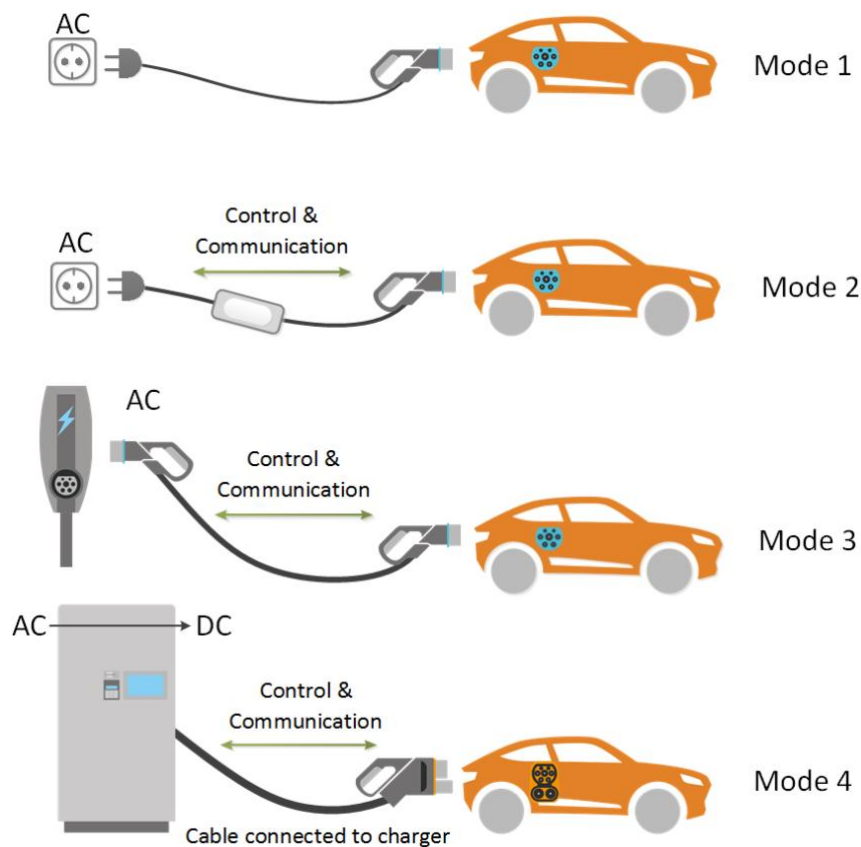
Om elektrische wagens tot een commercieel succes te laten evolueren, zal ook oplaadinfrastructuur nodig zijn die toegankelijk, makkelijk in gebruik en zo goedkoop mogelijk is. Het gebrek aan toegang tot laadinfrastructuur die de elektrische wagen kan opladen binnen een aanvaardbare tijdsduur blijft een van de grootste hinderpalen voor de adoptie van elektrische wagens. Welke vorm deze laadinfrastructuur in de toekomst zal aannemen, is nog onzeker. Zo zijn er vandaag verschillende laadtechnologieën beschikbaar en in ontwikkeling en is er geen consensus over welke laadtechniek binnen 30 jaar de meest effectieve zal zijn (Lee & Clark, 2018). Zo bestaan er naast de gekende conductielading (het laden met behulp van een kabel) ook andere laadmethoden zoals het contactloos laden met behulp van een inductielader of het wisselen van de volledige batterij, dewelke we in dit hoofdstuk zullen bespreken.

2.2.1 Conductief laden

Elektrische wagens worden meestal opgeladen via huishoudelijke stopcontacten of speciale oplaadstations. Dit proces neemt meestal enkele uren in beslag, tenzij er wordt geladen met een snellader, en wordt daardoor vaak 's nachts uitgevoerd. De wagen staat dan gedurende lange tijd stil. Door de invoering van laadnetwerken in grote steden en initiatieven van werkgevers kunnen bestuurders hun elektrische wagens ook tijdens de werkuren aansluiten op het net. Hierdoor vergroot het mogelijke bereik van het woon-werkverkeer en verkleint de angst van de bestuurder om zonder voldoende lading te vallen.

De internationale norm IEC 62196 onderscheidt vier categorieën (of modi) die de kenmerken van de verschillende laadtypes voor zowel elektrische voertuigen als hun laadapparatuur beschrijven. Bij mode 1 wordt het voertuig op het elektriciteitsnet aangesloten via normale stopcontacten in woningen waarvan de spanning, afhankelijk van het land, meestal rond de 10A ligt. Om mode 1 te kunnen gebruiken, moet de elektrische installatie een aardingssysteem, een stroomonderbreker en een aardlekschakelaar bevatten. De beperking van deze mode ligt hem in het beschikbare vermogen. Dat ligt erg laag teneinde de verwarming van het stopcontact en de kabels en brand tegengaan. Om van mode 1 naar mode 2 te gaan, moet er een extra veiligheid in de kabel worden ingebouwd die de stroomtoevoer automatisch afsluit indien er kortsluiting optreedt. Mode 3 is de meest aanbevolen methode voor het dagelijks opladen. De wagen wordt niet meer aangesloten op het huishoudelijke stopcontact, maar wordt direct op het elektriciteitsnet aangesloten via een gespecialiseerd laadpunt. Tussen het laadpunt en de wagen vloeit ook een communicatielijn die ervoor zorgt dat de hoeveelheid lading die naar de wagen vloeit kan worden aangepast. Mode 4 is ook wel gekend onder de term "snelladen". De elektrische wagen wordt via een externe lader op het hoofdnet aangesloten. De omzetting van wisselspanning (AC) die het net levert naar gelijkspanning (DC) die nodig is om de wagen te laden gebeurt nu in de lader. Dit betekent dat de gelijkspanning meteen naar de batterij loopt. Bij modi 1-3 gebeurt deze omzetting met behulp van een convertor in de wagen zelf. Die conversie vormt vaak een flessenhals (Gaton, 2019; Rata et al., 2019).

Figuur 2: Verschillende laadmodi van de elektrische wagen



Bron: Figuur overgenomen uit Deltrix (s.d).

De tijd waarin de wagen kan opgeladen worden is afhankelijk van de accucapaciteit en het laadvermogen. Het laadvermogen is op zijn beurt weer afhankelijk van de stroomsterkte (Ampère) en de spanning (Volt) die met elkaar vermenigvuldigd dienen te worden om de stroomsterkte te bekomen. De laadtijd kan dan worden berekend door de accucapaciteit te delen door het laadvermogen.

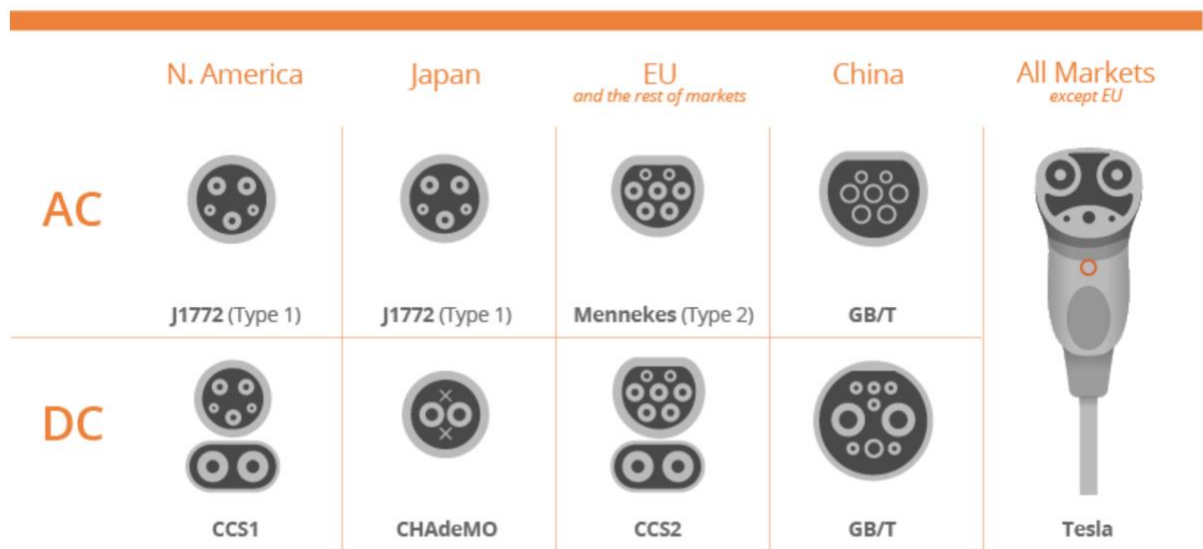
Tabel 3: Conductieve laadmodi en hun vermogen in België

Mode	AC/DC	Fase	Stroomsterkte	Spanning	Laadvermogen
Mode 1	AC	Een	16 A 32 A	230 V	3,7 kW 7,4 kW
		Drie	16 A 32 A	400 V	11 kW 22 kW
Mode 2	AC	Een	16 A 32 A	230 V	3,7 kW 7,4 kW
		Drie	16 A 32 A	400 V	11 kW 22 kW
Mode 3	AC	Drie	3x 16 A 3x 32 A	400 V	11 kW 22 kW
Mode 4 (CCS 2 kabel)	DC	N.v.t	400 A	600 V	170 kW

Bron: Eigen verwerking uit Blue Corner (s.d.) en Spöttle et al. (2018)

Om de laadinfrastructuur met de elektrische wagen te verbinden, is er een bepaalde connectie nodig. In Europa wordt deze connectie grotendeels gestandaardiseerd door de zogenaamde Type 2-connector (ook wel gekend onder de naam "Mennekes") waarvan alle publieke laadinfrastructuur voorzien wordt. Om het snelladen te ondersteunen moet de elektrische wagen ook compatibel zijn met de zogenaamde combinatieconnector (CCS 2). Deze connector voegt extra contactpunten toe aan de Type 2-connector.

Figuur 3: Verschillende typen laadconnectoren



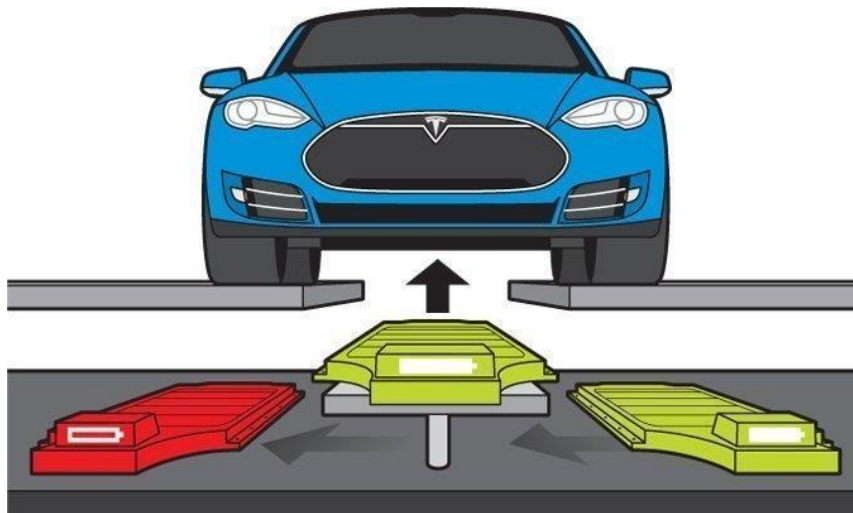
Bron: Figuur overgenomen uit Enel X (s.d.).

2.2.2 Swaps

Hoewel men de wagen relatief makkelijk conductief kan opladen thuis of op het werk (indien de infrastructuur aanwezig is), is het zeer onpraktisch om de wagen een aantal uur op te laden tijdens langere trips waarbij de te rijden afstand groter is dan de capaciteit van een volgeladen batterij. Batterijswaps laten toe om een elektrische wagen weer "op te laden" in enkele minuten in plaats van enkele uren. In zogenaamde swapping stations kunnen bestuurders hun lege batterijen wisselen voor opgeladen batterijen. De lege batterijen worden vervolgens opgeladen in het station en aan de volgende gebruiker aangeboden. Dit heeft tot gevolg dat de eigenaar van de elektrische wagen niet de eigenaar van de batterij kan zijn. Batterijen worden namelijk constant uitgewisseld. In plaats van het eigenaarschap over de batterij te hebben, verkrijgt de bestuurder het gebruiksrecht tot de batterij via een leasingcontract. Dit biedt verschillende voordelen. Zo gaat de batterij minder lang mee dan de rest van een elektrische wagen. Door een leasing systeem kunnen gebruikers ook voordeel halen uit verbeterde batterijtechnologieën. De oude batterijen in de stations kunnen namelijk vervangen worden door de nieuwere versies. Ook de aankoopprijs van de wagen, een hoge kost die de eigenaars *upfront* moeten betalen, kan naar beneden aangezien de bestuurders niet langer eigenaar zijn van de batterij maar deze leasen (Mak, Rong & Shen, 2013).

Het verwisselen van de batterijen vergt echter een bepaalde standaardisering wat betreft de toegang tot de batterij, de bevestiging, de afmetingen, de locatie en het type batterij. In 2013 kondigde Tesla een eigen laadservice aan om eigenaars van Tesla-voertuigen te ondersteunen. Een netwerk van Superchargers zou batterijswaps voor de model S ondersteunen alsook conductieve snelladers voor zowel de model S als de Roadster. Tesla heeft echter haar swappingambities opgegeven om zich volledig te focussen op conductieve snelladers. Toch ziet China een toekomst in de batterijswap. De Chinese overheid werkt momenteel aan een standaardisering van de swapprocedure. Hierdoor zullen de eigenaars van elektrische wagens met verwisselbare batterijen in elk wisselstation hun batterij kunnen vervangen, ongeacht het merk van de wagen. De macht die de Chinese overheid hierin heeft, mag niet onderschat worden. De helft van de elektrische wagens die wereldwijd verkocht worden, belanden in China. Indien de Chinese overheid erin slaagt om de swappingsprocedure te standaardiseren en de productie stuurt in de richting van elektrische wagens met verwisselbare batterijen, heeft dit een effect op een groot deel van de markt voor elektrische wagens. Chinese autofabrikanten als BAIC en NIO bieden al een swapping-service aan op de Chinese markt. Zo kondigde NIO op 26 mei 2020 aan dat het bedrijf erin geslaagd was 500.000 batterijswaps uit te voeren. De volledige procedure neemt slechts 3 minuten in beslag (Bloomberg, 2020; Lambert 2020).

Figuur 4: Batterij swap illustratie



Bron: *Figuur overgenomen uit Graber, G. (2016).*

Toch blijft de vraag of een swappingstation rendabel kan zijn. Een studie voor de Europese Commissie voor Transport en Toerisme (TRAN) schat dat de installatie van een swappingstation €400.000 zou kosten. Een andere uitdaging is het onderhouden van de batterijen. De batterijen van elektrische wagens zijn in constante evolutie. De consument voorzien van de nieuwste batterijtechnologie door het swappen naar een nieuwere batterij is erg kostelijk (Spöttle et al., 2018).

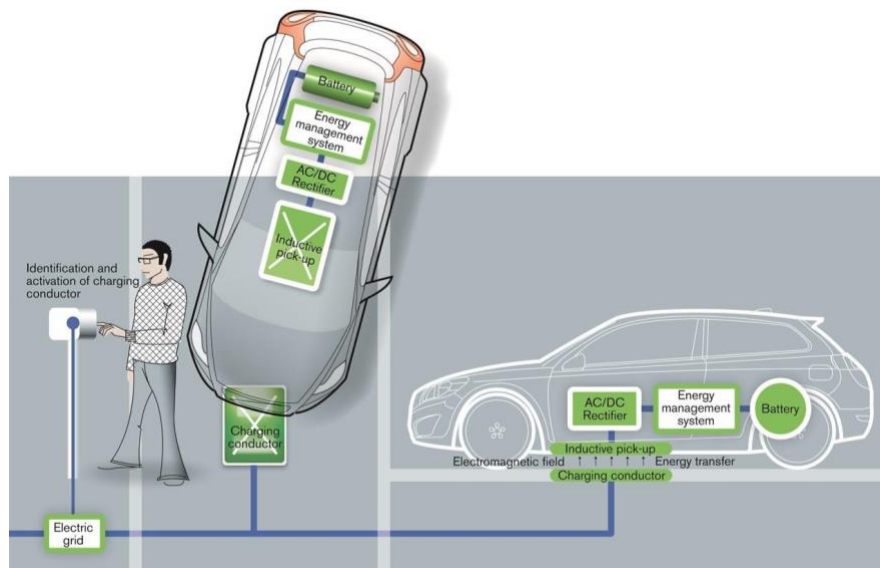
2.2.3 Inductief laden

De inductieve laadmethode wordt al toegepast in kleine elektronica zoals gsm-toestellen en tandenborstels onder de noemer "draadloos opladen". Deze laadmethode steunt op het principe van inductieve koppeling, waarbij een magnetisch veld wordt gecreëerd door elektrische stroom doorheen een spoel te sturen. Wanneer een tweede spoel (bijvoorbeeld die van een elektrische wagen) in de buurt van de eerste wordt geplaatst, vindt er een overdracht van energie plaats. Met andere woorden, het apparaat met de tweede spoel wordt opgeladen (Bansal, 2015).

Vergeleken met conductief laden biedt de inductieve laadmethode enkele voordelen. Een van die voordelen is het gebruiksgemak. Bij slecht weer hoeft de bestuurder de wagen niet te verlaten om die op te laden. Ook kan de bestuurder niet vergeten om de kabel in te steken. Wanneer de auto gepositioneerd is boven een laadpad zal deze automatisch opladen. Wanneer inductiepaden worden aangebracht op de openbare weg of private parkeerplaatsen, zijn ze ook beter beschermd tegen vandalisme dan laadpalen aangezien de pads ingekapseld zijn in de grond. Dat de pads verborgen zijn in de grond betekent ook dat de pads geen impact hebben op het uitzicht in de stad. Dit in tegenstelling tot conductief laden, waarbij fysieke laadpalen moeten geïnstalleerd worden in de openbare ruimte. Openbare laadinfrastructuur vormt ook een struikelgevaar voor ouderen of slechtzienden wanneer de laadkabel over het trottoir heen ligt (European Green Vehicle Initiative, 2014).

Net zoals bij de conductielading en de batterijswap dient er enige vorm van standaardisatie aanwezig te zijn om eenzelfde inductielader te kunnen gebruiken met verschillende modellen en merken. Zo verschilt vaak de afstand van de bodem van de wagen tot de grond van model tot model, zelfs bij dezelfde fabrikant. Een inductielader moet hiermee kunnen omgaan. De Society of Automotive Engineers (SAE) publiceerde in 2017 een eerste standaard met criteria voor elektromagnetische compatibiliteit, de minimumprestatie, veiligheid en testprocedure van inductieladers voor elektrische wagens (Spöttle et al., 2018).

Figuur 5: Illustratie inductief laden



Bron: Figuur overgenomen uit Volvo (2019).

De verdere ontwikkeling van de inductieve laadtechnologie kan leiden tot vele interessante toepassingen in de toekomst. Een van die toepassingen, die nu slechts op kleine experimentele schaal bestaat, is zogenaamde opladen *en-route*. Deze toepassing maakt het mogelijk om elektrische voertuigen op te laden terwijl ze stilstaan voor een verkeerslicht, een bushalte of een wachtplaats voor taxi's. Dit laatste voorbeeld is al uitgerold in Oslo, waar een taxi tot 75 kWh kan opladen terwijl hij wacht op een volgende passagier, gewoon door zich te positioneren in de toegewezen wachtrij (Statt, 2019). Hoewel het bij de conductieve laadmethode zeer onpraktisch is om deze korte tijdspannes te gebruiken het voertuig op te laden, maakt de inductieve methode dit wel mogelijk. Door deze kleine tijdspannes te gebruiken om de wagen op te laden, kan de actieradius vergroot worden. Specifiek wordt deze vorm statische inductieve *en-route charging* genoemd, aangezien de wagen stilstaat tijdens het laden. In een verre toekomst, wanneer inductiepaden vele vereteringen ondergaan zijn, zou het ook mogelijk worden om een dynamische *en-route charging* op te zetten. Dit houdt in dat de wagen kan opladen terwijl deze zich voortbeweegt. Dit kan bijvoorbeeld in een rijstrook op de autosnelweg die wordt uitgerust met inductiepaden op een periodieke afstand. Wanneer de elektrische wagen over de inductiepaden heen rijdt, zal er in die korte tijdspanne een hoeveelheid stroom naar de batterij vloeien. Idealiter zou die hoeveelheid stroom even groot of zelfs groter zijn dan wat de wagen op dat moment verbruikt (European Green Vehicle Initiative, 2014).

Hoofdstuk III: Beleid

In dit hoofdstuk wordt de beleidscontext rond elektrische wagens besproken. Hoofdstuk 3.1 schetst een globaal beeld over het beleid en verantwoordt de tussenkomst van de overheid in de markt van elektrische wagens. In hoofdstuk 3.2 kijken we wat de internationale en Europese trends zijn binnen ons domein. We nemen ook de beleidscontext in België onder de loep en vergelijken deze met de landen die in Europa het voortouw nemen: Nederland en Noorwegen.

3.1 Oriëntatie

Beleidsmaatregelen die overheden nemen met betrekking tot elektrische voertuigen verschillen sterk van land tot land. Zo kunnen overheden verschillen in de intensiteit van de maatregelen die ze nemen, alsook in de oriëntatie van deze maatregelen. Beleidsmaatregelen kunnen zich toespitsen op de aanbodzijde van de economie, alsook op de vraagzijde. Maatregelen die zich richten op de aanbodzijde uiten zich vaak in de vorm van subsidies voor fabrikanten en fiscale aftrekposten voor onderzoek en ontwikkeling (O&O) (Alkemade et al., 2011). Bedrijven doen aan O&O wanneer ze bijvoorbeeld extra opbrengsten verwachten door de verkoop van nieuwe producten of kosten besparen door een efficiënter productieproces. In een normale kapitaalmarkt zou een bedrijf in staat moeten zijn kapitaal te vinden voor (voldoende) winstgevendende projecten. Het is echter mogelijk dat O&O niet alleen voordelen heeft voor het bedrijf dat erin investeert, maar ook voordelen met zich meebrengt voor andere bedrijven of voor de maatschappij waarin ze zich bevindt. In economisch jargon spreken we dan over positieve externe effecten. De ontwikkeling en verbetering van elektrische wagens en nieuwe batterijtechnologieën brengen niet alleen private baten met zich mee voor het producerende bedrijf, maar ook sociale baten voor de maatschappij. Het investerende bedrijf zal echter enkel haar private kosten en baten in rekening nemen in haar investeringsbeslissing. De totale baten zullen daardoor onderschat worden. Dit zorgt ervoor dat er minder in O&O geïnvesteerd wordt dan sociaal gewenst. We kunnen dus spreken van een marktfaling (Salmenkaita & Salo, 2002).

Om deze discrepantie tussen het private en sociale optimum weg te werken, kan een overheid beslissen om te interveniëren. De interventie van een overheid in het prijsmechanisme, door bijvoorbeeld taksen en subsidies, beoogt een wijziging in de allocatie van schaarse middelen naar een toestand die zorgt voor meer sociale welvaart. Een subsidie voor elektrische voertuigen kan dus verantwoord worden door de positieve externaliteiten die zij met zich meebrengen. Zo stoten elektrische voertuigen geen CO₂ of fijn stof uit en verplaatsen ze zich bijna geruisloos over het wegennet (Wesseling, 2016).

Ook zijn er maatregelen die zich toespitsen op de vraagzijde van de economie. Deze maatregelen trachten lokale en globale emissies te verminderen door de adoptie van nieuwe, milieuvriendelijke technologieën. Voorbeelden zijn taksen en subsidies op bijvoorbeeld de verkoopprijs van de wagen. Een taks op wagens met een interne verbrandingsmotor kan worden verantwoord door het principe van negatieve externaliteiten. De impact die dit soort wagens hebben op het milieu zit vaak niet of

te weinig in de prijs verrekend. De aankoop en het gebruik van conventionele wagens brengt niet enkel kosten met zich mee voor de eigenaar, maar ook voor de maatschappij. Zo zullen de aankoopssom en de operationele kosten (brandstof, onderhoud, ...) ten laste vallen van de eigenaar terwijl de kosten van milieu en gezondheid afgewenteld worden op de maatschappij. De eigenaar van de wagen zal echter enkel zijn private kosten en baten in rekening nemen in de aankoopbeslissing. De totale kosten zullen daardoor onderschat worden. Dit zorgt ervoor dat er meer auto's aangekocht worden dan sociaal gewenst. Door een taks te heffen boven op de verkoopprijs van de wagen probeert de overheid de maatschappelijke kosten in de prijs te verrekenen (Sandén & Azar, 2005).

Landen als Noorwegen, waarover later meer, laten zien dat betrouwbare, stabiele en significante belastingvoordelen elektrische wagens economisch zeer aantrekkelijk maken. Een gevolg hiervan is dat ook de adoptiegraad positief beïnvloed zal worden. Toch is het nodig om zowel te subsidiëren als te taxeren. De stimulerende maatregelen dienen namelijk gefinancierd te worden. Werken langs beide kanten zorgt voor een beleid dat de elektrische wagen stimuleert, maar ook budgettair verantwoord is (Wappelhorst & Pniewska, 2020).

3.2 (Inter)nationale kijk

Landen spenderen gemiddeld 0.0063% van hun BBP aan beleid rond elektrische voertuigen en daaraan gerelateerde industrieën (zoals de ontwikkeling van batterijen en infrastructuur). Van die 0.0063% gaat gemiddeld 50% naar onderzoek en ontwikkeling, 12% naar infrastructuur en 38% naar verkoopsubsidies. Toch verschillen deze cijfers sterk van land tot land. Zo spenderen Noorwegen en Nederland, met beiden ongeveer 0,018% van hun BBP, beduidend meer dan andere landen. Ze zijn dan ook koplopers in Europa. Of landen het zwaartepunt leggen bij investeringen in onderzoek en ontwikkeling of bij verkoopsubsidies kan volgens Wesseling verklaard worden door het aandeel dat de auto-industrie heeft in de nationale economie. Een grotere auto-industrie correleert positief met overheidssubsidies voor onderzoek en ontwikkeling en negatief met verkoopsubsidies. Landen met een grotere auto-industrie (zoals bijvoorbeeld Duitsland) kiezen dus om te investeren in de ontwikkelingscapaciteiten van de binnenlandse industrie. Landen met een zwakke auto-industrie zetten daarentegen in op de adoptie van elektrische wagens door middel van verkoopsubsidies (Wesseling, 2016).

In 2019 werden meer dan 90% van de wereldwijde aankopen van elektrische wagens ondersteund door overheidsstimuli (IEA, 2020). Hoewel overheidssubsidies een cruciale rol hebben gespeeld in het stimuleren van de overgang naar elektrische mobiliteit, wijzen subsidieverlagingen en -afschaffing in enkele belangrijke automarkten (zoals de Verenigde Staten en China) op een verschuiving naar beleidsbenaderingen die eerder steunen op regelgevende en fiscale maatregelen ter ondersteuning van elektrische voertuigen. Ook Europa kiest voor een regelgevend beleid. Door het opleggen van Euronormen en emissiestandaarden tracht ze autofabrikanten ertoe aan te zetten meer milieuvriendelijke (en elektrische) wagens te fabriceren. Vanaf 2021 hanteert Europa een emissienorm voor nieuwe wagens van gemiddeld 95g CO₂/km, berekend over alle wagens van de

fabrikant die worden ingeschreven in dat jaar. In 2020 zal de emissienorm al gefaseerd in werking treden. De maximale emissienorm wordt dan niet berekend over het alle wagens die worden ingeschreven, maar slechts over de 95% nieuwste auto's met de laagste uitstoot. Vanaf 2021 moet de gemiddelde uitstoot van alle auto's die worden ingeschreven van een fabrikant binnen de doelstelling liggen. Als de gemiddelde CO₂-uitstoot van het wagenpark van een fabrikant in een bepaald jaar hoger ligt dan de doelstelling, wordt de fabrikant gesanctioneerd door middel van geldboetes (Europese Commissie, 2019).

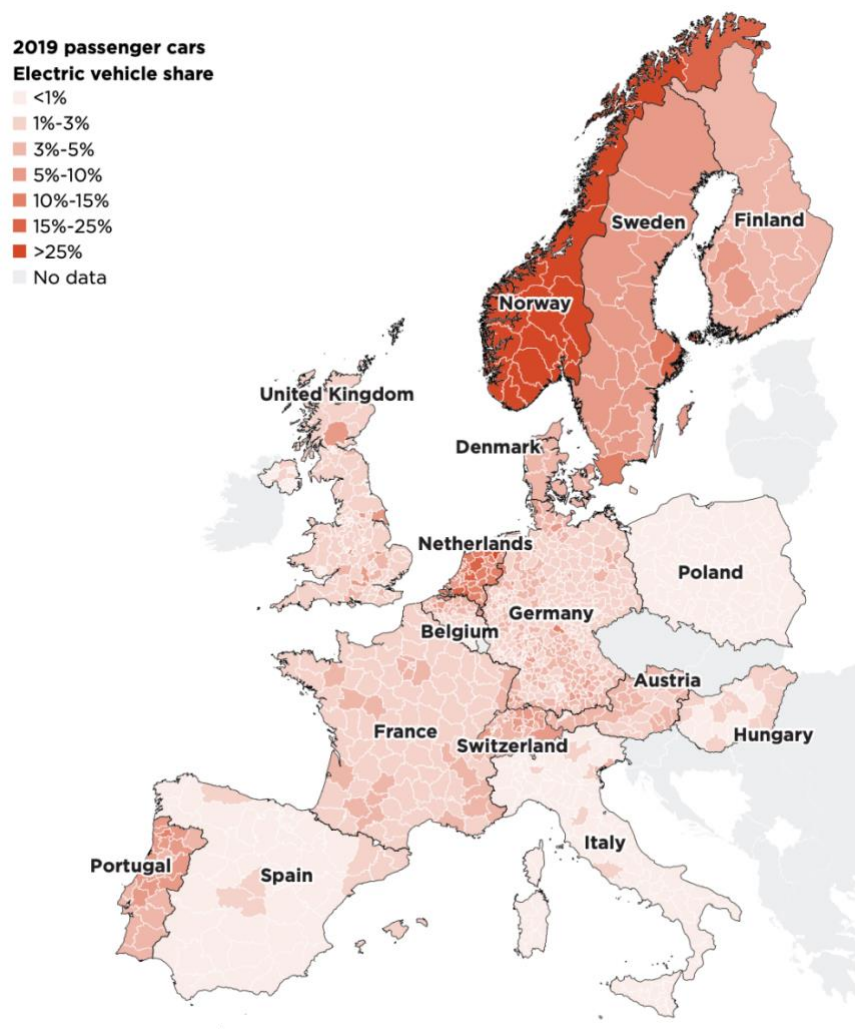
Uit een eerste evaluatie blijkt dat de meeste autofabrikanten dit jaar geen boetes zullen betalen. Enkel Daimler, de moedergroep boven Mercedes, en Jaguar Land Rover zouden in de gevarezone zitten. Deze fabrikanten hebben dan ook veel vervuilende wagens in hun assortiment. Ook de Volkswagengroep moet nog een kleine inspanning doen, al wordt verwacht dat met de verkoop van de nieuwe ID.3 de kloof snel gedicht zal worden. Dat de targets gehaald worden kan worden toegeschreven aan de bijkomende inspanningen van fabrikanten. De fabrikanten verbeterden ofwel de milieuprestaties van hun interne verbrandingsmotoren of verkochten veel hybride wagens. De Europese autofederatie ACEA stelt dat er in de eerste helft van 2020 296.444 elektrische wagens of plug-in hybriden verkocht werden, wat een stijging inhoudt van 77% ten opzichte van de eerste jaarihelft van 2019. Die groeiende verkoop heeft ook een positieve impact in ons land. De CO₂-uitstoot voor nieuwe wagens is in 2020 voor het eerst gedaald. In de eerste helft van 2020 bedroeg de uitstoot voor nieuwe auto's in België 112,6 gram CO₂ per kilometer ten opzichte van 121,2 gram CO₂ per kilometer in 2019 (Vanacker, 2020). Dat is opmerkelijk aangezien zware en vervuilende SUV's de laatste jaren erg populair waren in heel Europa. In de eerste jaarihelft van 2020 klom de verkoop van vervuilende SUV's nog tot 39% van de verkochte wagens. Zo zou ook vier op de tien Belgen een SUV bezitten. De Europese Federatie voor Transport en Milieu (T&E) stelt dan ook vast dat een achterpoortje in de Europese wetgeving ervoor zorgt dat de verkoop van zware voertuigen de fabrikanten minder strenge CO₂-doelstellingen oplevert (Bowers, 2020).

De elektrificatie van ons wagenpark krijgt dus een centrale rol in de strategieën van autofabrikanten. Een emissienormering op Europees niveau vormt een voorbeeld van beleid dat de auto-industrie aanmoedigt om uitstootvrije wagens aan te bieden aan de consument en tegelijkertijd verder te investeren in de ontwikkeling van groene technologieën (Transport & Environment, 2020a).

Toch moeten we vaststellen dat zowel de adoptie van de elektrische wagen als de beschikbaarheid van publieke laadinfrastructuur nog (sterk) ongelijk verdeeld is tussen de lidstaten. Noorwegen (56%), Nederland (15%) en Zweden (11%) kennen de hoogste adoptiegraad van elektrische wagens (Hall, Wappelhorst, Mock, & Lutsey, 2020). Tegelijkertijd bedraagt in vele Oost-Europese landen het marktaandeel minder dan 1%. Ook de laadinfrastructuur kent een gelijkaardige verdeling. Er zijn vier landen (Nederland, Frankrijk, Duitsland en het Verenigd Koninkrijk) die samen slechts 27% van het Europese grondgebied bezetten, maar wel meer dan 75% van de totale laadinfrastructuur bezitten. Van de 199.825 beschikbare laadpunten in de Europese Unie in 2019 bevond 25% (50.824) zich in Nederland, 20% (40.517) in Duitsland, 15% (30.367) in Frankrijk en 14% (28.538) in het Verenigd Koninkrijk. Nederland, het land met de meeste laadinfrastructuur, bezit zelfs 1000 keer

meer laadpunten dan Cyprus, met 38 laadpunten het land met de minste laadpunten. Ook het totaal aantal beschikbare laadpunten in de EU is ontoereikend. Een conservatieve schatting door de Europese Commissie schat het aantal benodigde laadpunten in 2030 op 2,8 miljoen. Vergeleken met de 199.825 laadpalen in 2019 betekent dat een vermenigvuldiging met een factor van 14 (ACEA, 2020a).

Figuur 6: Adoptiegraad in Europa



Bron: *Figuur overgenomen uit Hall et al. (2020).*

3.2.1 België

België is een van de 7 Europese landen die geen subsidies geeft voor de aankoop van elektrische wagens (ACEA, 2020b). Wel worden er op verschillende niveaus belastingverminderingen of -vrijstellingen gegeven. Belgische vennootschappen en zelfstandigen kunnen de kosten van hun elektrische bedrijfswagen, inclusief de kosten voor de laadpaal en de stroom die deze levert, voor 100% fiscaal aftrekken. Wanneer de wagen echter ook voor private doeleinden gebruikt wordt, wordt er een extra belastbaar inkomen aangerekend waarop de personenbelasting verschuldigd is. Dit principe noemt voordelen-alle-aard (Athlon, 2020).

Ook Vlaanderen maakt, conform de internationale trend, de omslag naar een regelgevend beleid. De zero-emissiepremie, die in 2016 in het leven geroepen werd, werd in januari 2020 afgeschaft. De premie gaf particulieren een korting op de cataloguswaarde van volledig elektrische wagens (inclusief BTW, exclusief opties en andere kortingen). De grootte van de premie verhiel zich omgekeerd evenredig met de cataloguswaarde. De premie werd afgeschaft omdat ze volgens Vlaams minister voor energie Zuhair Demir weinig effect hadden op de aankoopbereidheid voor elektrische wagens bij de modale Vlaming. Toch is er geen sprake van een verdwijning van overheidssubsidies. Minister Demir wil namelijk in plaats van een aankooppremie inzetten op de uitbouw van de laadinfrastructuur in Vlaanderen, wat ook deel uitmaakt van een adoptiegericht beleid (Paelinck, 2019). Wie geen private laadpaal kan plaatsen omdat men geen garage of oprit heeft en binnen de 500m van de woning geen toegang heeft tot een publieke laadpaal, kan wel kosteloos een publieke laadpaal aanvragen (Bebat, s.d.). Daarnaast blijven ook de subsidies voor de aankoop en installatie van laadpalen en thuisbatterijen bestaan (Vlaanderen.be, s.d.). Ook de fiscale stimuli bestaan. Zo wordt een elektrische wagen in Vlaanderen vrijgesteld van de eenmalige belasting op inverkeerstelling (BIV) en de jaarlijkse verkeersbelasting. Dit is overigens niet het geval in het Waals en Brussels Hoofdstedelijk gewest, waar elektrische voertuigen het minimumbedrag voor beiden belastingen verschuldigd zijn (LumiWorld, 2020). De stimuli in Vlaanderen lijken een positief effect te hebben op de adoptie van elektrische wagens. In 2018 werden 71,82% van de verkochte elektrische wagens in België ingeschreven in Vlaanderen. In Wallonië en Brussel werden respectievelijk 15,27% en 12,91% ingeschreven. Vooral Vlaamse bedrijven lijken geïnteresseerd in de elektrische wagens. Zo waren 42,27% van de voertuigen Vlaamse bedrijfswagens zonder leasing en 15,46% Vlaamse bedrijfswagens met een leasing (Van Leemputten, 2019).

Tabel 4: Verdeling nieuwe ingeschreven elektrische wagens per gewest in 2018

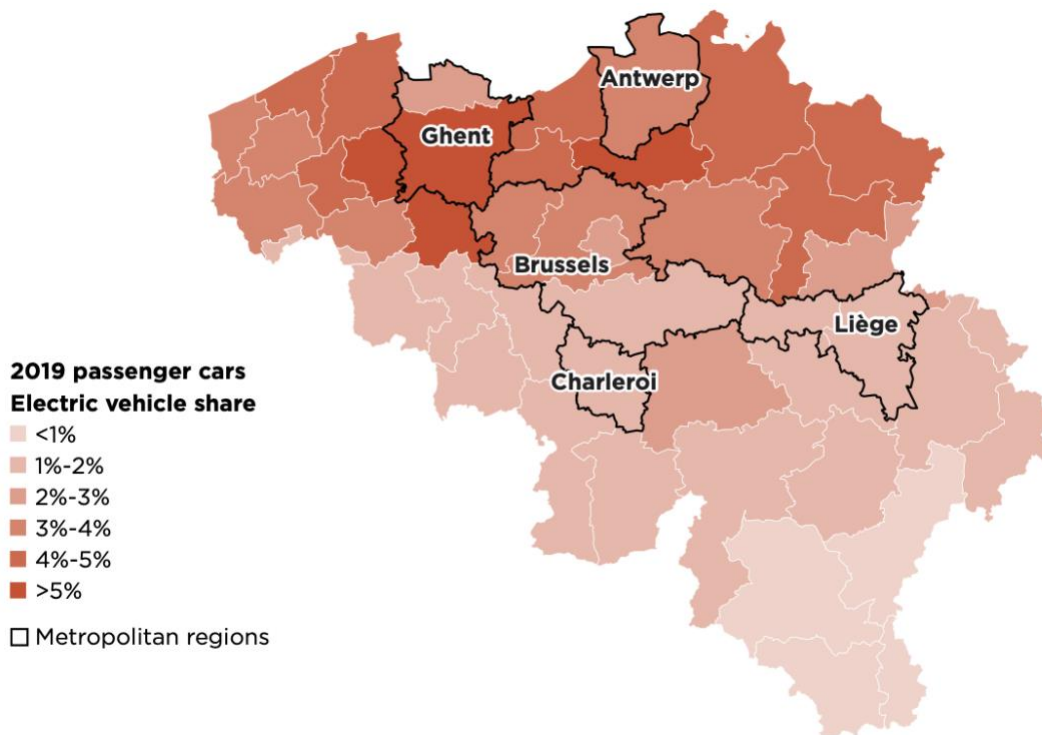
	Vlaanderen	Wallonië	Brussel
Bedrijfswagens met leasing	15,46%	1,48%	6,20%
Bedrijfswagens zonder leasing	42,27%	9,46%	6,03%
Zelfstandige	1,81%	0,41%	0,05%
Particulier	12,28%	3,92%	0,63%
Totaal	71,82%	15,27%	12,91%

Bron: Eigen verwerking uit Van Leemputten (2019).

Dit alles zorgt ervoor dat in België 2,80% van de nieuw ingeschreven wagens volledig elektrisch rijdt. Dat is beduidend minder dan onze buurlanden en de koplopers in Europa. Opmerkelijk is wel dat de hybridemarkt in België het beter doet. 6,20% van de nieuw ingeschreven wagens zijn namelijk hybridewagens (EAFO, 2020c). Een mogelijke verklaring hiervoor is de aanwezigheid van *range anxiety*. Daar de Belgen zeer risicoavers zijn, is het mogelijk dat de angst om onvoldoende bereik te hebben zwaar doorweegt in de aankoopbeslissing van de Belgen. Aangezien een uitgebreid

laadpalennetwerk *range anxiety* kan verlichten, is het aangewezen om nog sterker in te zetten op een verdere uitbouw van ons laadpalennetwerk.

Figuur 7: Adoptiegraad in België



Bron: Figuur overgenomen uit Hall et al. (2020).

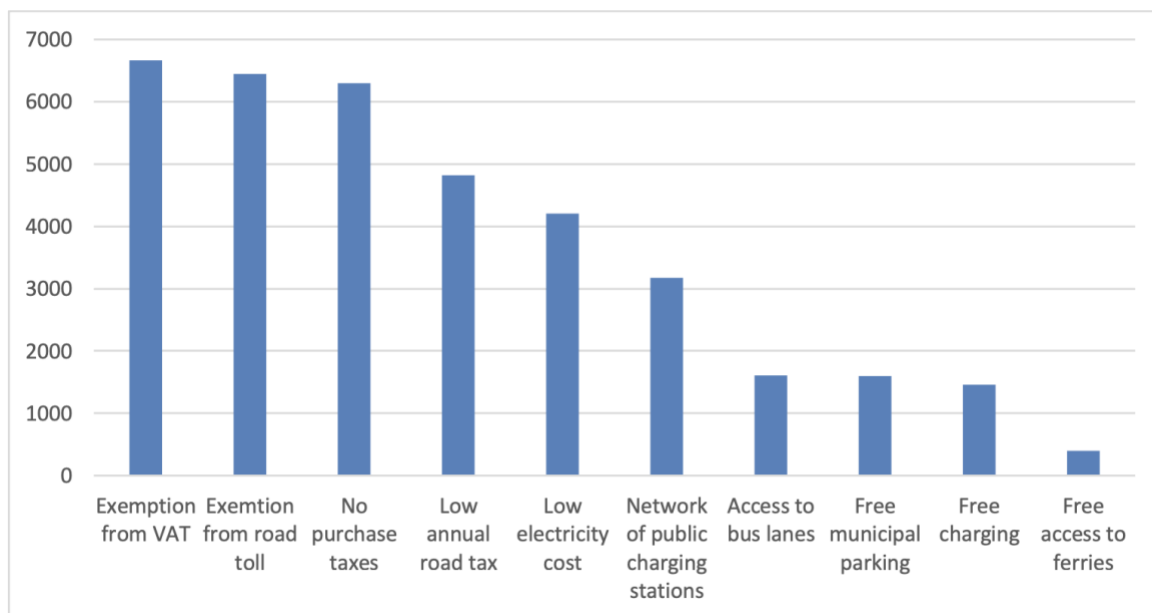
3.2.2 Noorwegen

Noorwegen is geen lid van de EU maar wel van de Europese Economische Ruimte (EER). Ze moet zich dus, behoudens enkele uitzonderingen, houden aan dezelfde regels betreffende de interne markt. Noorwegen steunt ook de Europese klimaatdoelen en -ambities. Zo wil het land de uitstoot van de transportsector tegen 2030 terugdringen met 35% van het niveau gemeten in 2005. Ambitieuze beleidsdoelstellingen dragen hiertoe bij. Zo wil de Noorse overheid dat er enkel nog wagens zonder uitstoot verkocht worden tegen 2025 (Holteng & te Riele, 2019; Norsk Elbilforening, s.d.).

De Noorse transportsector wordt zwaar belast door allerlei fiscale maatregelen. Dit maakt het mogelijk om de adoptie van elektrische wagens te ondersteunen door ze vrij te stellen van bepaalde belastingen. De Norwegian EV Association stelde vast dat de Noorse bevolking de belastingvrijstellingen benoemd als de voornaamste reden voor de aankoop van een elektrische wagen. De fiscale maatregelen bestaan uit de vrijstelling van btw bij aankoop van de elektrische wagen (normaal 25%), aankooptaks, importtaks en een vermindering in het tarief voor de circulatietaks, tolwegen, veerboten en parking. Het tarief dat wordt aangerekend voor tolwegen, veerboten en parkeren mag niet meer zijn dan 50% van het tarief dat wordt aangerekend aan conventionele wagens. Deze maatregelen zorgen ervoor dat de elektrische wagen zowel bij aankoop

als in gebruik prijscompetitief of zelfs besparend is ten opzichte van wagens met een interne verbrandingsmotor. Niet-fiscale maatregelen, zoals het gebruiken van busstroken en toegang tot preferentiële parkeerplaatsen dragen ook bij tot de adoptie van elektrische wagens. Daarenboven steunt de Noorse overheid ook de uitbouw van een netwerk van snelladers door subsidies. In 2017 besliste de regering dat er ten minste twee snelladers aanwezig dienden te zijn om de 50km op alle hoofdwegen. Hier is ze ondertussen grotendeels in geslaagd (met uitzondering van 2 regio's). De snelladers worden uitgebaat door private exploitanten. Hoewel de uitbouw van snelladers wel op het nationale niveau gestimuleerd wordt, wordt voor de stimulatie van residentiële laadinfrastructuur naar de lokale overheden gekeken. Via bouwreguleringen en subsidies proberen lokale overheden huisvestingsmaatschappijen ertoe aan te zetten om laadinfrastructuur te voorzien. Oslo was de eerste stad die dit deed, en kwam tussen in 20% van de investeringskost voor laadinfrastructuur (Haugneland, Lorentzen, Bu, & Hauge, 2017; Holteng & te Riele, 2019; EAFO, 2020b, Norsk Elbilforening, s.d.).

Figuur 8: Belangrijkste reden tot adoptie elektrische wagen volgens Noorse consumenten



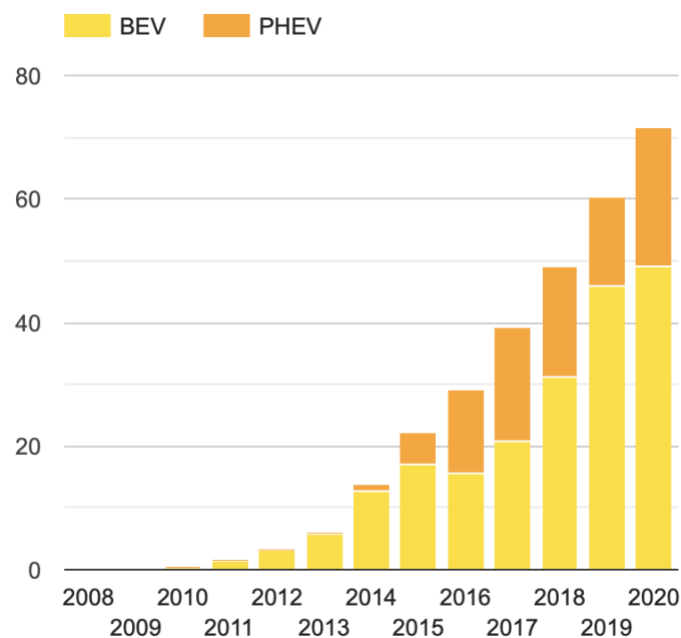
Bron: *Figuur overgenomen uit Haugneland, Lorentzen, Bu, & Hauge (2017).*

Er bestaat ook een ondersteunende context buiten de fiscale en niet-fiscale maatregelen die de adoptie van elektrische wagens in Noorwegen positief beïnvloedt. Zo is drie van de vier gezinnen in staat om hun wagen te parkeren op hun eigen grondgebied. Daardoor kunnen ze ook private laadinfrastructuur installeren, wat niet mogelijk is voor bewoners die beroep moeten doen op publieke parkeerplaatsen of parkeerplaatsen die eigendom zijn van de residentie waarin ze verblijven. Ook de capaciteit van het huishoudelijke elektriciteitsnetwerk is voldoende groot om elektrisch laden te ondersteunen. Dit komt omdat 74% van de Noren hun huis verwarmt met elektriciteit (Figenbaum, 2017). Elektriciteit in Noorwegen is namelijk relatief goedkoop ten opzichte van fossiele brandstoffen. 95% van de energieproductie wordt er opgewekt door waterkracht (Statistia, 2019). Ook kent Noorwegen geen auto-industrie die auto's produceert met interne

verbrandingsmotoren. Er is dus geen lobby aanwezig van autofabrikanten die de adoptie van elektrische wagens kan verhinderen (Figenbaum, 2017).

Noorwegen is dan ook het enige Europese land waar bijna de helft van alle verkochte wagens elektrisch rijdt. Met een marktaandeel van 49,1% is de elektrische wagen er niet uit het straatbeeld weg te denken. De Tesla Model 3 was er in 2019 zelfs de populairste wagen, voor zowel elektrische wagens als wagens met een interne verbrandingsmotor (EAFO, 2020c).

Figuur 9: Adoptiegraad van elektrische - en hybridewagens in Noorwegen



Bron: Figuur overgenomen uit EAFO (2020c).

3.2.3 Nederland

Ook Nederland heeft verschillende beleidsplannen en -initiatieven met betrekking tot elektrische voertuigen. Zo stelde de Rijksoverheid enkele jaren geleden het Formule E-team (FET) op. Dit is een publiek-private samenwerking (PPS) tussen bedrijven, de overheid en enkele kerninstellingen die als doel hebben het elektrische vervoer in Nederland te bevorderen. Deze groep is ook verantwoordelijk om delen van het nationale Klimaatakkoord te verwezenlijken. Net zoals Noorwegen de ambitie heeft om vanaf 2025 enkel nog de verkoop van nieuwe wagens toe te laten indien deze geen emissies uitstoten, ambieert Nederland om hetzelfde te doen tegen 2030. Het FET is ook verantwoordelijk voor de uitbouw van de laadinfrastructuur. Het team ziet erop toe dat de laadinfrastructuur voldoende aanwezig is doorheen het land, dat die laadinfrastructuur ook toekomstbestendig is en dat er voldoende toegankelijke informatie is over de locatie, beschikbaarheid en de laadtarieven (RVO, s.d.b). Zo een publiek-private samenwerking kan een voorbeeld vormen voor Vlaanderen. Door het opstellen van een multidisciplinair team van verschillende stakeholders kan er een coherent beleid tot stand komen met een breed draagvlak.

In tegenstelling tot Vlaanderen en Noorwegen heeft Nederland in juli 2020 beslist om consumenten een subsidie te geven op de aankoop van elektrische wagens. De subsidie bedraagt €4.000 voor nieuwe elektrische wagens met een cataloguswaarde tussen de €12.000 en €45.000, gekocht in 2020 of 2021 en €2.000 voor de aankoop van een tweedehands elektrische wagen. Een voorwaarde is wel dat de wagen een actieradius heeft van minimum 120km. Vanaf 2022 daalt het bedrag van de subsidie jaarlijks, om in 2026 weer uit werking te treden (Autovista Group, 2020). De subsidie maakt deel uit van het Klimaatakkoord. Het doel van het Klimaatakkoord is de uitstoot in Nederland tegen 2030 met 49% te doen afnemen ten opzichte van het niveau gemeten in 1990. De FET krijgt voor de uitwerking van dit akkoord een budget van €250 miljoen. Ook de ambitie om tegen 2030 1,8 miljoen laadpalen ter beschikking te hebben staat vermeld in dit akkoord (Jüdel, 2020).

Nederland kent geen subsidiëring voor de aankoop of installatie van private laadinfrastructuur, dit zowel op nationaal, regionaal en lokaal niveau. Het beleid focust zich vooral op de aankoop van elektrische wagens en de uitbouw van publieke laadinfrastructuur. Wie momenteel geen publieke laadpaal in de buurt heeft en niet de mogelijkheid heeft om een private laadpaal te installeren kan wel een verzoek indienen bij de lokale overheid om een publieke laadpaal te plaatsen. De consument dient dan wel te betalen voor het laden van de wagen, maar de kost van de laadpaal en de installatie ervan valt volledig ten laste van de lokale overheid. Dit zorgt er wel voor dat de beslissing voor het plaatsen van de laadpaal onder andere afhankelijk is van de beleidsruimte die ervoor gecreëerd wordt. Aangezien de kost ten laste valt van de lokale overheid, zal zij enkel laadpalen plaatsen indien hier ook het budget voor is (Jüdel, 2020).

De fiscale maatregelen in Nederland zijn vergelijkbaar met die in België. Zo is er geen belasting op de inverkeerstelling (in Nederland gekend als de BPM-belasting) van elektrische voertuigen tot 2024. Vanaf 2025 zal de BPM wel aangerekend worden en elk jaar stijgen. Hetzelfde geldt voor de circulatietaks. Een bijkomende ecotaks zorgt ervoor dat voertuigen ouder dan 12 jaar extra belast worden. De taks bedraagt 15% boven op de circulatietaks (RVO, s.d.a).

Door dit beleid kan Nederland een adoptiegraad van 12,70% op haar naam schrijven. Opmerkelijk is ook dat Nederland omschakeling gemaakt heeft van de hybridewagen naar de elektrische wagen. Zo waren in 2016 slechts 18% van de verkochte elektrische voertuigen volledig elektrisch. Vandaag is dat maar liefst 93%. Dit kan een interessante case vormen voor België, waar vandaag de hybridewagen ook nog zeer populair is. Naast het besproken beleid heeft het uitgebreide laadpalennetwerk in Nederland een grote impact op de adoptiegraad. Zoals eerder besproken kent Nederland met meer dan 50.000 publiek toegankelijke landpalen het grootste laadnetwerk van Europa (EAFO, 2020c; Hall et al., 2020).

3.3 Dekkende laadinfrastructuur

Voor de uitbouw van de laadinfrastructuur hebben de meeste landen die vandaag koplopers zijn een vraaggerichte aanpak toegepast. Een vraaggerichte aanpak gaat er van uit dat laadinfrastructuur moet worden aangelegd op die locaties waar de bestaande en toekomstige vraag kan worden

bepaald. Deze benadering is gericht op een optimale toewijzing en benutting van alle laadpunten en vermijdt "overbodige" laadpunten. Het aantal laadpunten wordt immers afgestemd op de vraag die ernaar is. Een dekkingsgerichte aanpak daarentegen gaat ervan uit dat de openbare infrastructuur een bepaald niveau van dienstverlening aan een zo groot mogelijk publiek moet garanderen door de afstand tussen de laadpunten tot een minimum te beperken. De Europese parlementaire commissie voor vervoer en toerisme (TRAN) stelt dat, ten einde de marktpenetratie te vergroten, er in Europa een verschuiving naar een dekkingsgerichte aanpak nodig is. Een dekkingsgerichte aanpak zou de bezorgdheid over het bereik van de wagen, een belangrijke drempel die consumenten ervan weerhoudt een elektrische wagen te kopen, kunnen oplossen. Toch is hier enige nuance nodig. Indien het aantal oplaadpunten te hoog is in vergelijking met het aantal elektrische wagens, zal er geen levensvatbare business case zijn voor exploitanten van oplaadpunten. Er bestaan verschillende businessmodellen voor de exploitatie van oplaadinfrastructuur, maar de rentabiliteit van de meeste daarvan blijkt beperkt te zijn. Dit is grotendeels te wijten aan de hoge kapitaalkosten, de kosten van elektriciteit voor het opladen op hoog vermogen en de onzekerheid over de vraag naar laadpunten op specifieke locaties. Op Europees niveau pleit de TRAN-commissie voor een centraal register voor publiek toegankelijke laadstations. Dit centrale register zou een gecoördineerde aanpak mogelijk maken om lacunes in de geografische dekking op te sporen. Het ontbreken van een coördinerend agentschap op EU-niveau wordt zelfs benoemd als de belangrijkste kwestie die op Europees niveau moet worden aangepakt (Spöttle et al., 2018).

Hoeveel laadinfrastructuur er nodig is om tot een dekkende laadinfrastructuur te komen, verschilt van land tot land. Er is geen uniforme maatstaf die hier een sluitend antwoord op kan formuleren. Zo formuleert de Europese Commissie een richtlijn van 10 elektrische voertuigen per laadpunt. Harrison & Thiel formuleren dan weer een interval. Volgens hen zou het optimaal aantal elektrische voertuigen per laadpunt tussen de 5 en 25 liggen. Zij bemerken dat wanneer het aantal voertuigen per laadpunt kleiner wordt dan 5, wat wijst op een groot aantal laadpunten in vergelijking tot het aantal wagens, er vooral veel kosten optreden en weinig baten (Harrison & Thiel, 2017). In tabel 5 merken we op dat er een groot verschil is tussen de ratio in Noorwegen (25) en Nederland (4), terwijl beiden beschouwd worden als voorbeeldlanden en koplopers. Dit kan enerzijds verklaard worden door de woonplaats van de bestuurder. Landen waar veel losstaande huizen zijn of waar bestuurders toegang hebben tot een eigen garage dienen minder publieke laadpalen ter beschikking te hebben. Bestuurders kunnen dan immers private laadinfrastructuur gebruiken. Een vaste oplaadplaats thuis of op het werk blijft de meest gebruikte laadoptie en is cruciaal voor de adoptie van de elektrische wagen. In Noorwegen, waar mensen meer toegang hebben tot private laadinfrastructuur, gebeuren meer dan 90% van de laadprocessen thuis. Landen waar mensen minder toegang hebben tot een garage, zoals Nederland, kunnen niet rekenen op private laadinfrastructuur om dagelijks de wagen op te laden en hebben dus meer baat bij een uitgebreid laadpalennetwerk. Zo ligt het percentage losstaande huizen in Nederland onder de 25% (Funke, Sprei, Gnann & Plötz, 2019). Het publieke laadnetwerk moet in dat geval een waardig alternatief vormen voor private laadinfrastructuur (Hardman et al., 2018). Toch mag niet vergeten worden dat een extensief laadpalennetwerk een positieve perceptie heeft op de intentie van mensen om een elektrische wagen te kopen.

Tabel 5: Wagens per oplaadpunt in 2019

	Aantal publiek toegankelijke laadpunten	Aantal volledig elektrische wagens per laadpunt	Elektrische + hybride wagens per laadpunt
Noorwegen	13.763	18	25
Nederland	50.592	2	4
België	6.429	3	9

Bron: Eigen verwerking uit *European Alternative Fuels Observatory (2020a)*.

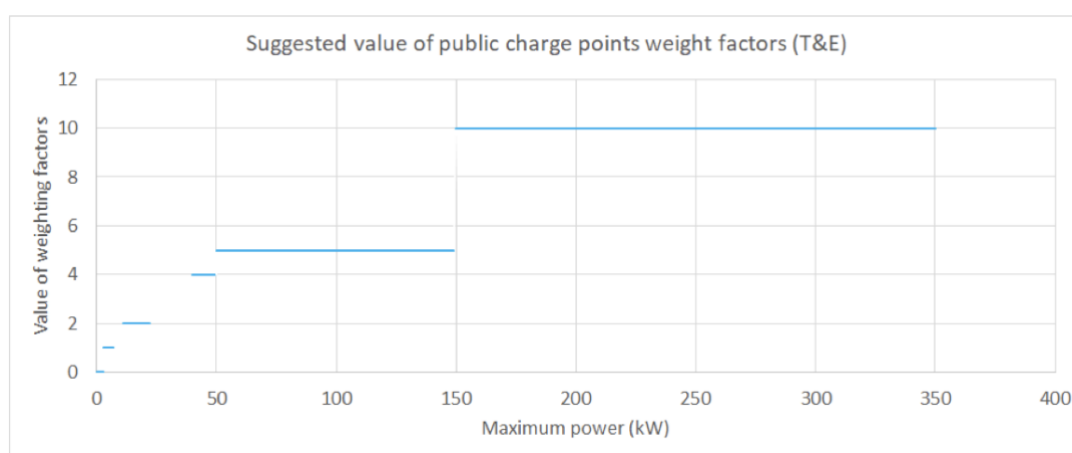
Uit tabel 5 blijkt dat de landen die we onder de loep genomen hebben uiteenlopende waarden vertonen voor de dekkingsindicator. België ligt met 9 elektrische voertuigen per laadpaal niet ver van de Europese richtlijn van 10 voertuigen per laadpaal. Toch blijft de adoptiegraad laag. Wanneer we aannemen dat het beleid erop gericht is om de adoptie van elektrische wagens te verhogen in de toekomst, ontstaat een kip-en-ei probleem. Moet de overheid eerst investeren in meer laadinfrastructuur om een uitgebreider net te krijgen met het risico dat veel laders niet gebruikt zullen worden, of moet ze de verkoop van elektrische wagens stimuleren met als risico dat er te weinig laadinfrastructuur aanwezig is per elektrisch voertuig? Idealiter zou de overheid natuurlijk beide problemen tegelijk aanpakken. Noorwegen en Nederland tonen dat een uitgebreider laadpalennetwerk en een extra fiscale stimulans of subsidie een positief effect kan hebben op de adoptie van elektrische wagens. Dit kan ook gebeuren door, zoals Nederland, de beleidskeuze te maken om enkel nog de verkoop van zero-emissie wagens toe te laten tegen 2025 (of 2030) of een ongunstiger klimaat te creëren voor wagens met een interne verbrandingsmotor door extra belastingen te heffen.

Hoewel beiden landen als koplopers beschouwd worden, liggen de ratio's van Nederland en Noorwegen sterk uit elkaar. Zoals eerder vermeld kan dit te wijten zijn aan de verschillen in infrastructuur tussen de landen en de functies die het laadpalennetwerk dient te vervullen. Zo dient het in Nederland een volwaardig alternatief te bieden voor de thuisladers, daar er minder losstaande huizen en private laadpalen zijn dan in Noorwegen. Noorwegen kan zich door de grotere mogelijkheid om private laadinfrastructuur te installeren dan weer focussen op de strategische plaatsing van (snel)laadpalen langs belangrijke verkeersassen.

Zoals uit de vorige bewerkingen bleek, is de huidige conventie om alle openbare oplaadpunten als gelijkwaardig te beschouwen en met elkaar te sommeren, ondanks de vele verschillen die zich kunnen voordoen tussen verschillende modellen van laadpalen. Zo kunnen de beschikbaarheid en het maximale geleverde vermogen sterk verschillen. Als alle laders gelijkwaardig worden

beschouwd, kan dit leiden tot inconsistenties in de manier waarop het openbare laadnetwerk wordt vormgegeven en de manier waarop landen met elkaar worden vergeleken. De Europese federatie voor transport en milieu (T&E) stelt een verbeterde methodiek voor om zowel de hoeveelheid publieke laders te beoordelen alsook de kwaliteit ervan (denk aan het maximaal geleverde vermogen). De nieuwe *supply metric* is een gewogen indicator die een bepaald gewicht toeschrijft aan verschillende karakteristieken van een laadpaal. Dit zal Europese lidstaten in staat stellen om doelstellingen te formuleren die rekening houden met belangrijke eenheden van hun land zoals de nationale huisvestingssituatie, verkoop van voertuigen en de gemiddelde afstand die wordt afgelegd (T&E 2018).

Figuur 10: Gewichten in de sufficiency indicator



Bron: *Figuur overgenomen uit T&E (2020b)*

Figuur 11: Berekening van de supply metric

The Supply metric for a given Member State is to be calculated based on the following formula:

$$Supply\ metric = \sum_{slow\ charger,i} \frac{1}{availability_i} + \sum_{normal\ charger,i} \frac{2}{availability_i} + \sum_{AC\ fast\ charger,i} \frac{4}{availability_i} + \sum_{fast\ charger,i} \frac{5}{availability_i} + \sum_{ultra-fast\ charger,i} \frac{10}{availability_i}$$

Where $availability_i = 1$ if $charger_i$ is publically available with no restriction 24/7

$availability_i = 2$ if $charger_i$ is semi – public

Chargers that do not fall within the scope of the above are not counted.

Bron: *Figuur overgenomen uit T&E (2020b)*

Er zijn dus verschillende manieren om een bepaalde waarde van de *supply metric* te bereiken. Zo kan een land bijvoorbeeld minder openbare laadpunten hebben dan een ander land, maar toch een hogere waarde voor de *supply metric* bekomen dankzij een hoger aantal snelladers en/of een groter aandeel van laders die volledig toegankelijk zijn (in tegenstelling tot semipublieke laders).

Om te komen tot een indicator voor de dekking moeten we naast het aanbod van de laadpunten ook rekening houden met het aantal wagens dat die punten zal gebruiken. De *sufficiency indicator* deelt

de som van het aantal volledig elektrische wagens (vermenigvuldigd met twee) en de hybride wagens door de *supply metric*. De volledig elektrische wagens worden dubbel geteld daar deze meer elektriciteit moeten laden dan een hybridewagen, die met zijn fossiele brandstoftank nog een tweede energiebron kan aanwenden. Het respectievelijke gewicht van elektrische wagens ten opzichte van hybridewagens kan worden aangepast naar de beschikbare informatie over het laadgedrag. T&E stelt dat volledig elektrische wagens ongeveer vier keer meer elektriciteit gebruiken bij een oplaadbeurt, wat zou moeten leiden tot een vermenigvuldiging met factor vier in plaats van twee. Toch beschouwen zij een verhouding van 2:1 als representatiever voor de komende jaren. De bekomen waarde voor de *sufficiency indicator* geeft ons dus een maatstaf voor de dekking van het laadnetwerk door het (gewogen) aantal laadbare voertuigen en het (gewogen) aantal laadpalen tegenover elkaar te zetten. Net zoals de eerder gebruikte ongewogen indicator duidt een hogere waarde voor de *sufficiency indicator* op minder beschikbare infrastructuur per laadbaar voertuig (T&E, 2020b).

Hoofdstuk IV: Autonoom rijdende wagens: een casestudy

Er zijn momenteel drie grote revoluties die zich ontplooiën in de mobiliteitssector: gedeelde mobiliteit, autonoom rijden en elektrificatie. Bij de planning van toekomstige oplaadinfrastructuur voor elektrische voertuigen is het belangrijk om de mogelijke interacties en synergiën tussen deze drie opkomende systemen in overweging te nemen. Een voertuig dat zowel elektrisch en autonoom rijdt en gedeeld wordt, wordt een *shared autonomous electric vehicle* (SAEV) genoemd. Dit soort voertuigen zullen in de toekomst vormgeven aan een omschakeling van voertuigbezit door particulieren naar mobiliteit als een service (MaaS). Het delen van ritten en wagens kan de bezettingsgraad van voertuigen verbeteren alsook de efficiëntie van onze mobiliteit. De inductieve laadmethode, die eerder in deze masterproef besproken werd, vormt een interessante toepassing voor de SAEV. Om te kunnen spreken van een volledig autonoom systeem, zal naast het besturen ook het laden van deze voertuigen autonoom moeten gebeuren. Hier komen de inductiepaden naar voor als een oplossing. De autonome wagen moet zich slechts boven de laadpad positioneren. Het laden zal vervolgens volledig automatisch gebeuren, zonder enige manuele tussenkomst.

De vraag blijft of zo een systeem rendabel kan zijn, en dus een interessante investering kan vormen voor (potentiële) exploitanten. Hoewel autonoom rijdende wagens vandaag de dag slechts in testomgevingen gebruikt worden en er weinig kostendata beschikbaar is om een volledig sluitende financiële analyse te maken, kunnen we het onderzoek wel vooruithelpen door een mathematisch model te maken van autonoom laden via inductiepaden. Met dit model kunnen we berekenen hoeveel een inductiepad maximaal zou mogen kosten voor de exploitant van een autonoom laadstation door de maximale kost van een inductiepad te laten afhangen van twee cruciale technische parameters: de allocatieve efficiëntie en het laadvermogen (Sperling, 2018).

4.1 Voordelen van autonoom rijdende voertuigen

De WHO schat dat er wereldwijd jaarlijks 1,25 miljoen mensen omkomen bij verkeersongevallen en meer dan 20 miljoen gekwetst raken. 93% van de verkeersongevallen worden veroorzaakt door menselijke fouten. Vaak voorkomende onderliggende oorzaken zijn te snel rijden, rijden onder invloed en afgeleid zijn. Autonome voertuigen zijn in staat om deze onderliggende oorzaken te vermijden. Zo kunnen ze geprogrammeerd worden om de snelheidslimieten te respecteren en met een zicht van 360 graden en snellere reactietijden dan de mens is het mogelijk om alle verkeersongevallen ten gevolge van menselijke fouten te vermijden. Een Australische studie berekende dat dit tot meer dan 16 miljard AUD per jaar kan opleveren. Ook de WHO stelt dat ontwikkelde landen jaarlijks tot 2% van hun BBP verliezen door verkeersongevallen. Daarenboven treden er ook besparingen op door bedden die niet meer in beslag genomen worden in ziekenhuizen en revalidatiecentra. Deze middelen kunnen ingezet worden op andere plaatsen binnen de gezondheidszorg. Autonoom rijdende wagens zijn daarom niet alleen een interessante

technologische ontwikkeling op vlak van mobiliteit, maar ook voor onze volksgezondheid (Pettigrew, 2017).

Autonoom rijdende voertuigen zijn ook in staat om de tijd die in auto's wordt doorgebracht kwalitatiever en productiever te maken, de veiligheid en efficiëntie van ons transportsysteem te verhogen en het transport om te vormen tot service die op elk moment beschikbaar is. Dit laatste concept staat in de literatuur bekend als *Mobility as a Service* (MaaS) (Lokhandwala & Cai, 2020).

De automatisering van het rijden kan worden opgedeeld in 5 verschillende niveaus, beschreven door de Society of Automotive Engineers (SAE). Tot en met niveau 2 is er ten aller tijde een interactie met de bestuurder nodig. De functies op deze niveaus zijn erop gericht om de bestuurder te ondersteunen in zijn rijgedrag, zoals *adaptieve cruise control*, rijbaanassistentie en automatisch remmen en accelereren. Op niveau 3 en 4 is overdracht van het voertuig aan de bestuurder in moeilijke situaties mogelijk. Niveau 5, ten slotte, bevat enkel voertuigen die onder alle omstandigheden volledig autonoom zijn (Shuttleworth, 2019).

Tussen autonoom rijdende wagens en elektrische voertuigen bestaan bepaalde synergiën. Zo kan een autonoom rijdend wagenpark verschillende barrières voor de adoptie van elektrische voertuigen verhelpen. Omdat een allocatiealgoritme het bereik van het voertuig afstemt op de geplande trip van de passagier, moet de passagier zich geen zorgen maken over het bereik van het voertuig. Een effectief allocatiealgoritme zal ervoor zorgen dat het bereik van het voertuig steeds volstaat om de gewenste afstand af te leggen. Ook de laadactiviteiten worden door dit algoritme geregeld, waardoor gebruikers zich geen zorgen moeten maken over de positie van het dichtstbijzijnde (niet bezette) oplaadpunt (Chen, Kockelman & Hanna, 2016).

Met opkomst van de deeleconomie wordt ook autodelen naar voor geschoven als een alternatieve vervoerswijze die flexibeler is dan het openbaar vervoer en minder duur dan het bezit van een privévoertuig. Een aantal aanbieders van *carsharing* projecten zoals Daimler (Car2Go) en BMW (DriveNow) maken al gebruik van elektrische wagens. Echter blijkt dat zogenaamde "one-way" carsharing, waarbij de gebruiker niet terugkeert naar zijn originele bestemming, druk zet op de winstgevendheid van deze projecten. De auto's moeten dan door een chauffeur handmatig terug naar de beginpositie gebracht worden. Autonome rijtechnologie zou die laatste stap kunnen wegnemen. De auto kan namelijk zonder bestuurder terugkeren of zich naar een nabijgelegen oplaadstation begeven (Chen, Kockelman & Hanna, 2016).

In 2015 voerde het Internationale Transport Forum een studie uit naar het gebruik van autonoom rijdende (deel)wagens in Lissabon. Wanneer de wagens autonoom reden en gedeeld werden door verschillende passagiers, kan 1 autonome deelwagen 10 bestaande wagens in privébezit vervangen. Wanneer de wagens wel autonoom rijden maar niet gedeeld worden, en dus de volgende passagier pas opgepikt wordt wanneer de eerste is afgezet op zijn bestemming, kan een autonome wagen 6 wagens in privébezit vervangen. Dit zorgt voor een inkrimping van het wagenpark. Wel werd

vastgesteld dat in beide gevallen er respectievelijk 6% en 44% meer kilometers gereden werden (International Transport Forum, 2015).

Hoewel verschillende proefprojecten al aangetoond hebben dat autonoom rijdende systemen dichterbij zijn dan we denken, en vooraanstaande fabrikanten al sensoren-, hardware- en softwarepakketten hebben uitgebracht, zijn er nog geen toepassingen rond het autonoom laden. Om het autonome verhaal volledig sluitend te maken, moeten autonoom rijdende voertuigen ook in staat zijn om zichzelf te laden. Inductiepaden kunnen in dit verhaal als bruikbare toepassing dienen. Aangezien de wagen zichzelf boven de inductiepad kan positioneren, en deze vervolgens kan beginnen met laden, is er geen enkele menselijke handeling nodig bij dit proces en kan het laden dus volledig autonoom gebeuren (Yamauchi, 2017).

4.2 Beschrijving van het model

Om de financiële haalbaarheid te analyseren bouwen we een model dat de winst berekent van een hypothetische exploitant die zijn laadinfrastructuur beschikbaar stelt aan een vloot van autonoom rijdende voertuigen. De aangeboden laadinfrastructuur bestaat uit een aantal laadstations verdeeld over het grondgebied van de vloot. Elk van deze laadstations wordt uitgerust met een aantal inductiepaden. De exploitant rekent erop dat het algoritme dat de vloot van autonoom rijdende voertuigen beheert op een efficiënte manier deze voertuigen autonoom naar de laadpaden leidt om in de laadbehoeften van deze voertuigen te voorzien. De exploitant realiseert een inkomen door een marge te nemen op de tariefprijs van elektriciteit. Met dit inkomen moet hij de investering terugbetalen voor het bouwen van de laadinfrastructuur. Het resterende bedrag kan hij als winst uitkeren.

Centraal in dit model staat onderstaande winst vergelijking die de jaarlijks gerealiseerde winst van de exploitatie uitdrukt in termen van de gemaakte inkomsten en kosten per jaar.

$$profit_y = income_y - cost_y \quad (e1)$$

In de volgende paragrafen wordt deze vergelijking systematisch verder uitgewerkt zodat de jaarlijkse winst van de exploitatie kan uitgedrukt worden in termen van de onderliggende technologische parameters van het inductieladen en autonoom elektrisch rijden en in termen van de elementaire kosten van de laadinfrastructuur. Vervolgens trachten we met de bepaling van het break-even punt de grenzen af te tasten waaraan de onderliggende parameters dienen te voldoen om winstgevend te zijn.

4.3 Uitwerking van het model

4.3.1 Kosten

De kosten voor de exploitant kunnen verder gedefinieerd worden door het aantal stations die hij uitbaat ($station_n$) te vermenigvuldigen met de eenmalige bouwkost van het station ($station_c$). Hierbij tellen we het aantal inductiepaden (pad_n) vermenigvuldigd met de kost per pad (pad_c) op.

$$cost = pad_c \cdot pad_n + station_c \cdot station_n \quad (e2)$$

Om te komen tot de kost per jaar delen we de totale kost door n . Hierbij kan n gedefinieerd worden als het aantal jaar waarover de kosten afgeschreven worden. Om het model eenvoudig te houden wordt er gekozen voor één waarde van n voor alle kosten. In de realiteit zal de afschrijvingstermijn verschillen naargelang de activa. Zo worden gebouwen en terreinen over een langere termijn afgeschreven dan de laadinfrastructuur

$$cost_y = \frac{cost}{n} \quad (e3)$$

4.3.2 Opbrengsten

Er bestaan verschillende businessmodellen rond laadinfrastructuur. Dit model maakt de assumptie dat de exploitant een procentuele marge (M) neemt op het elektriciteitsstarief (T), en dat deze marge constant blijft naargelang de tariefkosten fluctueren. De inkomsten op jaarbasis ($income_y$) kunnen dan berekend worden door de marge te vermenigvuldigen met het elektriciteitsstarief en totaal aantal geleverde kWh per jaar (kWh_y).

$$income_y = M \cdot T \cdot kWh_y \quad (e4)$$

De benodigde hoeveelheid elektriciteit per jaar kan worden benaderd door de gemiddelde lading die geleverd wordt per auto per laadbeurt (FSD_{charge}) te vermenigvuldigen met het aantal laadbeurten per jaar ($charge_n$).

$$kWh_y = FSD_{charge} \cdot charge_n \quad (e5)$$

Het aantal laadbeurten per jaar hangt op zijn beurt af van het aantal autonoom rijdende wagens ($cars$). Wanneer we dit aantal vermenigvuldigen met het gemiddeld aantal kilometer die zo een wagen aflegt per jaar (FSD_{km}) bekomen we het totaal aantal autonoom gereden kilometers per jaar door de hele vloot. Delen we die kilometers door de gemiddelde range van de wagen (FSD_{range}), dan bekomen we het totaal aantal laadbeurten per jaar ($charge_n$).

$$charge_n = \frac{FSD_{km} \cdot cars}{FSD_{range}} \quad (e6)$$

De tweede parameter die kWh_y bepaalde was FSD_{charge} . Een inschatting van deze parameter kan gemaakt worden door het gemiddelde verbruik per kilometer ($FSD_{consumption}$) te vermenigvuldigen met de actieradius van de wagen (FSD_{range}) en deze vervolgens te delen door de pad efficiëntie (E). De padefficiëntie drukt de efficiëntie uit waarmee de inductielader energie van het net omzet in lading voor de wagen.

$$FSD_{charge} = \frac{FSD_{consumption} \cdot FSD_{range}}{E} \quad (e7)$$

4.3.3 Groeiscenario

De bouwstenen van het model zijn gelegd. We moeten enkel nog bepalen hoeveel laadpads en laadstations de exploitant nodig heeft om in de vraag naar laadbeurten van de vloot van autonome voertuigen te kunnen voldoen.

In deze masterproef hanteren we een eenvoudig model waarin verondersteld wordt dat de laadoperator zijn infrastructuur perfect afstemt op het gevraagde aantal laadbeurten.

Wanneer we de assumptie maken dat het aantal benodigde pads (pad_n) de vraag naar autonome laadbeurten volgt, kunnen we het aantal pads (en ook het aantal stations) uitdrukken in functie van het aantal (gewenste) laadbeurten per jaar.

We starten met de assumptie dat elk laadstation 4 laadpunten (of pads) bevat. Dit maakt het mogelijk om ook het aantal stations uit te drukken in functie van de benodigde laadpads. We kunnen het aantal stations dan uitdrukken als:

$$station_n = \frac{pad_n}{4} \quad (e8)$$

Het aantal benodigde pads (pad_n) bedraagt dan het totale aantal laadbeurten per jaar ($charge_n$) gedeeld door het aantal laadbeurten per pad per jaar ($charge_{nppad}$).

$$pad_n = \frac{charge_n}{charge_{nppad}} \quad (e9)$$

Het aantal laadbeurten per pad per jaar zal in de context van volledig autonoom rijdende wagens afhangen van de efficiëntie van het allocatiealgoritme (A) die de wagens naar de laadstations stuurt en de laadtijd die nodig is per wagen. Theoretisch gezien kan een algoritme ervoor zorgen dat de pads te allen tijde benut worden. De efficiëntie bedraagt dan 100%. Toch zal dit in de realiteit, waar

ook veiligheidsmarges worden ingebouwd en onderhoudswerken worden uitgevoerd niet het geval zijn. We voeren daarom een correctiefactor A in. De laadtijd drukken we uit in minuten. Een jaar bestaat uit 8760 minuten (365 dagen * 24 uren * 60 minuten). Wanneer we dit delen door de tijd die nodig is voor een laadbeurt ($charge_{time}$) en vermenigvuldigen met de efficiëntie van het allocatiealgoritme (A) kunnen we een inschatting maken van de parameter $charge_{nppad}$.

$$charge_{nppad} = \frac{8760}{charge_{time}} \cdot A \quad (e10)$$

De tijd die nodig is om de wagen te laden kan worden uitgedrukt door de gemiddelde lading per laadbeurt (FSD_{charge}) te delen door het vermogen waarmee er geladen wordt (P).

$$charge_{time} = \frac{FSD_{charge}}{P} \quad (e11)$$

4.3.4 Winstberekening

Wanneer we voorgaande vergelijkingen achtereenvolgens in elkaar substitueren kunnen we een winstberekening maken. Ons startpunt is de winstvergelijking (e1):

$$profit_y = income_y - cost_y \quad (e1)$$

Na substitutie van (e3) en (e4) in (e1) bekomen we:

$$profit_y = M \cdot T \cdot kWh_y - \frac{cost}{n} \quad (e12)$$

Na substitutie van (e2) en (e5) in bovenstaande vergelijking bekomen we:

$$profit_y = \frac{1}{n} \left(FSD_{charge} \cdot M \cdot T \cdot charge_n \cdot n - pad_c \cdot pad_n - station_c \cdot station_n \right) \quad (e13)$$

Hierin substitueren we (e7), (e8) en (e9):

$$profit_y = \frac{FSD_{km} \cdot cars}{4 \cdot E \cdot FSD_{range} \cdot charge_{nppad} \cdot n} \cdot \left(-E(4pad_c + station_c) + 4 \cdot FSD_{consumption} \cdot FSD_{range} \cdot M \cdot T \cdot charge_{nppad} \cdot n \right) \quad (e14)$$

En vervolgens (e10) en (e11) zodat we uiteindelijk bekomen:

$$profit_y = \frac{FSD_{consumption} \cdot FSD_{km} \cdot cars}{35040 \cdot A \cdot E \cdot P \cdot n} \cdot \left(35040 \cdot A \cdot M \cdot P \cdot T \cdot n - 4pad_n - station_c \right) \quad (e15)$$

Tabel 6: Legende

Parameter	Beschrijving	Eenheid
$profit_y$	Winst per jaar	Euro (€)
$cars$	Totaal aantal autonoom rijdende wagens	/
n	Afschrijvingsperiode	Jaren
pad_n	Aantal inductie pads	/
pad_c	Kost per inductie pad	Euro (€)
$station_n$	Aantal stations	/
$station_c$	Bouwkost van een station	Euro (€)
A	Efficiëntie van het allocatie algoritme	Percentage (%)
P	Laadvermogen van de inductielader	Kilowattuur (kWh)
E	Efficiëntie van de inductielader	Percentage (%)
M	Winstmarge per kWh als percentage op het elektriciteits tarief	Percentage (%)
T	Elektriciteits tarief	Euro (€)
$FSD_{consumption}$	Gemiddelde verbruik per kilometer	Kilowattuur (kWh)
FSD_{km}	Gemiddeld aantal autonoom gereden kilometers per auto per jaar	Kilometer (km)
FSD_{range}	Gemiddeld aantal gereden kilometers per auto tussen twee laadbeurten	Kilometer (km)

4.3.5 Break Even punt

Het break-even punt is het punt waarop de kosten gelijk zijn aan de inkomsten en de winst dus gelijk is 0. Als we dat in (e15) invullen krijgen we de volgende vergelijking:

$$\frac{FSD_{consumption} \cdot FSD_{km} \cdot cars}{35040 \cdot A \cdot E \cdot P \cdot n} \cdot (35040 \cdot A \cdot M \cdot P \cdot T \cdot n - 4pad_c - station_c) = 0 \quad (e16)$$

Deze vergelijking kan dan opgelost worden voor de parameters die de kosten weerspiegelen om zo een beter zicht te krijgen op de voorwaarden waaraan die parameters moeten voldoen om een positieve winst te genereren.

Als we deze vergelijking oplossen naar de pad_c dan krijgen we:

$$pad_c = 8760 \cdot A \cdot M \cdot P \cdot T \cdot n - \frac{station_c}{4} \quad (e17)$$

Dit kunnen we als volgt herschrijven:

$$pad_c + \frac{station_c}{4} = 8760 \cdot A \cdot M \cdot P \cdot T \cdot n \quad (e18)$$

Het linkerlid van vergelijking (e18) komt overeen met de totale stationskost uitgedrukt per pad. Dit is de kost van de pad zelf plus één vierde van de stationskost vermits in het groeiscenario uitgegaan wordt van 4 pads per station. Met andere woorden, de bouwkost van het station wordt over de 4 pads verdeeld. Om winstgevend te kunnen zijn mag deze kost niet hoger zijn dan:

$$pad_{totalc} < 8760 \cdot A \cdot M \cdot P \cdot T \cdot n \quad (e19)$$

Per jaar wordt dit:

$$\frac{pad_{totalc}}{n} < 8760 \cdot A \cdot M \cdot P \cdot T \quad (e20)$$

Om een idee te krijgen van de inkomsten die jaarlijks moeten gerealiseerd worden om deze ongelijkheid op te lossen, plotten we het rechterlid van deze ongelijkheid voor verschillende waarden van A (de bezettingsgraad van de pads) en P (het laadvermogen), en dit voor een specifieke waarde van $M \cdot T$ (de inkomsten per kWh). Met andere woorden, we trachten na te gaan hoe veel een inductiepad mag kosten voor de exploitant in functie een bepaalde gerealiseerde winst, het laadvermogen van de pads en de allocatieve efficiëntie die gerealiseerd kan worden.

Om dit te doen moeten we een bepaalde waarden invullen voor elke parameter. De recente standaardisering door de SAE geeft 3 verschillende niveaus voor het laadvermogen (P) van de inductielader: 3,7 kW (WPT 1), 7 kW (WPT 2) en 11 kW (WPT 3) (SAE, 2020). De VAB stelt dat de gemiddelde tariefprijs ($M \cdot T$) die de consument betaalt aan publieke laadpalen €0,35 per kWh bedraagt (VAB, 2019). Dit is tevens ook het tarief dat bekende exploitanten *New Motion* en *Blue corner* hanteren. Volgens Eurostat bedroeg de gemiddelde energieprijis voor niet-huishoudelijke entiteiten in ons land 0,1408 €/kWh in de eerste jaarhelft van 2020 (Eurostat, 2020). Wanneer we van de energieprijis van de verkoopprijis aftrekken, krijgen we een inschatting van de marge die de exploitant doorrekent. Deze bedraagt in dit geval 0,2092 €/kWh. Om een overschatting van de opbrengsten tegen te gaan, ronden we dit bedrag af naar beneden tot 0,20 €/kWh. Als we dit invullen in vergelijking (e20) krijgen we de volgende vergelijking:

$$\frac{pad_{totalc}}{n} < 1752 \cdot A \cdot P$$

(e21)

Tabel 7: Invulling van de parameters

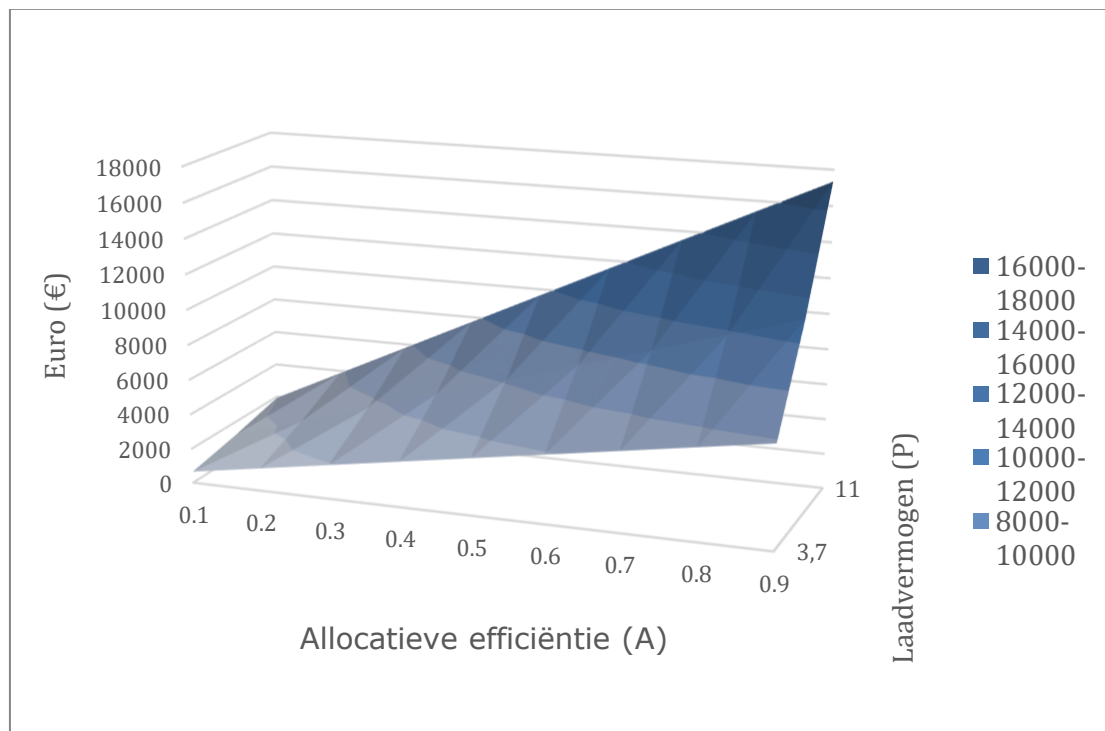
Parameter	Mogelijke waarde(n)	Eenheid	Bron
P	3,70 7 11	Kilowattuur (kWh)	SAE (2020)
M*T	0,35	Euro (€)	VAB (2019)
T	0,1408	Euro per kilowattuur (€/kWh)	Eurostat (2020)
M	0,20	Euro (€)	Eigen berekening

Om een idee te krijgen van de deze kosten gaan we deze berekenen voor een aantal waardes van A en P. Dit levert ons volgende tabel op:

Tabel 8: Maximale jaarlijkse kostprijs in functie van allocatie- en padefficiëntie. Periode: 1 jaar

		A								
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
P (kWh)	3,7 (WPT 1)	€648,24	€1.296,48	€1.944,72	€2.592,96	€3.241,20	€3.889,44	€4.537,68	€5.185,92	€5.834,16
	7 (WPT 2)	€1.226,40	€2.452,80	€3.679,20	€4.905,60	€6.132	€7.358,40	€8.584,80	€9.811,20	€11.037,60
	11 (WPT 3)	€1.927,20	€3.854,40	€5.781,60	€7.708,80	€9.636	€11.563,20	€13.490,40	€15.417,60	€17.344,80

Figuur 12: Maximale jaarlijkse kostprijs in functie van allocatie- en padefficiëntie



Uit tabel 8 kunnen we afleiden hoeveel een laadpad jaarlijks maximaal mag kosten voor de exploitant in functie van de eigenschappen van de laadpad en het allocatiealgoritme. We kunnen bijvoorbeeld opmaken dat een laadpad met een laadvermogen van 11 kWh die 50% van de tijd in gebruik is €9.636 per jaar mag kosten om break-even te draaien wanneer de exploitant een winst van €0,20 per kilowatt realiseert. Wanneer we ervan uitgaan dat de dominante kost de investeringskost van de laadpad is en we een afschrijvingstermijn van 5 jaar hanteren, dan bekomen we een maximum van €48.180 per laadpad. Voor een station met 4 laadpads komt de maximale kost dan neer op €192.720 per station.

De zwakte van de voorgaande analyse is dat we de eenmalige bouwkost van het station, alsook eventuele onderhoudskosten niet in kaart brengen. Dit komt door een gebrek aan (betrouwbare en toepasbare) data voor deze kosten in België. Een studie van de onderzoeksbureau CE Delft geeft ons wel informatie over deze ontbrekende kosten in Nederland. Wanneer we aannemen dat deze kosten (in voldoende maten) overeenkomen met de kosten die toepasbaar zijn in België, kunnen we een onze analyse verfijnen. De eenmalige kost van het station dekt de plaatsingskosten van de aannemer, de inrichting van een parkeervak, de aansluitkosten van de netbeheerder en de locatiebepaling. De jaarlijkse periodieke kosten dekken de service bij gebruiksproblemen, onderhoud/reparatie, een verzekeringspremie voor schade, communicatiekosten en periodieke kosten voor de netaansluiting (CE Delft, 2017).

Tabel 9: Eenmalige en jaarlijkse kosten in Nederland

	Kost (€)
Eenmalige vaste kost	900
Jaarlijkse kosten	275

We verwerken deze nieuwe gegevens als volgt: eerst nemen we de jaarlijkse kosten op door deze af te trekken van de voorgaande resultaten. Dat levert volgende tabel op:

Tabel 10: Maximale jaarlijkse kostprijs in functie van allocatie- en padefficiëntie, inclusief jaarlijkse kosten. Periode: 1 jaar

		A								
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
P (kWh)	3,7 (WPT 1)	€373,24	€1.021,48	€1.669,72	€2.317,96	€2.966,20	€3.614,44	€4.262,68	€4.910,92	€5.559,16
	7 (WPT 2)	€951,40	€2.177,80	€3.404,20	€4.630,60	€5.857	€7.083,40	€8.309,80	€9.536,20	€10.762,60
	11 (WPT 3)	€1.652,20	€3.579,40	€5.506,60	€7.433,80	€9361	€11.288,20	€13.215,40	€15.142,60	€17.069,80

Voor de eenmalige vaste kost gaan we uit van een afschrijvingsperiode van 5 jaar. We nemen de maximale kostprijs per jaar en vermenigvuldigen deze met 5. Van dit getal trekken we de eenmalige vaste kost af. Dat geeft ons volgend resultaat:

Tabel 11: Maximale kostprijs in functie van allocatie- en padefficiëntie, inclusief jaarlijkse kosten en eenmalige kosten. Periode: 5 jaar

		A								
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
P (kWh)	3,7 (WPT 1)	966,20	4.207,40	7.448,60	10.689,80	13.931	17.172,20	20.413,40	23.654,60	26.895,80
	7 (WPT 2)	3.857	9.989	16.121	22.253	28.385	34.517	40.649	46.781	52.913
	11 (WPT 3)	7.361	16.997	26.633	36.269	45.905	55.541	65.177	74.813	84.449

Tabel 11 geeft ons dus een inschatting hoeveel een inductiepad mag kosten, voor bepaalde waarden van P en A , met inbegrip van eenmalige opstartkosten en jaarlijkse periodieke kosten voor een exploitant die break-even wil draaien op 5 jaar.

We kunnen ook berekenen wat de laadoperator minimaal moet verdienen per kWh om rendabel te kunnen laden. Wanneer we vergelijking (e16) oplossen naar $M \cdot T$ bekomen we volgende vergelijking:

$$MT > \frac{4pad_c + station_c}{35040 \cdot A \cdot P \cdot n}$$

Hier zien we dat de technische parameters A en P omgekeerd evenredig zijn met M en T , en dus een grote impact hebben op de minimaal benodigde winstmarge. Een verdubbeling van het laadvermogen of de bezettingsgraad resulteert in een halvering van de minimaal benodigde winst per kWh. Wat we hieruit leren is dat technologische verbeteringen, hier uitgedrukt aan de hand van de parameters A en P , een belangrijke impact hebben op de rendabiliteit van het businessmodel van een exploitant. Dat betekent dat het winstperspectief van de exploitant alsmear beter wordt als hij kan uitgaan van een continue verbetering van de onderliggende technologie. Dat is ook goed nieuws voor de consument aangezien een verlaging van de minimale marge die de exploitant moet vragen ook de verkoopprijs van de kWh sterk kan beïnvloeden. Een lagere verkoopprijs zal op zijn beurt ook een positieve invloed hebben op de adoptiegraad van autonoom rijdende wagens, wanneer we uitgaan van een dalende vraagcurve waarbij de gevraagde hoeveelheid stijgt naarmate de prijs daalt.

Hoofdstuk V: Conclusie

De elektrische wagen geniet belangstelling vanuit verschillende hoeken. Naarmate er een steeds grotere belangstelling komt vanuit onder andere het milieu- en gezondheidsperspectief, zal de rol van de elektrische wagen in onze maatschappij de komende jaren enkel maar toenemen. Zo speelt de elektrische wagen een centrale rol in vele beleidsplannen. Een overzicht van het beleidsmatig kader in België, alsook op het Europese niveau en enkele lidstaten die het voortouw nemen, kon dan ook niet ontbreken.

Landen als Noorwegen laten zien dat betrouwbare, stabiele en significante belastingvoordelen elektrische wagens economisch zeer aantrekkelijk maken. Door wagens die gebruik maken van fossiele brandstoffen zwaar te belasten en elektrische wagens van deze belastingen te onttrekken, creëert Noorwegen een klimaat waarin elektrische wagens economisch interessant zijn. Het belastingvoordeel wordt door de Noren benoemd als de voornaamste reden om een elektrische wagen aan te schaffen. De voornaamste vrijstelling is die op de BTW. Daarbovenop komen nog tal van kleinere maatregelen die het gebruiksgemak verhogen en kleine besparingen opleveren bij het gebruik van de wagen. Net als Noorwegen stelt ook Nederland een einddatum vast voor de verkoop van wagens met een interne verbrandingsmotor. Dit is een duidelijk signaal naar zowel de consument als de producent, die beiden overtuigd worden om in te zetten op elektrische wagens. Verder toont Nederland aan dat het gebruik van een privaat-publieke samenwerking ook zijn toepassing vindt binnen het domein van de elektrische wagen. Door de uitbouw van het laadpalennetwerk toe te wijzen aan een PPS-project worden verschillende stakeholders betrokken en wordt een efficiënte en effectieve uitbouw van het laadpalennetwerk verzekerd. Ook op Europees niveau zien we ondersteuning van de elektrische wagen door het opleggen van emissiestandaarden aan autofabrikanten.

In België rijden slechts 2,80% van de nieuw ingeschreven wagens volledig elektrisch. We doen het daarmee een pak slechter dan de Europese koplopers. Dat is opmerkelijk, aangezien ons laadpalennetwerk voldoet aan de Europese doelstelling van 1 laadpaal per 10 elektrische wagens. We zouden daaruit kunnen afleiden dat er wel genoeg laadpalen zijn voor de elektrische wagens die vandaag in België rondrijden, maar dat het aantal elektrische wagens nog te beperkt is. Dit kan op zijn beurt verholpen worden door het toekennen van een subsidie bij de aankoop van de elektrische wagen, zoals veel andere Europese lidstaten dat doen. Een andere mogelijkheid is om de aankoop en het gebruik van fossiele wagens extra te belasten en zo de competitiviteit van de elektrische wagen te verhogen. Beide methodes kunnen ook simultaan toegepast worden.

Het tweede luik van deze masterproef richtte zich op de toekomst. De elektrische wagen is onderhevig aan een continue verbetering op technologisch vlak. Batterijen krijgen steeds meer capaciteit en worden goedkoper. Maar ook de apparatuur waarmee we onze elektrische wagen opladen, is onderhevig aan heel wat technologische vooruitgang. In hoofdstuk 2 van deze masterproef beantwoordde we de deelvraag: "*Wat zijn de verschillende laadtechnieken voor de elektrische wagen?*". Hier kwamen we in aanraking met de technieken van de conductielading,

inductielading en de batterijswap. Voor elke techniek werden de voor- en nadelen besproken alsook enkele toepassingen. Hoewel de inductieve laadmethode zeer gebruiksvriendelijk en relatief makkelijk toepasbaar is, staat deze technologie nog in haar kinderschoenen. Naast een verdere ontwikkeling op technologisch vlak is er ook nood aan meer economisch gerichte analyses. Deze masterpoef tracht hier een bijdrage aan te leveren. De centrale onderzoeksvraag luidde dan ook: *"Is een inductief laadstation economisch rendabel in een wereld van autonoom rijdende wagens?"*.

Onze berekeningen tonen aan dat een inductief laadstation wel degelijk rendabel kan zijn. Specifiek zijn we op zoek gegaan naar de maximale kostprijs van een inductiepad in functie van het gebruik (bezettingspercentage) en het laadvermogen van de pad. Die twee parameters zijn cruciaal om de maximale kostprijs te berekenen. Hoe hoger het bezettingspercentage, hoe hoger de maximale kostprijs van de inductiepad. Het allocatiealgoritme van een vloot autonoom rijdende wagens kan zorgen voor een efficiënte toekenning van de laadtijd en zo zorgen voor een hoge bezettingsgraad. Het laadvermogen van de pad is een technische parameter die in de toekomst steeds verbeterd kan worden naarmate nieuwe technologieën en verbeterde productieprocessen dit toelaten. Hoe hoger het laadvermogen van de pad, hoe korter de benodigde tijd om een batterij weer op te laden. Dat zorgt er op zijn beurt voor dat een inductiepad meer wagens kan bedienen en er minder pads per elektrisch voertuig nodig zijn om te kunnen voldoen aan de laadbehoefte van elektrische voertuigen. Toekomstige exploitanten kunnen aan de hand van de berekeningen in hoofdstuk 4 nagaan of de kostprijs van de inductiepaden waarover zij kunnen beschikken laag genoeg is om tot een rendabele investering te komen. Aangezien de haalbare allocatiegraad sterk afhankelijk is van de plaatsing van het laadstation, dienen exploitanten hier zelf een inschatting of studie rond uit te voeren. Wanneer er gewerkt wordt met een vloot autonoom rijdende wagens, hangt de bezettingsgraad ook af van het allocatiealgoritme dat de elektrische wagens naar de laadpads stuurt.

Bibliografie

- ACEA. (2020). Making the transition to zero-emission mobility. 2020 progress report. Enabling factors for alternatively powered cars and vans in the European Union. Geraadpleegd via https://www.acea.be/uploads/publications/ACEA_progress_report_2020.pdf#page=21.
- ACEA. (2020). Overview - Electric vehicles: Tax benefits & purchase incentives in the European Union. Geraadpleegd via <https://www.acea.be/publications/article/overview-of-incentives-for-buying-electric-vehicles>.
- Alkemade, F., Hekkert, M. P., & Negro, S. O. (2011). Transition policy and innovation policy: Friends or foes? *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 1(1), 125-129. doi:<https://doi.org/10.1016/j.eist.2011.04.009>.
- Athlon. (2020). Fiscaliteit 2020 en je elektrische wagenpark. Geraadpleegd via <https://www.athlon.com/be/over-athlon/laatste-nieuws/impact-op-elektrische-wagens>.
- Autovista Group. (2020). Netherlands introduces BEV incentives. Geraadpleegd via <https://autovistagroup.com/news-and-insights/netherlands-introduces-bev-incentives>.
- Bansal, P. (2015). Charging of electric vehicles: technology and policy implications. *Journal of Science Policy & Governance*, 6(1), 1-20.
- Bebat. (s.d.). Thuis een laadpaal installeren? Dit is wat je moet weten!. Geraadpleegd via <https://www.bebat.be/nl/blog/thuis-laadpaal-installeren>.
- Bloomberg News. (2020). China Embraces Battery-Swapping System for Electric Vehicles. Geraadpleegd via <https://www.bloomberg.com/news/articles/2020-01-17/china-embraces-ev-battery-swap-technology-tesla-has-cooled-on>.
- Blue Corner. (s.d.). Elektrisch rijden. Geraadpleegd via <https://www.bluecorner.be/nl/elektrisch-rijden/>.
- Bowers, C. (2020). Electric car sales set to treble, but there's a risk of growth fizzling without tougher targets. Geraadpleegd via <https://www.transportenvironment.org/news/electric-car-sales-set-treble-there-s-risk-growth-fizzling-without-tougher-targets>.
- Buekers, J., Van Holderbeke, M., Bierkens, J., & Int Panis, L. (2014). Health and environmental benefits related to electric vehicle introduction in EU countries. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 33, 26-38. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.09.002>.

- Bullard, N. (2019). Electric Car Price Tag Shrinks Along With Battery Cost. Geraadpleegd via <https://www.bloomberg.com/opinion/articles/2019-04-12/electric-vehicle-battery-shrinks-and-so-does-the-total-cost>.
- Cambridge Econometrics. (2018). Transition to e-mobility could boost Europe's growth and reduce air pollution but challenges remain. Geraadpleegd via <https://www.camecon.com/news/transition-e-mobility-help-revitalise-europes-growth-reduce-air-pollution-challenges-remain-along-way/>.
- Carley, S., Siddiki, S., & Nicholson-Crotty, S. (2019). Evolution of plug-in electric vehicle demand: Assessing consumer perceptions and intent to purchase over time. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 70, 94-111. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.04.002>.
- CE Delft. (2017). Uitbreiding publieke laadinfrastructuur tot 2020. Geraadpleegd via <https://www.ce.nl/publicaties/1910/uitbreiding-publieke-laadinfrastructuur-tot-2020>.
- Chen, T. D., Kockelman, K. M., & Hanna, J. P. (2016). Operations of a shared, autonomous, electric vehicle fleet: Implications of vehicle & charging infrastructure decisions. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 94, 243-254. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.08.020>.
- Coffin, D., & Horowitz, J. (2018). The Supply Chain for Electric Vehicle Batteries. Geraadpleegd via https://www.usitc.gov/publications/332/journals/the_supply_chain_for_electric_vehicle_batteries.pdf.
- De Coster, G. (2019). Emissie van broeikasgassen door transport. Geraadpleegd via <https://www.milieurapport.be/sectoren/transport/emissies-afval/broeikasgassen>.
- Deltrix. (s.d.). Charging Modes. Geraadpleegd via <https://deltrixchargers.com/about-emobility/charging-modes/>.
- Dervitsiotis, K. (2008). Developing Sustainable Competitive Advantage through Operational Excellence and Adaptation Excellence with Value-Innovations. In (pp. 37-55).
- Enel X. (s.d.) The Different EV Charging Connector Types. Geraadpleegd via <https://evcharging.enelx.com/no/news/blog/552-ev-charging-connector-types>.
- European Alternative Fuels Observatory. (2020). Countries: Netherlands. Geraadpleegd via <https://www.eafo.eu/countries/netherlands/1746/incentives>.
- European Alternative Fuels Observatory. (2020). Countries: Norway. Geraadpleegd via

<https://www.eafo.eu/countries/norway/1747/incentives>.

European Alternative Fuels Observatory. (2020). Passenger cars. Geraadpleegd via <https://www.eafo.eu/vehicles-and-fleet/m1#>.

European Green Vehicle Initiative. (2014). UNPLUGGED – Inductive charging for Electric Vehicles (February 2014). Geraadpleegd via <https://egvi.eu/project-highlight/unplugged-inductive-charging-for-electric-vehicles-february-2014/>.

Europese Commissie. (2020). CO2 emission performance standards for cars and vans (2020 onwards). Geraadpleegd via https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/regulation_nl.

Eurostat. (2020). Electricity prices for non-household consumers - bi-annual data (from 2007 onwards). Geraadpleegd via https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/NRG_PC_205__custom_255782/bookmark/table?lang=en&bookmarkId=d340c2db-5c64-4757-86e4-1b24e3f1b3f0.

EVdatabase. (s.d.). Stroomverbruik van een elektrische auto. Geraadpleegd via <https://ev-database.nl/informatie/stroomverbruik-hybride-elektrische-auto>.

Faria, R., Moura, P., Delgado, J., & de Almeida, A. T. (2012). A sustainability assessment of electric vehicles as a personal mobility system. *Energy Conversion and Management*, 61, 19-30. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.02.023>.

Figenbaum, E. (2017). Perspectives on Norway's supercharged electric vehicle policy. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 25, 14-34. doi:<https://doi.org/10.1016/j.eist.2016.11.002>.

Funke, S. Á., Sprei, F., Gnann, T., & Plötz, P. (2019). How much charging infrastructure do electric vehicles need? A review of the evidence and international comparison. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 77, 224-242. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.10.024>.

Frederick, S., Loewenstein, G., & O'Donoghue, T. (2002). Time Discounting and Time Preference: A Critical Review. *Journal of Economic Literature*, 40(2), 351-401. Geraadpleegd via www.jstor.org/stable/2698382.

Gaton, B. (2019). What are the different types – and speeds – of EV charging?. Geraadpleegd via <https://thedriven.io/2018/08/28/faq9-ev-charging-speeds-explained/>.

- Goldie-Scot, L. (2019). A Behind the Scenes Take on Lithium-ion Battery Prices. Geraadpleegd via <https://about.bnef.com/blog/behind-scenes-take-lithium-ion-battery-prices/>.
- Graber, G. (2016). *Electric Mobility: Smart Transportation in Smart Cities*. Geraadpleegd via https://www.researchgate.net/publication/303629402_Electric_Mobility_Smart_Transportation_in_Smart_Cities.
- Hall, D., Wappelhorst, S., Mock, P., Lutsey, N. (2020). European Electric Vehicle Factbook 2019/2020. Geraadpleegd via <https://theicct.org/sites/default/files/publications/EV-EU-Factbook-2020.pdf>.
- Hardman, S., Jenn, A., Tal, G., Axsen, J., Beard, G., Daina, N., . . . Witkamp, B. (2018). A review of consumer preferences of and interactions with electric vehicle charging infrastructure. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 62, 508-523. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.04.002>.
- Harrison, G., & Thiel, C. (2017). An exploratory policy analysis of electric vehicle sales competition and sensitivity to infrastructure in Europe. *Technological Forecasting and Social Change*, 114, 165-178. doi:<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.08.007>.
- Haugneland, P., Lorentzen, E., Bu, C., Hauge, E. (2017). Put a price on carbon to fund EV incentives – Norwegian EV policy success. Geraadpleegd via <https://elbil.no/wp-content/uploads/2016/08/EVS30-Norwegian-EV-policy-paper.pdf>.
- Henze, V. (2019). Battery Pack Prices Fall As Market Ramps Up With Market Average At \$156/kWh In 2019. Geraadpleegd via <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-fall-as-market-ramps-up-with-market-average-at-156-kwh-in-2019/>.
- Holteng, P., & te Riele, D. (2019). E-Mobility in Norway. Geraadpleegd via <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2019/04/E-Mobility%20in%20Norway%20-%20NL%20embassy%20Oslo.pdf>.
- International Energy Agency. (2019). Global EV Outlook 2019. Geraadpleegd via <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2019>.
- International Energy Agency. (2020). Electric Vehicles. Geraadpleegd via <https://www.iea.org/reports/electric-vehicles>.
- International Transport Forum. (2015). Urban Mobility System Upgrade. How shared self-driving cars could change city traffic. Geraadpleegd via <https://www.itf-oecd.org/urban-mobility-system-upgrade-1>.

Jüdel, F. (2020) Everything You Need To Know About EV Incentives In The Netherlands. Geraadpleegd via https://wallbox.com/en_catalog/netherlands-ev-incentives.

Lambert, F. (2020). Nio might have figured out battery swap for electric cars as it completes 500,000 swaps. Geraadpleegd via https://www.greencarreports.com/news/1128364_hey-tesla-china-s-nio-has-completed-500-000-battery-swaps.

Li, Z., & Ouyang, M. (2011). The pricing of charging for electric vehicles in China—Dilemma and solution. *Energy*, 36(9), 5765-5778. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.05.046>.

Lokhandwala, M., & Cai, H. (2020). Siting charging stations for electric vehicle adoption in shared autonomous fleets. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 80, 102231. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102231>.

LumiWorld. (2020). Elektrisch rijden: welke subsidies en voordelen krijg ik? Geraadpleegd via <https://lumiworld.luminus.be/slimme-investeringen/elektrisch-rijden-welke-subsidies-en-voordelen-krijg-ik/>.

Mak, H.-Y., Rong, Y., & Shen, Z.-J. M. (2013). Infrastructure planning for electric vehicles with battery swapping. *Management Science*, 59(7), 1557-1575.

McKinsey. (2017). Electrifying insights: How automakers can drive electrified vehicle sales and profitability. Geraadpleegd via <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/electrifying-insights-how-automakers-can-drive-electrified-vehicle-sales-and-profitability>.

Morrissey, P., Weldon, P., & O'Mahony, M. (2016). Future standard and fast charging infrastructure planning: An analysis of electric vehicle charging behaviour. *Energy Policy*, 89, 257-270. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.12.001>.

Norsk Elbilforening. (s.d.) Norwegian EV policy. Geraadpleegd via <https://elbil.no/english/norwegian-ev-policy/>.

Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. (2017). How Does a Lithium-ion Battery Work?. Geraadpleegd via <https://www.energy.gov/eere/articles/how-does-lithium-ion-battery-work>.

Ondernemingsdatabank. (2020). Gemiddelde brandstofkosten voor 2019. Geraadpleegd via https://ondernemingsdatabank.indicator.be/fiscaal___autokosten/gemiddelde_brandstofkosten_voor_2019/VLTATAAR_EU27120801/1/search.

Paelinck, G. (2019). Vlaamse regering schrapt premie voor elektrische wagens, sectororganisaties:

- "Nefast voor vergroening wagenpark". Geraadpleegd via <https://www.vrt.be/vrtnws/nl/2019/10/25/vlaamse-regering-schraapt-premie-voor-elektrische-wagens-weinig/>.
- Pettigrew, S. (2017). Why public health should embrace the autonomous car. *Australian and New Zealand Journal of Public Health*, 41(1), 5-7. doi:10.1111/1753-6405.12588.
- Rata, M., Rata, G., Filote, C., Raboaca, M. S., Graur, A., Afanasov, C., & Felseghi, A.-R. (2019). The Electrical Vehicle Simulator for Charging Station in Mode 3 of IEC 61851-1 Standard. *Energies*, 13(1), 176. doi:10.3390/en13010176.
- Renault. (2019) UNDERSTANDING THE CAPACITY OF AN ELECTRIC CAR BATTERY. Geraadpleegd via <https://easyelectriclife.groupe.renault.com/en/outlook/capacity-range-battery-for-electric-car-understanding/>.
- Rijksdienst voor Ondernemend Nederland. (s.d.). Fijnstoftoeslag mrb voor vervuilende dieselloertuigen. Geraadpleegd via <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/belastingen-op-auto-en-motor/fijnstoftoeslag-mrb>.
- Rijksdienst voor Ondernemend Nederland. (s.d.). Formule E-Team. Geraadpleegd via <https://www.rvo.nl/onderwerpen/duurzaam-ondernemen/energie-en-milieu-innovaties/elektrisch-rijden/informatie-over-elektrisch-rijden/formule-e-team>.
- SAE. (2020). New SAE Wireless Charging standard is EV game-changer. Geraadpleegd via <https://www.sae.org/news/2020/10/new-sae-wireless-charging-standard-is-ev-game-changer>.
- Salmenkaita, J.-P., & Salo, A. (2002). Rationales for Government Intervention in the Commercialization of New Technologies. *Technology Analysis & Strategic Management*, 14(2), 183-200. doi:10.1080/09537320220133857.
- Sandén, B. A., & Azar, C. (2005). Near-term technology policies for long-term climate targets—economy wide versus technology specific approaches. *Energy Policy*, 33(12), 1557-1576. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2004.01.012>.
- Santens, T. (2019). Verkoop van elektrische wagens meer dan verdubbeld (maar blijft laag). Geraadpleegd via <https://www.vrt.be/vrtnws/nl/2019/09/06/verkoop-elektrische-wagens.app/>.
- Schroeder, A., & Traber, T. (2012). The economics of fast charging infrastructure for electric vehicles. *Energy Policy*, 43, 136-144. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.12.041>.

- Shuttleworth, J. (2019). SAE Standards News: J3016 automated-driving graphic update. Geraadpleegd via <https://www.sae.org/news/2019/01/sae-updates-j3016-automated-driving-graphic>.
- Sierzchula, W., Bakker, S., Maat, K., & van Wee, B. (2014). The influence of financial incentives and other socio-economic factors on electric vehicle adoption. *Energy Policy*, 68, 183-194. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.01.043>.
- Smith, A. (2019). Electric Car Innovation: How Electric Vehicles Are Changing the World. Geraadpleegd via <https://www.plugandplaytechcenter.com/resources/electric-car-innovation-how-electric-vehicles-are-changing-world/>.
- Sperling, D. (2018). Three Revolutions Steering Automated, Shared, and Electric Vehicles to a Better Future: Steering Automated, Shared, and Electric Vehicles to a Better Future. Geraadpleegd via https://books.google.be/books?hl=nl&lr=&id=f0NEDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&ots=4QvbFo83ys&sig=_Eq3gAsqx2ibjh43j9Em1C7aZnk&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false.
- Spöttle, M., Jörling, K., Schimmel, M., Staats, M., Grizzel L., Jerram, L., Drier, W., & Gartner, J. (2018). Research for TRAN Committee – Charging infrastructure for electric road vehicles. Geraadpleegd via [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2018/617470/IPOL_STU\(2018\)617470_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2018/617470/IPOL_STU(2018)617470_EN.pdf).
- Statbel. (2019). Voertuigenpark. Geraadpleegd via <https://statbel.fgov.be/nl/themas/mobiliteit/verkeer/voertuigenpark#figures>.
- Statista. (2019). Distribution of electricity production in Norway in 2018, by source. Geraadpleegd via <https://www.statista.com/statistics/1025497/distribution-of-electricity-production-in-norway-by-source/>.
- Statt, N. (2019). Norway will install the world's first wireless electric car charging stations for Oslo taxis. *The Verge*. Geraadpleegd via <https://www.theverge.com/2019/3/21/18276541/norway-oslo-wireless-charging-electric-taxis-car-zero-emissions-induction>.
- Tesla. (2019). Introducing V3 Supercharging. Geraadpleegd via <https://www.tesla.com/blog/introducing-v3-supercharging>.
- Thiel, C., Nijs, W., Simoes, S., Schmidt, J., van Zyl, A., & Schmid, E. (2016). The impact of the EU

car CO2 regulation on the energy system and the role of electro-mobility to achieve transport decarbonisation. *Energy Policy*, 96, 153-166.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.05.043>.

Transport & Environment (2018). Roll-out of public EV charging infrastructure in the EU. Is the chicken and egg dilemma resolved?. Geraadpleegd via https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/Charging%20Infrastructure%20Report_September%202018_FINAL.pdf.

Transport & Environment (2020). Mission (almost) accomplished. Geraadpleegd via https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2020_10_TE_Car_CO2_report_final.pdf.

Transport & Environment (2020). Recharge EU. How many charging points will the EU and its member states need in the 2020s?. Geraadpleegd via <https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/01%202020%20Draft%20TE%20Infrastructure%20Report%20Final.pdf>.

VAB. (2019). Elektrische auto laden: hoeveel kost het en hoe lang duurt het?. Geraadpleegd via <https://magazine.vab.be/op-weg/mobiliteit/elektrische-auto-laden-hoeveel-kost-het-en-hoe-lang-duurt-het>.

Vanacker, L. (2019). 10.000 laadpalen in België. Geraadpleegd via <https://www.tijd.be/ondernemen/auto/10-000-laadpalen-in-belgie/10107810.html>.

Vanacker, L. (2020). Autobouwers vermijden forse boetes voor CO2-uitstoot. Geraadpleegd via <https://www.tijd.be/ondernemen/auto/autobouwers-vermijden-forse-boetes-voor-co2-uitstoot/10257437.html>.

Vandevenne, F. (2019). Verloren gezonde levensjaren (DALY's) door fijn stof. Geraadpleegd via <https://www.milieurapport.be/milieuthemas/milieu-gezondheid/dalys/verloren-gezonde-levensjaren-dalys-door-blootstelling-aan-fijn-stof>.

Van Leemputten, P. (2019). Dit zijn de populairste elektrische wagens in ons land. Geraadpleegd via https://datanews.knack.be/ict/nieuws/dit-zijn-de-populairste-elektrische-wagens-in-ons-land/article-normal-1416573.html?cookie_check=1561722029.

Virta. (2018). EV Charging 101 - How much electricity does an electric car use?. Geraadpleegd via <https://www.virta.global/blog/ev-charging-101-how-much-electricity-does-an-electric-car-use>.

- Vlaamse Milieumaatschappij. (2018). Infografiek verkeer 2018. Geraadpleegd via https://www.vmm.be/lucht/infografieken/vmm_verkeer_2018.jpg/view.
- Vlaamse Milieumaatschappij. (2018). *Uitstoot van de broeikasgassen in Vlaanderen 2000-2016*. Geraadpleegd via https://www.vmm.be/publicaties/uitstoot-van-de-broeikasgassen-in-vlaanderen-2000-2016/@@download/attachment/jaarverslag_broeikasgassen_2000-2016_TW.pdf?.
- Vlaamse Milieumaatschappij. (2019). *Uitstoot 2000-2017 en Luchtkwaliteit 2018 in Vlaanderen*. Geraadpleegd via <https://www.vmm.be/publicaties/lucht-2019/uitstoot-2000-2017-en-luchtkwaliteit-2018-in-vlaanderen-samenvatting>.
- Vlaanderen.be. (s.d.). Premie voor een nieuw zero-emissie-voertuig. Geraadpleegd via <https://www.vlaanderen.be/premie-voor-een-nieuw-zero-emissie-voertuig>.
- Volvo. (2019). Volvo Car Corporation participates in a project for the development of inductive charging for electric cars [Press release]. Geraadpleegd via <https://www.media.volvocars.com/global/en-gb/media/pressreleases/38135/photos%20mei%202011%20may%2019,%202011>.
- VREG. (2020). Evolutie energieprijzen en distributienettarieven. Geraadpleegd via <https://www.vreg.be/nl/evolutie-energieprijzen-en-distributienettarieven>.
- Wappelhorst, S., Pniewska, I. (2020). Emerging electric passenger car markets in Europe: Can Poland lead the way?. Geraadpleegd via <https://theicct.org/publications/poland-electric-passenger-car-market-sept2020>.
- Wesseling, J. H. (2016). Explaining variance in national electric vehicle policies. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 21, 28-38.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.eist.2016.03.001>.
- Yamauchi, M. (2017). How will autonomous vehicles charge themselves? Geraadpleegd via <https://www.pluglesspower.com/learn/solve-last-mile-vehicle-autonomy/>.
- Zhang, Q., Li, H., Zhu, L., Campana, P. E., Lu, H., Wallin, F., & Sun, Q. (2018). Factors influencing the economics of public charging infrastructures for EV – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94, 500-509.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.022>.