

Traffic & Transport

Automotive Campus 30
5708 JZ Helmond
Postbus 756
5700 AT Helmond

www.tno.nl

T +31 88 866 57 29
F +31 88 866 88 62

TNO / DNV-rapport**TNO 2021 R10550 | Eindrapport - Revisie**

Haalbaarheid van de bepaling van de restcapaciteit en de restlevensduur van de batterij van een gebruikt elektrisch voertuig

Datum	17 mei 2021 (Revisie: 13 december 2022)
Auteur(s)	Jos van der Burgt, Koen Broess, DNV Erik Hoedemaekers, Gertjan Koorneef, TNO
Exemplaarnummer	1
Oplage	1
Aantal pagina's	39 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	3
Opdrachtgever	Instituut voor Duurzame Mobiliteit
Projectnaam	IvDM - Accucheck
Projectnummer	060.46377

Alle rechten voorbehouden.

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

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

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

Voorwoord

Dit rapport beschrijft de aanpak en resultaten van het onderzoek naar de haalbaarheid van een uniforme “batterijcheck” voor gebruikte elektrische voertuigen. Het rapport is opgesteld door TNO en DNV .

Tijdens dit onderzoek hebben de auteurs regelmatig overleg gepleegd met de begeleidingscommissie, waarvoor dank. Deze bestond uit de volgende personen:

Dolf Teuwen, Instituut voor Duurzame Mobiliteit
Wout Benning, RAI Vereniging
Jan-Willem van der Linden, BOVAG

De auteurs bedanken verder de importeurs die geïnterviewd zijn. Zij hebben waardevolle informatie en inzichten gedeeld.

Als laatste een woord van dank aan de verschillende autobedrijven die met merkspecifieke en universele apparatuur geholpen hebben bij het uitlezen van de voertuigdata van een verscheidenheid aan elektrische auto's.

Samenvatting

De tweedehands markt voor elektrische auto's begint te groeien. Modellen die vanaf 2010 op de markt verschenen, komen nu als gebruikte auto (occasion) beschikbaar. Het belangrijkste en meest kostbare onderdeel van het elektrische voertuig (EV) is de batterij¹. Deze bepaalt hoe ver men met de elektrische auto kan rijden (actieradius of bereik). Elke oplaadbare batterij, dus ook de EV-batterij, kan na verloop van tijd minder elektriciteit opslaan en leveren: de capaciteit van de batterij neemt af.

Het is belangrijk dat kopers van een gebruikt EV goede informatie krijgen. Ook het verkopende autobedrijf wil zo veel mogelijk duidelijkheid en zekerheid over de restcapaciteit van de batterij in verband met garantie- en conformiteitskwesties (consumentenrecht). Daarom is het belangrijk dat verkopers (merkdealers en universele autobedrijven) ten minste een nauwkeurige inschatting kunnen maken van de restcapaciteit van de batterij van een gebruikt EV, en bij voorkeur ook van de verwachte restlevensduur. Daarover zijn afspraken gemaakt in het hoofdstuk Mobiliteit van het Klimaatkakoord. Daarom hebben TNO en DNV in opdracht van het Instituut voor Duurzame Mobiliteit (IvDM) onderzocht of een dergelijke "batterijcheck" haalbaar is voor merkdealers en universele autobedrijven en of dit geldt voor alle elektrische voertuigen op de (Nederlandse) markt. De methode die is gebruikt voor het onderzoek omvat een theoretisch kader, gesprekken met het merendeel van de EV-importeurs die op de Nederlandse markt actief zijn en metingen aan gebruikte EV's om te achterhalen welke informatie van het voertuig wel en niet uit te lezen is. Het totale marktaandeel van de besproken en geanalyseerde EV-modellen in het Nederlandse rijdende EV-wagenpark was in november 2020 gelijk aan 81%.

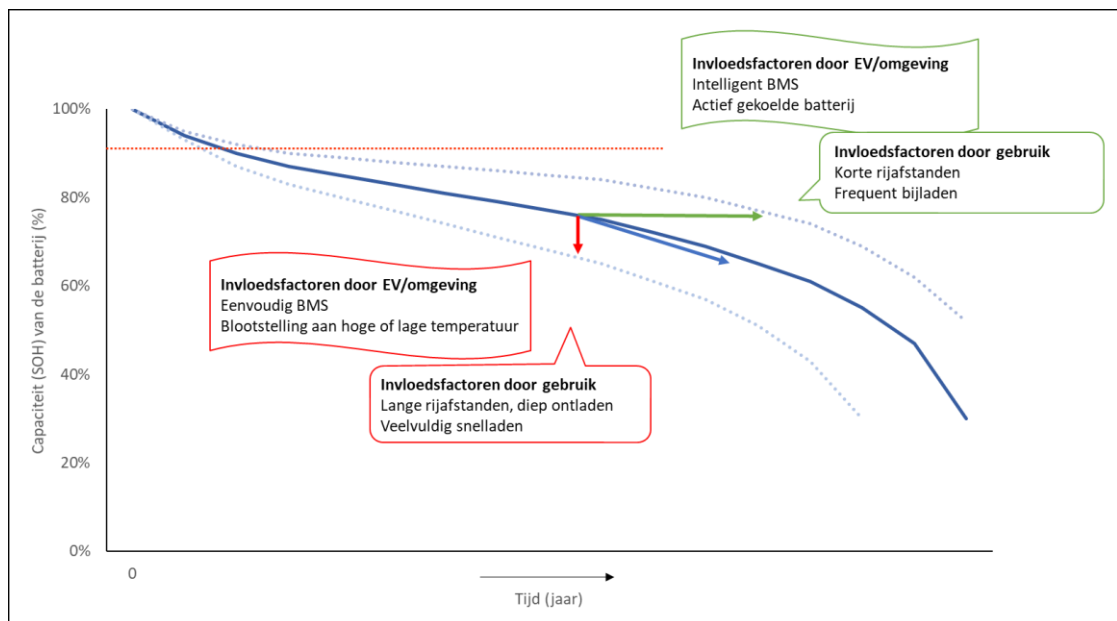
De verhouding tussen de huidige en de oorspronkelijke capaciteit van de batterij wordt ook wel aangeduid als 'state of health', afgekort als SoH. De SoH van een nieuwe batterij is gelijk aan 100%: de batterij kan worden opgeladen tot de volledige nominale capaciteit. De SoH neemt af door het gebruik in de loop van de tijd, namelijk met een percentage in de orde van 1,5 à 2,5% per jaar. Toen de huidige EV-modellen op de markt kwamen, circa vijf jaar geleden, werd gedacht dat de capaciteitsafname hoger zou zijn.

De conclusie is dat het momenteel nog niet mogelijk is om een eenvoudige, betrouwbare en merkonafhankelijke batterijcheck (SoH en restlevensduur) te ontwikkelen voor alle gebruikte EV's, die voor zowel merkdealers als universele autobedrijven toepasbaar is. Er zijn ook merkonafhankelijke aanbieders die een meetprocedure inclusief testrit aanbieden voor bepaling van de SoH. Deze procedures zijn echter tijdrovend (een voertuig moet bijvoorbeeld van volgeladen (bijna) volledig leeg gereden worden) en vallen om die reden buiten de scope van dit onderzoek. Om die reden is ook de nauwkeurigheid van deze methodes in het kader van dit onderzoek niet door ons onderzocht. De belangrijkste reden dat een eenvoudige, betrouwbare en merkonafhankelijke batterijcheck niet mogelijk is, is dat voor de actuele capaciteit of SoH van de batterij slechts bij een deel van de onderzochte EV's (17%) een indicatie aanwezig is via de zogenaamde digitale

¹ De batterij wordt ook wel accu genoemd. In dit rapport wordt de term 'batterij' gebruikt.

OBD²-aansluiting. En in geen van de onderzochte EV's is een indicatie voor de restlevensduur beschikbaar via OBD. Er zijn bij sommige merken waarbij geen directe SoH-indicatie kan worden afgegeven wel andere mogelijkheden om met een speciale, merkspecifieke meetprocedure bij een autobedrijf de actuele capaciteit van een batterij te bepalen, maar die zijn tijdrovend (het kost een tot twee dagen) en voornamelijk niet haalbaar voor een universele, merkonafhankelijke batterijcheck.

Waarom is het zo ingewikkeld om de resterende levensduur van een batterij op universele wijze onafhankelijk van het uitlezen van de bovengenoemde SoH te bepalen? Dat komt omdat er veel factoren zijn die mede bepalen hoe snel de capaciteit van een batterij afneemt, zoals technische factoren en het dagelijks gebruik van het EV. Denk aan de chemische samenstelling, het ontwerp en de configuratie van de batterij, maar ook aan de totaal gereden afstand per jaar, het rijgedrag, de interne regeling van de batterij, de oplaadsnelheid en de omgevingstemperatuur. Dit is in Figuur 1 hieronder visueel weergegeven. Daarnaast is de benodigde data uit het EV en de batterij niet voldoende beschikbaar om de resterende levensduur nauwkeurig te kunnen bepalen.



Figuur 1: De capaciteit (SoH) van de batterij neemt af in de loop der tijd en dit verloop wordt beïnvloed door technische en gebruiksfactoren. Het einde van de levensduur van de batterij zit tussen de 70 en 50% SoH. Na 50% SoH zal de batterij sneller verouderen en neemt de interne weerstand en warmteontwikkeling toe. Dit is het technische einde van de levensduur van de batterij. De rode stippellijn is waar de EV-software van veel fabrikanten aangeeft dat de SoH op 100% staat bij nieuwkoop. In het eerste jaar of de eerste jaren is dan niet zichtbaar in de EV-software dat de capaciteit al afgenomen is.

² OBD = on-board diagnostics

In dit rapport worden de volgende conclusies en aanbevelingen gedaan om tot een nauwkeurige, universele, merkonafhankelijke batterijcheck te komen die zowel voor merkdealers als universele autobedrijven praktisch toepasbaar is voor het rijdende wagenpark.

Conclusies

- Voor het bestaande wagenpark kan in 17% van de EV's een batterijcheck (SoH) direct uitgelezen worden.
- Voor 52% tot 62% van het bestaande wagenpark kan de huidige status van de batterij uitgelezen worden. De 62% geeft een grovere indicatie van de status van de batterij.
- Voor de overige EV's kan een OEM-specifieke testprocedure, eventueel met testrit, gebruikt worden waaruit de SoH-waarde volgt (en daaruit de restlevensduur). In een aantal gevallen is hiervoor de tussenkomst van de OEM vereist om tot een geverifieerde, nauwkeurige SoH te komen, waardoor het vooralsnog geen universeel toepasbare methode is.

Aanbevelingen

- Voor EV's die in de toekomst op de markt komen is het van belang dat SoH-informatie vrij toegankelijk beschikbaar komt op de OBD-aansluiting van elk EV. De SoH moet via een gestandaardiseerde formule beschikbaar komen zodat alle type voertuigen met elkaar te vergelijken zijn. Dit vereist een Europese/mondiale standaardisering van de benodigde data, uitgewerkt in Europese wetgeving. Mogelijkheden voor het afdwingen van deze informatiebeschikbaarheid zijn:
 - EU Batterijen Verordening (in ontwerp). In deze Verordening wordt vereist dat informatie over de SoH beschikbaar is (zonder verdere detaillering). SoH kent geen vaste formule, dus om er ook zeker van te zijn dat alle type voertuigen met elkaar te vergelijken zijn is het belangrijk om dit ook op te nemen in de verordening.
 - UN ECE, ter voorbereiding op de Europese typegoedkeuring van elektrische voertuigen. Hierin kan met name de RDW zijn input leveren.
 - Europese standaardisatie, met name CEN ISO 18541 betreffende de vrijgave van RMI-data³.
- Een schatting van de resterende levensduur is veel complexer, omdat het toekomstige gebruik van het voertuig niet bekend is. Er is verder onderzoek nodig om te bepalen binnen welke bandbreedte een schatting van de resterende levensduur mogelijk is op basis van gegevens van het voertuig en de batterij, de actuele batterijcapaciteit en het eerdere gebruik van het EV.
- Bij toekomstige implementatie van *Vehicle-to-Grid* (V2G) laadopties zou de batterijcheck geautomatiseerd kunnen worden. Het dient nog onderzocht te worden of (en zo ja, hoe) dit mogelijk gemaakt kan worden. Mogelijk kan dit dan in Europese wetgeving worden vereist.

³ RMI = repair and maintenance information

Inhoudsopgave

Voorwoord	2
Samenvatting	3
Afkortingen	7
1 Inleiding	8
1.1 Aanleiding voor het onderzoek	8
1.2 Onderzoeksvraag	9
1.3 Onderzoeksaanpak	9
2 Onderzoeksresultaten	15
2.1 Samenvatting van de bevindingen	15
2.2 Beschikbaarheid van data	16
2.3 Beschikbaarheid van de SoH	17
2.4 Bepaling van de restlevensduur	19
2.5 SoH-bepaling in de toekomst	20
3 Conclusies en aanbevelingen	22
3.1 Onderzoeksvraag en methode	22
3.2 Conclusies	22
3.3 Aanbevelingen	24
4 Ondertekening	26
Bijlage(n)	
A Definities	
B Technische aspecten van EV-batterijen	
C Resultaten van de praktijktests	

Afkortingen

BEV	Batterij-Elektrische Voertuig
BMS	Batterij Management Systeem
EV	Elektrische Voertuig
FCEV	<i>Fuel Cell Electric Vehicle</i>
LFP	<i>Lithium Iron Phosphate</i> (lithium ijzerfosfaat; type Li-ion batterijchemie)
Li-ion	Lithium-ion (batterijchemie)
MMS	Motor Management Systeem
NMC	<i>Nickel Manganese Cobalt</i> (nikkel mangaan kobalt; type Li-ion batterijchemie)
OBD	<i>On-Board Diagnostics</i>
OEM	<i>Original Equipment Manufacturer</i> , d.i. de autofabrikant
PHEV	Plug-in Hybride-Elektrisch Voertuig
RMI	<i>Repair and Maintenance Information</i>
SoC	<i>State of Charge</i> (= energieniveau = actuele energie-inhoud als percentage van de restcapaciteit)
SoH	<i>State of Health</i> (= restcapaciteit als percentage van de originele capaciteit)
VMS	Voertuig Management Systeem
V2G	Vehicle-to-Grid

1 Inleiding

1.1 Aanleiding voor het onderzoek

De tweedehands markt voor elektrische auto's⁴ begint te groeien. Modellen die vanaf 2010 op de markt verschenen, komen nu als gebruikte auto (occasion) beschikbaar. Gebruikte elektrische auto's zijn interessant vanwege de duurzaamheid (lagere emissies), gunstige fiscale behandeling, de mogelijkheid om de batterij te laden tegen een gunstig tarief en het geringe onderhoud. Dit laatste geldt, omdat de aandrijving minder bewegende, slijtagegevoelige onderdelen heeft.

Het belangrijkste en meest kostbare onderdeel van het EV is de batterij. De energiecapaciteit van de batterij bepaalt de actieradius of het bereik van het EV, oftewel hoe ver men met de elektrische auto kan rijden. Alle oplaadbare batterijen, dus ook EV-batterijen, kunnen na verloop van tijd minder elektriciteit opslaan en leveren, ook als ze niet gebruikt worden. Met andere woorden: de capaciteit van de batterij neemt af. De actieradius van het EV neemt daarbij ongeveer evenredig af met de capaciteit van de batterij.

Het is dus belangrijk om een nauwkeurige inschatting te kunnen maken van de restcapaciteit van de batterij bij de aanschaf c.q. verkoop van een gebruikt EV, en ook van de verwachte restlevensduur (de tijdsduur tot het moment waarop de capaciteit van de batterij niet meer voldoende is om nog met het EV te rijden). Het doel hiervan is om de consument inzicht en vertrouwen te geven bij de aanschaf van een gebruikt EV. Om deze reden is er ook een afspraak opgenomen in het Klimaatakkoord - hoofdstuk Mobiliteit (pag. 56):

“Partijen (Rijksoverheid, ANWB, BOVAG, DOET, RAI Vereniging en de Vereniging Elektrische Rijders) voeren zo spoedig mogelijk een uniforme batterijcheck in. Zodra dit mogelijk is wordt aan de batterijcheck een garantietermijn verbonden.”

Daarnaast wil ook het verkopende autobedrijf zo veel mogelijk duidelijkheid en zekerheid over de restcapaciteit van de batterij in verband met garantie- en conformiteitskwesties (consumentenrecht).

Daarom hebben TNO en DNV in opdracht van IvDM een onderzoek uitgevoerd naar de haalbaarheid van een betrouwbare uniforme batterijcheck.

⁴ In dit onderzoek wordt alleen naar volledig elektrische voertuigen (EV) gekeken, die gebruik maken van energie die in batterijen wordt opgeslagen. Deze voertuigen worden ook wel batterij-elektrische voertuigen (BEV) genoemd. Een EV kan ook een FCEV zijn: *fuel cell electric vehicle*, oftewel een EV met een brandstofcel voor elektriciteitsopwekking. FCEV's en plug-in hybride elektrische voertuigen (PHEV) worden in dit onderzoek buiten beschouwing gelaten.

1.2 Onderzoeksvraag

De vraag van IvDM omtrent de restlevensduur van batterijen in EV's is na overleg verhelderd en geconcretiseerd in een hoofdonderzoeksvraag:

“Kan een merkonafhankelijke en universeel toepasbare batterijcheck worden ontwikkeld voor volledig elektrische voertuigen die momenteel rondrijden, met als doel de consument inzicht te geven in de verwachte levensduur van het voertuig?”

Deze hoofdvraag is opgedeeld in twee deelvragen:

- Kan de huidige (actuele) *state of health* (SoH) van een batterij in een elektrische auto nauwkeurig worden bepaald door merkdealers én universele autobedrijven?
- Is alle vereiste data benodigd voor een betrouwbare inschatting van de restlevensduur toegankelijk voor merkdealers én universele autobedrijven?

In Bijlage A worden de termen capaciteit, SoH en (rest)levensduur uitgelegd.

1.3 Onderzoeksaanpak

Door middel van deskresearch is een theoretisch kader tot stand gekomen over batterijcapaciteit, de factoren die daarop van invloed zijn en mogelijke manieren om de restlevensduur van een batterij te bepalen. Daarnaast zijn gesprekken gevoerd met het merendeel van de EV-importeurs die op de Nederlandse markt actief zijn. Ook zijn metingen uitgevoerd aan gebruikte EV's om te achterhalen welke informatie over de batterij uit te lezen is. De informatie van de importeurs en de resultaten van de metingen zijn anoniem verwerkt, zodat uit dit rapport niet te achterhalen valt hoe specifieke merken en modellen presteren.

1.3.1 *Theoretisch model en beslisboom*

Als startpunt van het onderzoek is een theoretische analyse van de inschatting van de restlevensduur uitgevoerd, zie Bijlage B. Als ijkpunt voor de levensduur wordt de garantiewaarde van de SoH genomen. De fabrieksgarantie van vrijwel alle OEM's garandeert een SoH van meer dan 70% binnen een termijn van 8 jaar of 160.000 km (hetgeen als eerste komt). In de theoretische analyse worden meer en minder complexe modellen besproken met de daarvoor benodigde data uit het voertuig. De belangrijkste invoerparameter voor alle levensduurmodellen (en de belangrijkste in verband met de garantie) is de actuele SoH van de batterij. Daarom ligt de nadruk van het onderzoek op het bepalen van de SoH. Daarbij gaat de voorkeur uit naar het rechtstreeks uitlezen van de SoH-waarde uit de OBD-aansluiting van het voertuig – dit zou eenvoudig en snel toegang geven tot een SoH-waarde die reeds is berekend door het voertuig –, mits deze voldoende nauwkeurig is. Maar er zijn ook andere methoden, gebaseerd op een combinatie van OBD-data uit het EV (zie Bijlage B).

Uit de theoretische analyse en de daarmee samenhangende behoefte aan EV-data is een beslisboom afgeleid, die inzicht geeft in de kans op succes om de SoH en de levensduur van de EV-batterij te bepalen, zie Figuur 2.

De beslisboom structureert de beschikbaarheid van EV-data via enkele inzichtelijke stappen, die al dan niet leiden tot een succesvolle uitkomst. Naast de gewenste informatie over het EV zijn ook de mogelijke methodes van restlevensduur-inschatting uit Sectie B.2.1 meegenomen in de beslisboom.

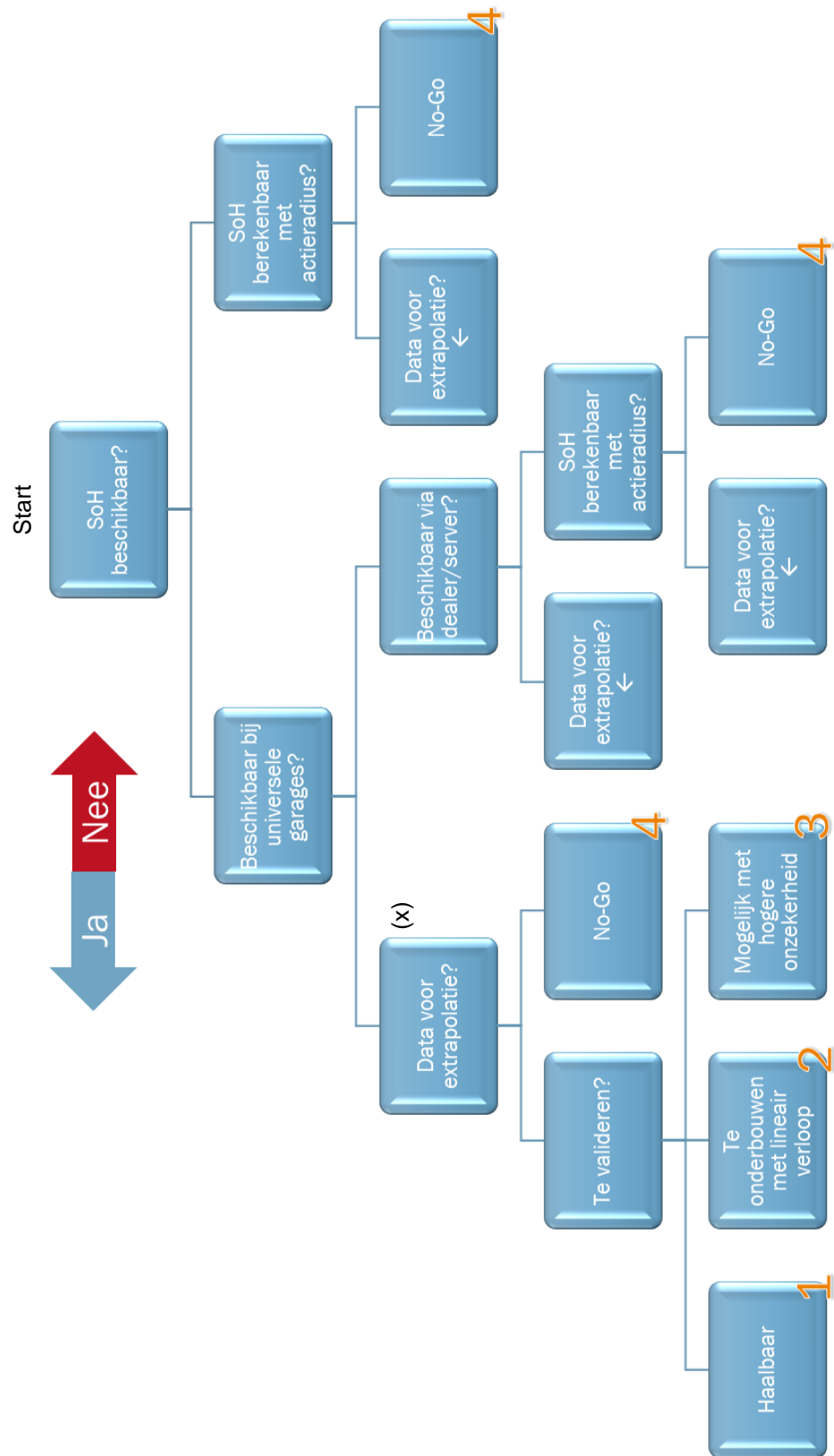
Stap 1 in de beslisboom is te kijken of de SoH beschikbaar is. Als deze beschikbaar is, geldt dat dan ook voor universele bedrijven of alleen voor merkdealers? Daarna is in beide gevallen de vraag: is er data beschikbaar voor extrapolatie van de SoH, zodat de levensduur kan worden bepaald? De volgende vraag is of de extrapolatie met een merkonafhankelijke methode is te valideren. Afhankelijk van de hoeveelheid data kan de validatie met meer of minder nauwkeurigheid gedaan worden (laatste stap).

Als de SoH niet beschikbaar is (de eerste stap gaat naar rechts), kan deze mogelijk bepaald worden met behulp van de actieradius, als die met voldoende nauwkeurigheid bekend is. Via de data voor extrapolatie zou dit ook kunnen leiden tot een bevredigende inschatting van de levensduur. Als de SoH én de data voor extrapolatie niet met voldoende nauwkeurigheid te achterhalen zijn, dan is het niet mogelijk om een levensduurinschatting te maken, wat aangegeven wordt met 'No-Go' in de beslisboom.

Een pad in de beslisboom kan eindigen op 4 verschillende opties volgens onderstaande lijst:

- 1 *Haalbaar*: De huidige batterijcapaciteit (SoH) is beschikbaar en de restlevensduur kan voldoende nauwkeurig worden ingeschat, bijvoorbeeld door kennis over het verloop van de SoH in relatie tot het aantal gereden kilometers (zie sectie B.2.1).
- 2 *Te onderbouwen met lineair verloop*: De huidige batterijcapaciteit is beschikbaar. Er is echter niet voldoende EV-data voor een beargumenteerd SoH-verloop in de toekomst, maar wel om onder de aanname van een lineair verloop een acceptabele inschatting van de restlevensduur te geven.
- 3 *Mogelijk met hogere onzekerheid*: De huidige batterijcapaciteit is met een gelimiteerde nauwkeurigheid beschikbaar, maar de data is niet voldoende nauwkeurig om een realistische extrapolatie voor de levensduur uit te voeren.
- 4 *No-Go*: De huidige batterijcapaciteit is niet beschikbaar en er is daarom géén inschatting van de restlevensduur mogelijk.

De beslisboom is gebruikt om per EV-type de haalbaarheid van een bepaling van de levensduur te onderzoeken.



Figuur 2: Beslisboom ter analyse van de beschikbare data per merk/model EV met als doel het bepalen van de restlevensduur. Als bij een stap het antwoord op de vraag 'Ja' is, gaat men in de boom naar links, bij nee gaat men naar rechts. De witte pijltjes '←' verwijzen naar de stap met (x).

1.3.2 *Dataverzameling*

Zoals hierboven aangegeven zijn de methodes voor het bepalen van de SoH en de restlevensduur afhankelijk van het beschikbaar stellen van informatie en data over de specifieke voertuigen door de OEM's (via de digitale OBD-aansluiting of anderszins) aan de bedrijven die een dergelijke test in de praktijk zullen gaan uitvoeren: dealers, merkgebonden reparateurs en onafhankelijke marktpartijen. Het aanspreekpunt van een OEM in Nederland is typisch de importeur van het desbetreffende merk, die tevens in direct contact staat met zijn merkdealers. Op basis van de Europese mededingingswetgeving voor de autosector⁵ kunnen onafhankelijke marktpartijen, onder de daarvoor geldende voorwaarden en procedures, ook een beroep doen op relevante technische informatie, alsmede gereedschappen, apparatuur en opleidingen vanuit de OEM's.

Om bovenstaande redenen is gekozen om te starten met een informatievraag aan de importeurs, om informatie te verzamelen over de beschikbare gegevens in en over hun elektrische voertuigen. Er is afgesproken dat de gegevensverwerking anoniem zou gebeuren, omdat de informatie in veel gevallen het intellectueel eigendom van de OEM's raakt. Uit het theoretisch kader (Bijlage B) kwam een lange lijst aan gewenste voertuigdata naar voren die betrekking heeft op de batterij, het voertuig, het rij- en laadgedrag van de rijder en omgevingscondities. Gezien het uitgebreide karakter van de gewenste informatie en om de benodigde tijd van de importeurs te beperken (met als doel een gestroomlijnde samenwerking), is gekozen om een shortlist van de meest voorkomende EV-modellen te maken en de uitvraag hierop te richten.

De shortlist is gebaseerd op de meest verkochte EV's van de afgelopen jaren (data beschikbaar gesteld door BOVAG). Deze modellen hebben samen een marktaandeel op de Nederlandse rijdende EV-markt van 83% (november 2020). De lijst omvat de volgende modellen, in alfabetische volgorde (gelimiteerd tot één model per merk, modeljaar 2017/2018):

- Audi E-tron
- BMW i3
- Fiat 500 La Prima (2020)
- Hyundai Ioniq
- Jaguar I-Pace
- Kia Niro Electric
- Mercedes EQC (2019)
- MG ZS
- Nissan Leaf
- Opel Ampera-E
- Renault Zoe
- Smart ForTwo ED
- Tesla Model S (geen lid van RAI-Vereniging of BOVAG)
- Volkswagen e-Golf

Voor bovenstaande voertuigen is een vragenlijst gecreëerd die via de RAI-Vereniging is gedeeld met de verantwoordelijke importeurs. Uit de reacties bleek al

⁵ EU nr. 461/2010: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/NL/ALL/?uri=CELEX%3A32010R0461>. Zie ook: <https://www.raivereniging.nl/artikel/dossiers/block-exemption/europese-mededingingswetgeving-voor-de-autosector.html>

snel dat veel van de gevraagde informatie niet beschikbaar is. Daarom is besloten om interviews met importeurs op te zetten. Op deze manier is de discussie gestart en werden op constructieve manier inzichten gedeeld.

Ter bevestiging van de door importeurs verstrekte informatie – en om te ervaren welke informatie in de praktijk via de OBD-aansluiting is uit te lezen – is met ondersteuning van meerdere merkdealers een groot aantal van de beoogde modellen (zie lijst in sectie 1.3.3) getest. Dit is deels gedaan met merkspecifieke apparatuur van dealers (waar nodig met ondersteuning van een monteur), deels middels een remote connectie naar AutoNiveau (in de achtergrond, met merkspecifieke apparatuur of universele apparatuur) en voor alle voertuigen met apparatuur waarover universele autobedrijven beschikken (in deze tests een tester van het type Launch X431 Pro).

1.3.3 *Overzicht van de verzamelde data*

De volgende importeurs zijn geïnterviewd:

- BMW
- Daimler (Mercedes & Smart)
- Hyundai
- Jaguar Land Rover
- Kia
- Nissan
- PON (Audi, Seat, Skoda & Volkswagen)
- PSA (Peugeot, Citroën, Opel, DS)
- Renault
- Tesla (via e-mail)

De analyses in het onderzoek zijn gebaseerd op de volgende 12 EV-modellen.

Deze modellen zijn besproken in de interviews met de importeurs. Bij verschillende autobedrijven zijn individuele EV's van de met (*) aangeduide modellen uitgelezen met OBD-apparatuur. De meetresultaten zijn geanonimiseerd terug te vinden in Bijlage C.

- Audi E-tron
- BMW i3 (*)
- Hyundai Ioniq (*)
- Jaguar I-Pace
- Kia Niro Electric
- Mercedes EQC (2019)
- Nissan Leaf (*)
- Opel Ampera-E
- Renault Zoe (*)
- Smart ForTwo ED
- Tesla⁶ Model S
- Volkswagen e-Golf (*)

Het totale marktaandeel van deze 12 EV-modellen in het Nederlandse rijdende EV-wagenpark was in november 2020 gelijk aan 81%.

⁶ Tesla's reactie omvatte al hun huidige modellen, dit is meegenomen in de marktpercentages.

Er is bij de analyses geen rekening gehouden met eventuele verschillen tussen modeluitvoeringen of -generaties. Er wordt aangenomen dat de uitlezing van een individueel EV representatief is voor de gehele modelserie. Dit laatste werd in het algemeen bevestigd door de importeurs.

2 Onderzoeksresultaten

2.1 Samenvatting van de bevindingen

Beschikbaarheid van EV-data

- Volgens geconsulteerde importeurs is de beschikbaarheid van batterijgegevens uit de OBD-uitleesapparatuur van autobedrijven zeer beperkt, veelal gelimiteerd tot huidige meetwaarden en nauwelijks relevante historische gegevens. Ook gaven de meeste importeurs aan dat OEM's toegang hebben tot meer batterijgegevens, maar deze worden vaak niet vrijgegeven aan merkdealers noch aan universele autobedrijven.
- Bij het uitlezen van de batterijgegevens werden geen verschillen gevonden tussen uitlezing met merkapparatuur of met universele OBD-apparatuur.
- De restcapaciteit (SoH) is de belangrijkste parameter voor de inschatting van de verwachte levensduur van de EV-batterij.

State of Health (SoH)

- In het onderzoek zijn 12 van de meest gangbare EV-modellen onderzocht. Deze representeren samen 81% van de Nederlandse EV-markt, zie 1.3.3.
- Bij 4 van de 12 onderzochte EV-modellen (17% van de EV-markt) kan de SoH als percentage van de originele waarde worden uitgelezen uit de OBD-aansluiting. Dit is de ideale situatie, omdat de SoH als percentage gebruikt kan worden voor verdere analyse van de toestand van de batterij en zijn restlevensduur. Bij het overgrote deel van de EV-modellen is deze SoH-waarde dus niet direct uit te lezen.
- Bij 3 van de 12 modellen (35% marktaandeel) kan de SoH als capaciteitswaarde in kWh worden uitgelezen; in 2 gevallen (10%) wordt de SoH in grove stappen weergegeven. Deze situaties zijn minder ideaal, omdat de SoH als percentage van de startwaarde niet direct herleidbaar en/of te onnauwkeurig is. Het vermoeden bestaat dat dit met aanvullende batterijgegevens wel mogelijk is, maar die worden niet beschikbaar gesteld via de OBD-uitlezing.
- In 3 van de 12 gevallen (19% van de EV-markt) geeft de OBD-uitlezing slechts een melding of de garantiewaarde van de SoH (gelijk aan 70%) wel of niet is overschreden. Hiermee is dus geen informatie over het actuele SoH-percentage bekend en is een levensduurinschatting onhaalbaar. Ook in deze gevallen vermoeden de importeurs dat aanvullende batterijgegevens wel in het managementsysteem zitten, maar niet extern beschikbaar zijn.
- Bij een aantal merken is het naast het bovenstaande ook mogelijk om middels een merkspecifieke testprocedure bij een autobedrijf een capaciteitsmeting te laten uitvoeren die uiteindelijk het SoH-percentage aan de klant vrijgeeft. Echter, deze test duurt een tot twee dagen, waarmee dit niet praktisch lijkt voor grote hoeveelheden tweedehands EV's.
- Er zijn ook merkonafhankelijke aanbieders die een meetprocedure inclusief testrit aanbieden voor bepaling van de SoH. Deze procedures zijn echter complex en tijdrovend en de nauwkeurigheid is niet geverifieerd. Ook is het vooralsnog onduidelijk of de gebruikte batterij- en voertuigdata met goedkeuring van de OEM én de consument gebruikt wordt.

- Bij toekomstige implementatie van *Vehicle-to-Grid* (V2G) laadopties zou deze test geautomatiseerd kunnen worden en ook sneller kunnen verlopen. Het dient nog onderzocht te worden of en hoe zo'n test geautomatiseerd kan worden. Mogelijk kan dit dan in EU-wetgeving worden vereist.

Voor een universele batterijcheck is het in ieder geval nodig dat de SoH als percentage van de startwaarde kan worden uitgelezen met universele OBD-uitleesapparatuur. Het is zeer aannemelijk dat dit SoH-percentage bij alle EV's intern aanwezig is, hoewel het niet in alle gevallen via de OBD-aansluiting beschikbaar is. Internationale of Europese wetgeving is de beste route om deze mogelijkheid verplicht te stellen, opdat OEM's het technisch mogelijk maken.

Verwachte levensduur

- Geen enkel EV-dashboard, OBD-diagnosesysteem of OEM-systeem geeft een indicatie voor de restlevensduur van een EV. Indien gewenst zal dit met een onafhankelijk voorspelmodel moeten worden bepaald.
- Als de SoH van elk EV in de toekomst beschikbaar is, kan een voorspelmodel voor de restlevensduur worden opgezet. Een dergelijk voorspelmodel is complex, omdat het toekomstige gebruik van het voertuig niet bekend is. Daarom is verder onderzoek nodig om te bepalen binnen welke bandbreedte een schatting van de resterende levensduur mogelijk is op basis van de actuele batterijcapaciteit (SoH) en het eerdere gebruik van het EV. Deze inzichten zouden middels *big data*- en *machine learning*-technieken verkregen kunnen worden, zoals beschreven in B.2.1.4.

2.2 Beschikbaarheid van data

De restlevensduur van een EV-batterij hangt af van uiteenlopende factoren, zoals de chemische samenstelling, het ontwerp en de configuratie van de batterij, de interne regeling van de batterij (het batterijmanagementsysteem – BMS), de totaal gereden afstand per jaar, het rijgedrag, het aantal laadsessies, de oplaadsnelheid en de omgevingstemperatuur (zie Bijlage B.1).

Uit de informatie van de importeurs blijkt dat van al deze factoren alleen de totaal gereden afstand eenvoudig is af te lezen. Verder is op het dashboard van alle geanalyseerde EV's het actuele energieniveau van de batterij (de *State of Charge* = SoC) af te lezen en de nog te rijden afstand. De importeurs bevestigen de vaststelling dat de SoH de belangrijkste parameter is voor het inschatten van de restlevensduur. De importeurs bevestigen ook dat de actuele SoH niet beschikbaar is op het dashboard. De nog te rijden afstand bij een volle batterij is de actieradius van het voertuig. Die hangt samen met de SoH van de batterij, maar dit verband is zo sterk afhankelijk van externe factoren, zoals het rij- en laadgedrag en de omgevingstemperatuur, dat de actieradius niet bruikbaar is om de SoH te herleiden. Hoewel de SoH en de actieradius in de loop van de tijd beide afnemen, is een modelmatig verband tussen deze twee parameters onbetrouwbaar en onbruikbaar voor een levensduurinschatting.

Uit de gesprekken met de importeurs en de diagnosetestsessies bij de autobedrijven kwam naar voren dat de informatie uit de batterij via de OBD-uitleesapparatuur voornamelijk beperkt is tot huidige meetwaardes en nauwelijks relevantie historische informatie bevat. Bij de diagnosetests kwam verder naar voren dat er geen verschillen waren tussen de merkgebonden en de universele OBD-apparatuur voor wat betreft de batterijdata. Dit is in overeenstemming met de

regels uit de eerder aangehaalde Europese mededingingswetgeving voor de autosector.

Versillende importeurs hebben in voorkomende gevallen navraag gedaan bij hun OEM's over aanvullende data uit de batterij. De OEM's bevestigen dat die data er wel is, maar dat die alleen voor ontwikkelingsdoeleinden bedoeld is en dus niet beschikbaar is voor autobedrijven. In een klein aantal gevallen is aanvullende data via de OEM beschikbaar voor de technische afdeling van de importeur, maar niet voor de universele noch voor de merkgebonden autobedrijven. De verdere analyse richt zich daarom op de SoH.

2.3 Beschikbaarheid van de SoH

Tabel 1 geeft een overzicht van de beschikbare informatie over de restcapaciteit (SoH) in geanonimiseerde vorm. De informatie is verkregen uit de diagnostests en de interviews. De 14 beschouwde EV-typen (modellen) uit sectie 1.3.2 zijn in de tabel onderverdeeld in 7 categorieën (Cat.), afhankelijk van de vorm waarin de SoH beschikbaar is (inclusief 2 modellen met 'Geen reactie'). De laatste kolom geeft het gerepresenteerde marktaandeel weer, dit is het huidige marktaandeel van de betreffende modellen, gebaseerd op wagenparkcijfers van BOVAG (nov. 2020). Het marktaandeel van de 12 geanalyseerde EV-typen samen is dus gelijk aan 81%. Als daarnaast mag worden aangenomen dat vergelijkbare OBD-data beschikbaar is voor andere modellen van de desbetreffende merken, dan is dit representatief voor 93% van de totale rijdende EV-markt.

Tabel 1 laat het volgende zien:

- Bij 4 van de 12 beschouwde EV-modellen (dit is 17% van de EV-markt) werd gevonden dat de SoH als percentage van de originele waarde kan worden uitgelezen uit de OBD-aansluiting (Cat. 1 in de tabel). Dit is de ideale situatie, omdat de SoH als percentage gebruikt kan worden voor verdere analyse van de toestand van de batterij en zijn restlevensduur (zie Bijlage B.2).
- Bij 3 van de 12 modellen (35% marktaandeel) kan de SoH als capaciteitswaarde in kWh worden uitgelezen (Cat. 2). Dit is minder ideaal, omdat de startwaarde van de capaciteit onduidelijk is, waardoor de SoH in procenten niet kan worden berekend en verdere analyse wordt bemoeilijkt.
- In twee gevallen wordt de SoH in grove stappen weergegeven (Cat. 3), waardoor de schatting van het SoH-percentage te onnauwkeurig is.
- In 2 van de 12 gevallen geeft de OBD-uitlesing slechts een melding of de garantiewaarde van de SoH (gelijk aan 70%) wel of niet is overschreden (Cat. 4). Dit geeft dus geen mathematische waarde die bruikbaar is voor verdere analyse.
- In één geval is er geen indicatie van de SoH uit de OBD-tester beschikbaar. De desbetreffende importeur geeft aan de garantieconditie te beproeven middels een combinatie van andere data van de OEM en indien nodig een rijtest (Cat. 5).

Uit deze analyse blijkt dat voor het grootste deel van de modellen waarover een reactie is ontvangen een indicatie van de huidige SoH beschikbaar is, namelijk voor 9 van de 12 modellen (Cat. 1, 2 en 3). Voor een deel van de modellen is dit echter slechts beperkt bruikbare informatie: de resolutie is beperkt of een referentiewaarde ontbreekt, waardoor een percentage niet berekenbaar is. Voor de 4 modellen in

Cat 1 kan de verantwoordelijke importeur met zekerheid aangeven dat een SoH-percentage beschikbaar is. Dit representeert echter slechts 17% van de totale EV-markt. In alle gevallen hadden merkgebonden en universele autobedrijven dezelfde mogelijkheden met hun OBD-apparatuur.

Tabel 1: SoH-beschikbaarheid bij uitgevraagde EV-typen

Beschikbaarheid	Cat.	Opmerking	Aantal EV-typen	Gerepresenteerd markt-aandeel	
Restcapaciteit als percentage (SoH)	1	SoH in % wordt gegeven	4	17%	Totaal 81%
Restcapaciteit als huidige capaciteit (in kWh)	2	Originele capaciteit onduidelijk → %SoH onbekend	3	35%	
Restcapaciteit in beperkte resolutie	3	Te grove stappen → %SoH onbekend	2	10%	
Restcapaciteit garantieconditie overschreden	4	Slechts een melding als SoH onder gegarandeerde waarde komt → %SoH onbekend	2	14%	
Restcapaciteit niet beschikbaar	5	→ %SoH onbekend	1	5%	
Geen reactie	6		2	2%	
Geen onderdeel van uitvraag	7	In deze studie zijn niet alle importeurs uitgenodigd, zie sectie 1.3.2	Rest	17%	

Opmerkelijk is dat bij één EV van ca. 3 jaar oud met ca. 130.000 km op de teller de actuele SoH-waarde op 100% stond, wat zeer onwaarschijnlijk is. De betreffende dealer gaf daarbij aan de SoH voor andere EV's van dit model in het verleden vaker te hebben opgevraagd, waarbij het antwoord steeds 100% was.

In alle gevallen bevestigen de importeurs dat zij uiteraard methodes hebben om te bepalen of de garantiecondities overschreden zijn (veelal 70% SoH en in sommige gevallen een ander percentage). Dit geeft aan dat het voertuig (of de OEM middels een *cloud-based service*) op een of andere manier een SoH-percentage bijhoudt; dit vermoeden wordt door een significant deel van de importeurs onderschreven. Eén importeur bevestigt dat er onderhuids wel een SoH-percentage beschikbaar is, dat momenteel echter niet wordt vrijgegeven aan diagnoseapparatuur.

Betreffende de snelheid van de capaciteitsafname is de algemene feedback van alle importeurs dat de degradatie van batterijen in hun EV's tot dusver positiever is dan vooraf, bij de introductie ca. 5 jaar geleden, verwacht. Er zijn slechts enkele importeurs die incidenteel een batterij hebben (laten) vervangen vanwege een SoH onder de garantiewaarde; het merendeel van de vervangingen heeft andere oorzaken (defecten, aanrijdingen, etc.). Alleen over de modellen die als eerste op de markt kwamen (dat wil zeggen vóór 2015) werd gemeld dat daarvan wel eens batterijen op basis van een te lage SoH werden vervangen, maar ook die importeurs geven aan dat dit aanzienlijk is verbeterd in de latere modellen (grotendeels de laatste 5 jaar). Vóór 2015 waren er slechts 6825 volledig elektrische voertuigen in Nederland, vergeleken met 144.876 eind oktober 2020. Door dit aanzienlijke

verschil in aantallen zullen specifieke issues met de allereerste modellen weinig impact hebben op het statistische overzicht.

Als enkel een indicatie van de huidige status van de batterij benodigd is (bijvoorbeeld om een inschatting te maken van de huidige actieradius aan de hand van een typisch energieverbruik), volstaat naast Cat. 1 ook Cat. 2 en met verminderde nauwkeurigheid ook Cat. 3. Deze data is dan beschikbaar voor respectievelijk 52% en 62% van de voertuigen.

2.4 Bepaling van de restlevensduur

Aan de hand van de informatie verzameld bij de importeurs en de praktisch uitgevoerde OBD-uitlezing van de voertuigen kan de balans worden opgemaakt omtrent de haalbaarheid van een restlevensduurinschatting. Hiervoor wordt de beslisboom uit sectie 1.3.1 gebruikt. De uitkomsten uit deze beslisboom zijn samengevat in Tabel 2. Het gaat hierbij dus over een voorspelling van de restlevensduur, niet over de actuele SoH.

Tabel 2: Uitkomst haalbaarheid restlevensduurbepaling

Haalbaarheid restlevensduurbepaling	Aantal EV-typen	Gerepresenteerd marktaandeel	Totaal 81%
1 – Haalbaar	0	0%	
2 – Te onderbouwen met lineair verloop	4	17%	
3 – Mogelijk met hogere onzekerheid	5	45%	
4 – Niet mogelijk (no-go)	3	19%	
Onbekend	Rest	19%	

De meest opvallende conclusie uit bovenstaande analyse is dat er voor geen enkel model een 100% haalbaarheid aangegeven kan worden voor de inschatting van de restlevensduur van de EV-batterij. Dit heeft met name te maken met het gebrek aan informatie over het toekomstige SoH-verloop van de EV-batterijen, omdat dit sterk afhangt van externe factoren, zoals het rij- en laadgedrag van de rijder en de omgevingstemperatuur. Zelfs met geavanceerde batterijmodellen van de OEM is een betrouwbare voorspelling van de levensduur hierdoor niet te maken.

De methodes die in veel gevallen wel mogelijk zijn, zijn levensduurvoorspellingen gebaseerd op de lineaire extrapolaties van de SoH-afname, beschreven in sectie B.2.1.1 en B.2.1.2. De beslisboomuitkomsten die hieraan gerelateerd zijn, zijn '2' en '3'. Bij uitkomst '2' is het aannemelijk dat dit nauwkeurig genoeg gedaan kan worden (aannemelijk voor 17% van de markt). In het geval van uitkomst '3' (45% van de markt) kunnen er specifieke beperkingen in de data zitten waardoor de nauwkeurigheid waarschijnlijk niet voldoende is (bijvoorbeeld te grove stappen in de inschatting of een gebrek aan informatie over de capaciteit van een nieuwe batterij).

Zoals in sectie 2.3 aangegeven, is voor een deel van deze derde categorie het gebrek aan informatie (met name de referentiewaarde van de originele capaciteit) mogelijk op te lossen, waarmee het marktaandeel van uitkomst '2' uit zou komen op ca. 52%. Deze categorie omvat echter nog steeds slechts grofweg de helft van de totale EV-markt, waarmee geconcludeerd moet worden dat er met de momenteel beschikbare data geen universele oplossing voor handen is voor het bepalen van de levensduur van huidige EV's.

De laatste categorie 'No-Go' bevat voertuigen welke geen of slechts zeer beperkte informatie over de degradatie van de batterij aan de OBD-apparatuur geven. In het laatste geval wordt enkel een indicatie gegeven of de batterij wel of niet onder de 70% van zijn originele capaciteit zit. Wel is het voor deze voertuigen (ook voor enkele andere) mogelijk om middels een merkspecifieke testprocedure bij een autobedrijf een capaciteitsmeting te laten uitvoeren die uiteindelijk het SoH-percentage aan de klant vrijgeeft. Deze test duurt echter één tot twee dagen. Voor grote hoeveelheden tweedehands EV's op de markt lijkt dat geen praktische optie. Er zijn ook merkonafhankelijke aanbieders die een meetprocedure inclusief testrit aanbieden voor bepaling van de SoH. Deze procedures zijn echter complex en tijdrovend en de nauwkeurigheid is niet geverifieerd. Ook is het vooralsnog onduidelijk of de gebruikte batterij- en voertuigdata met goedkeuring van de consument (mogelijk privacygevoelig) én de OEM gebruikt wordt. Om de data die het voertuig genereert beschikbaar te stellen aan derden voor commerciële doeleinden, is hoogstwaarschijnlijk toestemming van de OEM's vereist. Dit juridische vraagstuk staat nog open.

Voor de voertuigen in uitkomst '3' en '4' is het ook aannemelijk dat deze intern wél een inschatting van de huidige batterijcapaciteit beschikbaar hebben (hoewel niet vrijgegeven), want zowel grove indicaties als indicaties of de capaciteit boven de 70% ligt vereisen toch intern een meer gedetailleerde SoH-waarde.

2.5 SoH-bepaling in de toekomst

In de vorige sectie is uiteengezet dat de meest kansrijke methode om de restlevensduur van de EV-batterij te bepalen uit gaat van het SoH-percentage. Met het actuele SoH-percentage en het historische verloop van de SoH-afname kan door middel van lineaire extrapolatie een inschatting van de restlevensduur worden gemaakt, dat wil zeggen het moment waarop de SoH de garantiewaarde van 70% bereikt.

Om deze methode te kunnen toepassen, is het cruciaal dat de actuele SoH-waarde beschikbaar is via de OBD-aansluiting⁷ (of op een andere eenvoudige manier). Zoals hierboven al aangegeven, heerst het sterke vermoeden dat elke EV-batterij intern zijn SoH bijhoudt, maar dat die niet altijd extern beschikbaar is. Er bestaan al onafhankelijke partijen die deze mogelijkheid voor sommige EV-typen aanbieden, zij het met omslachtige methoden (zie sectie B.2.1.4). De situatie zou verbeterd kunnen worden wanneer er in internationale en dan met name Europese wetgeving wordt vastgelegd dat de actuele SoH voor elk autobedrijf uit te lezen moet zijn onder gedefinieerde condities en met voldoende nauwkeurigheid. Dit wordt dan ook voorgesteld in de toekomstige Batterijen Verordening⁸ (artikel 14), die op dit moment door de Europese Commissie wordt opgesteld. De huidige EU-Verordening 2017/1151⁹ bevat wel eisen aangaande de OBD-aansluiting van een voertuig, maar geen specifieke eisen betreffende EV-data of batterijdata. De Nederlandse overheid wordt aanbevolen om in Europees verband de discussie

⁷ De meerderheid van de importeurs gaf aan dat dit in hun PHEV-modellen wel mogelijk is, waarschijnlijk ingegeven door de Europese emissiewetgeving.

⁸ https://ec.europa.eu/environment/topics/waste-and-recycling/batteries-and-accumulators_en

⁹ "Typegoedkeuring van motorvoertuigen met betrekking tot emissies van lichte personen- en bedrijfsvoertuigen (Euro 5 en Euro 6) en de toegang tot reparatie- en onderhoudsinformatie", Aanhangsel 5. "OBD-informatie van het voertuig".

hierover aan te gaan (in het licht van Verordening (EU) 2019/631¹⁰ en de Overeenkomst van Parijs) en te bezien of aanpassing van deze Verordening of onderliggende Regelingen aangaande de restcapaciteit (SoH) mogelijk is.

Als voorloper van genoemde discussie loopt er in opdracht van de Europese Commissie in 2020-2021 een onderzoek, een zogenaamde “Stakeholder Consultation”, naar de beschikbaarheid van voertuigdata ten behoeve van onderhoud, inspectie, diagnose en reparatie van het voertuig, gericht op elektrische voertuigen. De eerste fase van het onderzoek, gericht op alle voertuigen (EV en niet-EV), is in 2017 met een eindrapport afgerond¹¹. Het doel van het onderzoek is om te analyseren of voertuigdata voor onderhoud en reparatie op een gelijke manier beschikbaar gesteld wordt aan merkgebonden en onafhankelijke autobedrijven. De onderzoekers is gevraagd om aanbevelingen voor Europese wetgeving te formuleren om dit gelijke speelveld te bewerkstelligen, als dit nog niet bestaat. Nederlandse partijen wordt aanbevolen bij dit onderzoek aan te haken en onder andere het belang van de SoH en het historische gebruik van de batterij naar voren te brengen.

Naast de bovengenoemde toekomstige Batterijen Verordening zijn er nog enkele andere mogelijkheden (deels recent en deels al enkele jaren onderwerp van discussie) om de beschikbaarheid van de SoH in elektrische voertuigen af te dwingen:

- UN ECE, ter voorbereiding op de Europese typegoedkeuring van elektrische voertuigen. Hierin kan met name de RDW zijn input leveren.
- Europese standaardisatie, met name CEN ISO 18541 betreffende de vrijgave van RMI-data¹².

Bij toekomstige implementatie van *vehicle-to-grid*-laadopties (V2G) zouden batterijtests geautomatiseerd kunnen worden en ook sneller kunnen verlopen dan nu het geval is (gelimiteerd door het vermogen van de laadpaal en/of het EV). Het dient nog onderzocht te worden of (en zo ja, hoe) deze tests geautomatiseerd kunnen worden. Mogelijk kan dit dan in EU-wetgeving worden vereist.

Ervan uitgaande dat in de toekomst de SoH van elk EV beschikbaar is, kan een voorspelmodel voor de restlevensduur worden opgezet. Een dergelijk voorspelmodel is complex, omdat het toekomstige gebruik van het voertuig – dat een grote invloed heeft – per definitie niet bekend is en omdat het model afhankelijk is van het type EV en type batterij. Er is daarom verder onderzoek nodig om te bepalen binnen welke bandbreedte een schatting van de resterende levensduur mogelijk is op basis van de actuele batterijcapaciteit (SoH) en het eerdere gebruik van het EV.

¹⁰ “tot vaststelling van CO2-emissienormen voor nieuwe personenauto's en nieuwe lichte bedrijfsvoertuigen”

¹¹ <https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/2017-05-access-to-in-vehicle-data-and-resources.pdf>

¹² ISO 18541 Road vehicles — Standardized access to automotive repair and maintenance information (RMI)

3 Conclusies en aanbevelingen

3.1 Onderzoeksvraag en methode

De tweedehands markt voor elektrische voertuigen (EV) begint te groeien, maar er is onzekerheid bij de consument en het verkopende autobedrijf over de levensduur. Dit rapport richt zich daarom op de verwachte levensduur van een EV en meer specifiek op de batterij, omdat die het meest bepalend is voor de EV-levensduur. Het onderzoek richt zich met name op de afname van de batterijcapaciteit, die het meest bepalend is voor de levensduur. De capaciteitsafname is inherent aan oplaadbare batterijen en wordt onder andere beïnvloed door het gebruik.

De hoofdvraag in dit onderzoek, uitgevoerd door TNO en DNV in opdracht van het Instituut voor Duurzame Mobiliteit (IvDM), en afgeleid van een van de afspraken in het hoofdstuk Mobiliteit van het Klimaatkakoord, luidt als volgt:

“Kan een merkonafhankelijke en universeel toepasbare batterijcheck worden ontwikkeld voor volledig elektrische voertuigen die momenteel rondrijden, met als doel de consument inzicht te geven in de verwachte levensduur van het voertuig?”

De methode die is gebruikt voor het onderzoek omvat een theoretisch kader, gesprekken met het merendeel van importeurs van EV's die op de Nederlandse markt actief zijn en metingen aan gebruikte EV's om te achterhalen wat er wel en niet uit te lezen is in het voertuig.

Het theoretisch kader geeft aan waarom het zo ingewikkeld is om de actuele capaciteit van een batterij op universele wijze te bepalen en de resterende levensduur te schatten. Dat komt omdat er veel factoren zijn die mede bepalen hoe snel de capaciteit van een batterij afneemt, zoals technische factoren en het dagelijks gebruik van het EV. Denk aan de chemische samenstelling, het ontwerp en de configuratie van de batterij, maar ook aan de totaal gereden afstand per jaar, het rijgedrag, de interne regeling van de batterij, de oplaadsnelheid en de omgevingstemperatuur. Daarnaast blijkt voor een goede batterijcheck een flinke hoeveelheid data uit het EV en de batterij benodigd te zijn.

Voor de inschatting van de restlevensduur van de batterij zijn verschillende methodes onderzocht (zie bijlage B), van eenvoudige extrapolatie tot *artificial intelligence*-technieken. Al deze methodes vereisen betrouwbare data uit het voertuig en/of van de OEM, te beginnen met een nauwkeurige status van de actuele restcapaciteit (SoH). Daarom is een vragenlijst opgesteld voor de importeurs/OEM's, waarbij allereerst contact opgenomen is met de importeurs van de meest voorkomende EV-modellen in Nederland.

3.2 Conclusies

Uit gesprekken met importeurs en de door hen aangeleverde informatie blijkt dat een verwachting van de restlevensduur van een gebruikt EV niet wordt afgegeven. Als het gebruikte EV nog ruim binnen de fabrieksgarantie valt, is het risico voor de koper beperkt, omdat de garantie doorloopt (inclusief de bijbehorende voorwaarden). Als de fabrieksgarantie nadert of reeds verstreken is (meestal na 8 jaar of na 160.000 gereden kilometers, hetgeen het eerst wordt bereikt), is de

beslissing aan de koper en zal de verkoper weinig zekerheid kunnen bieden over de restlevensduur.

Naast de interviews met importeurs zijn ook een groot aantal van de beoogde modellen getest met ondersteuning van meerdere merkdealers.

Aan de hand van de data vergaard bij importeurs en vanuit voertuigen kan de balans worden opgemaakt omtrent de haalbaarheid van een restlevensduur-inschatting en een inschatting van de huidige batterijcapaciteit (SoH). Om deze analyse op een gestructureerde manier uit te voeren, is een beslisboom opgesteld, die inzichtelijk maakt wat de mogelijkheden zijn per merk/model EV. De uitkomsten zijn weergegeven in onderstaande tabel. In deze tabel wordt het aantal EV-typen per optie gegeven, inclusief het bijbehorende marktaandeel.

Beslisboom-uitkomst Bepaling van de restlevensduur	Aantal EV-typen	Gerepresenteerd marktaandeel	Totaal 81%
1 – Haalbaar	0	0%	
2 – Te onderbouwen met lineair verloop	4	17%	
3 – Mogelijk met hogere onzekerheid	6	45%	
4 – Niet mogelijk (no-go)	4	19%	
Onbekend	Rest	19%	

De meest opvallende conclusie uit de analyse is dat het voor geen enkel model haalbaar is om een bevredigende restlevensduurinschatting te maken. De belangrijkste oorzaak is het gebrek aan gedetailleerde informatie over het SoH-verloop van de EV-batterijen in de tijd. Verder is de levensduur ook sterk afhankelijk van het gebruik van het EV in de toekomst.

In veel gevallen is het wel mogelijk om lineaire extrapolaties te maken van de inzet van het voertuig tot aan het moment van de SoH bepaling (beslisboomuitkomsten '2' en '3' in bovenstaande tabel). Voor 17% van de markt is het aannemelijk dat dit nauwkeurig genoeg gedaan kan worden; voor 45% van de markt is dit waarschijnlijk niet voldoende, omdat er specifieke beperkingen in de data zitten.

Categorie 4 (*no-go*) bevat voertuigen die slechts zeer beperkte informatie over de degradatie van de batterij geven. Wel is het voor deze en enkele andere voertuigen mogelijk om volgens een specifieke procedure bij een autobedrijf een capaciteitsmeting te laten uitvoeren, die de klant uiteindelijk een SoH-percentages oplevert. Deze test duurt echter één tot twee dagen en is daarom geen praktische oplossing voor de gehele markt voor tweedehands EV's. Er zijn ook merkonafhankelijke aanbieders die een meetprocedure inclusief testrit aanbieden voor bepaling van de SoH. Deze procedures zijn echter complex en tijdrovend en vallen om die reden buiten de scope van dit onderzoek. Om die reden is ook de nauwkeurigheid van deze methodes van merkonafhankelijke aanbieders in het kader van dit onderzoek niet onderzocht.

Voor alle EV-typen is het volgens de importeurs zeer aannemelijk, dat het voertuig intern een inschatting van de huidige SoH maakt, hoewel die in veel gevallen niet extern beschikbaar is gemaakt.

3.3 Aanbevelingen

Op dit moment is het nog niet mogelijk om op een eenvoudige wijze een betrouwbare, universele batterijcheck te ontwikkelen, die zowel voor merkdealers als universele autobedrijven praktisch toepasbaar is. Het is van belang dat dit in de nabije toekomst wel mogelijk is. Daarvoor is het cruciaal dat de actuele capaciteit (SoH) van de batterij vrij toegankelijk beschikbaar komt op de digitale OBD-aansluiting van elk EV. Het is wenselijk dat in Europese wetgeving wordt vastgelegd dat de actuele SoH voor elk autobedrijf uit te lezen moet zijn, onder gedefinieerde condities en met een voldoende nauwkeurigheid. Dit wordt dan ook in de voorgestelde nieuwe Batterijen Verordening¹³ aangegeven. De huidige EU-Verordening 2017/1151¹⁴ bevat wel eisen aangaande de OBD-aansluiting van een voertuig, maar geen specifieke eisen betreffende EV-data of batterijdata. De Nederlandse overheid wordt daarom aanbevolen om in Europees verband de discussie hierover aan te gaan (in het licht van Verordening (EU) 2019/631¹⁵ en de Overeenkomst van Parijs) en te bezien of aanpassing van deze Verordening of onderliggende Regelingen aangaande de restcapaciteit (SoH) met een gestandaardiseerde formule mogelijk is.

Als voorloper van genoemde discussie loopt er in opdracht van de Europese Commissie in 2020-2021 een onderzoek, een zogenaamde “Stakeholder Consultation”, naar de beschikbaarheid van voertuigdata ten behoeve van onderhoud, inspectie, diagnose en reparatie van het voertuig, gericht op elektrische voertuigen. De eerste fase van het onderzoek, gericht op alle voertuigen (EV en niet-EV), is in 2017 met een eindrapport afgerond¹⁶. Het doel van het onderzoek is om te analyseren of voertuigdata voor onderhoud en reparatie op een gelijke manier beschikbaar gesteld wordt aan merkgebonden en onafhankelijke autobedrijven. De onderzoekers is gevraagd om aanbevelingen voor Europese wetgeving te formuleren om dit gelijke speelveld te bewerkstelligen, als dit nog niet bestaat. Nederlandse partijen wordt aanbevolen bij dit onderzoek aan te haken en onder andere het belang van de SoH en het historische gebruik van de batterij naar voren te brengen.

Naast de bovengenoemde toekomstige Batterijen Verordening zijn er enkele andere mogelijkheden om de beschikbaarheid van de SoH met een gestandaardiseerde formule in elektrische voertuigen af te dwingen:

- UN ECE, ter voorbereiding op de Europese typegoedkeuring van elektrische voertuigen. Hierin kan met name de RDW zijn input leveren.
- Europese standaardisatie, met name CEN ISO 18541 betreffende de vrijgave van RMI-data¹⁷.

¹³ https://ec.europa.eu/environment/topics/waste-and-recycling/batteries-and-accumulators_en

¹⁴ “Typegoedkeuring van motorvoertuigen met betrekking tot emissies van lichte personen- en bedrijfsvoertuigen (Euro 5 en Euro 6) en de toegang tot reparatie- en onderhoudsinformatie”, Aanhangsel 5. “OBD-informatie van het voertuig”.

¹⁵ “tot vaststelling van CO2-emissienormen voor nieuwe personenauto's en nieuwe lichte bedrijfsvoertuigen”

¹⁶ <https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/2017-05-access-to-in-vehicle-data-and-resources.pdf>

¹⁷ ISO 18541 Road vehicles — Standardized access to automotive repair and maintenance information (RMI)

Bij de toekomstige implementatie van V2G-laadopties zou onderzocht moeten worden of SoH-tests geautomatiseerd kunnen worden tijdens het laden. V2G is nog niet algemeen beschikbaar. Het vrijgeven van de SoH door de OEM via de OBD-aansluiting van het EV is dus een betere oplossing.

Een schatting van de resterende levensduur is vanzelfsprekend nog complexer, omdat het toekomstige gebruik van het voertuig niet bekend is. Het schetsen van het toekomstig SoH-verloop (en daarmee de levensduur) zou op basis van een beperkt aantal (zo mogelijk gestandaardiseerde) inzetscenario's kunnen worden weergegeven, waarbij de restlevensduur modelmatig is berekend op basis van het SoH-verloop van het desbetreffende voertuig (met de daarvoor belangrijkste SoH-invloedparameters meegenomen; hiervoor is echter informatie over het gedrag van de batterijen nodig die grotendeels intellectueel eigendom van de OEM's is). Als alternatief traject zouden *machine learning*- en *artificial intelligence*-technieken kunnen worden ingezet om een statistisch inzicht te geven in de te verwachten levensduur op basis van de momentane SoH, het verwachte gebruik in de toekomst en modellen getraind met data van vergelijkbare voertuigen. Er is verder onderzoek nodig om te bepalen binnen welke bandbreedte een schatting van de resterende levensduur mogelijk is op basis van gegevens van het voertuig en de batterij, de actuele batterijcapaciteit en het eerdere gebruik van het EV.

4 Ondertekening

Helmond, 17 mei 2021



Oscar Zoetewij
Researchmanager TNO



Gertjan Koornneef
Projectleider TNO

Revisie:

Helmond, 13 december 2022



Mark Sliphorst
Researchmanager TNO

A Definities

In dit onderzoek wordt alleen naar volledig elektrische voertuigen (EV) gekeken, die gebruik maken van energie die in batterijen of accu's wordt opgeslagen. Deze voertuigen worden ook wel batterij-elektrische voertuigen (BEV) genoemd. Een EV kan ook een FCEV zijn: fuel cell electric vehicle, oftewel een EV met een brandstofcel voor elektriciteitsopwekking. FCEV's en plug-in hybride elektrische voertuigen (PHEV) worden in dit onderzoek buiten beschouwing gelaten.

Een tweedehands (elektrisch) voertuig of occasion wordt in dit rapport ook aangeduid als gebruikt (elektrisch) voertuig.

Met de batterijcheck wordt een methode bedoeld om de actuele SoH en de restlevensduur van een EV-batterij uit te lezen, dan wel op een eenvoudige manier te bepalen.

De batterij wordt ook wel accu genoemd, of hoog voltage-accu. De laatste term is bedoeld om de batterij te onderscheiden van de 12V-accu die ook nog in het EV aanwezig is. In dit rapport wordt de term 'batterij' gebruikt.

De capaciteit van de batterij is de maximaal beschikbare hoeveelheid energie in de batterij. Dit is dus de beschikbare energie van de volgeladen batterij. De capaciteit is maatgevend voor de actieradius van het EV, dat wil zeggen de afstand die gereden kan worden totdat de volle batterij weer leeg is.

De capaciteit van de batterij neemt af in de loop van de tijd, dit heet ook wel degradatie¹⁸ van de batterij. Daarom wordt de capaciteit in dit rapport meestal 'restcapaciteit' genoemd. Andere synoniemen voor 'capaciteit' zijn 'energiecapaciteit', 'oplaadcapaciteit' en 'batterijcapaciteit'. De eenheid van de capaciteit is kilowattuur (kWh).

De capaciteit wordt meestal weergegeven als een percentage van de initiële capaciteit van de nieuwe batterij. Dit wordt de *state of health* (= SoH) genoemd. De SoH is de relatieve capaciteit ten opzichte van de capaciteitswaarde van de batterij toen hij nieuw was. In dit rapport worden de termen SoH en (rest)capaciteit als synoniemen gebruikt¹⁹. De restcapaciteit neemt door het gebruik in de loop van de tijd af. De fabrieksgarantie van vrijwel alle OEM's garandeert een SoH van meer dan 70% binnen een termijn van 8 jaar of 160.000 km (hetgeen als eerste komt).

De afkorting OEM staat voor '*original equipment manufacturer*', dat wil zeggen de fabrikant van (onderdelen van) de auto.

De *state of charge* (SoC) is het energieniveau van de batterij, dat is gelijk aan de actuele energie-inhoud als percentage van de restcapaciteit, zie Figuur 3. De SoC neemt af tijdens het rijden. Een volgeladen batterij heeft een SoC gelijk aan 100%, een lege batterij heeft een SoC gelijk aan 0%.

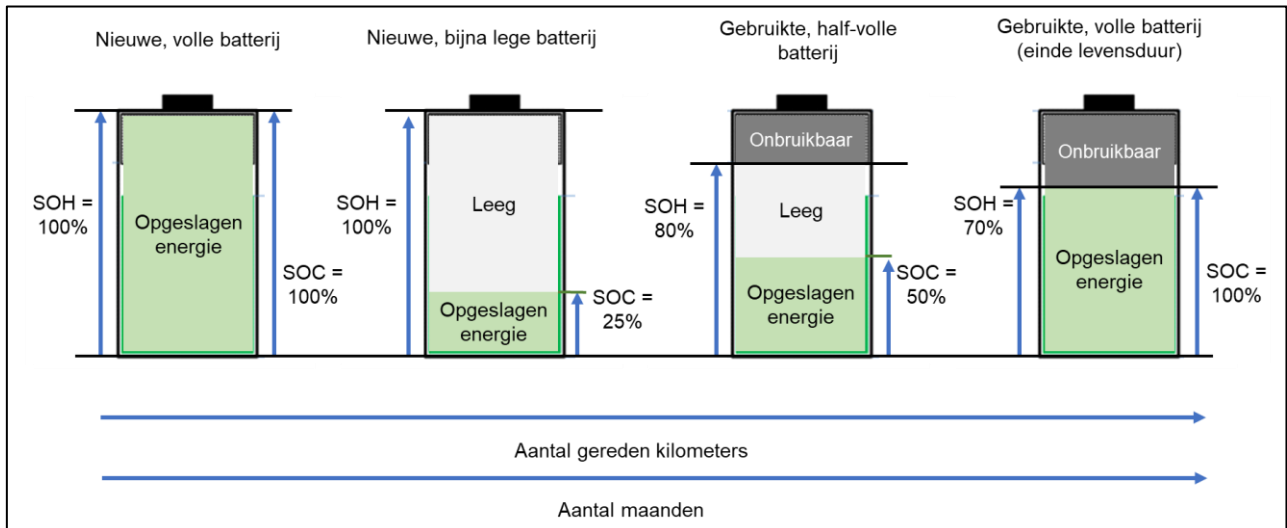
De actieradius of het bereik van het EV is de afstand die men kan afleggen met een volle batterij. Dit wordt ook wel *range* of (maximaal) haalbare rijafstand genoemd. De actieradius van het EV neemt ongeveer evenredig af met de restcapaciteit van

¹⁸ Met degradatie of veroudering wordt hier uitsluitend bedoeld het afnemen van de capaciteit van de batterij over de tijd. Dit is dus geen fysieke verslechtering of slijtage.

¹⁹ In de wetenschappelijke literatuur over restcapaciteit wordt de term SoH gebruikt voor een combinatie van chemisch-fysische verschijnselen, dus niet alleen de capaciteitsafname.

de batterij, maar hangt ook af van o.a. de omgevingstemperatuur en het rij- en laadgedrag.

De nog te rijden afstand hangt samen met de SoC: bij SoC = 100% is de nog te rijden afstand gelijk aan de actieradius; bij SoC = 50% is de nog te rijden afstand ruwweg de helft van de actieradius (ook weer afhankelijk van de omgevingsfactoren).



Figuur 3: Vereenvoudigde weergave van de afname van de restcapaciteit (SoH) en het energieniveau (SoC). De SoH wordt weergegeven als percentage van de capaciteit van een nieuwe batterij. De SoC wordt weergegeven als percentage van de SoH.

De levensduur of restlevensduur van het EV wordt met name bepaald door de levensduur van de batterij – dat wil zeggen de capaciteitsafname van de batterij. Er wordt onderscheid gemaakt tussen een economische en een technische levensduur van de batterij.

Met de economische levensduur van de batterij wordt bedoeld de tijd tot aan het moment waarop de restcapaciteit de minimale garantiewaarde bereikt heeft. De meeste OEM's hanteren een SoH van 70%. Er zijn geen problemen met de batterij te verwachten tot aan zijn economische levensduur.

Bij een SoH lager dan 70% is de batterij ook nog bruikbaar, zolang de bestuurder de lagere actieradius nog acceptabel vindt. Dit is de periode na verstrijken van de economische levensduur, maar voordat de technische levensduur bereikt is.

Beneden een bepaalde waarde van de capaciteit (bijvoorbeeld 50%), wordt de technische levensduur van de batterij bereikt, waarbij het EV niet meer of nog zeer beperkt te gebruiken is, bijvoorbeeld door vermogensverlies of rendementsverlies van de batterij.

In dit rapport wordt alleen het gebruik tot aan de economische levensduur beschouwd. De termen levensduur en restlevensduur worden gebruikt als synoniemen voor de economische levensduur.

Vehicle-to-Grid (V2G) geeft aan dat het EV niet alleen vanuit het elektriciteitsnet kan worden opgeladen (*grid to vehicle*), maar ook elektriciteit terug kan leveren aan het net (*vehicle to grid*) door te ontladen.

B Technische aspecten van EV-batterijen

B.1 Theoretisch kader

B.1.1 *Restcapaciteit en actieradius*

Een algemene eigenschap van batterijen is dat de restcapaciteit (SoH) in de loop der tijd afneemt. Dit geldt voor de Li-ion-batterijen²⁰ in EV's, maar ook voor andere batterijen, zoals nikkel- en loodbatterijen. Anders dan bij benzine- en dieselauto's, waar de levensduur vooral bepaald wordt door gebruiksaafhankelijke mechanische slijtage van draaiende onderdelen, wordt de levensduur van een EV-batterij met name bepaald door de langzaam afnemende restcapaciteit. Er is in een EV minder mechanische slijtage.

De snelheid waarmee de restcapaciteit (en daarmee de levensduur) afneemt wordt bepaald door het gebruik. Hoe meer de auto rijdt en de batterij weer wordt opgeladen, des te meer de restcapaciteit vermindert. Ook in de loop van de tijd (dus zonder te rijden) is er een kleine capaciteitsvermindering. Een generiek voorbeeld van de SoH-afname is te zien in Figuur 4.

De actieradius van het EV neemt bij gemiddeld gebruik ongeveer evenredig af met de capaciteit. Dus als na enkele jaren de resterende restcapaciteit nog driekwart van zijn beginwaarde is, is ook de actieradius nog circa driekwart van zijn beginwaarde. Als algemeen advies houden de autofabrikanten een resterende capaciteit van ongeveer 70% aan, waarbij de economische levensduur van de EV-batterij is bereikt. Hoe groter de batterij en diens capaciteit, des te groter de actieradius. Het probleem van de capaciteitsvermindering en de daarmee gepaard gaande afname van de actieradius wordt met name als hinderlijk ervaren bij kleinere batterijen.

Om een goede inschatting van de actuele actieradius te kunnen maken, is het zaak dat het EV de resterende batterijcapaciteit bijhoudt. Verder is het wenselijk om het toekomstige verloop van de resterende batterijcapaciteit ook te kunnen voorspellen en daarmee de restlevensduur van de batterij.

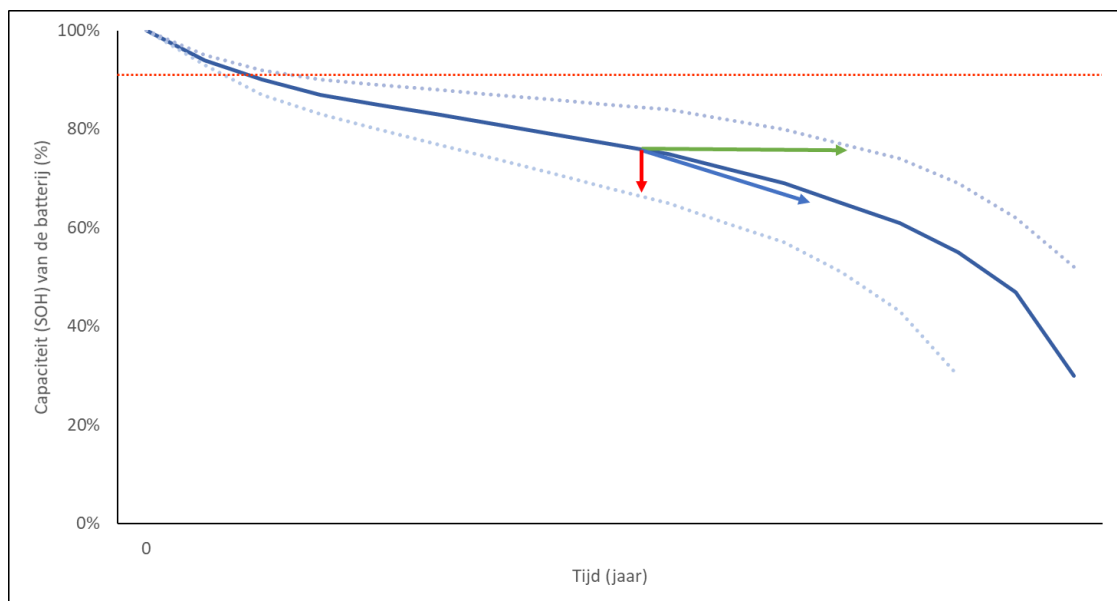
De restcapaciteit van de batterij en bijbehorende actieradius van het voertuig worden door het batterijmanagementsysteem (BMS) en slimme algoritmes van het voertuig bijgehouden. Het BMS geeft geen informatie over het toekomstige verloop van de afname van de restcapaciteit, terwijl dit wel belangrijke informatie is voor een eventuele volgende eigenaar van het voertuig. Daarom hebben TNO en DNV onderzocht of een voldoende eenvoudig model voor de voorspelling van deze capaciteitsafname haalbaar is (zie paragraaf B.2.1).

B.1.2 *Tijdsverloop van de restcapaciteit (SoH)*

Figuur 4 toont een generiek voorbeeld van de SoH-afname van een EV-batterij. De snelheid waarmee de SoH afneemt hangt af van technische factoren en het gebruik van het EV, zoals de totaal gereden afstand per jaar, het rijgedrag, de interne regeling van de batterij, de oplaadsnelheid en de omgevingstemperatuur.

²⁰ Er zijn kleine verschillen in capaciteitsafname tussen Li-ion-batterijtypen, maar de algemene trend is hetzelfde. N.B. vrijwel alle EV's maken gebruik van de 'NMC'-variant van de Li-ion technologie. Er is ook de variant 'LFP', maar die komt vrijwel niet voor in personenauto's.

In de grafiek in Figuur 4 is te zien dat batterijen vaak in het begin een iets sterkere afname van de capaciteit laten zien (afhankelijk van de chemische samenstelling van de Li-ion cellen) en daarna een nagenoeg lineaire afname. Na de lineaire fase gaat de batterij versneld in capaciteit afnemen. Dit zogenaamde 'knie-effect', dat ergens tussen de 70% en 50% begint, is moeilijk te voorspellen. Het einde van de economische levensduur zit rond deze knie. Bij een bepaalde capaciteit lager dan 50% treden er bijkomende reacties op in de batterij die de werking verder negatief beïnvloeden (bijvoorbeeld verlies van vermogen en/of rendement). In dat geval is de technische levensduur van de batterij bereikt.



Figuur 4: Verloop van de restcapaciteit (SoH) van de EV-batterij over de tijd. De doorgetrokken curve (en de blauwe pijl) geeft het gebruikelijke verloop weer. Door ongunstige factoren kan de afname sneller gaan (rode pijl), door gunstige factoren langzamer (groene pijl). De rode stippellijn is waar de software van veel fabrikanten in het EV aangeeft dat de SoH op 100% staat bij nieuwkoop.

Veelal definiëren de fabrikanten de bruikbare capaciteit van een nieuwe batterij lager dan het theoretische maximum. De waarde SoH = 100% wordt dan door het BMS op de rode stippellijn gelegd (zie Figuur 4). In het eerste jaar of de eerste jaren is dan niet zichtbaar in de EV-software dat de capaciteit al afgenomen is. Dit geeft de consument het vertrouwen dat in de eerste jaren de capaciteit niet afneemt. De gekozen rode stippellijn is echter voor elk merk en type EV anders en onbekend voor derden. Dat maakt het per definitie moeilijk voor generieke OBD-uitleesapparatuur om een nauwkeurige inschatting van de SoH te maken.

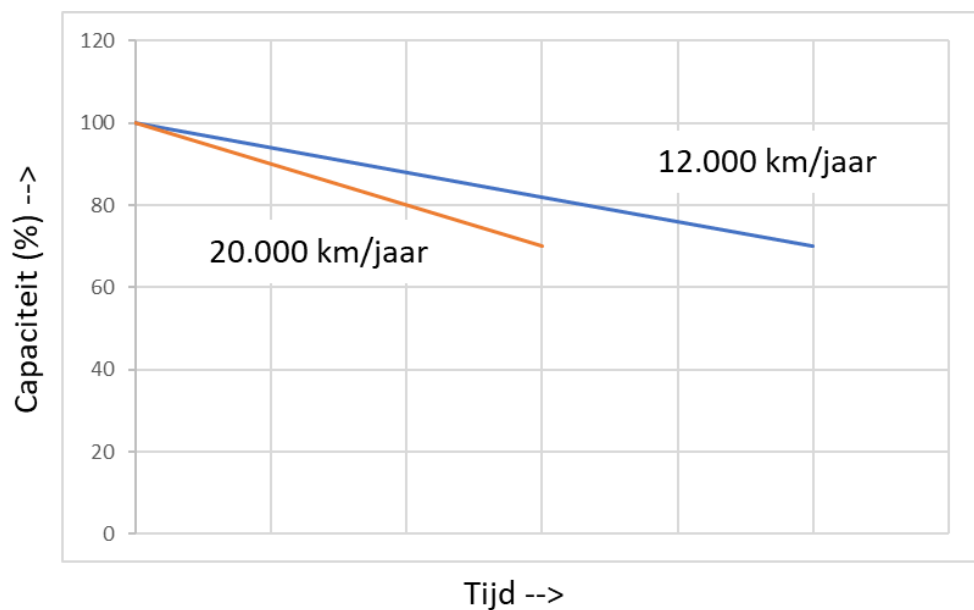
Verder is de capaciteitsbepaling gevoelig voor lage en hoge temperaturen, waardoor de uitleessoftware de capaciteit verkeerd kan inschatten als de auto stilstaat en de batterij niet op de juiste bedrijfstemperatuur is. Dit is ook de reden dat de meeste moderne typen EV gebruik maken van vloeistofkoeling (en verwarming indien nodig) om de batterij op de ideale temperatuur te houden tijdens het rijden (en het laden). Dit is zowel zinvol voor het maximaliseren van de actieradius als voor het minimaliseren van de capaciteitsafname.

B.1.3 Invloedsfactoren van de capaciteitsafname

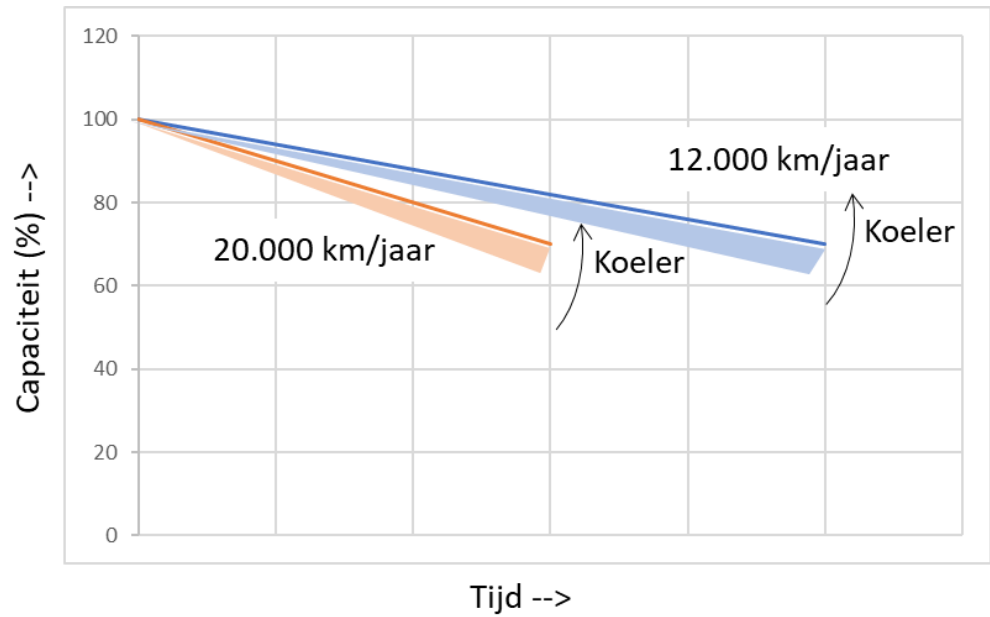
Het verloop van de capaciteitsafname is in eerste orde lineair met het aantal gereden kilometers (per maand of jaar). Dit geldt bij gelijkblijvend(e) rijgedrag, laadgedrag en temperaturomstandigheden. Bij een grotere of kleinere gereden afstand per jaar wordt een bepaalde restcapaciteit respectievelijk eerder of later in de tijd bereikt.

Het tijdsverloop van de capaciteitsafname hangt allereerst af van het aantal gereden kilometers per jaar, zie Figuur 5. De capaciteit van een gekoelde batterij neemt langzamer af, zie Figuur 6.

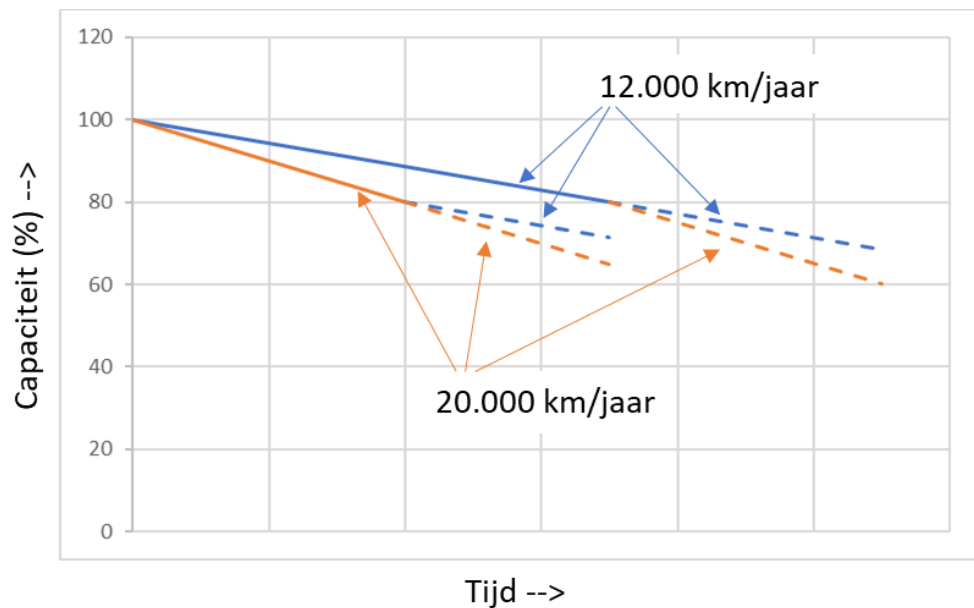
Als de tweede rijder vrijwel hetzelfde rijpatroon heeft als de eerste, is de capaciteitsafname naar verwachting redelijk lineair door te trekken, zie Figuur 7. Als de tweede rijder meer of minder kilometers per jaar gaat rijden, wel of niet een agressievere rijstijl heeft, meer of minder vaak gaat laden en/of het EV vaker in de garage of juist in de buitenlucht zet, komt er een spreiding in de verwachte capaciteitsafname. Dit kan met historische data van meerdere voertuigen statistisch afgeschat worden. Deze voorspelling is echter onzeker voor een individueel EV.



Figuur 5: De capaciteitsafname over de tijd hangt (naast andere factoren) voor een belangrijk deel af van de gereden afstand per jaar. Deze inschatting werkt goed als de beginwaarde en de waarde van nu bekend zijn (en het aantal km per jaar redelijk constant is).



Figuur 6: De capaciteit van een gekoelde batterij (rondom de ideale werktemperatuur) neemt langzamer af. (NB een extreem koude batterij kent juist een snellere SoH-afname.)



Figuur 7: De capaciteitsafname over de tijd hangt af van het aantal gereden kilometers per jaar (doorgetrokken lijnen). De toekomstige trend hangt dus af van het gebruik door de tweede eigenaar (stippellijnen). De verwachting van een individuele auto moet worden afgeschat met een statistisch gemiddelde trend uit historische data. Na "t = nu" ontstaat dus een waaier van de verwachte capaciteitsafname, en dus een spreiding in de verwachte restlevensduur.

Daarnaast hangt het verloop van de capaciteitsafname voornamelijk af van bijkomende factoren:

- De capaciteitsafname verschilt per merk en type EV door de chemische samenstelling en andere technische eigenschappen van de batterij.
- Ook de regelstrategie van het BMS veroorzaakt verschillen per merk en type EV.

- De leeftijd van de batterij. De batterijcapaciteit neemt gemiddeld met een percentage in de orde van 1,5% tot 2,5% per jaar af (mede afhankelijk van het gebruik)²¹. Dat betekent dat het maximale bereik van de auto ook met 1,5% à 2,5% afneemt. In de eerste paar jaren valt dit meestal lager uit; in latere jaren valt het soms ook hoger uit (Figuur 4).
- Als de batterij meestal helemaal wordt leeggereden, is de capaciteitsafname meer dan bij vaker herladen na korte ritten.
- De rijomstandigheden: hoge stroompieken bij snel optrekken en fors remmen hebben een negatief effect op de capaciteitsafname.
- De temperatuur van de batterij is van invloed. Een te warme of te koude batterij heeft een snellere capaciteitsafname.
- Het koelsysteem van de batterij speelt dus een belangrijke rol. Er zijn verschillende typen:
 - Passieve koeling, waarbij de batterij alleen tijdens het rijden wordt gekoeld, door de verplaatsing van lucht langs de batterij.
 - Actieve koeling, waarbij een geforceerde luchtstroom (via een ventilator) of vloeistof de batterij koelt tijdens het rijden én het laden. Een actief koelsysteem is beter om de temperatuur van de batterij optimaal te houden²².
- Ook de temperatuur van de batterij tijdens het parkeren heeft invloed op de degradatie van de batterij. De batterij van een auto die vaak in de zon geparkeerd staat, zal sneller in capaciteit afnemen dan die van een auto die koeler geparkeerd staat.
- Bij het parkeren speelt ook de SoC een rol: een geheel volle of geheel lege batterij degradeert iets sneller dan een gedeeltelijk volle batterij (bijvoorbeeld $50% < \text{SoC} < 80\%$).
- Snelladen resulteert in een snellere SoH-afname door de hogere stroom. Daarnaast wordt de batterij warmer dan bij normaal laden. Veelvuldig snelladen heeft ook daardoor een snellere SoH-afname tot gevolg. Hierbij speelt een intelligent BMS ook een positieve rol.
- Bij een aantal typen EV kan de rijder bij het laden een bovengrens van het energieniveau (SoC) instellen (bijvoorbeeld 100% of 80%). Een eindwaarde lager dan 100% is iets gunstiger voor de SoH-afname.

Deze bepalende factoren worden bijgehouden door het BMS, net zoals het VMS data verzamelt over het voertuig en het MMS over de motor. Deze BMS-data zijn echter niet eenvoudig uit te lezen en niet beschikbaar voor de bestuurder of de garage. Dat is meestal ook niet nodig. Deze data vallen vaak onder het intellectueel eigendomsrecht van de fabrikant, die wel toegang heeft tot deze gegevens. Ook de importeur heeft er tot op zekere hoogte toegang toe. Mogelijk zijn enkele gegevens of parameters van belang voor het te ontwikkelen model om de batterijlevensduur te voorspellen (zie het volgende hoofdstuk). Hiervoor is dan in bepaalde gevallen de medewerking van de fabrikanten nodig om deze gegevens uit het BMS te achterhalen.

²¹ Deze waarden worden gevonden uit metingen aan EV's door TNO en uit testen en simulaties van batterijen door DNV. Deze waarden worden ook onderschreven door de importeurs.

²² Een actief (koel)systeem kan ook de batterij verwarmen als deze te koud is. Een te lage temperatuur kan ook tot versnelde SoH-afname leiden.

B.2 Voorspellen van de resterende levensduur

Een voorspelling van de restlevensduur van de batterij is gewenst bij aankoop van een gebruikt EV: wanneer wordt het punt bereikt waarop de restcapaciteit 70% bedraagt? Hiervoor is een voorspellingsmodel nodig. Dat kan eenvoudig of complex zijn, afhankelijk van de gewenste nauwkeurigheid.

De eerste stap in het beantwoorden van de hoofdonderzoeksvraag “Kan van de momenteel rondrijdende volledig elektrische voertuigen een inschatting van de restlevensduur worden gemaakt door merkdealers en universele autobedrijven?”, is het inventariseren van de mogelijke methodes die daarvoor beschikbaar zijn. Hierbij is ervoor gekozen om niet in detail te treden, maar op een abstracter niveau de kenmerken te duiden en waar mogelijk meteen de haalbaarheidscriteria te checken.

Hieronder worden de mogelijke methodes voor een restlevensduurinschatting uiteengezet. Hieruit zal meteen duidelijk worden dat zelfs bij de meest eenvoudige methodes (waarvoor een minimale hoeveelheid data nodig is) een nauwkeurige inschatting van de huidige *state of health* (SoH) een vereiste is. Daarom worden de mogelijke methodes voor een SoH-inschatting in sectie B.2.2 uiteengezet en besproken.

B.2.1 Restlevensduurinschatting

Er bestaan verschillende methodes om een inschatting te maken van de restlevensduur van batterijen in elektrische voertuigen, die variëren in complexiteit en praktische uitvoerbaarheid. De volgende vier methodes worden hier onderscheiden:

- Extrapolatie van SoH-afname (ook wel degradatie genoemd)
- Extrapolatie van SoH-afname ondersteund door een universeel degradatiemodel²³
- Batterij-specifiek degradatiemodel
- *Machine learning*- en *artificial intelligence*-technieken

In de volgende paragrafen worden deze methodes geanalyseerd en aan de hand van hun kenmerken en vereisten afgewogen.

B.2.1.1 Extrapolatie van SoH-afname

Beschrijving

Een eenvoudige methode om een inschatting te maken van de verwachte restlevensduur, is het extrapoleren van de tot nu gemeten SoH-afname naar de toekomst. Het verloop van de SoH kan worden afgezet tegen de leeftijd van de batterij of het kilometrage van het voertuig. De gegeven datapunten worden vervolgens met een specifieke lijn ‘gefit’. Afhankelijk van het aantal beschikbare datapunten kan deze fit met meer of minder parameters worden gedaan (meer datapunten kunnen meer parameters fitten, waardoor een complexere relatie gebruikt kan worden). In de praktijk betekent dit dat met twee datapunten slechts een lineaire relatie (een rechte lijn) gefit kan worden.

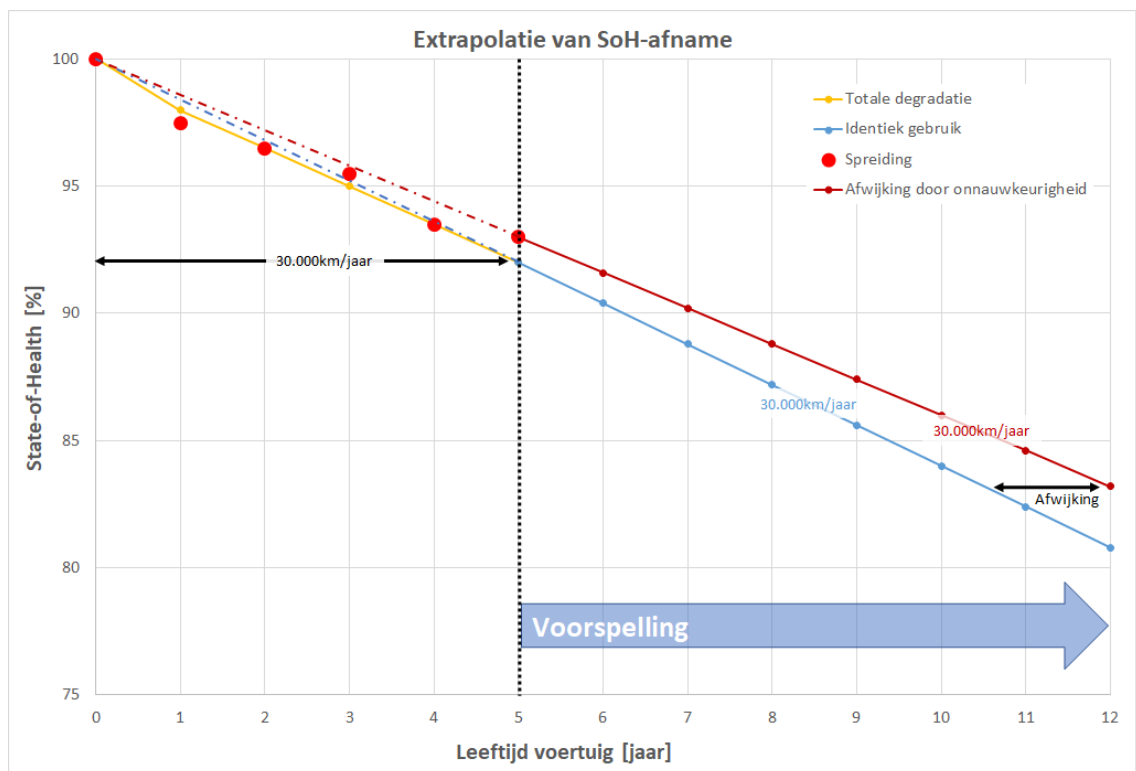
²³ Een degradatiemodel beschrijft de verwachte toekomstige SoH-afname over de tijd. Degradatie betekent hier dus niet fysieke verslechtering of slijtage.

Benodigde data

Voor deze methode is minimaal de volgende data vereist:

- Originele batterijcapaciteit
- Huidige batterijcapaciteit
- Huidige leeftijd en/of kilometrage

Idealiter worden de batterijcapaciteit en de leeftijd en/of het kilometrage periodiek bijgehouden, bijvoorbeeld een of twee keer per jaar, waarmee complexere relaties (meer detail dan een lineair verband) gebruikt kunnen worden en ook een betrouwbaardere inschatting gemaakt kan worden. Figuur 8 (met fictieve data ter illustratie) laat zien hoe kleine afwijkingen bij een beperkt aantal datapunten leiden tot een aanzienlijke afwijking in de voorspelling. De werkelijke degradatie tot op dit moment (gekozen op 5 jaar) wordt beschreven door de gele lijn, met daarop de datapunten die opgeslagen zijn. De blauwe lijn representeert de extrapolatie van deze werkelijke degradatie. Als er echter een onnauwkeurigheid aan de datapunten wordt toegevoegd middels een spreiding, getoond als rode punten, treedt een afwijking in de voorspelling op (de rode lijn). Hieruit blijkt de noodzaak van nauwkeurige data.



Figuur 8: Illustratief voorbeeld van restlevensduurinschatting middels extrapolatie van degradatie.

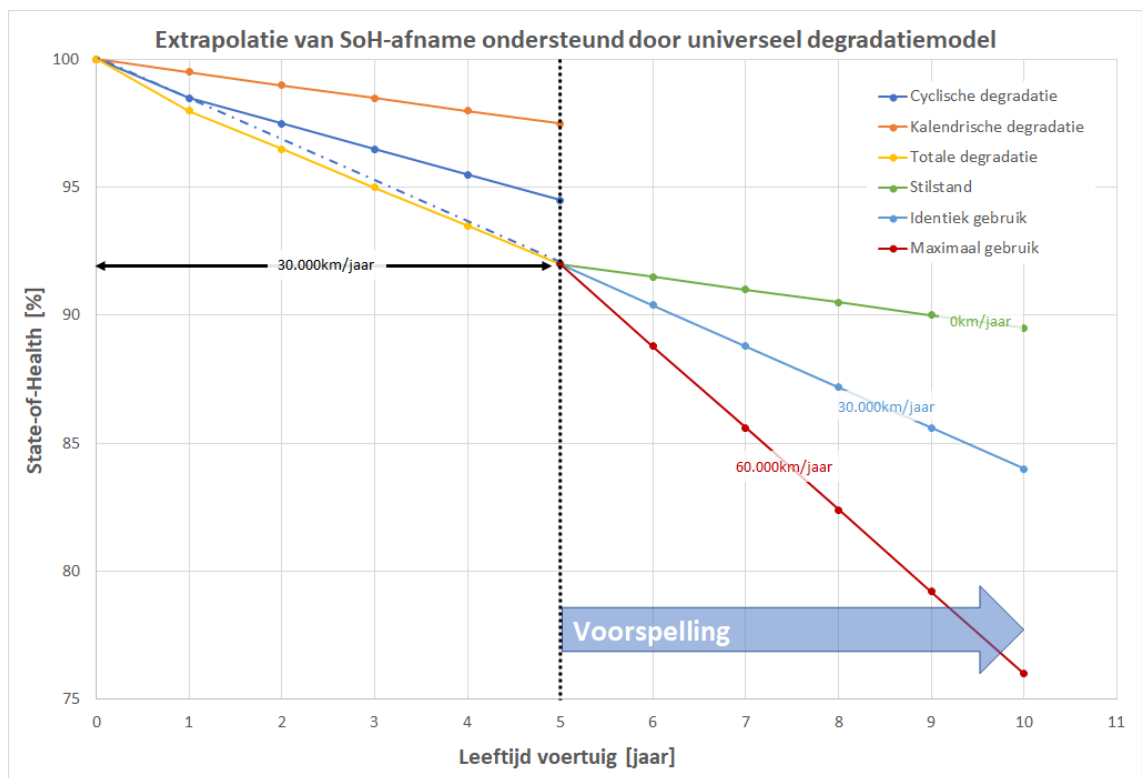
B.2.1.2 Extrapolatie van SoH-afname ondersteund door een universeel degradatiemodel

Beschrijving

De basis van deze methode is identiek aan de vorige methode, met als toevoeging een universeel degradatiemodel van een Li-ion batterij. Dit model is gebaseerd op de gemiddelde degradatie van een groot aantal verschillende Li-ion-cellen. Een dergelijk model modelleert zowel de kalendrische degradatie (als gevolg van tijd en temperatuur) als de cyclische degradatie (als gevolg van het laden en ontladen van

de batterij). De parameters voor de cyclische degradatie (*C-rate* oftewel de stroomsterkte bij laden en ontladen, en *Depth of Discharge*, de mate waarin de batterij ontladen wordt) zijn erg afhankelijk van individueel gebruik c.q. het rijgedrag; deze data zijn typisch niet beschikbaar per voertuig. De parameters voor kalendrische degradatie zijn daarentegen met redelijke nauwkeurigheid in te schatten, omdat deze gedomineerd worden door de condities van een stilstaand voertuig. Hierbij is de gemiddelde temperatuur goed in te schatten middels de buitentemperatuur. Ook de gemiddelde SoC is goed te schatten. Een auto zal immers niet vaak langdurig bij lage SoC worden weggezet (daarmee zou deze niet gebruiksklaar zijn), maar typische bij relatief hoge SoC (dus met nagenoeg volgeladen batterij).

Door gebruik te maken van een gemiddelde kalendrische degradatie (SoH-afname) van bijvoorbeeld 0,5% per jaar wordt het verloop van de geschatte SoH opgesplitst in een kalendrisch en een cyclisch deel. Met deze splitsing kan een variatie in kilometrage per jaar in de voorspelling worden meegenomen. Dit is schematisch weergegeven in Figuur 9.



Figuur 9: Illustratief voorbeeld van de restlevensduurinschatting middels extrapolatie van degradatie gecorrigeerd voor gemiddelde jaarlijkse degradatie.

B.2.1.3 Batterij-specifiek degradatiemodel

Beschrijving

Bij deze methode wordt met behulp van een uitgebreide testserie een afzonderlijk model opgesteld voor de degradatie van elke type batterij. De tests die daarvoor gebruikt worden bestaan uit langdurige laad-ontlaadttests (minimaal enkele maanden) onder verschillende condities, waarmee een volledig beeld van de degradatie bij alle mogelijke condities wordt opgebouwd. Door vervolgens het

verwachte gebruik als input aan dit model aan te bieden kan de degradatie nauwkeurig worden ingeschat en kan ook de resterende levensduur relatief eenvoudig worden berekend.

Benodigde data

Voor een goed degradatiemodel is een grote hoeveelheid data nodig die verkregen wordt uit de langdurige laad-ontlaadtests. En voor de tests zijn batterijcellen benodigd die van hetzelfde type zijn als de cellen in het beschouwde type EV. Daarnaast is er voldoende data nodig over het verwachte gebruik van het EV, inclusief seizoensinvloeden op de temperatuur.

De hoeveelheid benodigde data en de beschikbaarheid van de juiste cellen maakt dat deze methode geen realistische optie vormt in het kader van dit onderzoek. Dit is wel een methode die door OEM's en batterijfabrikanten in hun ontwikkeltrajecten wordt gebruikt, maar betrokken partijen weten uit ervaring dat deze informatie vaak niet met derden gedeeld wordt.

B.2.1.4 Machine learning / artificial intelligence-technieken

Beschrijving

Deze methode maakt gebruik van de grote hoeveelheid data die beschikbaar is in een wagenpark van meerdere EV's. Alle relevante condities en parameters worden voortdurend bijgehouden, waaronder de SoH die een batterij op dat moment heeft. Hiermee wordt op een volledige geautomatiseerde manier, bijvoorbeeld via permanent aangesloten OBD-meetkastjes in meerdere auto's, een grote hoeveelheid data bijeengenomen in een model (dit wordt het 'trainen' van zo'n model genoemd). Dat model kan vervolgens in elk individueel voertuig toegepast worden om met zijn eigen condities en parameters de toekomstige degradatie te schatten. Hiermee leert een individueel voertuig dus van alle andere voertuigen in een wagenpark.

Een dergelijke methode wordt betrouwbaarder naarmate het betrokken wagenpark groter is. Voor het optimaal trainen van het model zouden zo veel mogelijk EV's van een bepaald merk en type waar hetzelfde type batterij in zit, betrokken moeten zijn. Daarom is deze methode niet geschikt in het kader van dit onderzoek. Theoretisch zou het mogelijk zijn om een analyse-*tool* te maken die in de achtergrond data verzamelt om een dergelijk model te trainen, waardoor de inschattingen van het model in de loop der tijd nauwkeuriger zouden kunnen worden. De verwachting is echter dat dit een omslachtige methode is en de beschikbare hoeveelheid (historische) informatie van de voertuigen niet voldoende is, waardoor de kracht van deze methode verloren gaat. Ook is de nauwkeurigheid van deze methode een aandachtspunt, aangezien deze gebruik maakt van gegevens die niet door de OEM's ondersteund worden, dus niet geverifieerd zijn. Ook is het vooral nog onduidelijk of de gebruikte batterij- en voertuigdata met goedkeuring van de consument (privacy kwestie) én de OEM (juridisch vraagstuk) gebruikt wordt. Verder is de methode niet voor alle merken toepasbaar, omdat de batterijdata op deze manier soms niet te achterhalen is.

De hier beschreven methode is de meest moderne en meest universele (hoewel niet altijd bruikbaar), en wordt in beperkte mate al op het gebied van batterij-

degradatie toegepast, onder andere door OEM-onafhankelijke aanbieders²⁴. Dergelijke methodes zijn tevens onderdeel van de bredere onderzoeksactiviteiten van DNV en TNO.

B.2.2 *State of health-inschatting*

De vier hierboven beschreven methodes vereisen zoals aangegeven een bepaalde hoeveelheid (nauwkeurige) data om correct te kunnen functioneren. Essentieel is de beschikbaarheid van de SoH van de batterij, al dan niet op meerder momenten in de historie. Het opvragen of bepalen van de SoH kan op vier manieren, die hieronder staan genoemd, gerangschikt naar de toepasbaarheid voor een universele batterijcheck op elektrische voertuigen.

- Opvragen van de SoH via de OBD-aansluiting in het voertuig:
 - Dit is een eenvoudige methode, maar wel een die afhankelijk is van de beschikbaarheid van deze informatie en van de nauwkeurigheid van de gegeven data. De inschatting wordt gemaakt door het BMS; deze methode valt normaal gesproken onder het intellectueel eigendom van de OEM en daarmee niet inzichtelijk.
- Data uit een *cloud*-omgeving van de OEM:
 - Vergelijkbaar aan voorgaande methode, maar dan opgevraagd uit een *cloud*-service van de OEM. Voordeel hierbij is de mogelijke beschikbaarheid van meer historie en de optie om te leren van andere voertuigen van hetzelfde type. Deze methode is afhankelijk van de implementatie van de OEM en de beschikbaarstelling van de data, zowel door de EV-rijder (privacyregels) als door de OEM (onder meer in verband met intellectueel eigendom).
- Rijtest met het voertuig:
 - In geval bovenstaande methodes niet mogelijk zijn of de resultaten niet vertrouwd (kunnen) worden, zou een rijtest kunnen worden uitgevoerd volgens een testprocedure van de OEM. Een dergelijke rijtest kan in het geval van sommige OEM's de kwaliteit van bovenstaande inschattingen verbeteren of zelfs de enige manier zijn om een nauwkeurige waarde te verkrijgen. Een rijtest vergt een flinke inspanning in tijd en mankracht van het autobedrijf.
- Batterijtest bij het autobedrijf/merkdealer:
 - Vergelijkbaar met de vorige methode, maar in dit geval wordt gebruik gemaakt van specifieke procedures en apparatuur (bijvoorbeeld een OEM-tester of eventueel een OEM-laadpaal) om een batterijtest uit te voeren zonder te rijden, door te laden en ontladen middels een lader en ontladapparatuur. Ook een batterijtest vergt extra tijd en mankracht.

De genoemde rijtest en batterijtest brengen extra tijd en mogelijk extra kosten met zich mee voor het autobedrijf. De uitvoerbaarheid hiervan zal nog verder in de praktijk onderzocht moeten worden. Bij toekomstige implementatie van *Vehicle-to-Grid* (V2G) laadopties zouden deze tests aan de laadpaal geautomatiseerd kunnen worden. Mogelijk kan dit dan in EU-wetgeving worden vereist. Eerst zal onderzocht moeten worden of en hoe deze automatisering mogelijk is.

²⁴ Voorbeelden van zulke aanbieders zijn *Aviloo* (<https://aviloo.com/aviloo-batterie-test/>) en *La Belle Batterie* (<https://www.labellebatterie.com/le-certificat-batterie/>).

C Resultaten van de praktijktests

Onderstaande tabel bevat de resultaten van de praktijktests, waarin de OBD-data van de EV-batterij is uitgelezen. De gegevens zijn geanonimiseerd weergegeven. In alle gevallen waren de resultaten van de merkspecifieke en universele apparatuur gelijk aan elkaar.

Het gaat hierbij om de volgende modellen (in alfabetische volgorde): BMW i3; Hyundai Ioniq; Nissan Leaf; Renault Zoe; Volkswagen e-Golf; Volkswagen ID.3.

Beschikbare data	Model					
	#	*	+	‡	°	†
Restcapaciteit als percentage (SoH)	x	x				
Restcapaciteit als huidige capaciteit (in kWh)						
Restcapaciteit in beperkte resolutie			x			
Restcapaciteit garantieconditie overschreden				x	x	
Restcapaciteit niet beschikbaar						x
Resultaat uit Beslisboom	2	2	3	4	4	4
Andere OBD-data						
Cel spanningen	x	x	x	x	x	x
Cel spanning (min/max)	x		x	x	x	x
Temperatuur batterij/module	x	x	x	x	x	x
State-of-Charge	x	x	x	x	x	x
SoC (min/max)		x		x	x	
Batterijspanning	x	x	x	x	x	x
Batterijstroom		x	x	x	x	
Max. laadvermogen/stroom	x	x		x	x	
Max. ontladvermogen/stroom	x			x	x	
Max. SoC						x
Min. SoC						x
Cumulatieve energie/capaciteit	x	x		x	x	
Gereden afstand batterij		x				