



OPENPILOT TAILGATING WARNING

Een bumperkleef detectie- en waarschuwingsservice voor het
openpilot systeem

VERANTWOORDINGSRAPPORT

Auteur

Jeroen Lammersma

E-mailadres

je.lammersma@st.hanze.nl

Studiejaar

Vierde

Studentnummer

362799

Onderwijsinstelling

Hanzehogeschool Groningen

Studie & major

HBO-ICT, Software Engineering

Opdrachtgever

H.M. Groenboom

E-mailadres

h.m.groenboom@pl.hanze.nl

Afstudeerbegeleider

B.L. Heijne

E-mailadres

b.l.heijne@pl.hanze.nl

Bron illustratie voorblad

<https://github.com/commaai/openpilot>

OPENPILOT TAILGATING WARNING

Een bumperkleef detectie en waarschuwing service voor het
openpilot systeem

VERANTWOORDINGSRAPPORT

Publicatiedatum

3 oktober 2022

*Dit verantwoordingsrapport is geschreven onder
verantwoordelijkheid van de Hanzehogeschool Groningen.
Het copyright berust bij de auteur.*

Versie

1.0

Voorwoord

Zo dan.

De laatste loodjes waarmee het Hanze hoofdstuk mee afgesloten mag worden: het afstudeerproject. Voor velen een groot mijlpaal, maar, in mijn gedachten voornamelijk een proces met veel *spielerei*.

Ik ben in het diepe gegooid, dat is iets wat zeker is. Maar goed, dat is ook waar de mooiste uitdagingen te vinden zijn!

Rix, bedankt voor je enthousiasme en de kans om iets moois op te zetten met openpilot.

Erik, het was een waar genoegen om jou erbij te hebben, zo erg zelfs, dat we al een project zijn gestart m.b.t. openpilot voor de 4^e jaars?! :-)

Chris, zonder de mensen zoals jij, die een compleet ander inzicht en expertise met zich meebrengen, zijn wij ICT'ers maar een kip zonder kop (== bedankt voor alle hulp!).

Evelien a.k.a. Evy, mijn zus, bedankt voor de emotionele support.

Groningen, 3 oktober 2022

Jeroen Lammersma

Samenvatting

In de moderne tijd lijkt alles mogelijk te zijn met technologie. Een klein computertje die je auto zelfrijdend dus ook. Het apparaat in kwestie is de *comma three devkit*, wat het lectoraat New Business & IT, onderdeel van de Digital Society Hub, Hanzehogeschool Groningen sinds korte tijd in bezit heeft.

Het lectoraat wil een Virtuele Automobiel Rijcoach (VAR) ontwikkelen. openpilot, een open-source Advanced Driving Assistance System, blijkt hier een uitstekende basis voor te bieden. Omdat openpilot open-source is, biedt het een uitstekende kans om hiermee te experimenteren.

De opdracht van het uitgevoerde afstudeerproject was om het fundament te leggen voor een rijcoach en tegelijkertijd een detector te realiseren die op één van de veelvoorkomende gevaarlijke rijgedragingen waarschuwt: bumperkleven.

Dit is uiteindelijk ook gerealiseerd: de bumperkleef detectie- en waarschuwingsservice geeft aan de hand van auditieve en visuele waarschuwingen aan wanneer de bestuurder aan het bumperkleven is. Naast dit prototype zijn er ook extra producten opgeleverd die de doorontwikkeling aan de VAR moeten versimpelen.

Tijdens de uitvoering van het project is de longitudinale veiligheid van openpilot onderzocht. Hiervoor is het systeem vergeleken met een menselijke bestuurder aan de hand van een car-following scenario in gesimuleerde omstandigheden. De resultaten van dit experiment zijn gepresenteerd tijdens de SafeTRANS Industrial Day in Oldenburg.

Helaas is het (momenteel) door wet- en regelgeving enkel mogelijk om openpilot te testen in een simulator. Om deze redenen is momenteel nog onbekend of de bumperkleefservice in de praktijk daadwerkelijk effectief is: dit zal dus verder onderzocht moeten worden.

Ondanks dat de effectiviteit van de bumperkleef service nog onbekend is, heeft het project wel de deuren geopend voor verdere doorontwikkeling aan de VAR.

Inhoudsopgave

Voorwoord.....	3
Samenvatting	4
Figuren- en tabellenlijst	3
Afkortingenlijst.....	7
1. Inleiding	8
1.1. Achtergrond	8
1.2. Aanleiding	9
1.3. Opdracht.....	9
1.4. Doel verantwoordingsrapport en vooruitblik.....	10
2. Wat is openpilot?.....	11
2.1. openpilot	11
2.2. comma three devkit.....	11
2.3. comma.ai.....	13
3. Projectaanpak en risico's.....	14
3.1. Beroepsproducten	14
3.1.1. Requirementsanalyse.....	14
3.1.2. Technisch ontwerp.....	14
3.1.3. Bumperkleef detectie- en waarschuwingsservice	14
3.1.4. Continuous integration setup.....	15
3.1.5. openpilot-dev ondersteunende repository	15
3.1.6. Toelichting op realisatie.....	15
3.2. Projectplanning en uitvoer	16
3.2.1. Oplevermomenten.....	16
3.2.2. Betrokken personen en afstemmomenten	17
3.3. Projectrisico's	17
4. Aantonen HBO-I competenties.....	19
4.1. Analyseren	19
4.2. Ontwerpen	19
4.3. Realiseren	19
4.4. Professioneel werken	20
4.5. Schriftelijke vaardigheden	20
4.6. Onderzoekend vermogen	20
4.7. Overzicht inclusief wegingsfactoren	21
5. Longitudinale veiligheid openpilot	22

5.1. SafeTRANS 30. Industrial Day	22
5.2. Car-following scenario	23
5.2.1. Context	23
5.2.2. Onderzoeksvraag	23
5.2.3. Onderzoeksstrategie.....	23
5.2.4. Dataverzamelingsmethode	24
5.2.5. Data-analyse	24
5.2.6. Conclusie	24
6. Conclusie.....	25
7. Lessons learned / reflectie op product.....	26
Literatuurlijst	27
Bijlage A: Car-following scenario instructies.....	31
Bijlage B: Car-following scenario resultaten	32

Figuren- en tabellenlijst

Figuur 1: Illustraties van de door openpilot aangeboden functionaliteiten (ACC, ALC, FCW, LDW).	11
Figuur 2: De comma three devkit (23).	12
Figuur 3: De user interface van openpilot wanneer de auto is gestart.	12
Figuur 4: De oorspronkelijke planning van het afstudeerproject.	16
Figuur 5: C. Dijksterhuis en J. Lammersma presenteren hun bevindingen tijdens de 30 ^e editie van de SafeTRANS Industrial Day (3 juni, 2022).	22
Tabel 1: Oplevermomenten van de beroepsproducten. Alle oplevermomenten vonden plaats in 2022.	16
Tabel 2: Betrokken personen en hun rollen tijdens het project.	17
Tabel 3: De belangrijkste risico's die voor kunnen komen tijdens het afstudeerproject, met bijpassende inperkingen en tegenreacties.	17
Tabel 4: Overzicht van de aangetoonde competenties, inclusief aangepaste wegingsfactoren.	21
Tabel 5: Instructies dat het leidende voertuig volgt tijdens het car-following scenario.	31

Afkortingenlijst

ACC	Adaptive Cruise Control
ADAS	Advanced Driving Assistance System
ALC	Automated Lane Centering
CAN	Controller Area Network
CI	Continuous Integration
DM	Driver Monitoring
ECU	Electronic Control Unit
FCW	Forward Collision Warning
LCM	Automated Lane Change maneuver
LDW	Lane Departure Warning
THW	Time headway
TTC	Time-to-collision
VAR	Virtuele Automobiël Rijcoach

1. Inleiding

Je auto volledig laten besturen door een mobiele telefoon? Dat moet toch wel te idioot voor woorden zijn, maar niet voor George “Geohot” Hotz, die de wereld in 2016 kennis liet maken met de *comma one*, een simpel ogend, neongroen kleurig, ‘doosje’ die een auto zelfrijdend kan maken (1). In principe is het een doodgewone OnePlus 3 telefoon, weliswaar met aangepaste software, maar waar voor de rest niks spannends aan veranderd is, omhult met een ge-3D-printte behuizing.

George, die in 2015 zijn Acura ILX 2016 voor het eerst autonoom liet rijden door middel van een computer, neemt het met zijn bedrijf comma.ai als *david* op tegen de *Goliaths*, zoals Tesla en Google (2). Tot nu toe gaat hem dit goed af; comma.ai bracht namelijk onlangs de vierde generatie van het apparaat uit: de *comma three devkit*. Het gaat George voor de wind en zijn geen tekens dat hij hier binnenkort mee zal stoppen.

1.1. Achtergrond

Onderhand zijn ze voor iedereen wel bekend: zelfrijdende auto’s. Toch zijn ze (in Nederland) nog niet op de openbare weg te vinden; alle auto’s met assisterende middelen zijn in feite namelijk ‘semi-autonoom’, ook wel SAE level 2 genoemd (3). Maar, als het aan Elon Musk ligt gaan ze liever gisteren dan vandaag nog de weg op: hij hoopt dat volledig zelfrijdende Tesla’s voor de kerst te koop zijn (4).

Volgens Elon zouden zelfrijdende auto’s veiliger zijn dan auto’s die door mensen worden bestuurd (5). Het aantal ongevallen verminderen is in ieder geval veelal het belangrijkste doel van autonoom rijden (6). Er wordt gestreefd naar meer veiligheid: *“autonome rijssystemen [zouden] de veiligheid op de weg kunnen vergroten”* (7). Zo luid ook de missie van comma.ai: *“We believe that [openpilot] will be a significant step forward in reducing driving stress and road accidents.”* (8).

De autofabrikant Audi voorspelt op z’n vroegst tegen het einde van dit decennium modellen te kunnen leveren waarbij gereden kan worden zonder stuur: *“Op dit moment is het nog vooral de regelgeving die ons in de weg zit, maar de technologie is er feitelijk al klaar voor”* (7).

Maar zit iedereen wel op deze technologie te wachten? Uit het laatste onderzoek van de *American Automobile Association* (het Amerikaanse equivalent van de ANWB) blijkt dat het merendeel van (Amerikaanse) bestuurders niet wil dat autofabrikanten zelfrijdende auto’s ontwikkelen, maar in plaats daarvan de bestaande assisterende functies verbeteren (9). In Nederland zou bijna de helft van de bevolking nooit in een zelfrijdende auto willen stappen. Driekwart vindt het zelfs eng als de auto de besturing volledig overneemt (10).

Maar, is deze angst wel terecht? Of is dit meer een gevalletje angst hebben voor het ‘stalen beest dat stoom blaast’, net zoals 180 jaar geleden? Hoe dan ook: er zal zeker voor een aantal jaren nog altijd handmatig door mensen gereden worden. Hierbij zal veiligheid uiteraard ook hoog op de agenda blijven staan en dit afstudeerproject probeert hierin een kleine stap verder in vooruit te maken.

Het project is uitgevoerd bij het lectoraat New Business & IT, wat onderdeel is van de Digital Society Hub (DSH). Dit rapport is geschreven als onderdeel van het

afstudeerproject *openpilot Tailgating Warning*, uitgevoerd door J. Lammersma, HBO-ICT Software Engineering student aan de Hanzehogeschool Groningen.

1.2. Aanleiding

Dagelijks ontstaan er ongelukken in het verkeer in Nederland. Volgens Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid (SWOV) raakten in 2020 ongeveer 19.700 personen als een gevolg hiervan ernstig gewond (11). Een deel van de verkeersongelukken is te wijten aan riskant verkeersgedrag. Hier valt onder andere roodlicht negatie, telefoongebruik en rijden onder invloed onder (12). Exacte cijfers over hoeveel ongelukken te wijden zijn aan riskant verkeersgedrag zijn niet bekend. Er is echter wel meer bekend over de risicoverhoging door dergelijk rijgedrag: bij roodlicht negatie op een 50km/uur-kruispunt wordt bijvoorbeeld de kans op ongeluk met 14 keer vergroot (13).

Reden genoeg hier iets aan te doen. Het lectoraat ziet dit ook in en is sinds februari 2022 begonnen met een nieuw project waarmee geëxperimenteerd wordt met de hard- en software van comma.ai (14). Eén van de doelen van dit project is om op basis van de software, openpilot, een virtuele rijcoach te ontwikkelen: de *Virtuele Automobiel Rijcoach* (VAR). Het doel van de VAR is om het rijgedrag van bestuurders op een positieve manier te verbeteren. De coach zal bijvoorbeeld moeten gaan waarschuwen wanneer riskant verkeersgedrag optreedt of een gevaarlijke verkeerssituatie ontstaan is.

Op het moment bestaat de VAR nog niet en heeft en is het dus nog niet mogelijk om met openpilot riskante verkeersgedragingen op te merken en hierop te waarschuwen en/of te coachen.

1.3. Opdracht

Een complete rijcoach ontwikkelen in een halfjaar tijd is natuurlijk niet haalbaar: de opdracht moet afgebakend worden. Van de riskante verkeersgedragingen staat te korte volgtijd, ook wel bumperkleven genoemd, op de eerste plek van ergernissen die ervaren worden in het verkeer (15). De opdracht van het project is dan ook om een nieuwe service te ontwikkelen, voor openpilot, die de bestuurder waarschuwt als hij of zij aan het bumperkleven is.

Er is expliciet gekozen om de focus te leggen bumperkleven, omdat dit technisch gezien eenvoudiger is om te detecteren vergeleken met de andere gedragingen. Daarnaast was nog onbekend wat de mate van complexiteit zou zijn van het toevoegen van nieuwe functionaliteiten aan openpilot. Op deze manier blijft het project beheersbaar.

De doelstelling van het afstudeerproject is als volgt geformuleerd:

Aan het eind van het afstudeerproject bevat het openpilot systeem een bumperkleef detectie- en waarschuwingsservice waarbij de bestuurder, aan de hand van auditieve en visuele waarschuwingen, wordt gewaarschuwd wanneer hij of zij aan het bumperkleven is.

Het openpilot systeem is de software dat ontwikkeld wordt door comma.ai en is te vinden op GitHub (16). openpilot bestaat uit een bundel *services* die met elkaar

communiceren (17). Daarom wordt de bumperkleef detectie- en waarschuwing toegevoegd als nieuwe service. Auditieve waarschuwingen zijn in de vorm van 'piepjes' en visuele waarschuwingen zullen zichtbaar zijn op de GUI. Bumperkleven is gedefinieerd als het hebben van een volgtijd van minder dan één seconde tot een voorligger, waarbij het voertuig minimaal 18 km per uur rijdt. Maar, de bestuurder zal pas worden gewaarschuwd als hij of zij voor minimaal vijf aaneengesloten seconden aan het bumperkleven is (18).

openpilot en het 'sleutelen' aan dit systeem is nieuw voor het lectoraat. Naast het implementeren van de zojuist genoemde service wenst de opdrachtgever ook meer inzicht in openpilot en het ontwikkelproces te krijgen: wanneer het project is afgerond moeten potentiële opvolgers de verdere ontwikkeling aan de VAR snel moeten kunnen oppakken.

Voor het onderzoek is er gekeken naar het gedrag van openpilot in vergelijking met een menselijke bestuurder, in de context van een car-following scenario. De uitkomsten hiervan zijn gepresenteerd tijdens de 30^e editie van de SafeTRANS Industrial Day.

1.4. Doel verantwoordingsrapport en vooruitblik

Het doel van het verantwoordingsrapport is op hoofdlijnen verslag te doen van de uitvoering van het afstudeerproject. Centraal staat de onderbouwing van gemaakte keuzes tijdens het proces. Tevens wordt aangetoond welke competenties op eindniveau toegepast zijn. Overigens is de geraadpleegde literatuur geïntegreerd in de hoofdstukken.

Hoofdstuk 2 geeft een algemene beschrijving van het openpilot systeem en haar mogelijkheden. Dit opzichzelfstaande hoofdstuk is optioneel, maar wordt wel aangeraden voor lezers die onbekend zijn met openpilot en/of het begrip *Advanced Driving Assistance System* (ADAS). In hoofdstuk 3 komt de projectaanpak, de ontwikkelde beroepsproducten, de planning en de projectrisico's aan bod. Daarna zullen de HBO-I competenties en hoe deze zijn aangetoond toegelicht worden in hoofdstuk 4. Hoofdstuk 5 beschrijft het uitgevoerde onderzoek, waarbij ook de presentatie van de resultaten tijdens SafeTRANS behandeld wordt. Het rapport eindigt met een conclusie in hoofdstuk 6 en een reflectie op het geheel in hoofdstuk 7.

2. Wat is openpilot?

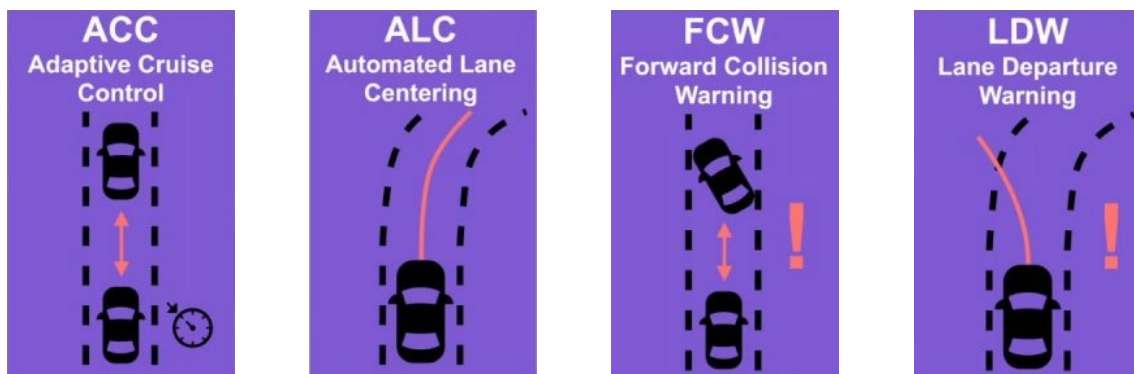
Dit hoofdstuk moet een laagdrempelig en beknopte introductie geven van openpilot. Het is voornamelijk bedoeld voor lezers die onbekend zijn met openpilot en/of ADAS systemen, of voor lezers die hierin een opfrisser nodig hebben. De hard- en software en het bedrijf achter het systeem zal hierbij aan bod komen.

2.1. openpilot

openpilot is een open source *Advanced Driver Assistance System* (ADAS). Het doel van dit soort systemen is om bestuurders te assisteren bij het rijden en/of parkeren. openpilot heeft de mogelijkheid om te assisteren door middel van:

- *Adaptive Cruise Control* (ACC), waarmee snelheid automatisch wordt aangepast om een veilige afstand tot voorliggers te behouden;
- *Automated Lane Centering* (ALC), die het voertuig in het midden van de rijbaan houdt;
- *Automated Lane Change Maneuver* (LCM), waarmee het voertuig automatisch van rijstrook kan wisselen;
- *Forward Collision Warning* (FCW), die de bestuurder waarschuwt op een potentiële aanrijding;
- *Lane Departure Warning* (LDW), die de bestuurder waarschuwt als het voertuig zijn rijstrook begint te verlaten (op wegen met meerdere rijbanen in dezelfde richting, zoals de snelweg).

Daarnaast zal, wanneer openpilot is ingeschakeld, de *Driver Monitoring* (DM) afgeleide en slapende bestuurders waarschuwen (16).



Figuur 1: Illustraties van de door openpilot aangeboden functionaliteiten (ACC, ALC, FCW, LDW).

Een auto moet minimaal een radar aan boord hebben om geschikt te zijn voor openpilot. Echter, dit betekent niet gelijk dat openpilot gebruikt kan worden in iedere auto die deze sensor heeft ingebouwd: een auto moet ook ondersteunt worden. Momenteel worden er meer dan 200 automodellen ondersteunt (19).

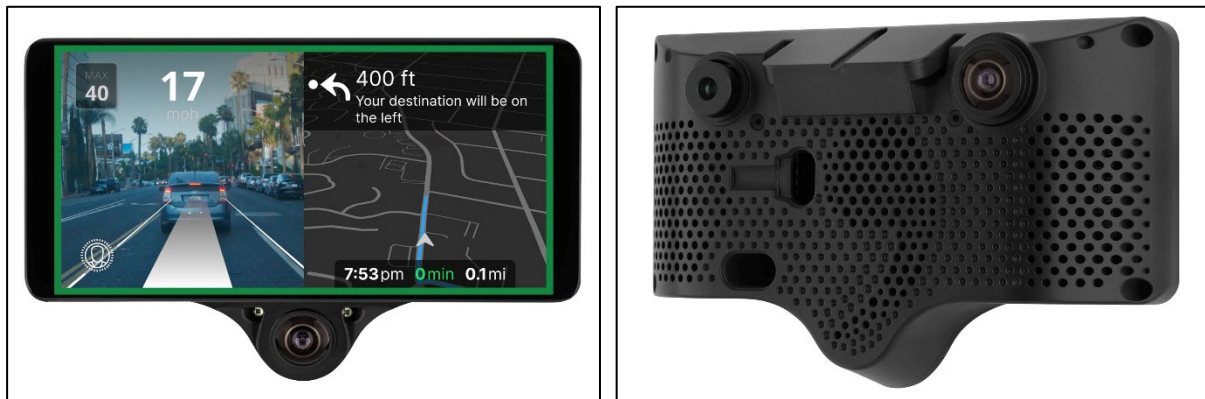
Voor een meer gedetailleerde uitleg over de werking van openpilot, zie de blogpost *How openpilot works in 2021*, beschikbaar op de website van comma.ai (17).

2.2. comma three devkit

De nieuwste (officiële) hardware waar openpilot op draait is (op het moment van schrijven) de *comma three devkit* (vanaf nu aangeduid als simpelweg 'comma 3') (20).

Het apparaat heeft eigenlijk veel weg van een dashcam, volgestopt met allerlei slimme functies.

Sterker nog: de comma hardware wordt in principe verkocht en geleverd als (werkende) dashcam. Op deze manier worden de voorschriften die door de National Highway and Traffic Safety Administration (NHTSA) zijn opgelegd omzeilt (21). Dit is ook de reden waarom de *comma one* omgedoopt was tot *comma neo*, in oktober 2017 (22). Om een comma vervolgens een auto te laten besturen dient de gebruiker zelf deze software op het apparaat te installeren.



Figuur 2: De comma three devkit (23).

De comma 3 heeft drie camera's. Twee hiervan zijn naar voren gericht, naar de rijweg voor het voertuig. De beelden hiervan worden onder andere gebruikt voor het bepalen van de latitudinale en longitudinale acties. De andere camera is naar binnen gericht, naar de bestuurder, en wordt gebruikt voor de DM.

Verder heeft het een beeldscherm, waarmee het apparaat bediend kan worden en, wanneer de auto is gestart, beelden toont van één van de naar voren gerichte camera's. Over deze beelden worden vervolgens onder andere het geplande rij plan, voorliggers en rijstrooklijnen geprojecteerd.



Figuur 3: De user interface van openpilot wanneer de auto is gestart.

Het apparaat wordt gemonteerd op de voorruit, onder de achteruitkijkspiegel en wordt aangesloten op de Car Area Network (CAN) bus van de auto. CAN is een standaard

waarmee communicatie plaatsvindt tussen verschillende elektronische componenten (ECU's) in een voertuig (24).

2.3. comma.ai

De organisatie achter de openpilot software en comma hardware is comma.ai: een Amerikaans bedrijf dat gevestigd is in San Diego (25). Het is opgericht in 2015 door George Hotz (2). De missie van comma.ai is een oplossing bieden om autorijden voor mensen te verbeteren, voor de auto's die ze al bezitten (8). Daarnaast willen ze openpilot de 'Android' maken van zelfrijdende auto's: *"iOS isn't going to be open sourced any time soon. But Android is. If Autopilot* is the iOS, openpilot is the Android."* (26).

Ook al is de software open source, comma.ai houdt hier goed grip op. Je kan uiteraard wel veranderingen voorstellen, maar comma.ai heeft hier uiteindelijk de controle op. Wat daarentegen niet beschikbaar is gesteld, is het ontwerp van de (nieuwste) hardware. Ook stelt comma.ai bijvoorbeeld de trainingssets (waarop het machine learning model getraind wordt) niet openlijk beschikbaar.

*Autopilot is het ADAS van Tesla (27).

3. Projectaanpak en risico's

Dit hoofdstuk behandelt de projectaanpak en risico's van het afstudeerproject. Allereerst wordt inzichtelijk gemaakt welke beroepsproducten zijn opgeleverd en hoe deze zijn gerealiseerd. Vervolgens wordt de projectplanning en de opgelopen vertraging behandeld. Als laatst komen de projectrisico's aan bod.

3.1. Beroepsproducten

Voor het project zijn meerdere beroepsproducten gerealiseerd. Van elk product wordt een concrete beschrijving gegeven. Ook zullen de gebruikte methoden, technieken, tools en/of theorie beschreven worden.

3.1.1. Requirementsanalyse

De requirementsanalyse bevat de basis waarmee de bumperkleef detectie- en waarschuwingsservice gerealiseerd is. Het bevat de functionele requirements, niet-functionele requirements en de beperkingen waar het eindproduct aan moet voldoen. De uitwerking hiervan is te vinden in het requirementsanalyse document (28).

Voor de uitvoering is gebruik gemaakt van de MoSCoW methode.

3.1.2. Technisch ontwerp

Om een kwalitatief eindproduct te realiseren is voorafgaand aan de ontwikkeling hiervan een technisch ontwerp uitgewerkt. Het openpilot systeem is hiervoor grondig geanalyseerd. Er is onder andere onderzocht hoe huidige services zijn geïmplementeerd, hoe de communicatie tussen de verschillende services verloopt en hoe de user interface werkt. Al deze bevindingen zijn netjes verwerkt in het technisch ontwerp document (18).

Het technisch ontwerp document bevat een beschrijving en definitie van bumperkleven, de introductie van de rijcoach, een beschrijving van de belangrijkste services (voor de realisatie van de nieuwe service), de benodigde communicatie componenten en het ontwerp van de bumperkleef detectie- en waarschuwingsservice.

Voor het uitwerken van het technisch ontwerp is gebruik gemaakt van UML (29). Hierbij is de tool *Visual Paradigm* gebruikt (30). Om een beter begrip te krijgen van de veiligheidsindicatoren THW en TTC is de theorie van Vogel bestudeerd (31). De formules van deze indicatoren zijn samengesteld aan de hand van de definities beschreven door Carnetsoft (32). Om een beter beeld te krijgen van het begrip bumperkleven is naar de theorie van SWOV gekeken (33). Om uiteindelijk een objectieve definitie van bumperkleven vast te leggen is de expertise van C. Dijksterhuis gevraagd, specialist op het gebied van verkeersgedrag en mens-machine interactie (34). Informatie over het openpilot systeem bleek helaas erg schaars te zijn. Er is bijvoorbeeld erg weinig documentatie beschikbaar en de broncode kan nogal cryptisch zijn. Van te voren is wel de introductie geraadpleegd (35).

3.1.3. Bumperkleef detectie- en waarschuwingsservice

Waar het uiteindelijk allemaal om draaide: de bumperkleef detectie- en waarschuwingsservice gerealiseerd in openpilot. Om dit mogelijk te maken is er een nieuwe service geïmplementeerd, de rijcoach service *coachd*. Het doel van deze service

is om als fundament te dienen voor de VAR. Er is gekozen voor een modulaire aanpak bij het implementeren van de VAR: nieuwe functionaliteiten (detectors) kunnen namelijk als modules worden toegevoegd.

Zo dus ook de bumperkleef detectie module. Het maakt gebruik van de THW en TTC data dat gepubliceerd wordt door de radar service. De berekeningen hiervan zijn hiervoor toegevoegd aan de radar service. Verder zijn er nog wat aanpassingen gemaakt aan het systeem zodat bumperkleefwaarschuwingen afgevuurd kunnen worden het bumperkleefwaarschuwingsteken zichtbaar wordt op de user interface.

Voor het implementeren is gebruik gemaakt van de programmeertalen Python en C++. Bij het implementeren van Python code is zoveel mogelijk de Google Python Style Guide gevolgd (36), tenzij er in de openpilot codebase expliciet een andere conventie werd gehanteerd. Voor de communicatie maakt openpilot gebruik van Cap'n Proto, dus dit framework is bestudeerd (37). Voor de rest is voornamelijk de openpilot codebase bestudeerd en is er mee geëxperimenteerd, om zo de werking beter te begrijpen.

Een complete en gedetailleerde beschrijving van de implementatie is te vinden in het document *toelichting op realisatie* (38).

3.1.4. Continuous integration setup

Naast het implementeren van een nieuwe service is ook nagenoeg de complete CI setup van openpilot overgenomen en opgetuigd in de openpilot en cereal repositories op GitHub. Dit was geen verplicht onderdeel van het afstudeerproject. Desalniettemin is het een waardevolle toevoeging voor de opdrachtgever. Hiervoor is voornamelijk de documentatie van GitHub Actions bestudeerd (39).

Een gedetailleerde beschrijving hiervan is te vinden in hoofdstuk 5 van het document *toelichting op realisatie* (38).

3.1.5. openpilot-dev ondersteunende repository

Ooit begonnen als een simpel script is uitgroeid tot een ondersteunende repository: *openpilot-dev*. Ook dit was niet een verplicht onderdeel van het afstudeerproject. Het doel van de repository is om te zorgen dat opvolgers vrijwel direct kunnen beginnen met ontwikkelen, zonder druk te maken om zaken zoals configuratie.

Het bevat een interactieve setup waarmee automatisch een volledige openpilot ontwikkelomgeving opgetuigd kan worden. Daarnaast bevat het ook een reeks scripts die handig zijn bij het ontwikkelen aan openpilot. De openpilot-dev repository is te vinden op GitHub (40).

Voor het implementeren is gebruik gemaakt Bash scripting. Een gedetailleerde beschrijving hiervan is te vinden in hoofdstuk 7 van het document *toelichting op realisatie* (38).

3.1.6. Toelichting op realisatie

Dit document dient als naslagwerk waarin de realisatie uitgebreid en gedetailleerd wordt toegelicht. De volgende zaken worden behandeld:

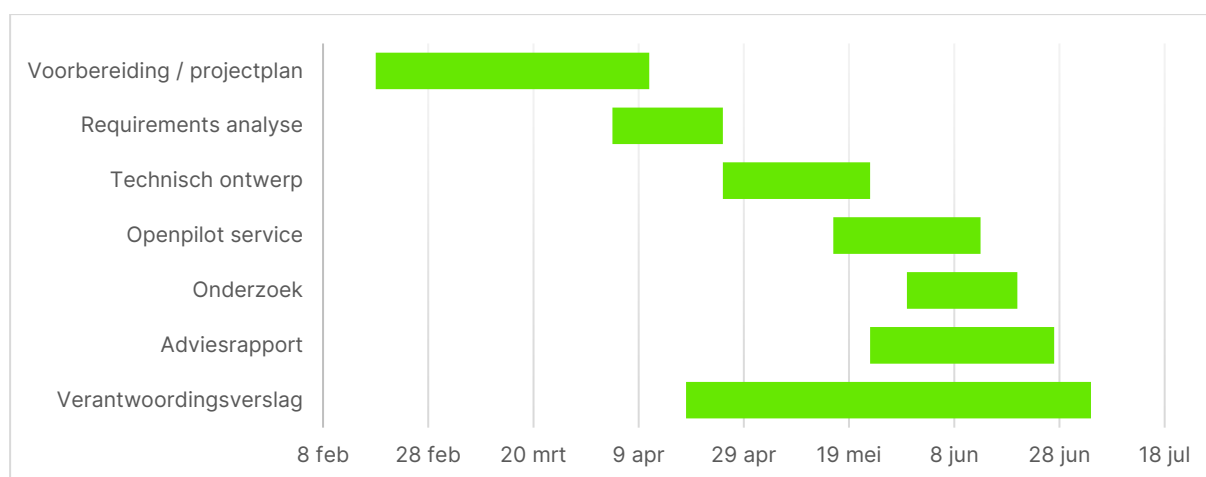
- Realisatie en beschrijving van de openpilot service.
- Aanpassingen aan de openpilot repository.

- Implementatie en beschrijving van de CI.
- Beschrijving van de verbetervoorstellen (pull requests) aan comma.ai.
- Realisatie en beschrijving van de openpilot-dev repository.

Ook al is het doel van dit verslag om als naslagwerk te dienen, tegelijkertijd kan het ook worden gezien als een beroepsproduct voor de opdrachtgever; door grondig de realisatie toe te lichten kan het document namelijk als opzet of als een soort handleiding gebruikt worden voor opvolgers die verder gaan ontwikkelen aan openpilot en/of de VAR.

3.2. Projectplanning en uitvoer

Bij de aanvang was het doel om het project aan het eind van studiejaar 21/22 af hebben gerond. Het project heeft echter vertraging opgelopen en is dit doel dus niet gehaald. Als gevolg hiervan is de oorspronkelijk planning achterhaald. Figuur 4 geeft deze weer in de vorm van een Gantt chart.



Figuur 4: De oorspronkelijke planning van het afstudeerproject.

De situatie was met de opdrachtgever besproken en hiervoor werd begrip getoond. Samen met de opdrachtgever werd gekeken naar een nieuwe planning. Uiteindelijk is er besloten om het oplevermoment te verschuiven naar begin oktober.

3.2.1. Oplevermomenten

Door de vertraging zijn de beroepsproducten dus ook later opgeleverd dan gepland. Tabel 1 geeft een overzicht van alle oplevermomenten.

Tabel 1: Oplevermomenten van de beroepsproducten. Alle oplevermomenten vonden plaats in 2022.

Product	Datum van oplevering
Requirementsanalyse	10 mei
Resultaten onderzoek	2 juni
Technisch ontwerp	9 juni
Toelichting op realisatie	27 augustus

openpilot-dev repository	1 september
Bumperkleef detectie- en waarschuwingsservice	5 september
Continuous integration setup	5 september

3.2.2. Betrokken personen en afstemmomenten

Bij het afstudeerproject zijn meerdere personen betrokken geweest. Tabel 2 geeft hier een overzicht van.

Tabel 2: Betrokken personen en hun rollen tijdens het project.

Persoon	Rol
Jeroen Lammersma	Afstudeerstudent en projectuitvoerder
Rix Groenboom	Opdrachtgever
Erik Roos	Assistent opdrachtgever
Chris Dijksterhuis	Specialist verkeersgedrag en mens-machine interactie
Bas Heijne	Afstudeerbegeleider, beoordelaar en tafelvoorzitter Intelligente systemen
Lech Bialek	Medebeoordelaar en tafelvoorzitter Intelligente systemen

De afstudeerstudent, opdrachtgever en assistent opdrachtgever zijn nagenoeg elke week samengekomen in de vorm van een stand-up. Hierbij waren ook de andere studenten aanwezig die een opdracht aan het uitvoeren waren in het kader van comma.ai en openpilot.

Met de specialist op het gebied van verkeersgedrag en mens-machine interactie is sporadisch afgesproken, voornamelijk voor het inwinnen van advies.

Tijdens de afstudeertafelbijeenkomsten, die om de 2 a 3 weken plaatsvonden, is de voortgang besproken met de afstudeertafelvoorzitters.

3.3. Projectrisico's

Elk project heeft risico's. Een overzicht van de belangrijkste risico's van dit project zijn te vinden in tabel 3.

Tabel 3: De belangrijkste risico's die voor kunnen komen tijdens het afstudeerproject, met bijpassende inperkingen en tegenreacties.

Risico	Beperkt door	Tegenreactie
Scope creep	De scope helder en duidelijk af te bakenen met de opdrachtgever, zodoende	Indien het voorkomt, plaatsen op een backlog. Indien het in de planning past

	dat er geen twijfel kan ontstaan.	meenemen. Zo niet, dan vasthouden aan afgesproken scope.
Tijdgebrek	Een realistische planning maken en hier zo goed mogelijk aan te houden.	Met opdrachtgever overleggen of bepaalde zaken overgeslagen kunnen worden.
Opdrachtgever niet meer in staat project te begeleiden	N.v.t.	Met de organisatie van de opdrachtgever overleggen hoe het project voortgezet kan worden.
openpilot codebase is te ingewikkeld om de gevraagde software in te ontwikkelen	Goed onderzoek doen naar codebase en zoveel mogelijk informatie inwinnen over ontwikkelen binnen openpilot.	Met andere studenten overleggen die bezig zijn met comma.ai en eventueel externen raadplegen van de comma.ai / openpilot development community.
Scenario's ontwikkelen voor CARLA om te testen blijkt tijdrovender / lastiger dan gedacht	Goed onderzoek doen naar de ontwikkeling van scenario's en in een vroeg stadium van project een simpel test scenario opzetten.	Hulp vragen aan andere studenten die bezig zijn met comma.ai en/of opdrachtgever vragen of externe hulp gezocht kan worden.

Tijdens het project waren de meeste risico's niet aan de orde. Wel was er sprake van tijdgebrek (toegelicht in paragraaf 3.2).

In het volgende hoofdstuk zal inzichtelijk worden gemaakt op welke manier de beroepsproducten hebben bijgedragen aan het aantonen van de HBO-I competenties.

4. Aantonen HBO-I competenties

In dit hoofdstuk worden de competenties behandeld die toegepast zijn tijdens het afstudeerproject. Elke competentie zal kort worden beschreven, gepaard met een toelichting van de wijze hoe het is aangetoond. Op het eind is een globaal overzicht van de competenties te vinden, inclusief aangepaste wegingsfactoren.

4.1. Analyseren

De student analyseert processen, producten en/of informatiestromen in hun onderlinge samenhang in de context van de omgeving.

De competentie is aangetoond door het uitvoeren van een requirementsanalyse. De wensen van de opdrachtgever werden hierdoor helder en waren de eisen vastgesteld in de vorm van functionele requirements, niet functionele requirements en beperkingen. Hierbij is de MoSCoW methode ingezet. De analyse is uitgewerkt in een document (28).

Daarnaast is de broncode en van het openpilot systeem grondig geanalyseerd om grip te krijgen op de werking van het systeem. De documentatie van openpilot is schaars en voornamelijk een algemene beschrijving. Om details te achterhalen was het nodig om de code te analyseren. Dit bleek soms een uitdaging: de code is in niet erg 'clean' en commentaar ontbreekt in veel gevallen op plekken waar dit wel wenselijk was geweest. De uitwerking hiervan is voornamelijk te vinden in het technisch ontwerp (18).

4.2. Ontwerpen

De student ontwerpt een (deel van een) ICT-systeem op basis van specificaties binnen vooraf gestelde kaders.

Voor het aantonen van deze competentie is er een technisch ontwerp samengesteld. Hierin wordt de bumperkleef detectie- en waarschuwingsservice beschreven op basis van de requirementsanalyse. De grondige analyse van de code heeft hierbij een grote rol gespeeld.

Er is in dit ontwerp niet ingegaan op de algehele architectuur van openpilot. Deze keuze is bewust gemaakt: één van de medestudenten in de groep had dit namelijk als stageopdracht.

Daarnaast is er alleen een ontwerp samengesteld van de gerealiseerde openpilot service. Ook dit was intentioneel: voor het overnemen en gedeeltelijk aanpassen van de CI was geen ontwerp nodig en de openpilot-dev ondersteunende repository is uiteindelijk op een natuurlijke wijze uit zichzelf ontstaan.

4.3. Realiseren

De student realiseert een (deel van een) ICT-systeem op basis van een ontwerp binnen gestelde kaders.

Deze competentie is aangetoond door het realiseren van:

- de basis voor de rijcoach en bumperkleef detectie- en waarschuwingsservice binnen openpilot;
- de aangepaste CI, uitgewerkt binnen de GitHub repository;
- de openpilot-dev ondersteunende repository.

Het fundament voor de rijcoach en bumperkleef service zijn gerealiseerd op basis van de wensen van de opdrachtgever. De CI en openpilot-dev repository zijn daarentegen uit eigen beweging ontstaan. Desalniettemin vallen beide wel in lijn met het langere termijn doel van de opdrachtgever (realiseren van de VAR).

4.4. Professioneel werken

De student toont aan het project planmatig en aan de hand van reflectieve kritische houding te hebben uitgevoerd.

Deze competentie is aangetoond in het gehele proces. Het project is in een logische volgorde uitgevoerd, beginnend bij het achterhalen van de requirements en eindigend bij het opleveren van het eindproduct. Uiteindelijk is er nauwelijks afgeweken van het projectplan. Indien er wel was afgewezen is dit een weloverwogen beslissing geweest.

Vanuit de opdrachtgever werd voor het uitvoeren van het project veel autonomie verwacht: hij vertrouwde erop dat het project op een correcte wijze werd uitgevoerd en goede beslissingen werden genomen, zonder hier al te veel bemoeienis in te hebben. Dit is bijvoorbeeld terug te zien in het feit dat er mee is gedacht aan potentiële vervolgoopdrachten en door meer te realiseren dan initieel was vastgelegd in de requirements.

Verder was er bij de aanvang nog geen concrete richting en waren er veel onzekerheden, wat uiteindelijk wel zorgde voor een goede uitdaging.

Ook is er kritisch gekeken naar de duur van het project, waarbij uiteindelijk een weloverwogen keuze is gemaakt om de duur te verlengen (in plaats van het project 'af te raffelen').

4.5. Schriftelijke vaardigheden

De student schrijft een verzorgd, zakelijk en goed gestructureerd verantwoordingsverslag en het taalgebruik daarbij is correct.

De competentie is aangetoond in de samengestelde documenten. Hier vallen onder andere het projectplan, toelichting op realisatie document en verantwoordingsverslag onder.

Echter, er is wel afgeweken van sommige adviezen die gegeven zijn voor het verantwoordingsrapport: de inleiding is bijvoorbeeld langer en bevat meer achtergrondinformatie. Daarnaast is er een extra hoofdstuk toegevoegd die een korte introductie geeft op openpilot (hoofdstuk 2). Het doel van deze toevoegingen is om alle relevante (achtergrond)informatie te bundelen in één verslag, waardoor het geheel volledig op zichzelf staand te lezen valt. Hiermee wordt ook gehoopt om een prettigere en laagdrempeligere leeservaring te bieden.

4.6. Onderzoekend vermogen

De student voert op adequate en navolgbare wijze een praktijkgericht onderzoek uit ter onderbouwing van een fase of een deel van de opdracht.

Onderzoekend vermogen is aangetoond door middel van het uitgevoerde experiment waarbij de longitudinale veiligheid van openpilot is getoetst. De bevindingen zijn

gepresenteerd tijdens de SafeTRANS Industrial Day. Zie hoofdstuk 5 voor een uitgebreide toelichting.

4.7. Overzicht inclusief wegingsfactoren

Tabel 4 geeft een globaal overzicht weer van de zojuist genoemde competenties, waarbij ook de (aangepaste) wegingsfactoren in zijn meegenomen. De competentie 'adviseren' was optioneel en is niet (op een systematische wijze) toegepast tijdens het project.

Tabel 4: Overzicht van de aangetoonde competenties, inclusief aangepaste wegingsfactoren.

Competentie	Aangetoond door	Standaard wegings-factor	Aangepaste wegings-factor
Analyseren	Requirementsanalyse document	4	2
Adviseren	<i>Niet toegepast</i>	4	0
Ontwerpen	Technisch ontwerp document	4	6
Realiseren	1. Implementatie van de bumperkleef detectie- en waarschuwingsservice binnen het openpilot systeem 2. Opzetten van CI	4	8
Professioneel werken	1. Samengestelde documenten (zoals projectplan, verantwoordingsrapport en toelichting op realisatie) 2. Presentatie tijdens, en bezoek aan SafeTRANS	2	2
Schriftelijke vaardigheden	Samengestelde documenten (zoals projectplan, verantwoordingsrapport en toelichting op realisatie)	1	1
Onderzoekend vermogen	Verkenning naar de longitudinale veiligheid van openpilot waarbij een (kleinschalig) experiment is uitgevoerd.	1	1

Voor bepaalde competenties is gekozen om af te wijken van de standaard wegingsfactor: er is bijvoorbeeld gekozen om 'realiseren' een weging te geven van acht punten, een verdubbeling op de standaard weging.

In het volgende hoofdstuk zal het uitgevoerde onderzoek uitgebreid aan bod komen.

5. Longitudinale veiligheid openpilot

Tijdens het project zijn de heren Groenboom, Dijksterhuis en Lammersma op bezoek geweest bij de 30^e editie van de SafeTRANS Industrial Day. Ze waren hier niet alleen om kennis te vergaren, ze waren hier ook om kennis te delen: Dijksterhuis en Lammersma hebben hier de bevindingen gepresenteerd van hun eerste verkenning naar de longitudinale veiligheid van openpilot.

Er volgt een toelichting van de SafeTRANS Industrial Day en de organisatie die het organiseert. Daarna wordt de uitgevoerde car-following scenario behandeld en worden er conclusies uit getrokken.

5.1. SafeTRANS 30. Industrial Day

SafeTRANS ("Safety in Transportation Systems") is een non-profitorganisatie die partners uit de wetenschap en industrie verenigt op het gebied van complexe embedded systemen in transport en andere veiligheidskritieke domeinen. Het streeft naar het mogelijk maken van veilige en beveiligde mobiliteit. Ondanks toenemende verkeersvolumes en complexiteit van systemen prefereert SafeTRANS hiervoor een holistische benadering (41).

De 30^e editie van de SafeTRANS Industrial Day vond plaats op 3 juni 2022, in Oldenburg, Duitsland. Het thema van de 30^e editie was *Virtuelle Absicherung* (virtuele validatie) (42). Centraal stond het vraagstuk hoe safety cases zodanig ontworpen kunnen worden zodat ze in hoge mate gebaseerd kunnen worden op de resultaten van virtuele validatie. De beweegreden hierachter komt uit het feit dat met traditionele testmethoden niet de volledige validatie bereikt kan worden van sterk geautomatiseerde en autonome systemen. Kortom: door de complexiteit van deze systemen is er een toenemende trend gaande van virtualisatie van systeemtesten.

Voor de eerste verkenning naar de longitudinale veiligheid van openpilot is gekeken naar het gedrag van het systeem gedurende gesimuleerde condities. Dit sluit goed aan op dit onderwerp. Hiervoor is een experiment uitgevoerd.

De bevindingen zijn uiteindelijk gepresenteerd tijdens de SafeTRANS Industrial Day.



Figuur 5: C. Dijksterhuis en J. Lammersma presenteren hun bevindingen tijdens de 30^e editie van de SafeTRANS Industrial Day (3 juni, 2022).

5.2. Car-following scenario

Als onderzoek is openpilot onderworpen aan een gesimuleerd car-following scenario. Er is hiervoor gebruik gemaakt van de CARLA simulator (43).

Bij een car-following scenario is er meestal sprake van een leidend voertuig en een volgend voertuig. Het leidende voertuig kan besluiten om zijn snelheid aan te passen door te gaan accelereren of te gaan remmen, of zelfs volledig tot stilstand te komen. Het volgend voertuig dient hier vervolgens op te acteren, zodat het een aanrijding vermijdt. Hierbij staat het gedrag (de reactie) van het volgend voertuig op de acties van het leidende voertuig centraal.

Om een objectief oordeel te kunnen vellen over het gedrag wordt er gebruikt gemaakt van twee veel gebruikte indicatoren bij het beoordelen van verkeerssituaties: time headway (THW) en time-to-collision (TTC). THW is de volgtijd tot het leidende voertuig (in seconden). TTC is de tijd (in seconden) voordat een botsing ontstaat met het leidende voertuig (18).

Tijdens het onderzoek had Dijksterhuis een ondersteunende en adviserende rol.

5.2.1. Context

Een te korte volgtijd is vaak de oorzaak van een kop-staartbotsing (44). Op dat moment is er sprake van een car-following situatie. Maar voordat er aan openpilot een bumperkleef detectie- en waarschuwingsservice wordt toegevoegd, of zelfs een stap verder: een service die zal ingrijpen, moet eerst de longitudinale veiligheid van openpilot worden onderzocht. Of te wel, hoe reageert het openpilot systeem tijdens een car-following situatie.

Om een duidelijk beeld te schetsen wordt tegelijkertijd een menselijke bestuurder onderworpen aan exact dezelfde situatie, om zo het gedrag van beide met elkaar te kunnen vergelijken.

5.2.2. Onderzoeksvraag

De onderzoeksvraag luidt dan ook:

“Hoe verhoudt het gedrag van het openpilot systeem zich tot een menselijke bestuurder gedurende gesimuleerde car-following condities?”

Waarbij gedrag gemeten wordt aan de hand van THW en TTC.

5.2.3. Onderzoeksstrategie

Als onderzoeksstrategie wordt gekozen voor het uitvoeren van een experiment; er wordt immers een causale relatie onderzocht tussen het type bestuurder en het gedrag tijdens een car-following situatie. De onafhankelijk variabele is in dit geval het type bestuurder (openpilot of mens) en de afhankelijke variabele is het gedrag van de bestuurder, gemeten in THW en TTC.

Voor het experiment is met CARLA ScenarioRunner een car-following scenario ontwikkeld (45). Er is gekozen om alleen de snelheid van het leidende voertuig tijdens het scenario te laten variëren en dus niet volledig tot stilstand te laten komen. Het leidende voertuig volgt de instructies beschreven in tabel 5, te vinden in bijlage A. Een

video van de uitvoering van het scenario door openpilot als bestuurder is te vinden op YouTube (46).

5.2.4. Dataverzamelmethode

Als dataverzamelmethode is gekozen voor observeren: het scenario wordt gestart en vervolgens wordt de bestuurder geobserveerd. Tijdens het experiment wordt niks genoteerd; de THW en TTC waarden worden namelijk automatisch gelogd en opgeslagen in een log bestand op de computer (als kwantitatieve data).

Eén kanttekening: de handmatige besturing was erg primitief (momenteel alleen nog maar mogelijk om te accelereren of af te remmen, er is geen mogelijkheid om gas los te laten) en dit is ook terug te zien in verzamelde data: wanneer de THW geplot wordt als grafiek verkrijgt het een 'zaag' patroon.

5.2.5. Data-analyse

Vervolgens wordt de data uit een logbestand ingeladen en worden de THW en TTC waarden geëxtraheerd. De data is kwantitatief en is op rationiveau (continue).

Vervolgens kan hier eenvoudig een grafiek van worden gemaakt, met op de Y-as de veiligheidsindicatoren, THW en TTC, in seconden en op de X-as de tijd, ook in seconden. bijlage B bevat twee voorbeelden, één van openpilot en één van een menselijke bestuurder.

5.2.6. Conclusie

Uit de grafieken is af te leiden dat openpilot ander gedrag vertoont dan de menselijke bestuurder. De menselijke bestuurder blijft dicht op het leidende voertuig rijden, terwijl openpilot langzamer reageert en meer afstand houdt.

De volgende conclusies kunnen getrokken worden:

1. De reactietijd van openpilot is langzamer.
2. Het gemiddelde THW van openpilot is hoger.
3. Het gemiddelde TTC van openpilot is lager.

Uiteraard was dit pas een eerste verkenning van de mogelijkheden om openpilot te testen aan de hand van virtuele validatie. Om tot een meer gegeneraliseerd resultaat te komen is er meer validatie nodig, in de vorm van meer gesimuleerde scenario's en scenario's in de echte wereld. Maar, met deze resultaten kan zeker iets gezegd worden over de longitudinale veiligheid van openpilot.

Het gedrag van openpilot wijkt af bij dit scenario af van een menselijke bestuurder. Als gevolg zouden hierdoor juist zelfs méér gevaarlijke situaties kunnen optreden. Als er bijvoorbeeld meer volgende voertuigen (met menselijke bestuurders) achter openpilot zouden rijden zouden deze bestuurders verward kunnen raken door het gedrag van openpilot; het gedrag van openpilot valt namelijk buiten het verwachtingspatroon: een menselijke bestuurder zou niet zo'n groot gat tussen zichzelf en een leidend voertuig laten. Als gevolg zou de menselijke bestuurder geïrriteerd kunnen raken en geneigd zijn om in te willen halen.

6. Conclusie

In dit verantwoordingsrapport is de uitvoering van het afstudeerproject *openpilot Tailgating Warning* toegelicht. Hierbij worden de gemaakte keuzes gemaakt beschreven en wordt er ingegaan op hoe de toegepaste HBO-I eindcompetenties zijn aangetoond. Hiervoor zijn beroepsproducten ontwikkeld, wat uiteindelijk heeft geresulteerd in een bumperkleef detectie- en waarschuwingsservice voor het openpilot systeem.

Vandaag de dag gebeuren er nog ontzettend veel, onnodige, ongelukken in het verkeer. De oorzaak ligt veelal bij gevaarlijke rijgedragingen, waaronder bumperkleven. Misschien de volgende keer toch maar iets meer afstand houden tot die ene *zondagsrijder* op de A7, met 130 op de teller. Wellicht dat een virtuele rijcoach hierbij kan helpen. Althans, wel in de ogen van het lectoraat New Business & IT, onderdeel van de Digital Society Hub, de opdrachtgever waarbij dit project is uitgevoerd.

De wens van de opdrachtgever was om de basis van de Virtuele Automobiël Rijcoach (VAR) te leggen, binnen het openpilot systeem, inclusief een bumperkleef detectie- en waarschuwingsservice. Het doel van deze service is om (zoals de naam impliceert) een bestuurder te waarschuwen wanneer hij of zij gevaarlijk bumperkleef gedrag vertoont. Dit prototype heeft ook inzicht gegeven in het feit in hoeverre het openpilot systeem geschikt is om de VAR verder op door te ontwikkelen.

Dit is succesvol gerealiseerd: er is een rijcoach service toegevoegd aan openpilot die realtime waarschuwingen geeft wanneer een bestuurder aan het bumperkleven is. Naast de gewenste requirements zijn er ook extra producten gerealiseerd, zoals een ondersteunende repository vol met handige scripts, met het doel om de doorontwikkeling aan de VAR te vergemakkelijken. De opdrachtgever bleek positief over de resultaten.

Omwille van huidige wet- en regelgeving is openpilot momenteel illegaal in Nederland. Om deze reden is de rijcoach en bumperkleef service enkel getest onder gesimuleerde omstandigheden, doormiddel van de CARLA simulator. Een vervolgstap zou dus zijn om de functionaliteiten nu ook te testen onder realistische omstandigheden, bijvoorbeeld op een testbaan. Dit zou ook gelijk mogelijkheden bieden om de, momenteel nog onbekende, effectiviteit van de bumperkleef service te testen.

openpilot is zeker een geschikt platform waarop de VAR op door te ontwikkeld kan worden. De uitkomsten van dit project bieden hier ook uitstekende handvatten voor. De toekomst zal leren of we *straks* allemaal met een 'kastje' in de auto zullen rondrijden.

7. Lessons learned / reflectie op product

De gerealiseerde producten bieden de opdrachtgever een goede start in de ontwikkeling van een rijcoach op basis van openpilot. Ten eerste biedt ontwerp veel inzichten in de werkwijze van hoe functionaliteiten toegevoegd kunnen worden aan het openpilot systeem. Ten tweede geeft de rijcoach, samen met de bumperkleef service, een goede eerste blik op de mogelijkheden van de VAR. Door hiernaast ook de CI op te zetten en openpilot-dev repository aan te bieden, kan de opdrachtgever gemakkelijk de ontwikkeling hervatten.

Doordat er tijdens de aanvang nog veel onzekerheid heerste en de opdrachtgever tijdens de uitvoering veel autonomie wenste, is de duur van project verlengd. Uiteindelijk bleek dit een goede keus: het project is op een nette manier afgerond. Echter, in de toekomst zal de uitvoerende partij een dergelijk project enkel uitvoeren ZONDER al het bureaucratische *geneuzel* en *klierige* documentatiewerk wat een afstudeeropdracht met zich meebrengt. Naar verwachting zal dit resulteren in hogere kwaliteit, in een korter tijdsbestek.

Wel is er enige trots voor wat er is opgeleverd: een simpel, maar wel een *clean* prototype, inclusief ondersteunende producten die doorontwikkeling aan de VAR zo simpel mogelijk dienen te maken, terwijl de opdrachtgever niet eens de eigenaar is van openpilot. Dit is enigszins bijzonder, omdat technische ondersteuning dus niet beschikbaar was: alles moest eigenhandig *uitgevogeld* worden (uiteindelijk ook deels de reden waardoor de ondersteunende repository is ontstaan).

Jammer genoeg is er nog weinig te zeggen over de effectiviteit van de bumperkleef service in de praktijk, omdat testen momenteel enkel in de simulator mogelijk is. Hopelijk biedt RDW in de nabije toekomst nieuwe wet- en regelgeving die dergelijke praktijktesten wél mogelijk maken.

Al met al: het was een prima en plezierig project en de motivatie is zeker aanwezig om uit eigen beweging door te ontwikkelen aan openpilot.

Literatuurlijst

1. Etherington D. George “Geohot” Hotz Presents the Comma One. TechCrunch. 2016. Beschikbaar via: <https://techcrunch.com/video/george-geohot-hotz-presents-the-comma-one/>. Geraadpleegd 2022 september 1.
2. Vance A. The First Person to Hack the iPhone Built a Self-Driving Car. In His Garage: George Hotz is taking on Google and Tesla by himself. Bloomberg. 2015. Beschikbaar via: <https://www.bloomberg.com/features/2015-george-hotz-self-driving-car/>. Geraadpleegd 2022 september 1.
3. SAE International. Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles. J3016_202104. SAE International; 2021.
4. Tabahriti S. Business Insider. 2022. Beschikbaar via: <https://www.businessinsider.nl/elon-musk-volledig-zelfrijdende-tesla-kerst>. Geraadpleegd 2022 september 1.
5. Bright. Tesla gaat prijs 'zelfrijdende' functie fors verhogen. RTL Nieuws. 2022. Beschikbaar via: <https://www.rtlnieuws.nl/tech/artikel/5328377/tesla-zelfrijdende-autopilot-self-driving>. Geraadpleegd 2022 september 1.
6. MIT Technology Review Insights. Self-driving cars take the wheel. MIT Technology Review. 2019. Beschikbaar via: <https://www.technologyreview.com/2019/02/15/137381/self-driving-cars-take-the-wheel/>. Geraadpleegd 2022 september 1.
7. Tameling R. Deze Audi's kunnen rijden zonder stuur: 'Binnen tien jaar realiteit'. AD. 2022. Beschikbaar via: <https://www.ad.nl/auto/deze-audis-kunnen-rijden-zonder-stuur-binnen-tien-jaar-realiteit~a69f8d6b>. Geraadpleegd 2022 september 1.
8. comma.ai. comma.ai: Overview. LinkedIn. Beschikbaar via: <https://www.linkedin.com/company/comma.ai/about/>. Geraadpleegd 1 september 2022.
9. Gross A. Consumer Skepticism Toward Autonomous Driving Features Justified. AAA Newsroom. 2022. Beschikbaar via: <https://newsroom.aaa.com/2022/05/consumer-skepticism-toward-active-driving-features-justified>. Geraadpleegd 2022 september 1.
10. Bright. Bijna helft van Nederlanders wil nooit in zelfrijdende auto stappen. RTL Nieuws. 2022. Beschikbaar via: <https://www.rtlnieuws.nl/tech/artikel/5304388/zelfrijdende-auto-nederland>. Geraadpleegd 2022 september 1.
11. SWOV. Ernstig verkeersgewonden in Nederland. 2021. Beschikbaar via: <https://swov.nl/nl/factsheet/ernstig-verkeersgewonden-nederland>. Geraadpleegd 2022 april 4.

12. SWOV. Riskant verkeersgedrag, verkeersagressie en veelplegers. 2021. Beschikbaar via: <https://www.swov.nl/nl/factsheet/riskant-verkeersgedrag-verkeersagressie-en-veelplegers>. Geraadpleegd 2022 april 4.
13. Aarts LT, Loenis B, Korving H, Guiking C. Risicofactoren op 50km/uur-kruispunten met verkeerslichten. Den Haag: SWOV; 2017.
14. Digital Society Hub. comma.ai. Beschikbaar via: <https://www.digitalsocietyhub.nl/projecten/commaai>. Geraadpleegd 2022 september 1.
15. Allianz Direct. De grootste auto ergernissen van Nederland. Beschikbaar via: <https://www.allianzdirect.nl/pers/grootste-auto-ergernissen-2021/>. Geraadpleegd 2022 april 7.
16. comma.ai. commaai/openpilot: openpilot is an open source driver assistance system. openpilot performs the functions of Automated Lane Centering and Adaptive Cruise Control for over 150 supported car makes and models. GitHub. Beschikbaar via: <https://github.com/commaai/openpilot>. Geraadpleegd 2022 juni 5.
17. comma.ai. How openpilot works in 2021. 2021. Beschikbaar via: <https://blog.comma.ai/openpilot-in-2021/>. Geraadpleegd 2022 april 8.
18. Lammersma J. Technisch Ontwerp – openpilot Tailgating Warning. Groningen: Hanzehogeschool, SCMI; 2022.
19. comma.ai. comma - Compatibility. Beschikbaar via: <https://comma.ai/vehicles>. Geraadpleegd 2022 september 1.
20. comma.ai. comma three Press Release. 2021. Beschikbaar via: <https://blog.comma.ai/comma-three-press-release/>. Geraadpleegd 2022 maart 30.
21. Etherington D. Comma.ai cancels the Comma One following NHTSA letter. TechCrunch. 2016. Beschikbaar via: <https://techcrunch.com/2016/10/28/comma-ai-cancels-the-comma-one-following-nhtsa-letter>. Geraadpleegd 2022 september 1.
22. comma.ai. Announcing the EON Dashcam DevKit. Medium. 2017. Beschikbaar via: <https://comma-ai.medium.com/announcing-the-eon-dashcam-devkit-166116eea497>. Geraadpleegd 2022 september 1.
23. comma.ai. comma three devkit | comma shop. Beschikbaar via: <https://comma.ai/shop/products/three>. Geraadpleegd 2022 september 1.
24. CSS Electronics. CAN Bus Explained - A Simple Intro. 2022. Beschikbaar via: <https://www.csselectronics.com/pages/can-bus-simple-intro-tutorial>. Geraadpleegd 2022 september 1.
25. comma.ai. Beschikbaar via: <https://comma.ai/>.

26. comma [@comma_ai]. iOS isn't going to be open sourced any time soon. But Android is. If Autopilot is the iOS, openpilot is the Android. [Tweet]. Twitter. 2022. Beschikbaar via: https://twitter.com/comma_ai/status/1507183091265073152.
27. Tesla. Autopilot. Beschikbaar via: <https://www.tesla.com/autopilot>. Geraadpleegd 2022 september 1.
28. Lammersma J. Requirementsanalyse – openpilot Tailgating Warning. Groningen: Hanzehogeschool, SCMI; 2022.
29. Object Management Group®, Inc. Welcome To UML Web Site! Unified Modeling Language. Beschikbaar via: <https://www.uml.org>. Geraadpleegd 2022 september 4.
30. Visual Paradigm. Ideal Modeling & Diagramming Tool for Agile Team Collaboration. Visual Paradigm. Beschikbaar via: <https://www.visual-paradigm.com/>. Geraadpleegd 2022 september 4.
31. Vogel K. A comparison of headway and time to collision as safety indicators. Accident Analysis & Prevention. 2003 mei; p. 427-433.
32. Carnetsoft B.V. Data sampling and data storage for research simulators. Carnetsoft Driving Simulators. 2013. Beschikbaar via: <https://cs-driving-simulator.com/downloads/DataStorage.pdf>. Geraadpleegd 2022 juni 2.
33. SWOV. Volgtijd en verkeersveiligheid. Leidschendam: SWOV; 2012.
34. Dijksterhuis C. over. Dijksterhuis Onderzoek & Advies. Beschikbaar via: <https://www.chrisdijksterhuis.nl/over>. Geraadpleegd 2022 juni 2.
35. comma.ai. Introduction to openpilot · commaai/openpilot Wiki. GitHub. Beschikbaar via: <https://github.com/commaai/openpilot/wiki/Introduction-to-openpilot>. Geraadpleegd 2022 juni 8.
36. Google. Google Python Style Guide. GitHub. Beschikbaar via: <https://google.github.io/styleguide/pyguide.html>. Geraadpleegd 2022 augustus 10.
37. Cap'n Proto. Cap'n Proto: Introduction. Beschikbaar via: <https://capnproto.org/>. Geraadpleegd 2022 juni 6.
38. Lammersma J. Toelichting op Realisatie – openpilot Tailgating Warning. Groningen: Hanzehogeschool, SCMI; 2022.
39. GitHub, Inc. GitHub Actions Documentation. GitHub Docs. Beschikbaar via: <https://docs.github.com/en/actions>. Geraadpleegd 2022 augustus 21.
40. Lammersma J. jeroenlammersma/openpilot-dev: Power up your openpilot development setup! openpilot-dev is is an interactive setup that simplifies and automates the process of setting up an openpilot development environment. GitHub. Beschikbaar via: <https://github.com/jeroenlammersma/openpilot-dev/tree/graduation-project>. Geraadpleegd 2022 september 4.

41. SafeTRANS e.V. Über uns. SafeTRANS. Beschikbaar via: <https://www.safetrans-de.org/de/Ueber-uns/index.php>. Geraadpleegd 2022 september 2.
42. SafeTRANS e.V. 30. SafeTRANS Industrial Day. SafeTRANS. 2022. Beschikbaar via: <https://www.safetrans-de.org/de/Veranstaltungen/2022/06/03/30.-safetrans-industrial-day>. Geraadpleegd 2022 september 2.
43. CARLA. CARLA Simulator. Beschikbaar via: <https://carla.org/>.
44. Muhrer E, Vollrath M. Expectations while car following—The consequences for driving behaviour in a simulated driving task. Accident Analysis and Prevention. 2010 november; 42(6): 2158-2164.
45. Carla Team. carla-simulator/scenario_runner: Traffic scenario definition and execution engine. GitHub. Beschikbaar via: https://github.com/carla-simulator/scenario_runner. Geraadpleegd 2022 2 september.
46. Lammersma J. openpilot Car Following Task [Video]. 2022. Beschikbaar via: <https://www.youtube.com/watch?v=FkssibDleZY>. Geraadpleegd 2022 september 2.

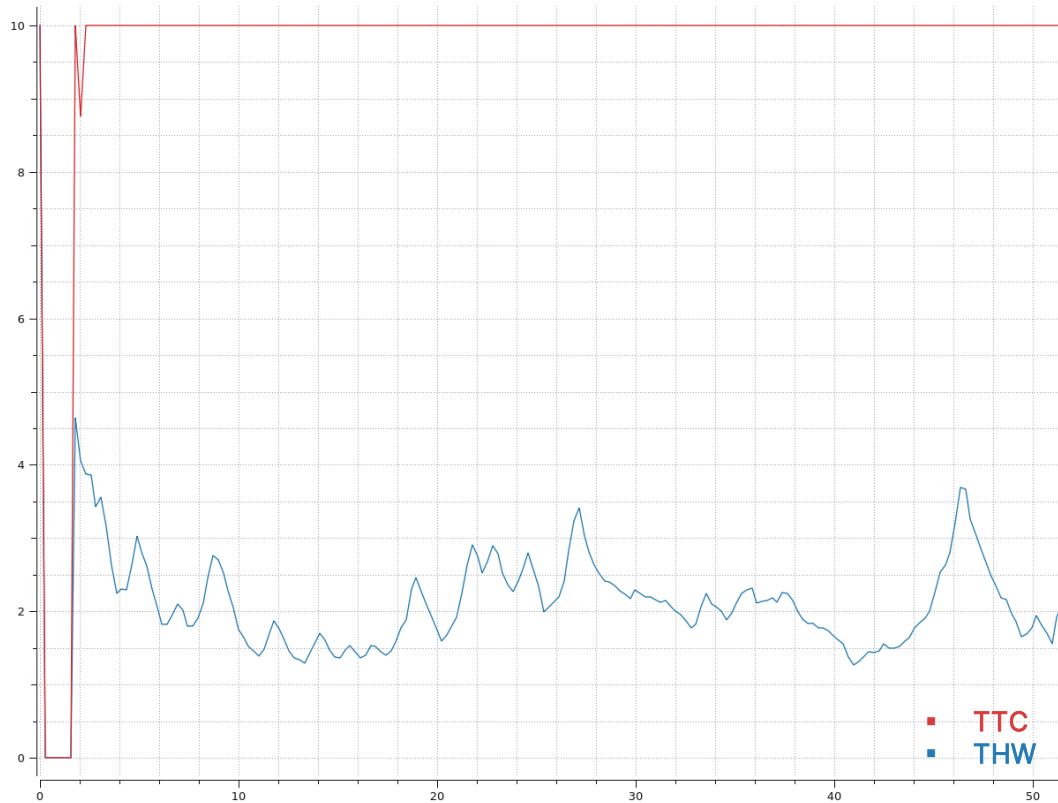
Bijlage A: Car-following scenario instructies

Tabel 5: Instructies dat het leidende voertuig volgt tijdens het car-following scenario.

#	Actie	Afstand (in meter)	Streefsnelheid (in m/s)	Streefsnelheid (in km/u)
1	Accelereren	40	8	28,8
2	Accelereren	120	12	43,2
3	Afremmen	64	8	28,8
4	Accelereren	110	20	72
5	Afremmen	55	10	36
6	Accelereren	50	16	57,6
7	Afremmen	60	9	32,4
8	Accelereren	70	12	43,2

Bijlage B: Car-following scenario resultaten

Menselijke bestuurder



openpilot

