

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen: informatica

Masterthesis

Energie-efficiënte optimalisaties voor adaptieve streaming

Damianus Wakker

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: informatica

PROMOTOR :

Prof. dr. Peter QUAX

BEGELEIDER :

De heer Mike VANDERSANDEN

Gezamenlijke opleiding UHasselt en KU Leuven



Universiteit Hasselt | Campus Diepenbeek | Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen | Agoralaan Gebouw H - Gebouw B | BE 3590 Diepenbeek

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



2023
2024

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen: informatica

Masterthesis

Energie-efficiënte optimalisaties voor adaptieve streaming

Damianus Wakker

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: informatica

PROMOTOR :

Prof. dr. Peter QUAX

BEGELEIDER :

De heer Mike VANDERSANDEN



KU LEUVEN

Woord vooraf

Bij het afronden van deze scriptie over energie-efficiënte optimalisaties in adaptieve streaming wil ik mijn dank en waardering uitspreken aan degenen die hebben bijgedragen aan dit project.

Eerst en vooral wil ik mijn oprechte dank betuigen aan mijn promotor, prof. dr. Peter Quax en begeleider, Mike Vandersanden, voor hun onschatbare begeleiding, waardevolle suggesties en voortdurende steun gedurende het gehele onderzoeksproces. Hun deskundigheid en aanmoediging hebben een belangrijke rol gespeeld in zowel de ontwikkeling als de afronding van dit onderzoek. Vervolgens wil ik mijn waardering uiten voor het onderzoekscentrum EDM (Expertisecentrum voor Digitale Media) voor het beschikbaar stellen van de faciliteiten en middelen die nodig waren voor dit onderzoek.

Verder wil ik mijn dank uitspreken aan mijn medestudenten, vrienden, zussen, moeder en partner voor hun onvoorwaardelijke steun en bemoediging gedurende mijn studieperiode. Jullie vertrouwen in mijn capaciteiten heeft mij gemotiveerd om door te gaan, zelfs tijdens mijn moeilijke momenten.

Ik hoop dat u deze scriptie interessant en leerzaam zult vinden.

Inhoudsopgave

Woord vooraf	1
Lijst met tabellen	5
Lijst met figuren	8
Verklarende woordenlijst	9
Abstract	11
Abstract in English	13
1 Inleiding	15
1.1 Situering	15
1.2 Probleemstelling	16
1.3 Doelstellingen	17
1.4 Methode	18
1.5 Vooruitblik	19
2 Bronnenstudie	21
2.1 Wat is de effectieve impact van de videostreaming industrie	21
2.2 Werking van video on-demand streaming	22
2.3 Onderzochte bronnen van bestaande methodes	24
2.3.1 Samenvatting	24
2.3.2 Belangrijkste Punten	24
2.4 Gebruikers demografie	27
3 Materiaal en Methode	29
3.1 Mogelijke methodes	29
3.2 Gekozen methodes	31
3.3 Implementatie van groene videospeler	31
3.4 Implementatie adaptie o.b.v. fysieke video-omvang	34
3.5 Gebruikerstest	36
3.5.1 Opstellingen	36
3.5.2 Groene videospeler test	36
3.5.3 Adaptie o.b.v. fysieke video-omvang	38
4 Groene videospeler	41

4.1	Resultaten	41
4.2	Discussie	50
5	Adaptie o.b.v. fysieke video-omvang	53
5.1	Resultaten	53
5.2	Discussie	62
6	Besparingen door methodes	65
6.1	Resultaten	65
6.1.1	Groene Videospeler	65
6.1.2	Adaptie o.b.v. fysieke video-omvang	67
6.2	Discussie	69
6.2.1	Groene Videospeler	70
6.2.2	Adaptie o.b.v. fysieke video-omvang	70
7	Besluit	73
8	Toekomstig onderzoek	75
	Literatuurlijst	79

Lijst van tabellen

3.1	Datapunten batterijmeting	34
3.2	Vergelijking van batterijmetingmethodes	34

Lijst van figuren

1.1	Voorstelling werking van CDN[1].	15
1.2	Voorstelling werking van CDN[2].	15
1.3	Voorstelling werking van ABR a.d.h.v. iconen[3].	16
1.4	Voorstelling werking van ABR a.d.h.v. videofragmenten[4].	16
2.1	Impact van videostreaming op de aardopwarming[5], [6].	21
2.2	Verdeling van het internetverkeer[7].	21
2.3	Voorstelling werking van ABR a.d.h.v. videofragmenten[4].	22
2.4	Voorstelling werking van CDN[2].	23
2.5	Meest gebruikte apparaat op YouTube.	27
2.6	Meest gebruikte apparaat op netflix.	28
2.7	Kijkuren per streaming platform.	28
3.1	Overwogen methode encoding.	29
3.2	Gebruikersinterface groene videospeler.	32
3.3	Grafiek voor Formule 3.1.	33
4.1	Resultaten vraag GVS2.	41
4.2	Resultaten vraag GVS3.	42
4.3	Resultaten vraag GVS4.	42
4.4	Resultaten vraag GVS5.	43
4.5	Resultaten vraag GVS7.	43
4.6	Resultaten vraag GVS8.	44
4.7	Resultaten vraag GVS9.	44
4.8	Resultaten vraag GVS10.	45
4.9	Resultaten vraag GVS11.	45
4.10	Resultaten vraag GVS12.	46
4.11	Resultaten vraag GVS13.	46
4.12	Resultaten vraag GVS14.	47
4.13	Resultaten vraag GVS15.	47
4.14	Resultaten vraag GVS16.	48
4.15	Resultaten vraag GVS17.	48
4.16	Resultaten vraag GVS18.	49
4.17	Resultaten vraag GVS19.	49
4.18	Resultaten vraag GVS20.	50
4.19	Resultaten vraag GVS21.	50

5.1	Resultaten of gebruikers bewust zijn van de impact van videostreaming op de aardopwarming.	53
5.2	Resultaten of gebruikers merkten dat de videokwaliteit werd aangepast.	54
5.3	Resultaten of gebruikers het erg vonden dat de videokwaliteit veranderde.	54
5.4	Resultaten van of de videokwaliteit per omvang van video-element prettig was. . .	55
5.5	Resultaten van gebruikers die de streamingdienst zou blijven gebruiken ondanks kwaliteitsverandering (enige aanbieder van gewenste content).	55
5.6	Resultaat van gebruikers die de streamingdienst zou blijven gebruiken ondanks kwaliteitsverandering (zelfde prijs, alternatieve aanbieder beschikbaar).	56
5.7	Resultaten van gebruikers die de streamingdienst zou blijven gebruiken ondanks kwaliteitsverandering (alternatieve aanbieder beschikbaar tegen hogere prijs). . . .	56
5.8	Resultaten van gebruikers die de streamingdienst zou blijven gebruiken ondanks kwaliteitsverandering (alternatieve aanbieder beschikbaar tegen goedkopere prijs). .	57
5.9	Resultaten van de gebruikerservaring met videokwaliteit bij kleine videoweergave. .	57
5.10	Resultaten van de verwachte gebruikerservaring met videokwaliteit bij kleine videoweergave op een telefoon.	58
5.11	Resultaten van de gebruikerservaring met videokwaliteit bij middel videoweergave. .	58
5.12	Resultaten van de verwachte gebruikerservaring met videokwaliteit bij middel videoweergave op een tablet.	59
5.13	Resultaten van de gebruikerservaring met videokwaliteit bij standaard videoweergave.	59
5.14	Resultaten van de verwachte gebruikerservaring met videokwaliteit bij standaard videoweergave op een laptop.	60
5.15	Resultaten van de gebruikerservaring met videokwaliteit bij grote videoweergave. .	60
5.16	Resultaten van de gebruikerservaring met videokwaliteit bij volledig scherm voor videoweergave.	61
5.17	Resultaten over de wenselijkheid van deze methode bij bestaande streamingdiensten volgens gebruikers.	61
5.18	Resultaten over de geschiktheid van deze methode om de impact op de opwarming van de aarde te verminderen.	62
6.1	Resultaten percentage besparing per mogelijke instelling.	65
6.2	Resultaten besparing per mogelijke instelling.	66
6.3	Vergelijking tussen het verbruik van de videokwaliteit tussen met en zonder invloed van de UI-elementen.	66
6.4	Vergelijking tussen het verbruik van de helderheid tussen met en zonder invloed van de UI-elementen.	67
6.5	Resultaten besparing van testgroep gebaseerd op meest gebruikt toestel.	67
6.6	Resultaten besparing van testgroep gebaseerd op alle gebruikte toestel.	68
6.7	Resultaten besparing gebaseerde op de demografie van het uurverbruik per toestel op YouTube.	68
6.8	Resultaten besparing gebaseerde op de demografie van het uurverbruik per toestel op Netflix.	69
6.9	Resultaten besparing gebaseerde op de demografie van het uurverbruik per toestel op Netflix en YouTube.	69

Verklarende woordenlijst

ppi	<i>Pixels per inch</i> , dit zijn het aantal pixels over de diagonaal gedeeld door het aantal inches over de diagonaal van een scherm.
API	<i>Application Programming Interface</i> is een set van regels die softwaretoepassingen in staat stelt om met elkaar te communiceren en functies of gegevens van elkaar te gebruiken.
Bitrate	De hoeveelheid data die per seconde wordt overgedragen tijdens het afspelen van audio- of videobestanden, meestal gemeten in kilobits per seconde (kbps).
Buffering	Het proces waarbij een bepaalde hoeveelheid gegevens vooraf wordt gedownload en opgeslagen in een tijdelijk geheugen zodat videostreaming ononderbroken kan doorgaan ondanks variaties in de netwerkverbinding.
Rebuffering	het proces waarbij de afspelbuffer opnieuw gevuld wordt, omdat de eerder opgeslagen data opgebruikt is, wat resulteert in onderbrekingen tijdens het streamen van audio of video.
Renditie	Een versie van een video in een specifieke resolutie en bitrate, aangepast aan verschillende netwerkcondities.
Segment	Een klein deel van een renditie, meestal enkele seconden lang, dat wordt gebruikt voor het efficiënter streamen en dynamisch aanpassen van de videokwaliteit aan de beschikbare bandbreedte.
Resolutie	De mate van detail in een afbeelding of scherm, gemeten in het aantal pixels.

Abstract

Het groeiende internetverkeer en de significante CO₂-uitstoot van videostreaming onderstrepen de noodzaak van energie-efficiënte adaptieve streaming. Deze masterproef verkent methodes om de gebruiker te sensibiliseren tijdens het consumeren van content en hun reactie tot een energiebesparend *Adaptive Bitrate* (ABR)-algoritme.

Er is een groene videospeler ontwikkeld die visuele feedback geeft over de huidige ecologische impact, gebaseerd op de datatransmissie via bitrate, en batterijverbruik beïnvloedt door helderheidswijzigingen. Tijdens de gebruikerstest hadden gebruikers controle over de resolutie en helderheid. De resultaten hiervan tonen een verlaging van 55% gCO₂/h a.d.h.v de gekozen resolutie door de gebruikers. Ook is er een verlaging van 25% gCO₂/h door de gekozen helderheid. Bovendien waren alle gebruikers comfortabel met de ervaring van hun gekozen instellingen. Verder zijn gebruikers onderworpen aan een ABR-algoritme die een resolutie kiest voor de gestreamde video op basis van de fysieke ruimte die het inneemt. Dit resulteerde in een vermindering van 35% gCO₂/h. Vervolgens vond 70% van de gebruikers de ervaring over alle groottes prettig, al was de resolutie lager bij de fysiek kleinere video-elementen.

Kortom, beide methodes resulteerde in een vermindering op de ecologische impact. Verder, zijn gebruikers bereid om minder energie te gebruiken indien ze bewust zijn van de impact van een hogere resolutie en helderheid. Daarnaast zijn ze open tot het idee van de implementatie van zulke methodes.

Abstract in English

The growing internet traffic and the significant CO₂ emissions from video streaming underscore the need for energy-efficient adaptive streaming. This master's thesis explores methods to sensitize users during content consumption and their reaction to an energy-saving Adaptive Bitrate (ABR) algorithm.

A green video player has been developed that provides visual feedback on the current ecological impact, based on data transmission via bitrate, and battery consumption influenced by brightness changes. During user tests, participants had control over the resolution and brightness. The results show a reduction of 55% gCO₂/h based on the chosen resolution by the users. There was also a reduction of 25% gCO₂/h due to the chosen brightness. Moreover, all users were comfortable with the experience of their chosen settings. Afterwards, users were subjected to an ABR algorithm that determines the video resolution by querying the physical size of the video being shown. This resulted in a 35% gCO₂/h reduction. Furthermore, 70% of users found the experience pleasant across all sizes, even though the resolution was lower for the physically smaller video elements.

In short, both methods resulted in a reduction in ecological impact. Furthermore, it was found that users are willing to consume less energy when they are aware of the impact of higher resolution and are open to the implementation of such methods.

Hoofdstuk 1

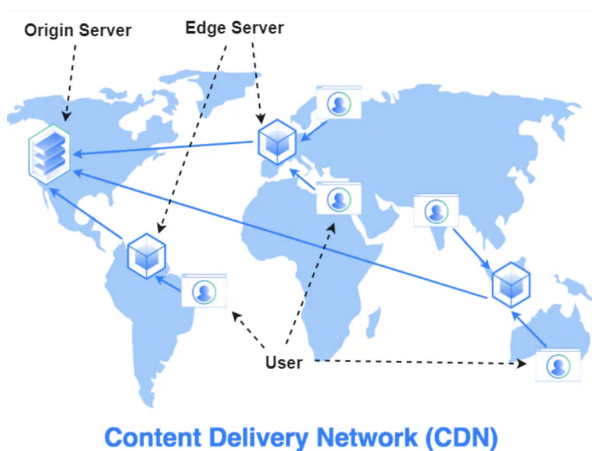
Inleiding

1.1 Situering

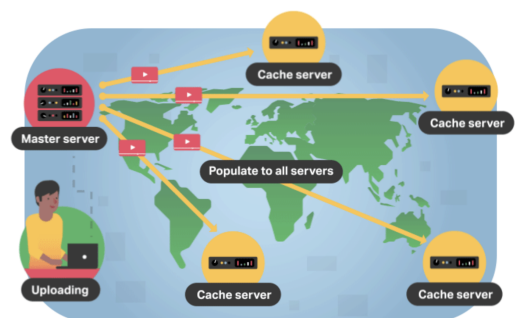
Het wereldwijde internetverkeer groeit jaarlijks met ongeveer 35% en videostreaming is verantwoordelijk voor 60% van die groei[8]. Bovendien hebben internetaccounts een impact van ongeveer 4% op de opwarming van de aarde, waarvan videostreaming 60-80% uitmaakt[5]. Daarom onderzoekt deze masterproef, in samenwerking met het Expertisecentrum voor Digitale Media (EDM) van UHasselt, mogelijke optimalisaties om adaptieve streaming van video on demand energie-efficiënter te maken.

Videostreaming heeft een breed veld aan toepassingen, van entertainment en educatie tot bedrijfscommunicatie en gezondheidszorg. De groeiende populariteit van videostreaming diensten of te communiceren naar een groter publiek zoals Netflix en YouTube onderstreept de noodzaak om deze diensten efficiënter te maken, zowel in termen van bandbreedtegebruik als energieverbruik en de ecologische impact die hierbij komt kijken.

Energie-efficiëntie in dit verband betekent niet simpelweg het selecteren van de laagst mogelijke kwaliteit en die te gebruiken. Het impliceert eerder dat de laagst mogelijke kwaliteit wordt geselecteerd terwijl de ervaring van de gebruiker vergelijkbaar blijft met die bij een hogere videokwaliteit. Om dit te bereiken zijn er verschillende componenten die kunnen worden aangepakt.

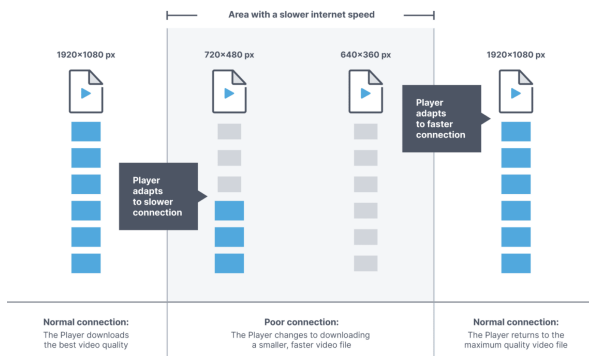


Figuur 1.1: Voorstelling werking van CDN[1].



Figuur 1.2: Voorstelling werking van CDN[2].

De belangrijkste componenten zijn het Content Delivery Network (CDN), *encoding*- en *decoding*-algoritmes, *Adaptive Bitrate streaming* (ABR) en het eindgebruikerstoestel. Een CDN is een systeem van geïnterconnecteerde servers zoals geïllustreerd in Figuur 1.1 en Figuur 2.4. Deze servers zijn verspreid over de hele wereld om te zorgen dat de content (bv. gesegmenteerde video's) zo dicht mogelijk bij de eindgebruiker gecached (d.w.z. opgeslaan) kan worden op deze servers. *Encoding*-algoritmes worden vervolgens aan de serverkant uitgevoerd om de volledige omvang van de video te verminderen, waarbij de video in meerdere resoluties wordt gecodeerd. Elke resolutie van de video wordt een *rendition* genoemd en wordt verder opgesplitst in meerdere segmenten, typisch variërend van 2s tot 10s. Het is belangrijk om te onthouden dat het hier gaat om *video on demand* en niet om livestreams, aangezien bij livestreams de segmenten maximum 2s zijn.



Figuur 1.3: Voorstelling werking van ABR a.d.h.v. iconen[3].



Figuur 1.4: Voorstelling werking van ABR a.d.h.v. videofragmenten[4].

ABR zorgt ervoor dat bij een plotselinge daling in de internetsnelheid geen buffering nodig is, maar dat er automatisch wordt overgeschakeld naar een lagere kwaliteit zoals getoont in Figuur 1.3 en Figuur 2.3. De gekozen kwaliteit is meestal altijd de best mogelijke binnen de beschikbare bandbreedte. Ten slotte spelen ook de decoding-algoritmes op het eindgebruikers-toestel een rol bij het bekijken van de content, waarbij vooral de helderheid van het scherm een impact heeft op het energieverbruik of een instabiele verbinding[2].

1.2 Probleemstelling

In een tijd waarin de opwarming van de aarde bijna onomkeerbaar is, is het essentieel om technologieën te heroverwegen die impact hebben op het milieu[9]. Videostreaming draagt significant bij aan de emissies die de opwarming van de aarde versnellen[10]. Het is daarom van groot belang om te onderzoeken hoe de energie-efficiëntie van adaptieve streaming kan worden verbeterd zonder concessies te doen aan de kwaliteit van de gebruikerservaring.

Het probleem met de huidige adaptieve streaming technologieën is dat deze voornamelijk rekening houden met de beschikbare bandbreedte en niet met andere belangrijke factoren die de energie-efficiëntie kan beïnvloeden. Huidige algoritmes, zoals het HINDSIGHT-algoritme van Netflix, focussen op het minimaliseren van buffering door automatisch de hoogste mogelijke kwaliteit te kiezen binnen de beschikbare bandbreedte[11]. Dit leidt vaak tot een onnodig hoog energieverbruik, vooral wanneer de hogere kwaliteit geen merkbare verbetering in de gebruikerservaring oplevert, bijvoorbeeld wanneer de resolutie hoger is dan wat het eindgebruikerstoestel kan weergeven.

Daarnaast houdt meeste huidige technologie geen rekening met een instabiele internetverbinding. Echter zijn er al ondertussen een aantal ontwikkelde ABR's in het onderzoek ontwikkeld hiervoor. Een instabiele verbinding betekent dat de beschikbare bandbreedte fluctueert, wat leidt tot extra energieverbruik doordat het eindgebruikerstoestel constant probeert de optimale kwaliteit te behouden[12]. Verder wordt ook geen rekening gehouden met de energiebronnen van de servers die verantwoordelijk zijn voor de streaming, wat kan resulteren in een inefficiënte energiebalans[13].

De hoofdvraag van dit onderzoek is dan ook: "Kan een lager energieverbruik worden gerealiseerd bij adaptieve streaming zonder dat de gebruikerservaring significant wordt verminderd?" Deze vraag wordt onderzocht door twee scenario's te evalueren:

- Scenario 1: De gebruiker heeft geen controle en alles wordt geregeld door de videospeler zelf.
- Scenario 2: De gebruiker krijgt de optie om te kiezen voor 'groen streamen' in de videospeler, waarbij de impact op het energieverbruik zichtbaar wordt gemaakt en de gebruiker zijn gebruikerservaring kan afwegen tegen de besparingen[12].

In het eerste scenario zullen verschillende aspecten worden onderzocht. Een daarvan is de impact van het aanbieden van alleen de maximale kwaliteit die het eindgebruikerstoestel aankan. Daarnaast wordt onderzocht wat de effecten zijn van het aanbieden van een lagere, maar stabiele kwaliteit bij een instabiele verbinding, om te voorkomen dat het eindgebruikerstoestel constant moet vechten voor de beste kwaliteit en daardoor meer energie verbruikt[13]. Ten slotte wordt bekeken of verbeterde encoding-algoritmes kunnen leiden tot een vermindering van de energie-impact, niet alleen tijdens het encoderen zelf, maar ook tijdens de transmissie en decodering.

Het probleem is duidelijk: de huidige adaptieve streaming technologieën zijn niet optimaal in termen van energie-efficiëntie, wat resulteert in onnodig hoge emissies en energieverbruik. Dit is een probleem voor zowel de milieu-impact van streamingdiensten als voor de gebruikers die een efficiënte en duurzame dienst willen. De oorzaken zijn divers, variërend van instabiele verbindingen tot inefficiënte encoding-algoritmes. Als deze problemen niet worden opgelost, zal de groeiende vraag naar videostreaming blijven bijdragen aan de opwarming van de aarde en zal de duurzaamheid van deze technologieën in het gedrang komen.

1.3 Doelstellingen

Het hoofddoel van dit project is om verschillende manieren te onderzoeken om energie-efficiënter te streamen en/of over te schakelen op groenere energie. Er worden twee benaderingen onderzocht en vergeleken op basis van hun impact. Vervolgens wordt bekeken of deze benaderingen elkaar kunnen complementeren. Het uiteindelijke doel is om alle bevindingen geïmplementeerd en getest te hebben tegen uiterlijk 31 mei. De onderzoeksvragen die hierbij komen kijken zijn:

- Is het mogelijk om de ecologische-impact te verminderen door de gebruikers te beïnvloeden aan de hand van UI-elementen?
 - Hoeveel besparing wordt gedaan per mogelijke instelling van de gebruiker?
 - Is de gebruikerservaring negatief beïnvloed door de groene videospeler?
 - Hoe wenselijk vinden gebruikers de groene videospeler voor andere streamingdiensten?

- Is het mogelijk om de ecologische-impact te verminderen door de resolutie aan te passen aan de hand van de fysieke omvang van het video-element?
 - Hoeveel besparing wordt er gedaan per algemene gebruiker gebaseerd op de testgroep meest gebruikte toestel?
 - Hoeveel besparing wordt er gedaan per algemene gebruiker gebaseerd op YouTube's and Netflix's gebruikersdemografie?
 - Was de gebruikerservaring bij de geadapteerde resolutie bij de fysieke groottes van het video-element comfortabel?
 - Hoe wenselijk vinden gebruikers de adaptie methode voor andere streamingdiensten?

De eerste benadering die wordt onderzocht, is de ontwikkeling van een groene videospeler. Het doel hiervan is om gebruikers gemakkelijk inzicht te geven in hoe ze energie kunnen besparen en dit visueel duidelijk te maken. De verwachting is dat er minstens 10% uitstoot wordt bespaard bij de keuze van helderheid en resolutie na de invloed van de UI-elementen. Hiernaast is de verwachting dat de gebruikerservaring positief wordt ontvangen door minstens 70% van de gebruikers. Ook is de hypothese indien gebruikers bewust zijn van de ecologische-impact van videostreaming, 70% van gebruikers het wenselijk zal vinden om een gelijkaardige methode geïmplementeerd te hebben op bestaande streaming diensten. Kortom, houdt dit in dat gebruikers moeten kunnen zien welke ecologische impact ze hebben, terwijl het beeld voor hen nog steeds aantrekkelijk is om naar te kijken. Dit doel moet worden bereikt tegen 26 april.

De tweede benadering richt zich op de impact van de kwaliteit van het scherm van het eindgebruikerstoestel en/of de fysieke grootte van het video-element in overweging te nemen. Het doel is om een besparing van minstens 10% te realiseren op de ecologische-impact gebaseerd op het toestelgebruik van de testgroep. Ook is de verwachting dat er minstens 10% besparing wordt gedaan op de ecologische impact indien dit bij YouTube of Netflix wordt geïmplementeerd. Verder is de hypothese dat 70% van gebruikers de geadapteerde resolutie comfortabel vinden om te kijken. Kortom, hierbij mag er geen significante vermindering zijn in de gebruikerservaring. Dit doel moet worden bereikt tegen 10 mei.

1.4 Methode

Om het onderzoek naar energie-efficiënte optimalisaties bij adaptive streaming tot een succesvol einde te brengen, wordt een gestructureerde aanpak gehanteerd, opgebouwd uit verschillende werkpakketten.

Werkpakket 1 (literatuurstudie): Een literatuurstudie uitvoeren om een diepgaand begrip van het onderwerp te verwerven, onontgonnen gebieden te identificeren en potentiële methoden voor verdere ontwikkeling te verkennen.

Werkpakket 2 (groene videospeler): Ontwikkeling van een groene videospeler, waarbij voortgebouwd wordt op bestaande videospelers en ABR-keuzes. Hierbij wordt specifieke informatie verstrekt over de ecologische-impact die gedaan wordt, wanneer een gebruiker kiest voor een bepaalde kwaliteit waarbij de gebruikerservaring nog steeds voldoet. De effectiviteit van deze implementatie wordt getest en indien nodig worden aanpassingen doorgevoerd.

Werkpakket 3 (adaptie o.b.v. video-omvang): Verfijning van bestaande ABR-algoritmes om rekening te houden met fysieke grootte van de omvang van het video-element. De initiële tests richten zich op het meten van de ecologische-impact ten opzichte van bestaande ABR-algoritmes. Vervolgens worden gebruikerstests uitgevoerd om de gebruikerservaring te beoordelen met de nieuwe parameters.

Werkpakket 4 (resultaat analyse): Vergelijking van alle ontwikkelde methoden om te bepalen welke de beste resultaten oplevert en of sommige methoden samen kunnen worden toegepast. Dit omvat ook het identificeren van eventuele synergiën tussen verschillende optimalisatiestrategieën. Door deze methodische aanpak wordt beoogd om een effectieve en efficiënte optimalisatie van adaptive streaming te bereiken, met als uiteindelijk doel het behoud van een hoge gebruikerservaring en het verminderen van de impact op het milieu.

1.5 Vooruitblik

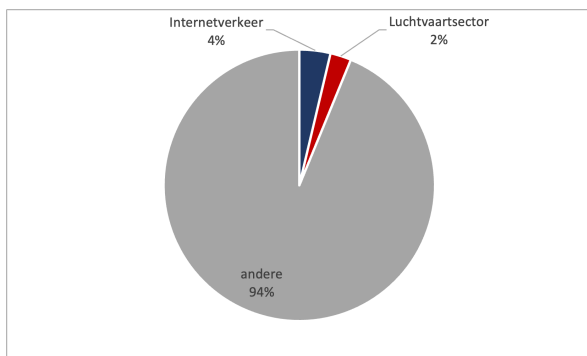
De thesis gaat verder met de bronnenstudie (Hoofdstuk 2) die dieper ingaat op de impact van de videostreaming industrie, de werking van videostreaming en bestaande methodes voor energie-efficiëntie. In Hoofdstuk 3 worden de materialen en methoden beschreven, inclusief de ontwikkeling en implementatie van de groene videospeler en het adaptieve video-element. De resultaten van deze implementaties en hun effectiviteit worden besproken in Hoofdstuk 4 en Hoofdstuk 5. Het onderzoek sluit af met een gedetailleerde analyse van de besparingen door de gebruikte methodes in Hoofdstuk 6, gevolgd door een conclusie en discussie in Hoofdstuk 7, en toekomstig onderzoek in Hoofdstuk 8.

Hoofdstuk 2

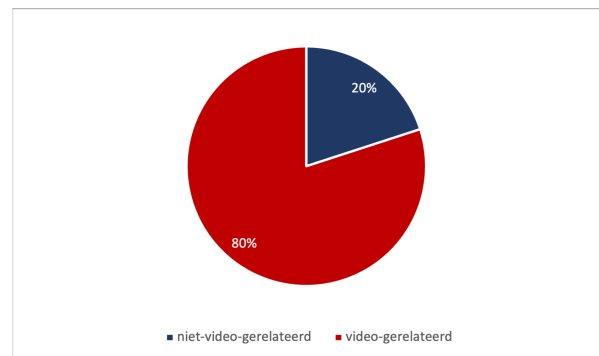
Bronnenstudie

2.1 Wat is de effectieve impact van de videostreaming industrie

Videostreaming is tegenwoordig onderdeel van het moderne leven, maar de milieu-impact ervan wordt vaak over het hoofd gezien. De energieconsumptie en koolstofvoetafdruk geassocieerd met streamingdiensten, zoals Netflix en YouTube, dragen aanzienlijk bij aan de wereldwijde CO₂-uitstoot zoals zichtbaar door de combinatie van Figuur 2.1 en Figuur 2.2.



Figuur 2.1: Impact van videostreaming op de aardopwarming[5], [6].



Figuur 2.2: Verdeling van het internetverkeer[7].

Volgens het Shift Project blijft het gebruik van online videostreaming maar groeien. Ze schatten dat online videostreaming in 2018 verantwoordelijk was voor meer dan 300 miljoen ton CO₂, wat vergelijkbaar is met de uitstoot van Spanje[7]. Deze hoge energieconsumptie komt voornamelijk voort uit datacenters, datatransmissienetwerken en de apparaten die worden gebruikt om de inhoud te streamen.

De International Energy Agency (IEA) biedt echter een ander perspectief en suggereert dat de werkelijke koolstofvoetafdruk van streaming mogelijk lager is dan sommige alarmerende schattingen. Ze wijzen erop dat het energiegebruik van apparaten een belangrijkere rol speelt dan dat van datacenters en transmissienetwerken. Zo is streamen op een smartphone veel energie-efficiënter dan op een grote televisie. De IEA schat dat het kijken naar een halfuur durende show op Netflix ongeveer 0,018 kg CO₂-uitstoot, wat aanzienlijk lager is dan eerdere claims[10].

Bovendien is de koolstofvoetafdruk van streaming sterk afhankelijk van de samenstelling uit energie van het land. In regio's met een hoog aandeel hernieuwbare energie, zoals Frankrijk, is de uitstoot aanzienlijk lager dan in landen die afhankelijk zijn van fossiele brandstoffen[10].

Naast de uitstoot omvat de milieu-impact van streaming ook een aanzienlijk elektronisch afval door kortlevende apparaten. Het Shift Project haalt de noodzaak van duurzamere praktijken in de digitale sector aan, zoals het verbeteren van de energie-efficiëntie van datacenters en het bevorderen van langere levensduur van apparaten[7].

Gezien deze inzichten is het duidelijk dat, enerzijds streaming een milieu-impact heeft, er anderzijds wegen zijn om deze te verminderen. Het verhogen van de efficiëntie van technologie, de overgang naar hernieuwbare energiebronnen en het aannemen van duurzamere consumentengewoonten zijn belangrijke stappen om de koolstofvoetafdruk van videostreaming te verminderen[5], [6], [10].

2.2 Werking van video on-demand streaming

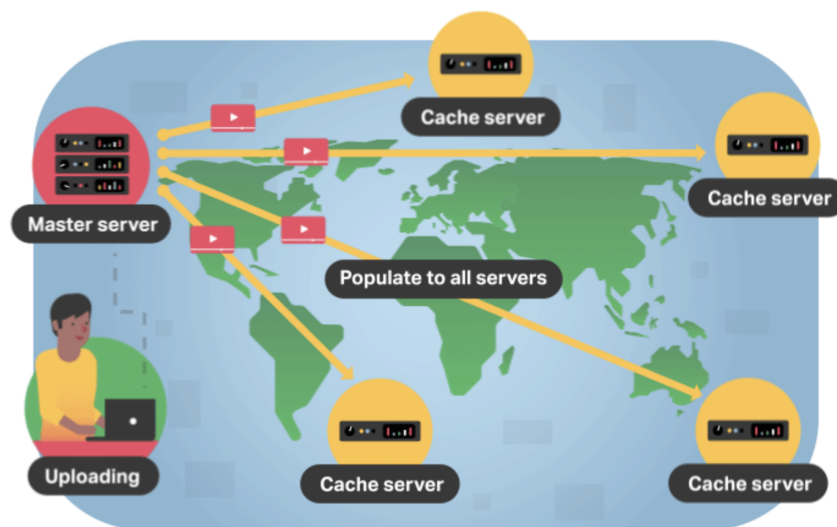
Tegenwoordig, wanneer video content wordt geconsumeerd, zal de gebruiker zelden last hebben van rebuffering, dankzij de toepassing van Adaptive Bitrate (ABR) algoritmes. Deze algoritmes maken dit mogelijk door gebruik te maken van segmenten en verschillende kwaliteitsniveaus, ook wel rendities genoemd. De twee bekendste protocollen hiervoor zijn HTTP Live Streaming (HLS) en Dynamic Adaptive Streaming over HTTP (DASH).

Rendities zijn verschillende versies van de video met uiteenlopende encodings, wat betekent dat de video in verschillende kwaliteiten beschikbaar is. Dit maakt het mogelijk om de kwaliteit van de video dynamisch aan te passen aan de beschikbare bandbreedte van de gebruiker. Segmenten zijn doorgaans 2-12 seconden durende opdelingen van een renditie voor video on-demand, terwijl dit bij livestreaming vaak maximaal 2 seconden is. Door de segmenten klein te houden, kan er snel gewisseld worden tussen kwaliteitsniveaus als de bandbreedte plotseling daalt, zodat het bufferen wordt voorkomen zoals getoont in Figuur 2.3. Het ABR-algoritme zorgt ervoor dat de kwaliteit automatisch wordt aangepast naar een lagere resolutie wanneer de bandbreedte onvoldoende is voor de hogere kwaliteit te behouden.



Figuur 2.3: Voorstelling werking van ABR a.d.h.v. videofragmenten[4].

De video moet uiteraard eerst bij de gebruiker terechtkomen. Dit gebeurt via een Content Delivery Network (CDN). Een CDN is essentieel omdat één enkele server niet in staat zou zijn om verzoeken van miljarden mensen tegelijk te verwerken. Het concept is vergelijkbaar met de manier waarop mensen verdeeld worden over verschillende kassa's in een supermarkt of over verschillende veiligheidslijnen op een vliegveld. In een CDN worden servers strategisch geplaatst over verschillende geografische locaties, zodat elke regio zijn verzoeken naar de dichtstbijzijnde server kan sturen. Als een gebruiker content aanvraagt die niet aanwezig is op de dichtstbijzijnde CDN-server, wordt deze content opgevraagd bij de originele server en vervolgens gecached door de CDN-server zoals zichtbaar in Figuur 2.4. Dit zorgt ervoor dat toekomstige verzoeken naar dezelfde content sneller kunnen worden afgehandeld.



Figuur 2.4: Voorstelling werking van CDN[2].

Voordat we de video op de originele server zetten, moeten we de gefilmde content omzetten naar een bruikbaar formaat voor streaming over HTTP. Een MP4-bestand kan niet direct gestreamd worden met de gangbare streamingprotocollen. Bij directe “streaming” van een MP4-bestand, wat eigenlijk neerkomt op pseudo-streaming (waarbij het bestand progressief wordt gedownload), moet de gebruiker beschikken over voldoende bandbreedte om de video sneller af te spelen dan deze gedownload kan worden. Dit is problematisch omdat MP4 en WebM geen adaptieve bitrate ondersteunen, wat betekent dat gebruikers met beperkte bandbreedte een lagere resolutie moeten accepteren of dat hoge resoluties alleen beschikbaar zijn voor gebruikers met snelle verbindingen.

Er zijn veel verschillende videospelers beschikbaar voor HLS en DASH, variërend van gratis en open-source tot commerciële oplossingen. Bij het kiezen van een speler moet je rekening houden met de functies die je nodig hebt, zoals ondertiteling, DRM, advertentie-injectie en miniatuurvoorbeelden. Deze spelers zorgen ervoor dat de kijkervaring zo goed mogelijk is op verschillende apparaten en besturingssystemen[2].

2.3 Onderzochte bronnen van bestaande methodes

2.3.1 Samenvatting

De onderzochte bronnen richten zich op het verminderen van het energieverbruik en de CO₂-uitstoot van video streaming door middel van verschillende methodes. Ze bespreken verschillende methodes voor *end-to-end* optimalisaties, *context-aware encoding*, groene videospeler en energiebewuste content distributie[12]. Daarnaast wordt er aandacht besteed aan energieoverwegingen bij *Adaptive Bitrate* (ABR) videostreaming naar smartphones en worden modellen en strategieën geïntroduceerd om energie te besparen zonder significante kwaliteitsvermindering[14]. Een andere studie onderzoekt methodes voor het optimaliseren van videostreaming op smartphones door zowel energieverbruik als contextuele factoren in overweging te nemen. Een andere studie introduceert een nieuw ABR-algoritme dat gebruik maakt van diepe versterkingsleren om energieverbruik te optimaliseren[15]. Andere papers richten zich op energie-efficiëntie en QoE optimalisatie voor adaptieve http-streaming over draadloze netwerken, energieoptimalisatie voor mobiele videostreaming met behulp van een geaggregeerd model[16], energiebesparende aanpassing van de verkeerssnelheid voor draadloze streaming media transmissie[17], en energiebesparende technieken voor videostreaming op mobiele apparaten door gebruik te maken van *race-to-sleep*, content caching, en display caching[18]. Tot slot wordt er gekeken naar de verbetering van ABR-algoritmen voor hybride *Content Delivery Network* (CDN) en *Peer-to-Peer* (P2P) netwerken[19]. De recentste papers onderzoeken de optimalisatie van adaptieve bitrate streaming (ABR) om de gebruikerservaring (QoE) te verbeteren, een data-efficiënt ABR-algoritme dat zowel QoE als dataverbruik optimaliseert, en een energie-efficiëntie georiënteerd ABR-algoritme dat energieverbruik minimaliseert zonder significante QoE-verlies[20].

2.3.2 Belangrijkste Punten

- **End-to-end Optimalisaties voor Groen Streamen**[12]:
 - Videostreaming draagt significant bij aan CO₂-uitstoot en vormt 60-80% van het wereldwijde internetverkeer.
 - *Context-aware Encoding*:
 - * Optimaliseert video-encoding op basis van de inhoud.
 - * Complexe inhoud verbruikt meer energie dan eenvoudige inhoud.
 - Concept *Green Media Players*:
 - * Aanpassen van helderheid en kwaliteit om energie te besparen.
 - * Concept van Prototype speler toont CO₂-uitstoot en biedt energiebesparende opties.
 - *Energy-aware Content Steering*:
 - * Inhoud sturen op basis van energie-efficiëntie en apparaat-specificaties.
 - * Voorkeur voor datacenters met duurzame energie.
- **Energieoverwegingen voor ABR Videostreaming naar Smartphones: Metingen, Modellen en Inzichten**[14]:
 - Energieoverwegingen voor ABR Streaming:
 - * ABR-streaming is energie-intensief op mobiele apparaten.
 - * Ontwikkeling van energieprofielen om verbruik te meten.
 - * Eenvoudige strategieën kunnen tot 30% energie besparen.
 - Modellen en Metingen:

- * Modellen schatten realtime energieverbruik van componenten.
- * Validatie door metingen biedt inzicht in energieverbruik.
- Energiebesparende Strategieën:
 - * Optimalisatie van segmentselectie en vermijden van onnodige kwaliteitswijzigingen.
 - * Balanceren van energiebesparing en kijkerservaring.
- **Energiebewust en Contextbewust Videostreamen op Smartphones**[21]:
 - Energiebewuste Aanpassing: Het systeem past de videokwaliteit aan op basis van de resterende batterijduur om de gebruikstijd van smartphones te verlengen.
 - Contextbewustzijn: Maakt gebruik van contextuele informatie zoals netwerkcondities en gebruikersvoorkeuren om de streamingervaring te verbeteren.
 - Dynamische Kwaliteitsaanpassing: Gebruikt realtime gegevens om beslissingen te nemen over bitrate en resolutie om een balans te vinden tussen videokwaliteit en energie-efficiëntie.
- **GreenABR: Energiebewust Adaptief Bitrate Streaming met Diepe Versterkingsleren**[15]:
 - Diepe Versterkingsleren: Maakt gebruik van een DQN (Deep Q-Network) model om ABR-beslissingen te nemen, wat helpt bij het optimaliseren van energieverbruik.
 - Energie- en Databesparingen: Bereikt tot 57% energiebesparing en 60% vermindering van dataverbruik, terwijl hoge QoE behouden blijft.
 - Prestaties: Resultaten tonen tot 22% betere perceptuele QoE dankzij aanzienlijke verminderingen in buffertijd en bijna nul capaciteitsschendingen.
- **Energie-efficiënte video QoE-optimalisatie voor dynamische adaptieve http-streaming over draadloze netwerken**[16]:
 - Ontwikkeling van een energie-efficiënt adaptief bitrate (ABR) algoritme.
 - Gebruik van machine learning om netwerkcondities te voorspellen en energieverbruik te minimaliseren zonder QoE te verminderen.
 - Resultaten tonen een significante vermindering van energieverbruik met behoud van hoge QoE.
- **Energie-optimalisatie voor mobiele videostreaming via een aggregaatmodel**[22]:
 - Voorstellen van een geaggregeerd model dat rekening houdt met zowel de energieverbruikende componenten van mobiele apparaten als de netwerkcondities.
 - Modelaanpassingen voor verschillende streaming omstandigheden om energieverbruik te minimaliseren.
 - Resultaten laten zien dat het model effectief is in het verminderen van energieverbruik tijdens verschillende netwerkcondities en gebruiksscenario's.
- **Energie-efficiënte aanpassing van verkeerssnelheid voor draadloze transmissie van streaming media**[17]:
 - Introduceren van een verkeerssnelheid adaptatie algoritme dat het energieverbruik vermindert door de verkeerssnelheid dynamisch aan te passen op basis van de huidige netwerkcondities.
 - Toepassing van het algoritme op verschillende netwerkprotocollen om de efficiëntie te testen.
 - Significant lagere energieverbruik en verbeterde netwerkprestaties aangetoond door experimenten.

- **Race-To-Sleep + Inhoudscaching + Weergavecaching: Een recept voor energie-efficiënt videostreaming op *handhelds***[18]:
 - Race-to-Sleep: Introduceert een techniek waarbij de frames in batches worden verwerkt en de frequentie wordt verhoogd om de verwerking te versnellen, waardoor apparaten langer in de slaapmodus kunnen blijven zonder kwaliteitsverlies.
 - Content Caching: Voert een nieuw cache-organisatieschema in, genaamd Macroblock Cache (MACH), dat gebruik maakt van de inhoudsgelijkenis tussen videoblokken om de geheugenbelasting te verminderen en de efficiëntie te verhogen.
 - Display Caching: Past display caching toe door gebruik te maken van inhoudsgelijkenis in de display controller, wat leidt tot een aanzienlijke vermindering van de energieconsumptie door het aantal geheugenaccesses te minimaliseren.
 - Evaluatie en Resultaten: Door deze technieken te combineren in een geïntegreerd videoverwerkingsframework, toont de paper aan dat het energieverbruik van videostreaming op mobiele apparaten gemiddeld met 21% wordt verminderd in vergelijking met bestaande methoden.
- **Het mogelijk maken van adaptieve bitrate-algoritmen in hybride CDN/P2P-netwerken**[19]:
 - ABR Algoritmen in P2P Netwerken: Analyseert de toepasbaarheid van buffer-gebaseerde, throughput-gebaseerde, en hybride ABR-algoritmen in P2P netwerken om de algehele kwaliteit van ervaring (QoE) te verbeteren.
 - Verbeteringsvoorstellen: Introduceert methoden om ABR-algoritmen efficiënter te maken binnen P2P netwerken door optimalisatie van de bitrate aanpassing op basis van netwerkcondities en peer-bijdrage.
 - Nieuwe Metrics: Stelt twee nieuwe metrics voor om de efficiëntie van P2P netwerken te kwantificeren in het kader van ABR-levering, wat helpt bij het meten en verbeteren van de prestaties van de netwerken.
 - Resultaten en Evaluatie: Experimentele resultaten tonen aan dat de voorgestelde methoden significante verbeteringen opleveren in zowel energieverbruik als netwerkprestaties, waardoor de efficiëntie van streaming in hybride CDN/P2P omgevingen wordt verhoogd.
- **Adaptieve Bitrate Streaming met QoE-georiënteerde Beslissingen (ABR-QoE)**[23]:
 - Optimalisatie van ABR-algoritmen om de gebruikerservaring (QoE) te verbeteren.
 - Introduceert een QoE-georiënteerde benadering waarbij de beslissingen van het ABR-algoritme worden beïnvloed door de perceptie van de gebruiker.
 - Analyse van verschillende factoren die de QoE beïnvloeden, zoals rebuffering, video-resolutie, en bitrate fluctuaties.
 - De voorgestelde ABR-methoden verminderen de rebuffering aanzienlijk, wat een positieve impact heeft op de QoE.
 - Presentatie van een model dat de QoE-kenmerken kwantificeert en integreert in het ABR-algoritme om de kwaliteit van streaming te verbeteren zonder extra netwerkbelasting.
- **QuRate: Een Data-efficiënte QoE-georiënteerde Adaptieve Bitrate Streaming (QuRate)**[24]:
 - Ontwikkelen van een ABR-algoritme dat niet alleen de QoE verbetert, maar ook data-efficiëntie waarborgt.
 - Het algoritme balanceert tussen hoge videokwaliteit en lage dataverbruik door dyna-

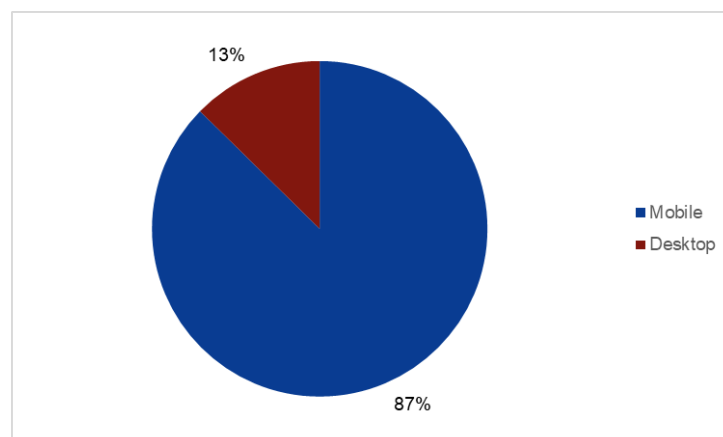
misch de bitrate aan te passen op basis van de netwerkcondities en gebruikersvoorkeuren.

- QuRate vermindert het dataverbruik met 20-30% vergeleken met traditionele ABR-algoritmen, zonder significante QoE-verlies.
 - Het algoritme past zich snel aan veranderende netwerkcondities aan, wat resulteert in een stabielere kijkervaring met minder onderbrekingen en een consistente videokwaliteit.
- **GreenABR+: Algemeen Energie-bewuste Adaptieve Bitrate Streaming (GreenABR+)[20]:**
 - Ontworpen om energieverbruik tijdens videostreaming te minimaliseren zonder de gebruikerservaring (QoE) significant te beïnvloeden.
 - Uitbreiding van het bestaande GreenABR-model en getraind om stabiele prestaties te leveren over verschillende representatiesets.
 - GreenABR+ bereikt 11-28% energiebesparing vergeleken met andere ABR-algoritmen en 16-28% betere energie-efficiëntie.
 - Voor sets met tien representaties bereikt GreenABR+ tot 48% betere energie-efficiëntie en 13-40% energiebesparing.
 - Met de toevoeging van 2K- en 4K-resoluties, realiseert GreenABR+ energiebesparingen van 34-57%, 4-25% hogere QoE, en 37-56% betere energie-efficiëntie.

2.4 Gebruikers demografie

In deze sectie bekijken we welke apparaten gebruikers van YouTube en Netflix de meeste uren op bekijken. Dit wordt gedaan om te zien hoe werkzaam de adaptie van de resolutie op basis van de fysieke video-omvang (methode 2) zou zijn. Daarnaast wordt ook gekeken hoeveel uur op de platformen video's worden bekeken.

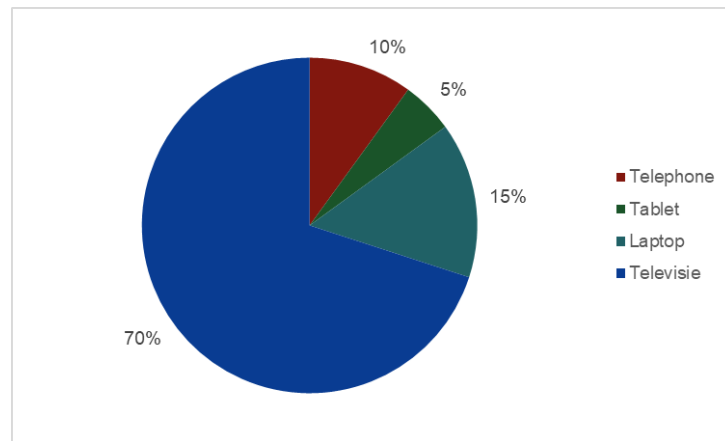
Figuur 2.5 toont het soort apparaat waar de meeste uren YouTube op bekeken worden.



Figuur 2.5: Meest gebruikte apparaat op YouTube.

Zoals te zien valt op Figuur 2.5 bekijkt wordt 87% van gebruikers kijk uren gedaan via een mobiel apparaat zoals een telefoon en tablet[25].

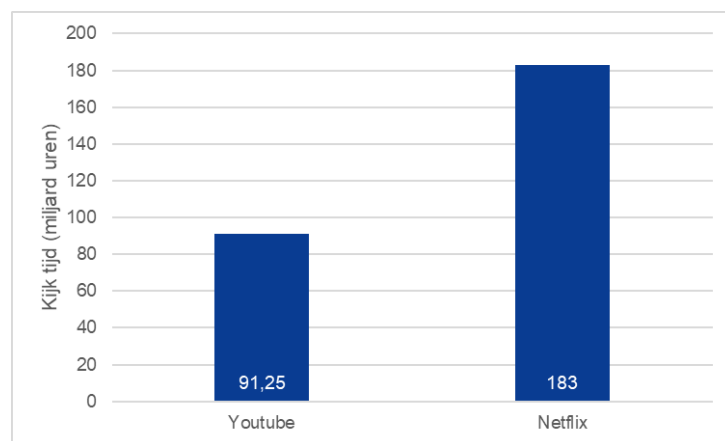
Figuur 2.6 weergeeft waar op welk apparaat de meeste uren bekeken worden op Netflix.



Figuur 2.6: Meest gebruikte apparaat op netflix.

Bovenstaande Figuur 2.6 demonstreert dat 70% van gebruikers zijn kijkuren besteed via de televisie. Vervolgens wordt 15% via de laptop, 10% via de telefoon en 5% via de tablet bekeken[26].

Figuur 2.7 toont hoeveel uur jaarlijks bekeken wordt op YouTube en Netflix.



Figuur 2.7: Kijkuren per streaming platform.

Uit Figuur 2.7 blijkt dat op Netflix dubbel zoveel uren video's bekeken worden. Met YouTube 91,25 miljard uren kijk tijd en Netflix 183 miljard uur kijk tijd[27], [28].

Uit deze resultaten kan vermoed worden dat methode 2 minder werkzaam zal zijn op een platform zoals Netflix maar zeer werkzaam op een platform gelijk YouTube. Hierbij is de verwachting wel een vermindering zullen hebben van minstens 10% gCO₂/h.

Hoofdstuk 3

Materiaal en Methode

Uit de literatuurstudie blijkt dat er verschillende methodes zijn om het energieverbruik te optimaliseren. Het doel van deze methodes is om de gebruikers bewust te maken van de ecologische impact van streamen, hun streaminggedrag te beïnvloeden en alternatieven aan te bieden zonder hun ervaring te verminderen.

3.1 Mogelijke methodes

Uit de literatuurstudie waren er 5 methodes die interessant waren om verder uit te denken.

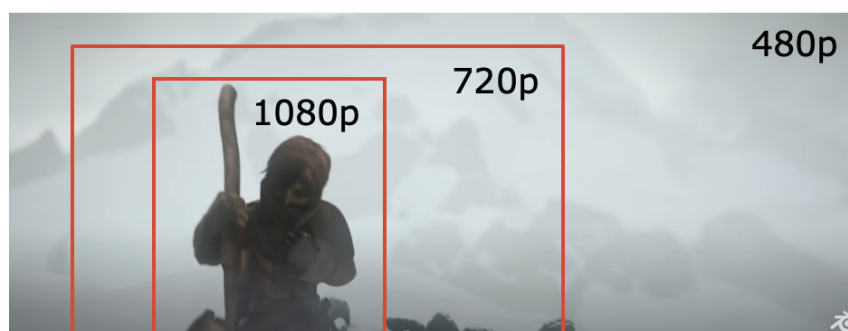
Als eerste is de mogelijkheid onderzocht om video-encoding te verbeteren, hierdoor zou er minder data verstuurd moeten worden. Hierbij zou er gebruik gemaakt worden van machine learning (ML) om het focuspunt van een scène te bepalen, zoals zichtbaar in Figuur 3.1. Als het focuspunt is bepaald zou de regio van het focuspunt in een hoge ppi worden geëncodeerd met een van de standaard encoding protocols. Vervolgens zou de omringende omgeving een gradueel lager ppi geëncodeerd krijgen.

Voordelen:

- Gebruikers zouden de beste resolutie verkrijgen rond het focuspunt.
- Er is minder data nodig zonder de belangrijkste sectie van de video te comprimeren.

Nadeel:

- Gebruikers die het belangrijk vinden om de omgeving in een video te zien.



Figuur 3.1: Overwogen methode encoding.

De tweede mogelijke methode was om te zien of een CDN groene energie heeft en hier dan een parameter voor maken in het ABR-algoritme. Hierdoor zou het mogelijk zijn dat het ABR-algoritme een langere route kiest maar door een afweging o.b.v. de gekozen CDN een kleinere voetafdruk na laat op de aardopwarming.

Voordelen:

- Geen verandering in geselecteerde kwaliteit door ABR-algoritme.
- Minder CO₂-uitstoot zonder lagere keuze kwaliteit.
- Kan geëmuleerd worden aan de hand van fictieve data.

Nadelen:

- Application Programming Interface (API) nodig voor de parameter van server provider.
 - Er zijn geen CDNs die dit implementeren.
- Moeilijk om te bepalen hoe praktisch/commercieel haalbaar dit is buiten een academische setting.

Optimalisatie op basis van verbindingstabieleit is de derde mogelijkheid. Deze methode biedt de hoogste kwaliteit aan bij een instabiele verbinding die onderhouden kan worden over lange periodes. Dit is beter dan constant wisselen tussen kwaliteit, vooral omdat het zeer energie-intensief is voor telefoons zoals eerder vermeld in de literatuurstudie[21]. Dit zou dan met behulp van een emulatie van een instabiele verbinding gedaan worden aan de hand van vegvisir[29].

Voordelen:

- Langere batterij duur voor mobiele gebruikers.
- Minder CO₂-impact voor zowel datatransmissie als gebruikerstoestel.

Nadelen:

- Resolutie is slechter met deze methode en sommige gebruikers vinden dat niet fijn. Daarnaast maakt het hun misschien niet uit dat hun toestel meer energie verbruikt.

De groene videospeler is de vierde mogelijkheid, hierbij wordt er niet automatisch de bitrate aangepast, wel indien nodig. Dit werkt gelijk een YouTube waar je wel altijd zelf je resolutie kan kiezen, maar wordt veranderd als de bandbreedte niet meer genoeg is. In deze speler is wel toegevoegd dat de gebruiker direct de helderheid van het toestel kan aanpassen. Daarnaast krijgt de gebruiker informatie over het verbruik dat momenteel plaats neemt en de impact op de aardopwarming ermee.

Voordelen:

- Mogelijkheid om te implementeren op eigen toestel.
- Gebruiker bewust maken van de impact van videostreamen.
- Gebruiker heeft nog altijd zelf controle.

Nadelen:

- Gebruiker kan extreem hoog verbruik gebruiken.

- Provider heeft geen controle over het verbruik.

De laatste mogelijke methode is het aanpassen van de resolutie op basis van de schermgrootte. Dit blijkt uit de literatuurstudie meestal geen rekening mee gehouden te worden. Terwijl bijvoorbeeld de ervaring op een telefoon van 6,1 inch tussen 480p en 720p niet op te merken is. Aangezien 480p op een scherm van 6,1 inches een ppi van 78 heeft en 72 ppi aanbevolen is voor online gebruik[30]. Hierbij krijgt de gebruiker geen controle over zijn resolutie, maar wel de helderheid. Hierdoor zal de impact op datatransmissie consequent zijn, zonder een impact op de ervaring van de gebruiker.

Voordelen:

- Mogelijkheid om te implementeren op eigen toestel.
- Gebruiker heeft geen impact op de keuze dus zal de energie-impact niet beïnvloeden.

Nadelen:

- Kieskeurige gebruiker zal sneller het verschil merken.
- Gebruiker afstand tot toestel varieert.

3.2 Gekozen methodes

De verkozen methodes zijn de groene videospeler (methode 1) en de resolutie aanpassen op basis van de fysieke grootte van het video-element (methode 2). Hierbij was initieel ook de methode voor de instabiele verbinding aan te pakken gekozen, maar door tijdsrestricties is deze weggelaten. Deze methodes zijn verkozen omdat ze ten eerste te implementeren zijn op een eigen toestel zonder fictieve data. Ten tweede beantwoordt het twee belangrijke vragen voor de masterproef:

- Willen gebruikers meer sensibel omgaan met hoe ze content bekijken, indien bewust van de impact?
- Is het mogelijk om de energie-impact te beïnvloeden zonder dat de gebruikerservaring hieronder lijdt?

3.3 Implementatie van groene videospeler

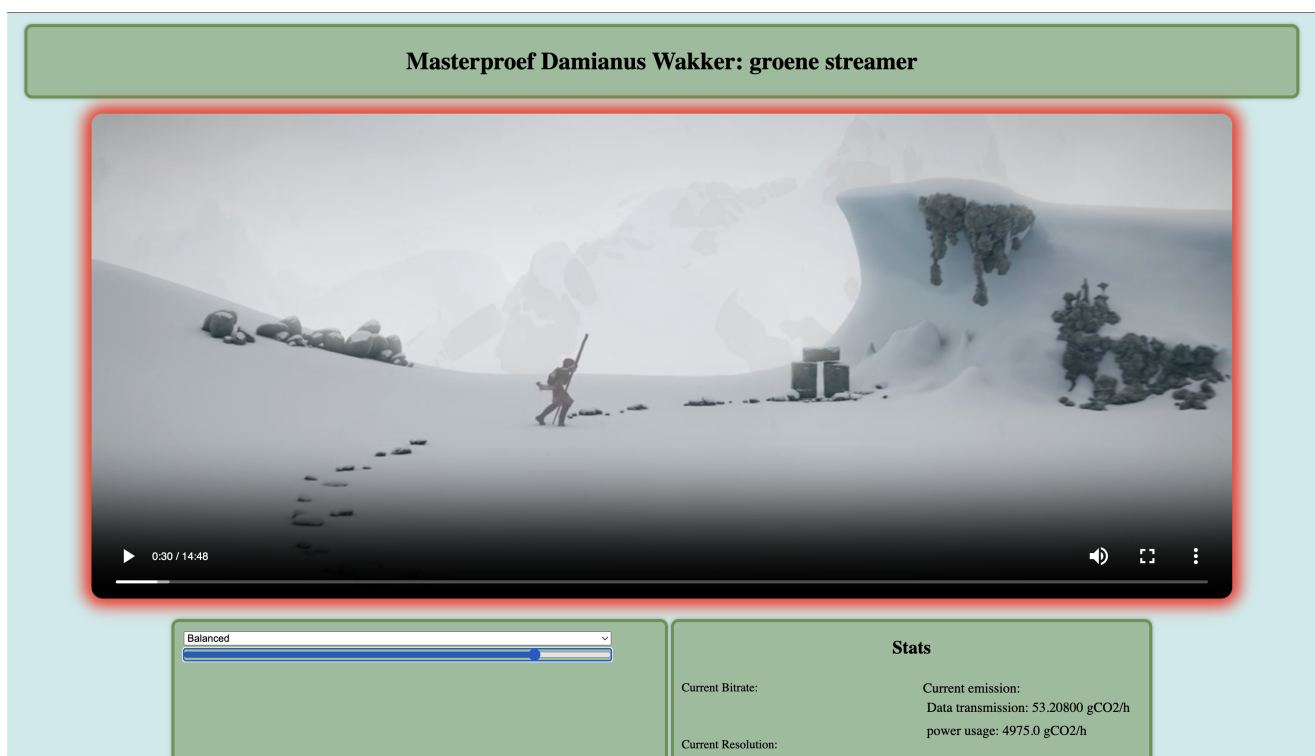
Voor het ontwikkelen van de groene videospeler moesten er een aantal doelen van de methode uitgelijnd worden. Deze doelen waren:

- Het gebruikersgedrag beïnvloeden zonder het verstoren van de video.
- het algemeen verbruik verlagen door de beïnvloeding.

Tijdens het ontwikkelen van de groene speler is er gebruik gemaakt van verschillende technologieën. Deze technologieën moesten het mogelijk maken om parameters gelijk het batterijverbruik te meten en helderheid te meten en in te stellen. Daarnaast ook om invloed te hebben op de impact van het batterijverbruik zelf, moesten er controles in de gebruikersinterface (UI) gemaakt worden. Deze controles konden dan de nodige factoren beïnvloeden. Daarnaast moest het streamen zelf ook mogelijk gemaakt worden.

Ten eerste moest het mogelijk gemaakt worden om een testvideo te streamen waar de gebruikers naar zouden kijken en de ontwikkelde methodes op getest konden worden. Hiervoor is gekozen voor de industriestandaard, de dash.js API[31]. Met behulp van deze API is de player voor de video opgezet kunnen worden aan de hand van de functie `dashjs.MediaPlayer().create()`. Vervolgens moet de player dan nog eens geïnitieerd worden met het video-element en de URL van waarvan de CDN wordt aangesproken voor de video. Voor de video is gekozen met 1 van de industriestandaard video's genoemd Sintel, dit is een shortfilm van ongeveer 15 minuten aangeboden via de Cloudflare CDN via bitmovin om te testen[32].

De hoofdfactor op het batterijverbruik was verondersteld de helderheid te zijn en dit bleek ook zo later te zijn uit de testen. Om de helderheid te controleren kon er gekozen worden om simpelweg met de voorziene toetsenbord knoppen te werken of de besturingssysteemcontroles. Hiervoor is niet gekozen in verband met dat de gebruikers dan niet de directe impact zagen. Door alles rond dezelfde plaats te zetten konden gebruikers de correlatie makkelijker zien tussen, de ecologische impact en de gekozen instellingen. Het zou wel dezelfde invloed hebben gehad, maar door de volgende gekozen methode kon de helderheid ook direct teruggekoppeld worden naar de benodigde berekeningen. Om het mogelijk te maken dat de helderheid gecontroleerd kon worden vanuit de UI is er gebruik gemaakt van een terminal tool genoemd *Brightness* gemaakt door Nicholas Riley[33]. Om deze terminal tool te laten samenwerken met de UI moest er een python script aangemaakt worden. Dit script is gemaakt met behulp van de libraries `subprocess`, `flask`, `flask_cors`. Het pythonscript zetten dan een lokaal gehoste CORS-server op waar dan de lokaal gehoste groene videospeler verzoeken naar kon sturen. Op basis van wat de gebruiker dan selecteert voor de helderheidsschuifregelaar waarde, is de helderheid van het scherm aangepast. De implementering in de UI is zichtbaar in de Onderstaande Figuur 3.2.



Figuur 3.2: Gebruikersinterface groene videospeler.

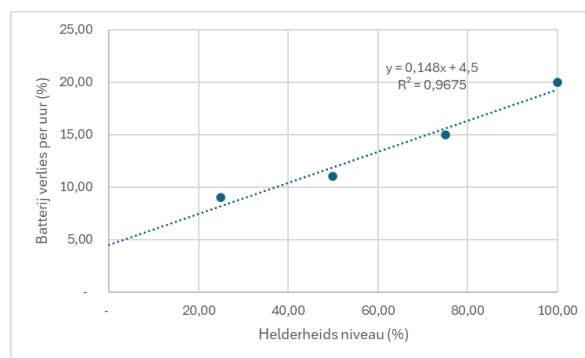
Vervolgens om het batterijverbruik te meten zijn er 3 methodes gebruikt. Deze methodes waren:

- *battery manager* API[34],
- powermetrics batterijverbruik waarde,
- meting batterij ontlading a.d.h.v. powermetrics en python script.

De *battery manager* API was als eerste geïmplementeerd. Deze keuze was gemaakt omdat dit het makkelijkste was om te implementeren. Hierna is getest of het de impact van de helderheid van het toestel zelf opgemerkt zou worden, maar dit was onsuccesvol. Aangezien het oftewel te laat reageerde oftewel niet. Met als gevolg dat het energieverbruik van het toestel niet snel genoeg of helemaal niet teruggekoppeld kon worden, naar de gebruiker.

Daarna is de ingebouwde terminal tool powermetrics verkend. Hierin was de parameter “combined power” gegeven die het aantal gebruikte mW berekent in een interval van 5 seconden. Dit werd dan via een python script gecommuniceerd naar de groene streamer. Dit script maakte ook gebruik van de libraries subprocess, flask, flask_cors. Dit leek een goede oplossing te zijn aangezien aan de hand van deze waarden kon de kWh bepaald worden. Waarmee erna kon berekend worden hoeveel gCO₂/h gebruikt werd verbruikt en dit dan terug te communiceren naar de gebruiker zelf. Dit werkte uiteindelijk niet, aangezien de waarde die de powermetrics gaf was veel te laag (1 kWh) voor verbruik in vergelijken met hoeveel batterijpercentage (15 kWh) er verloren ging in hetzelfde tijdsinterval.

Vanwege deze observatie is een andere methode uitgewerkt. De methode maakt nog altijd gebruik van powermetrics. Dit komt doordat powermetrics ook registreert hoeveel batterij percentage over is. Hierdoor kon een python script opgesteld worden dat elke 5 seconden registreert hoeveel percentage er nog aanwezig is. Dit script werd uitgevoerd voor 4 uur, in deze 4 uur werd elk uur de helderheid met 25% omlaag gedaan. Terwijl dit script uitgevoerd werd in de achtergrond werd de video in kwestie voor de gebruikers test herhaaldelijk afgespeeld tot het einde van het script zonder enige andere programma’s open. Dit is zo gedaan, aangezien het er ook zo aan toe zou gaan tijdens de gebruikerstest.



Figuur 3.3: Grafiek voor Formule 3.1.

Deze test met het script werd 2 keer uitgevoerd. Op het einde van deze testen met de data (zie Tabel 3.1) is er in Excel aan de hand van een trendlijn (zie Figuur 3.3) een formule verkregen die het batterijverbruik uitdrukt in functie van de geselecteerde helderheid, deze functie is:

$$\text{batterijverbruik}\% = 0.148 * \text{helderheidsniveau}\% + 4.5 \quad (3.1)$$

Tabel 3.1: Datapunten batterijmeting

Batterijverbruik	
Helderheids Niveau (%)	Batterij verlies per uur
25,00	9,00
50,00	11,00
75,00	15,00
100,00	20,00

Tabel 3.2: Vergelijking van batterijmetingmethodes

Methode	Accuratie	Usage opvraag frequentie
Battery manager API	Laag voor toepassing	Elke 15 seconden
Terminal tool powermetrics met “combined power” parameter	Matig voor toepassing	Elke 5 seconden
Opgestelde formule	Hoog voor toepassing	Met elke verandering

Bovenstaande Tabel 3.2 geeft en overzicht van hoe accuraat elke batterijmetingmethode was voor deze toepassing. Daarnaast toont het ook hoe frequent het verbruik werd opgevraagd.

Om de impact te communiceren naar de gebruikers moet de kWh/h van het verbruik van het toestel en de geselecteerde bitrate omgezet worden naar gCO₂/h. Dit wordt gedaan met behulp van de gegeven energie-intensiteit (kWh) per land uit de data voorzien door “ourworldindata” [35]. Omdat de energie-intensiteit afhankelijk is per land wordt dit bepaald met de hulp van de *Geolocation* API en kan de data verzoekt worden van de verkregen data [36]. Voor het gebruikers-toestel impact te berekenen wordt het batterijverbruik per uur berekend en dan vermenigvuldigd met de energie-intensiteit en wordt dit zichtbaar gemaakt naar de gebruiker om hem bewust te maken van de impact die hij zelf heeft. Ook wordt deze waarde verwerkt in de later vermelde tint rond het scherm. Daarnaast wordt dan ook de impact van de gekozen resolutie berekend, dit wordt gedaan door[12]:

$$\text{bitrate} \frac{Gb}{s} * \text{verbruiktransmissie} \frac{kWh}{Gb} * \text{energieintensiteit} \frac{gCO_2}{kWh} * 3600 \frac{s}{h} \quad (3.2)$$

Deze waarde wordt dan ook getoond aan de gebruiker en verwerkt in de later vermelde tint, om de gebruiker meer bewust te maken.

3.4 Implementatie adaptie o.b.v. fysieke video-omvang

In deze sectie beschrijven we de materialen en methoden die zijn gebruikt bij de ontwikkeling van een tool voor de resolutie adaptie op basis van de fysieke omvang van het video-element. Het doel van deze tool is om de afmetingen van een scherm nauwkeurig te bepalen en de optimale resolutie te selecteren voor het weergeven van de content, afhankelijk van de grootte van het video-element. De stappen die zijn gevolgd, omvatten het bepalen van de schermgrootte, het uitvoeren van metingen op verschillende schermformaten, het opstellen van een formule voor nauwkeurige afmetingen, en het selecteren van de geschikte resolutie op basis van deze afmetingen en de industriernorm voor 72 ppi[30].

Bij de ontwikkeling van deze tool werd gebruikgemaakt van de volgende hardware en software. Voor de hardware werden drie verschillende schermen gebruikt:

- een 16-inch scherm (MacBook Pro 16inch M1 Pro),
- een 27-inch scherm (LG 27GL63T),
- een 34-inch ultrawide scherm (AOC Q34E2A).

De eerste stap was het verzamelen van schermafmetingen door gebruik te maken van de eigenschappen “`window.screen.width`” en “`window.screen.height`” om de breedte en hoogte van het scherm in pixels te verkrijgen. Deze waarden vormden de basis voor verdere berekeningen. Vervolgens werd de diagonale afmeting van het scherm in pixels berekend met behulp van de stelling van Pythagoras. Om de pixels om te zetten naar inches is gebruik gemaakt van “`window.devicePixelRatio`”.

Het bleek echter dat deze conversie niet op elk scherm accuraat was. Daarom werden de metingen uitgevoerd op drie verschillende schermformaten: 16-inch, 27-inch, en 34-inch ultrawide schermen. Deze metingen gaven een beter inzicht in de werkelijke afmetingen in inches en werden vergeleken met de berekende waarden om afwijkingen te identificeren en een correctiefactor op te stellen.

Directe metingen op verschillende schermformaten zijn gedaan voor het verkrijgen van nauwkeurige afmetingen. De metingen werden handmatig verricht en vergeleken met de berekende waarden. Dit proces maakte het mogelijk om een correctiefactor te ontwikkelen die de nauwkeurigheid van de berekeningen verbeterde.

Op basis van de verkregen meetgegevens werd een formule opgesteld om de breedte en hoogte van het scherm (in inches) nauwkeurig om te zetten naar pixels. De formule is:

$$\text{hoogte of breedte}(\text{inches}) = \frac{\text{hoogte of breedte}(\text{pixels})}{(33 + 45 * \text{window.devicePixelRatio})} \quad (3.3)$$

Deze formule maakte het mogelijk om de nauwkeurige afmeting in inches te berekenen uit de schermdimensies in pixels. Met behulp van deze formule werden de afmetingen van het scherm in inches nauwkeurig berekend. Dit hielp bij het bepalen van de fysieke grootte van het video-element.

De eerder vermelde ppi waarde van 72, werd gebruikt voor verdere berekeningen. Wanneer de videospeler wordt opgezet, worden alle resoluties verzoekt uit de manifest file. Terwijl deze verzoeken plaatsnemen, wordt het aantal diagonale pixels berekend per index. Hieruit werd een lijst verkregen met verschillende schermresoluties en hun respectievelijke pixels over de diagonaal. Indien een resolutie voldeed aan de vereiste pixels over de diagonaal, werd deze resolutie geselecteerd. Deze vergelijking werd telkens uitgevoerd wanneer het video-element van grootte veranderde, en de laagst mogelijke resolutie die nog steeds aan de waarde voldeed werd gekozen.

De tool werd geïmplementeerd in een webomgeving, waarbij JavaScript werd gebruikt voor de metingen en berekeningen. De nauwkeurige afmetingen en geselecteerde resolutie werden vervolgens toegepast op het video-element. De tool werd uitgebreid getest op verschillende schermformaten en browseromgevingen om de nauwkeurigheid en betrouwbaarheid van de metingen en resolutie-selectie te waarborgen. Er zijn enkele *test runs* gedaan om ervoor te zorgen dat de tool correct functioneert ongeacht de variaties in schermgrootte en resolutie.

Door een gestructureerde aanpak van metingen, formuleontwikkeling en vergelijking met standaard ppi, is er een tool ontwikkeld voor schermadaptatie. Deze tool kan nauwkeurig de afmetingen van het scherm bepalen en de meer energiezuinige resolutie selecteren voor het weergeven van video-inhoud. Dit biedt een goede gebruikerservaring doordat de video-inhoud altijd een resolutie weergeeft die voldoet aan de vereiste ppi.

3.5 Gebruikerstest

3.5.1 Opstellingen

Beide methodes werden samen vlak na elkaar getest door de gebruikers. De testen werden in 2 verschillende ruimtes getest. De reden hiervoor was zodat de test, voor de groene videospeler in een reproduceerbare ruimte werd gedaan.

In deze ruimte was alles verdonkerd met behulp van rolluiken zodat de donkere en dat de verlichte situatie altijd hetzelfde was. Vervolgens werd de methode met adaptie op basis van de fysieke grootte van het video-element, uitgevoerd in ruimte met de monitor. Daarnaast is de groene speler ook niet op de monitor getest omdat de helderheid dan niet via de gebruikersinterface aangepast kon worden. Dit komt doordat de monitor niet bezit over een usb-c connectie voor connectiviteit. Aangezien met deze connectiviteit zou meer data van de laptop en de monitor uitgewisseld kunnen worden dan enkel de beeldinformatie dat nu gaat.

Hiervoor is gekozen omdat meer groottes getest konden worden met de monitor 27 inch dan met het 16 inch scherm van de laptop. De reden dat de groene videospeler niet werd uitgevoerd in deze ruimte, is omdat deze niet in bezit was van rolluiken en hierdoor de ruimte omgeving niet reproduceerbaar was.

3.5.2 Groene videospeler test

De gebruikers zijn in verdeeld over de twee beschreven situaties van de ruimtes. 6 gebruikers hebben het in een verlichte situatie uitgevoerd en 4 in een donkere situatie. Bij de start werd er voor elke gebruiker gealterneerd tussen starten met een lage, gemiddelde of hoge instelling. De betekenis van elke instelling is:

- Lage instelling: 10% helderheid en de *low* resolutie-instelling;
- Gemiddelde instelling: 50% helderheid en de *balanced* resolutie-instelling;
- Hoge instelling: 100% helderheid en de *excellent* resolutie-instelling.

Dit is gedaan zodat er kon geobserveerd worden of alle gebruikers rond dezelfde eindinstelling zitten. De eindinstelling betekende de instelling die de gebruiker op het einde comfortabel vindt om te kijken, terwijl ze tevreden zijn met de ecologische impact die ze hebben op dat moment. Ook dat ze tevreden zijn met de tint rond het scherm die indiceert hoe goed of slecht ze bezig zijn voor de omgeving. Voordat de gebruikers aan deze gebruikers test starten hebben ze het eerste deel van de enquête ingevuld met de volgende vragen:

A1. In welke leeftijdscategorie valt u?

A2. In welk vakgebied studeert/werkt u?

- A3.** Wat is de omgeving?
- A4.** Probeert u actief minder impact te hebben op klimaatverandering?
- A5.** Heeft u zonnepanelen thuis?
- A6.** Kijkt u tv van de provider?
- A7.** Hoe vaak streamt u video's?
- A8.** Als u video's streamt, op welk apparaten kijkt u dan?
- A9.** Op welk apparaat streamt u het meest video's?
- A10.** Bent u zich bewust van de impact van videostreaming op klimaatverandering?

Nadat ze dit hebben ingevuld kregen ze een korte instructie waarin werd verteld dat ze de video moesten bekijken en moesten rondspelen met de mogelijke instellingen. Ook werd er verwezen naar de emissie nummers die werden gecommuniceerd naar de gebruiker via de UI. Daarnaast is er ook verteld dat de instelling die ze kiezen een invloed hebben op een tint rond het video-element die indiceert of ze goed of slecht bezig waren. Hiernaast was ook uitgelegd als ze veranderden van een hoger geselecteerde resolutie naar een lagere, kon het zijn dat de buffer redelijk lang was, aangezien de segmenten op de hogere kwaliteit langer waren. Hierbij werd dan uitgelegd dat de kort moesten terug klikken in de tijdsbar om de resultaten van hun selectie direct te zien. Na al deze instructies keek elke gebruiker naar de video, waar sommige gebruikers hun comfortabele instelling snel vonden en verder keken naar de inhoud van de video, waren er sommige gebruikers die meer rond speelde met de instellingen dan effectief de video-inhoud te bekijken. Nadat dit was uitgevoerd vulde ze nog een enquête in om te peilen of wat de invloed was op hun keuzes met deze methode. De vragen op de enquête waren:

- GVS1.** Welke instellingen gebruikte u in het begin?
- GVS2.** Welke kwaliteit koos u?
- GVS3.** Hoeveel helderheid koos u?
- GVS4.** Wat viel u het meest op?
- GVS5.** Merkte u dat de tint aanwezig was?
- GVS6.** Als u de tint niet opmerkte, waarom niet?
- GVS7.** Zou de tint uw keuze beïnvloeden als u deze had opgemerkt?
- GVS8.** Na te hebben gezien hoe de tint werkt, is deze effectief in het informeren van gebruikers?
- GVS9.** Hoe storend waren de tint en emissiecijfers tijdens het kijken van de video, wetende dat deze de impact van klimaatverandering aangeven?
- GVS10.** Hoe geruststellend waren de tint en emissiecijfers, wetende dat als het groen of niet goed zichtbaar was, u beter voor het milieu was?
- GVS11.** Hebben de tint en/of emissiecijfers uw keuze van resolutie en kwaliteit beïnvloed?
- GVS12.** Hoe moeilijk was het om een kleur van de kleurschakering en/of emissiecijfers te krijgen waar u tevreden mee was?

- GVS13.** Voelde u zich gedwongen door de kleurschakering en/of de emissiecijfers om de gekozen resolutie te kiezen?
- GVS14.** Was u vol vertrouwen comfortabel met uw keuze van resolutie zodat u de hele video ermee kon bekijken?
- GVS15.** Voelde u zich gedwongen door de kleurschakering en/of emissiecijfers om de gekozen helderheid te kiezen?
- GVS16.** Was u vol vertrouwen comfortabel met uw keuze van helderheid zodat u de hele video ermee kon bekijken?
- GVS17.** Wat was effectiever?
- GVS18.** Hoe effectief was de kleurschakering?
- GVS19.** Hoe effectief waren de emissiecijfers?
- GVS20.** Wetende wat de impact van streaming is, zou u uw gebruik in de toekomst veranderen?
- GVS21.** Zou u willen dat andere streamingdiensten en apps een soortgelijke functie hebben, zodat u weet welke impact u heeft?

3.5.3 Adaptie o.b.v. fysieke video-omvang

Alle 10 gebruikers hebben deze test in dezelfde omgeving met dezelfde start situatie. Deze start situatie hield in dat het video-element op size 1 was gezet. Vervolgens kreeg de gebruiker de instructie om de video te bekijken voor minstens 45-60 seconden per fysieke video-element grootte. Dit mocht ook langer zijn als de gebruiker dit nodig vond. Een andere instructie voor de test was om een comfortabele afstand tot het scherm te vinden en deze dan te behouden. Deze instructie was gegeven, aangezien de gebruiker anders gezien veel te dicht bij ging zitten voor bepaalde groottes. Dit was niet de bedoeling omdat het moest simuleren alsof je op je telefoon, tablet, laptop of een kleine tab (picture-in-picture) kijkt. Nadat de gebruikers de test hebben uitgevoerd is er een enquête uitgevoerd door de gebruikers om te zien hoe effectief en bruikbaar deze methode is. De enquête bestaat uit de volgende vragen:

- AVE1.** Merkt u dat de schermkwaliteit veranderd?
- AVE2.** Vond u het vervelend dat de schermkwaliteit veranderde?
- AVE3.** Was de keuze van schermkwaliteit per grootte prettig om naar te kijken?
- AVE4.** Als een streamingdienst de kwaliteit op deze manier zou veranderen, zou u dan nog steeds van hun dienst gebruik maken als zij de enige zijn met deze inhoud?
- AVE5.** Als een streamingdienst de kwaliteit op deze manier zou veranderen, zou u dan nog steeds van hun dienst gebruik maken als een andere dienst dezelfde inhoud aanbiedt voor dezelfde prijs?
- AVE6.** Als een streamingdienst de kwaliteit op deze manier zou veranderen, zou u dan nog steeds van hun dienst gebruik maken als een andere dienst de inhoud aanbiedt die u wilt zien voor een duurdere prijs?

- AVE7.** Hoe storend vond u de kwaliteit van de video voor het kleine formaat?
- AVE8.** Hoe comfortabel vond u de kwaliteit van de video voor het kleine formaat?
- AVE9.** Hoe storend zou u de kwaliteit vinden als u de video volledig scherm op uw telefoon zou bekijken? (Aangezien het videoformaat gelijkwaardig is aan een telefoonschermformaat)
- AVE10.** Hoe comfortabel zou u de kwaliteit vinden als u de video volledig scherm op uw telefoon zou bekijken? (Aangezien het videoformaat gelijkwaardig is aan een telefoonschermformaat)
- AVE11.** Hoe storend vond u de kwaliteit van de video voor het medium formaat?
- AVE12.** Hoe comfortabel vond u de kwaliteit van de video voor het medium formaat?
- AVE13.** Hoe storend zou u de kwaliteit vinden als u de video volledig scherm op uw tablet zou bekijken? (Aangezien het videoformaat gelijkwaardig is aan een tabletschermformaat)
- AVE14.** Hoe comfortabel zou u de kwaliteit vinden als u de video volledig scherm op uw tablet zou bekijken? (Aangezien het videoformaat gelijkwaardig is aan een tabletschermformaat)
- AVE15.** Hoe storend vond u de kwaliteit van de video voor het standaard formaat?
- AVE16.** Hoe comfortabel vond u de kwaliteit van de video voor het standaard formaat?
- AVE17.** Hoe storend zou u de kwaliteit vinden als u de video volledig scherm op uw laptop zou bekijken? (Aangezien het videoformaat gelijkwaardig is aan een laptopschermformaat)
- AVE18.** Hoe comfortabel zou u de kwaliteit vinden als u de video volledig scherm op uw laptop zou bekijken? (Aangezien het videoformaat gelijkwaardig is aan een laptopschermformaat)
- AVE19.** Hoe storend vond u de kwaliteit van de video voor het grote formaat?
- AVE20.** Hoe comfortabel vond u de kwaliteit van de video voor het grote formaat?
- AVE21.** Hoe storend vond u de kwaliteit van de video voor het volledig scherm formaat?
- AVE22.** Hoe comfortabel vond u de kwaliteit van de video voor het volledig scherm formaat?
- AVE23.** Wetende dat de resolutiekwaliteit veranderde zonder dat u controle had, zou u willen dat andere streamingdiensten dit implementeren?
- AVE24.** Vindt u het een goed idee dat de resolutie verandert, wetende welke impact het kan hebben?

Hoofdstuk 4

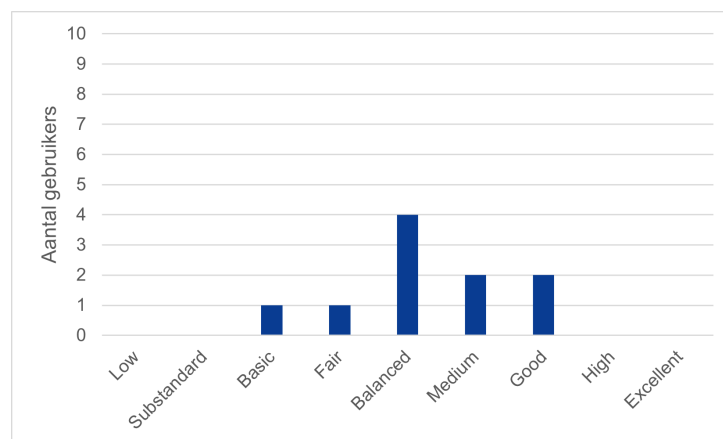
Groene videospeler

In de volgende sectie worden de resultaten van methode 1 enquête getoond en de gecorreleerde gevolgen van de impact op CO₂ uitstoot. Meeste resultaten van de enquêtes worden getoond met een schaling van 1 tot 5. Deze betekent meestal hetzelfde tenzij anders vermeld. De betekenis van deze schalingen zijn:

- 1 = helemaal niet,
- 2 = lichtelijk,
- 3 = matig,
- 4 = zeer,
- 5 = uiterst.

4.1 Resultaten

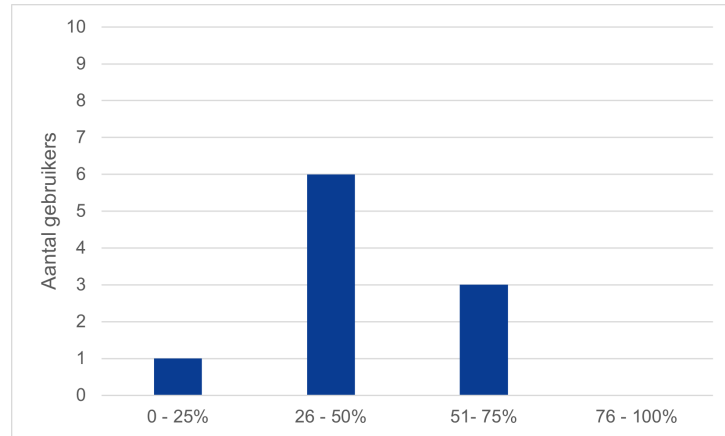
Figuur 4.1 toont het aantal gebruikers dat aan het einde een bepaalde resolutie heeft gekozen.



Figuur 4.1: Resultaten vraag GVS2.

Zoals weergegeven in Figuur 4.1, kozen 4 gebruikers voor de videokwaliteit, *balanced*. Verder koos 1 gebruiker voor de videokwaliteit, *Basic* en 1 gebruiker koos voor *Fair*. Daarnaast kozen 2 gebruikers voor de videokwaliteit, *Medium* en 2 gebruikers kozen voor *good*.

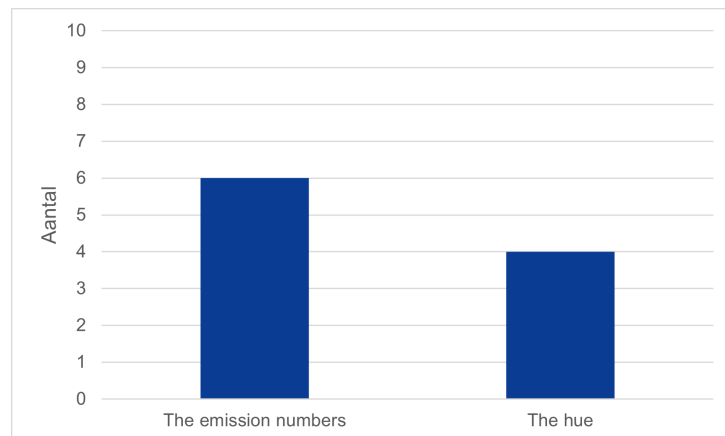
Figuur 4.2 toont het aantal gebruikers dat aan een bepaalde helderheid hebben gekozen om de video helemaal mee te bekijken, na de invloed van de UI-elementen.



Figuur 4.2: Resultaten vraag GVS3.

Uit de resultaten blijkt dat 6 gebruikers tussen de 26 - 50% helderheid kozen. Verder kozen 4 gebruikers 51 - 75% helderheid om de hele video mee te bekijken na invloed van de UI-elementen. Daarnaast koos 1 gebruiker voor 0 - 25% als eind helderheid.

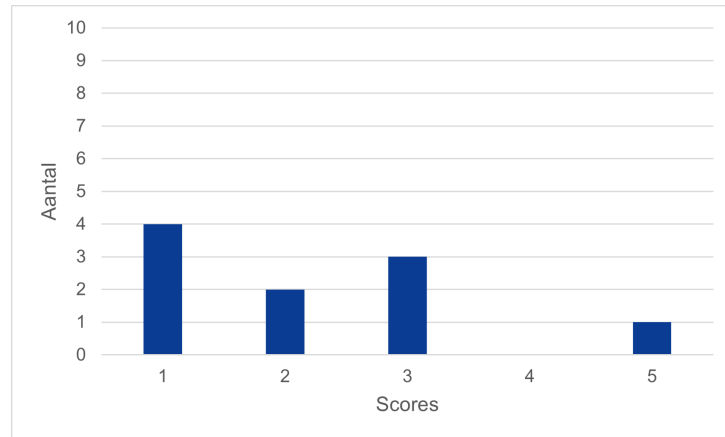
Figuur 4.3 geeft weer welke UI-element het meest opviel voor de gebruiker tijdens het kijken van de video.



Figuur 4.3: Resultaten vraag GVS4.

Zoals afgebeeld in Figuur 4.3 tonen 6 gebruikers aan dat het voor hun de emissie nummers meer opvalt. Verder vonden 4 gebruikers dat de kleurschakering meer opviel tijdens het bekijken van de video.

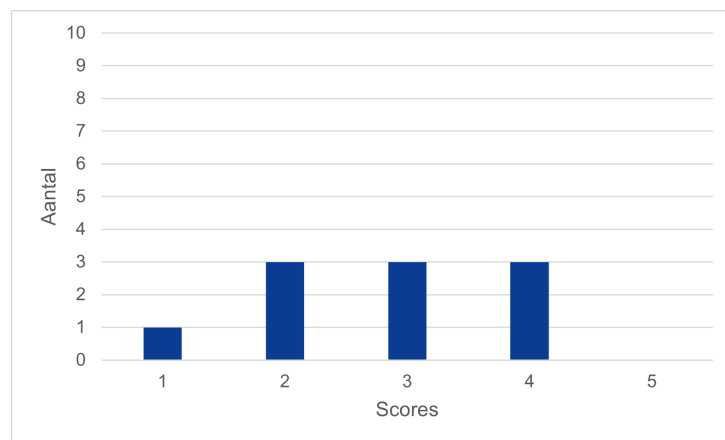
Figuur 4.4 laat zien hoe fel de gebruikers merkte dat de tint aanwezig was, tijdens het bekijken van de video.



Figuur 4.4: Resultaten vraag GVS5.

De resultaten van Figuur 4.4 toont dat meeste gebruikers het niet opmerkten dat de kleurschakering aanwezig was. Met 4 gebruikers die het helemaal niet opmerkten en 2 gebruikers die het lichtelijk opmerkten. Echter zijn er 3 gebruikers die het matig opmerkten. Daarnaast is er zelfs 1 gebruiker die het uiterst opmerkte dat de kleurschakering aanwezig was.

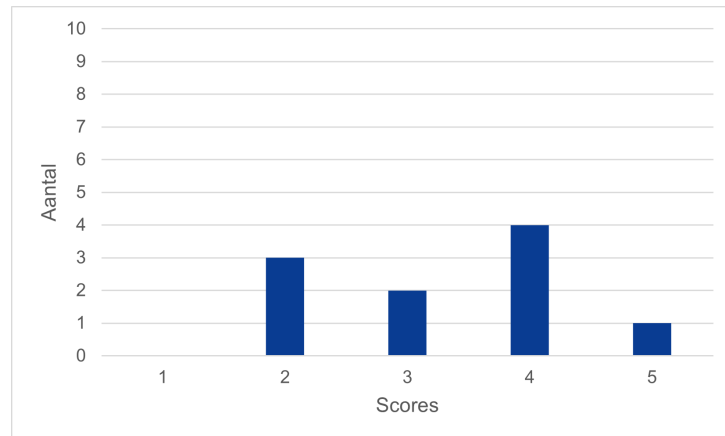
Figuur 4.5 verduidelijkt indien de gebruikers de tint niet hebben opgemerkt of ze denken dat het hun zou beïnvloed hebben als ze het wel hadden opgemerkt. Daarnaast toont het voor de gebruikers die het wel heeft beïnvloed, hoeveel het hun beïnvloed heeft.



Figuur 4.5: Resultaten vraag GVS7.

Zoals afgebeeld in Figuur 4.5 is of zou 1 gebruiker helemaal niet beïnvloed worden door de kleurschakering. Verder zijn of zouden 3 gebruikers lichtelijk beïnvloed door de kleurschakering. Daarnaast zijn of zouden 3 gebruikers matig beïnvloed door de kleurschakering. Ook zijn of zouden 3 gebruikers zeer beïnvloed door de kleurschakering.

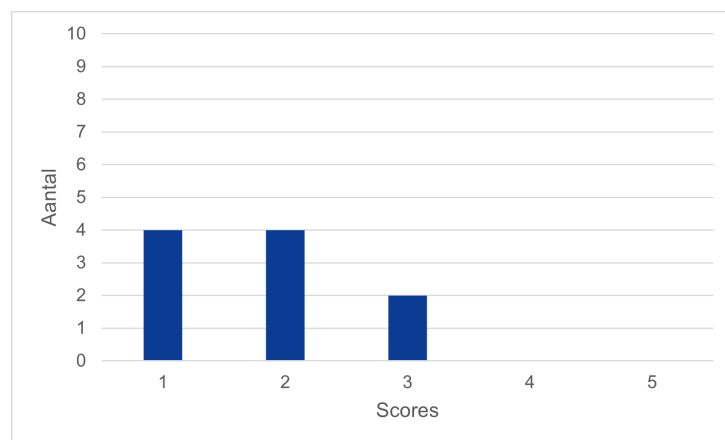
Figuur 4.6 demonstreert of de gebruikers denken dat de kleurschakering andere gebruikers zou beïnvloeden in hun streaming keuzes.



Figuur 4.6: Resultaten vraag GVS8.

Zoals afgebeeld in Figuur 4.6 dachten 2 gebruikers dat de tint matig veel invloed zou hebben op andere gebruikers. Verder dachten 3 gebruikers dat er zeer veel invloed wordt gedaan aan de hand van de kleurschakering. Ook dacht 1 gebruiker zelfs dat de kleurschakering uiterst veel invloed zou hebben. Echter dacht 1 gebruiker dat er maar lichtelijk veel invloed wordt gedaan op andere gebruikers aan de hand van de kleurschakering.

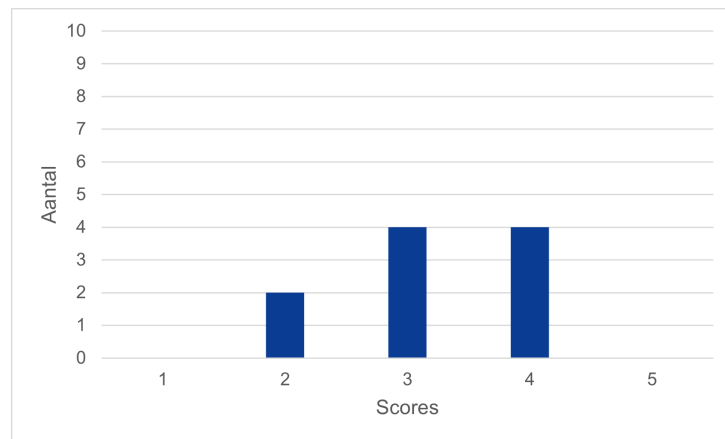
Figuur 4.7 geeft weer hoe storend de gebruikers de tint vonden terwijl ze de getoonde content consumeerde.



Figuur 4.7: Resultaten vraag GVS9.

Uit Figuur 4.7 blijkt 4 gebruikers de kleurschakering helemaal niet storend vonden tijdens het consumeren van de content. Daarnaast vonden 4 gebruikers de kleurschakering lichtelijk storend. Daarentegen vonden 2 gebruiker het wel matig storend terwijl ze de content consumeerde.

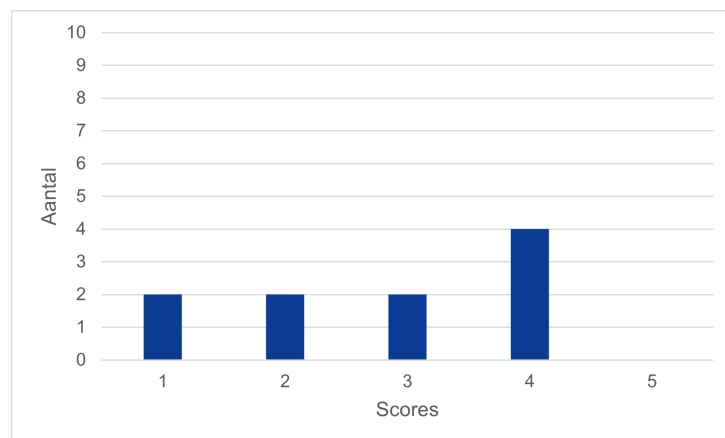
Figuur 4.8 toont of de gebruikers de tint en emissie nummers geruststellend vonden. Wetende dat ze een beter impact hadden indien de emissie nummers laag waren en de tint groen of niet zichtbaar was.



Figuur 4.8: Resultaten vraag GVS10.

Volgens de resultaten van Figuur 4.8, was de mening van 4 gebruikers dat ze zeer gerust gesteld werden door de UI-elementen. Verder zijn 4 gebruikers matig gerustgesteld door de UI-elementen en de indicatie naar de ecologische impact. Echter waren er ook 2 gebruikers die maar lichtelijk gerust gesteld waren door de UI-elementen en hun betekenis.

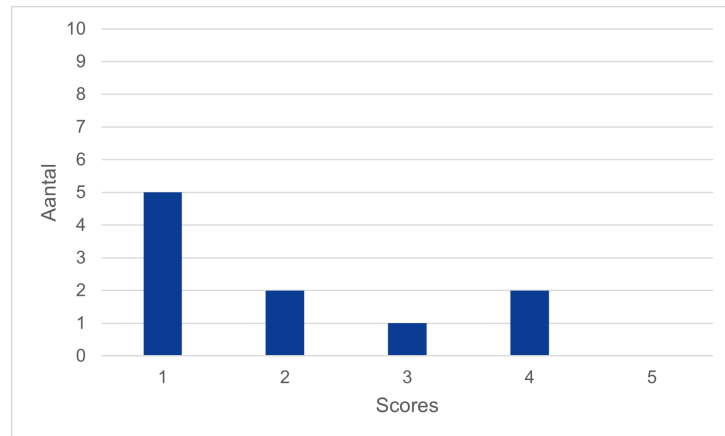
Volgende Figuur 4.9 weergeeft hoeveel de combinatie van de UI-elementen de gebruikers beïnvloeden.



Figuur 4.9: Resultaten vraag GVS11.

Zoals Figuur 4.9 aangeeft, vonden 4 gebruikers de combinatie van de UI-elementen zeer beïnvloedbaar. Verder vonden 2 gebruikers de combinatie van de UI-elementen matig beïnvloedbaar. Echter vonden ook 2 gebruikers het helemaal niet beïnvloedbaar en 2 gebruikers vonden zich, maar lichtelijk beïnvloed door de combinatie van UI-elementen.

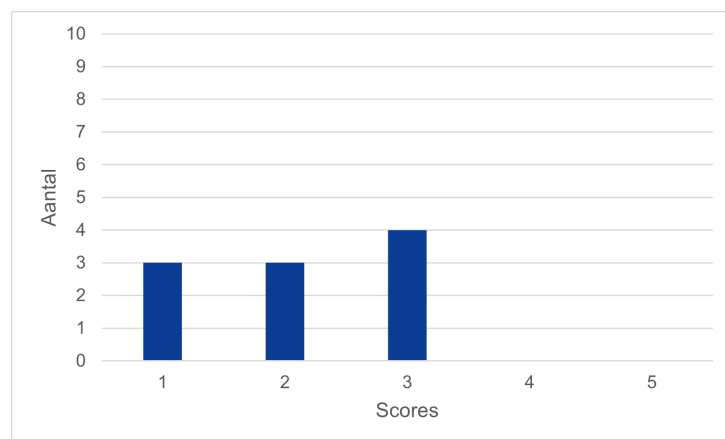
Figuur 4.10 illustreert hoe moeilijk de gebruikers het vonden om de UI-elementen te krijgen bij een instelling te krijgen dat goed was voor het milieu was in hun mening.



Figuur 4.10: Resultaten vraag GVS12.

In overeenstemming met Figuur 4.10 vonden 5 gebruikers het helemaal niet moeilijk om de instellingen te krijgen, zodat ze beter bezig waren voor de impact op aardopwarming. Daarnaast vonden 2 gebruikers het lichtelijk moeilijk om de UI-elementen in te stellen, zodat er minder impact is op aardopwarming. Echter vond 1 gebruiker het matig moeilijk en 2 gebruikers vonden het zelfs zeer moeilijk om een instelling te krijgen waar ze tevreden mee waren in beide aspecten. Een goede ervaring en minder ecologische impact.

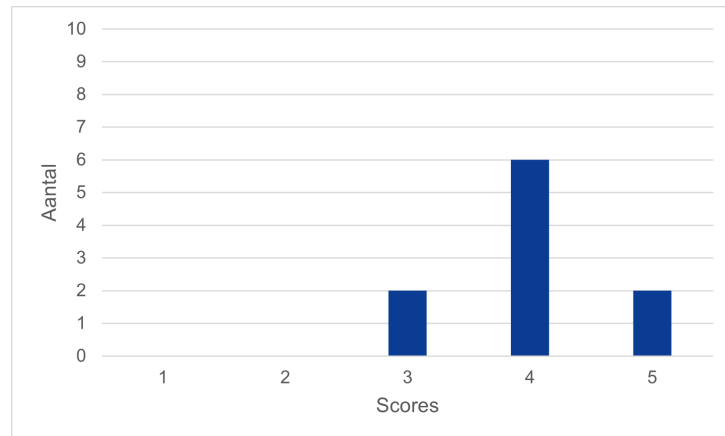
Figuur 4.11 toont hoe gedwongen de gebruikers zich voelde door de UI-elementen om hun keuze van videokwaliteit te veranderen.



Figuur 4.11: Resultaten vraag GVS13.

Zoals zichtbaar in Figuur 4.11 dat 3 gebruikers zich helemaal niet geforceerd voelde door de UI-elementen om de videokwaliteit te veranderen. Verder voelde 3 gebruikers zich, maar lichtelijk geforceerd. Echter waren er 4 gebruikers die zich wel matig geforceerd voelde om de videokwaliteit aan te passen.

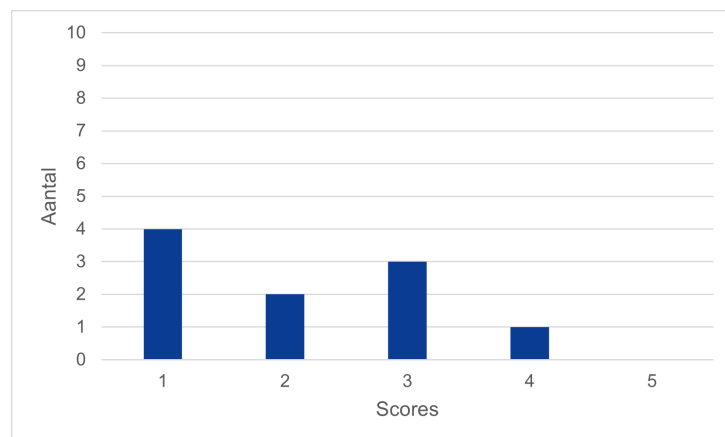
Figuur 4.12 laat zien hoeveel vertrouwen ze hebben dat ze met hun gekozen videokwaliteit de hele video comfortabel kunnen afkijken.



Figuur 4.12: Resultaten vraag GVS14.

Uit Figuur 4.12 blijkt dat 6 gebruikers er zeer veel vertrouwen in hadden dat ze met hun gekozen resolutie de video comfortabel kunnen afkijken. Daarnaast hadden 2 gebruikers uiterst veel vertrouwen. Verder hadden 2 gebruikers er matig veel vertrouwen in.

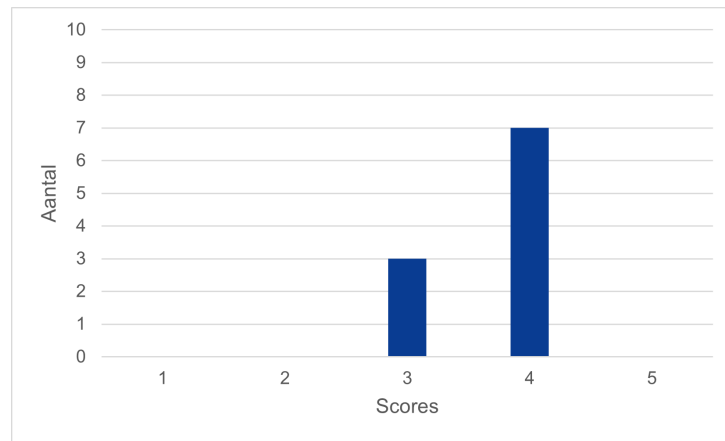
In Figuur 4.13 wordt getoond hoe gedwongen de gebruikers zich voelde om de helderheid aan te passen door de UI-elementen.



Figuur 4.13: Resultaten vraag GVS15.

Zoals afgebeeld Figuur 4.13 voelde 4 gebruikers zich helemaal niet geforceerd om de helderheid aan te passen door de feedback van de UI-elementen. Verder voelde 2 gebruikers zich, maar lichtelijk geforceerd. Daarentegen waren er wel 3 gebruikers die zich matig geforceerd voelden en 1 gebruiker die zich zeer geforceerd voelde om de helderheid aan te passen.

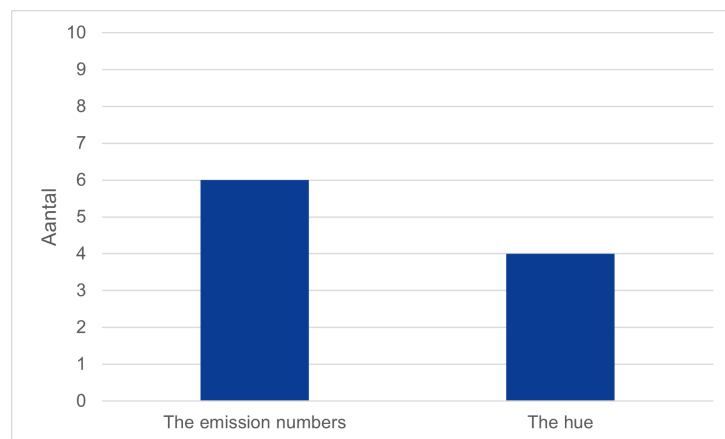
Figuur 4.14 geeft weer hoe comfortabel de gebruikers waren met hun gekozen helderheid.



Figuur 4.14: Resultaten vraag GVS16.

Zoals geïllustreerd in Figuur 4.14 hadden 7 gebruikers zeer veel vertrouwen in dat ze de hele video comfortabel kunnen afkijken met de gekozen helderheid. Daarnaast hadden 3 gebruikers uiterst veel vertrouwen erin dat ze de hele video zo konden afkijken met hun gekozen helderheid na de invloed van de UI-elementen.

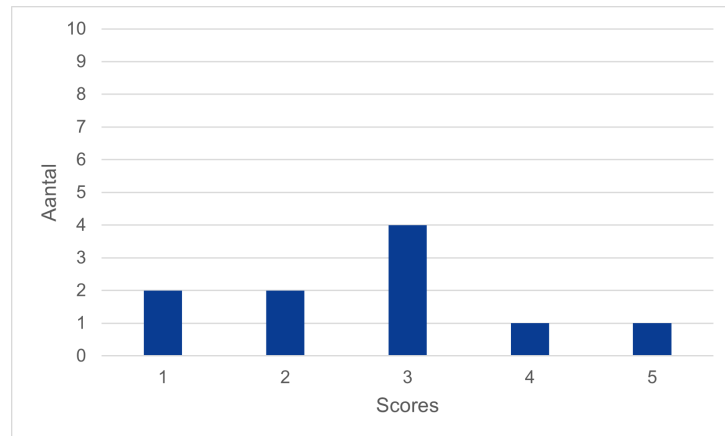
Figuur 4.15 presenteert, welk van de 2 UI-elementen meer effectief werkte om te indiceren welke het beste de ecologische impact indiceerde.



Figuur 4.15: Resultaten vraag GVS17.

In Figuur 4.15 kan gezien worden dat 6 gebruikers de emissie nummers beter vonden om hun ecologische impact te indiceren. Daarnaast vonden 4 gebruikers de kleurschakering de betere indicatie van welke impact ze hebben op de aardopwarming.

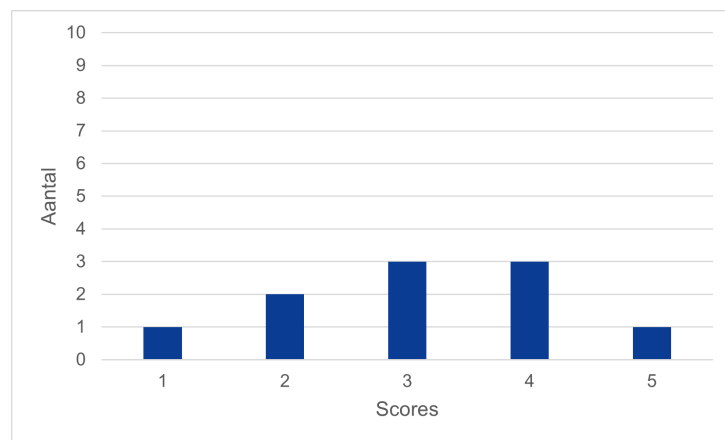
Figuur 4.16 toont hoe werkzaam alle gebruikers de kleurschakering UI-element vonden om hun te beïnvloeden in hun streaminggedrag.



Figuur 4.16: Resultaten vraag GVS18.

Zoals weergegeven door Figuur 4.16 vond 1 gebruiker het uiterst werkzaam en 1 gebruiker vond de kleurschakering zeer werkzaam in zich te beïnvloeden. Verder vonden 4 gebruikers het matig werkzaam in hun te beïnvloeden in hun streaminggedrag. Echter vonden 2 gebruikers het lichtelijk werkzaam en 2 gebruikers vonden de kleurschakering helemaal niet werkzaam in het beïnvloeden van hun streaminggedrag.

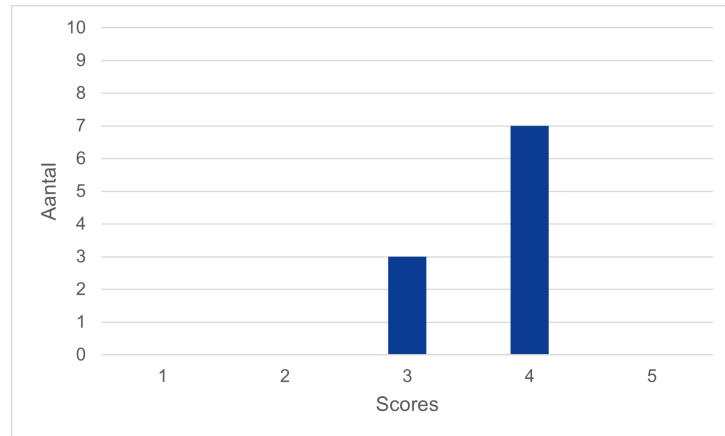
Figuur 4.17 demonstreert hoe werkzaam het UI-element met de emissie nummers was voor de te beïnvloeden gebruikers door een indicatie van de impact op de aardopwarming.



Figuur 4.17: Resultaten vraag GVS19.

In Figuur 4.17 is te zien dat 1 gebruiker, de emissie nummers uiterst werkzaam vond. Verder vonden 3 gebruikers het UI-element zeer werkzaam. Vervolgens vonden 3 gebruikers de emissie nummers matig werkzaam. Echter vonden 2 gebruikers het lichtelijk werkzaam en 1 gebruiker vond de emissie nummers helemaal niet werkzaam in zich te beïnvloeden in zijn keuze.

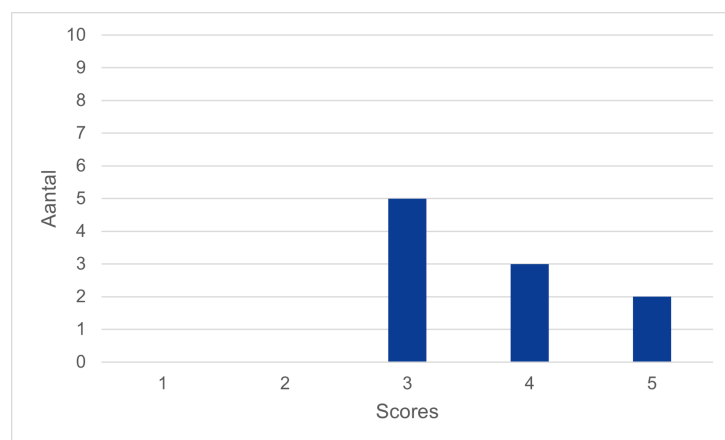
Figuur 4.18 laat zien hoe bereid gebruikers zijn om hun streaminggedrag te veranderen, wetende wat de impact op de aardopwarming is tegenwoordig.



Figuur 4.18: Resultaten vraag GVS20.

Zoals getoond in Figuur 4.18 zijn score 3 gebruikers hun bereidheid een 3 op de schaling. Score 3 indiceerde, "Ja, Indien de situatie het toelaat". Daarentegen waren 7 gebruikers die hun bereidheid een score van 4 in schaalde. Op deze schaal betekent dit "Ja, maar het mag niet te oncomfortabel worden".

Figuur 4.19 illustreert hoe wenselijk gebruikers het vonden dat andere streamingdiensten een soortgelijke functie implementeren.



Figuur 4.19: Resultaten vraag GVS21.

De resultaten van Figuur 4.19 schaalde 5 gebruikers hun wenselijkheid met een score van 3, deze score betekent, "Ja, maar ik wil de optie om het af te zetten". Verder schaalde 3 de wenselijkheid met een score van 4. Score 4 heeft de betekenis, "Ja maar in een iets minimalistische manier. Vervolgens schaalde 2 gebruikers een wenselijkheid score van 5, deze score betekent "Ja, altijd".

4.2 Discussie

Opvallend is dat een significant aantal gebruikers koos voor een balans tussen kwaliteit en energieverbruik, waarbij de meerderheid van de gebruikers helderheidsinstellingen 26-50% prefereerde.

Het meest opvallende UI-element waren de emissie nummers, wat suggereert dat gebruikers visuele feedback waardeerden om hun impact te meten. Interessant genoeg viel de kleurschakering minder op, dit zou kunnen zijn omdat de gebruikers al gewend waren om de helderheid laag te houden vanwege milieubewustzijn. De meeste gebruikers merkten de tint nauwelijks op, wat aangeeft dat subtiele visuele aanwijzingen minder invloedrijk zouden kunnen zijn dan expliciete numerieke feedback.

Hoewel gebruikers dachten dat de tint hen slechts matig zou beïnvloeden als ze het hadden opgemerkt, geloofden ze wel dat het andere gebruikers zou kunnen beïnvloeden. Over het algemeen vonden de meeste gebruikers de UI-elementen niet storend. De geruststellende werking van deze elementen was gemengd, maar neigde positief, met een groot aantal gebruikers die gerustgesteld waren door de emissie nummers en tint.

De invloed van de UI-elementen op het gedrag van gebruikers was aanzienlijk. Veel gebruikers gaven aan dat de UI-elementen hen sterk beïnvloedden, wat resulteerde in een verlaging van de videokwaliteit en helderheid. Ondanks deze veranderingen vonden gebruikers het over het algemeen niet moeilijk om een instelling te vinden die zowel goed was voor het milieu als acceptabel voor hun kijkervaring. De meeste gebruikers voelden zich niet geforceerd door de UI-elementen om de videokwaliteit of helderheid te veranderen en waren comfortabel met hun gekozen instellingen, zelfs na het maken van afwegingen tussen kijkervaring en energiebesparing.

De bereidheid van gebruikers om hun gedrag te veranderen was hoog. Gebruikers gaven aan dat ze open stonden voor verandering indien de situatie het toeliet en indien het niet te oncomfortabel werd. Daarnaast vonden gebruikers het wenselijk dat andere streamingdiensten soortgelijke functies zouden implementeren, wat wijst op een algemene positieve houding tegenover milieuvriendelijke functionaliteiten in videostreamingdiensten.

Deze resultaten tonen aan dat gebruikers milieubewust zijn en bereid zijn om hun streaming gedrag aan te passen om de impact op de aardopwarming te verminderen. UI-elementen zoals emissie nummers en kleurschakeringen kunnen effectieve middelen zijn om gebruikers te informeren en te beïnvloeden, mits goed ontworpen en gepresenteerd.

Hoofdstuk 5

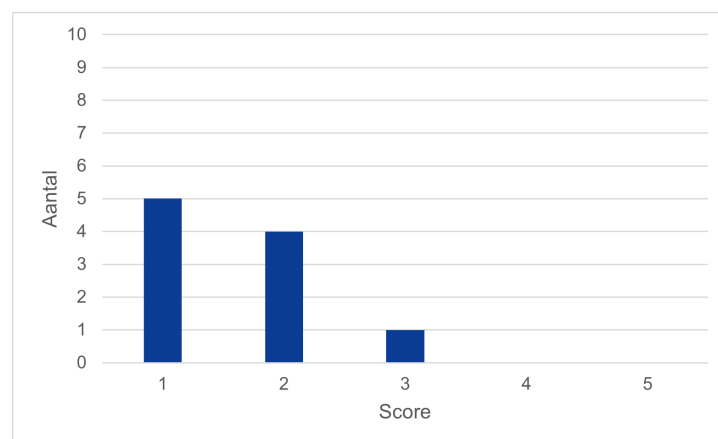
Adaptie o.b.v. fysieke video-omvang

In de volgende sectie worden de resultaten van methode 2 enquête getoond. Meeste resultaten van de enquêtes worden getoond met een schaling van 1 tot 5. Deze betekent meestal:

- 1 = helemaal niet,
- 2 = lichtelijk,
- 3 = matig,
- 4 = zeer,
- 5 = uiterst.

5.1 Resultaten

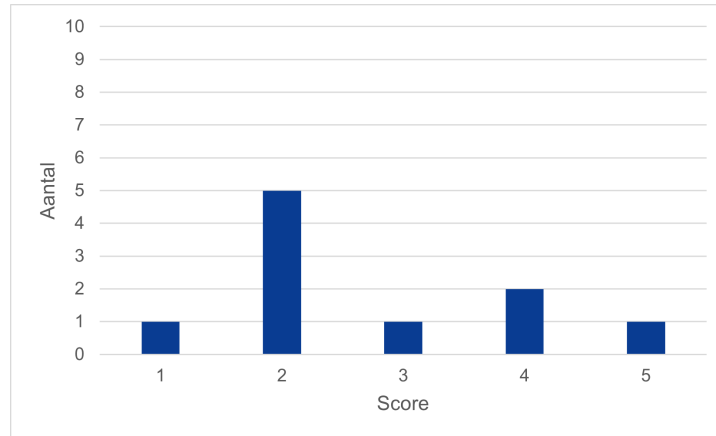
Figuur 5.1 toont hoe bewust gebruikers zijn van de impact van videostreaming op de aardopwarming.



Figuur 5.1: Resultaten of gebruikers bewust zijn van de impact van videostreaming op de aardopwarming.

Zoals Figuur 5.1 weergeeft, waren 5 Gebruikers helemaal niet van bewust, wat de impact van videostreaming is op de aardopwarming. Verder waren 4 gebruikers lichtelijk bewust van de impact en 1 gebruiker was matig op de hoogte van de impact van videostreaming is op de aardopwarming.

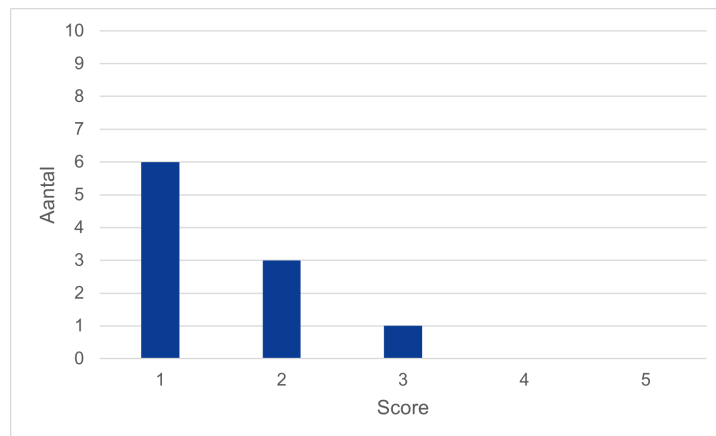
In Figuur 5.2 wordt getoond hoe fel de gebruikers merkten dat de videokwaliteit veranderde, indien de video-omvang veranderde.



Figuur 5.2: Resultaten of gebruikers merkten dat de videokwaliteit werd aangepast.

De resultaten van Figuur 5.2 toont 1 gebruiker die het helemaal niet merkte dat de videokwaliteit veranderde. Verder waren er 5 gebruikers die het, maar lichtelijk merkte dat de resolutie veranderde. Verder vond 1 gebruiker dat het matig merkbaar is, en 2 gebruikers vonden het zeer merkbaar. Echter is er ook 1 gebruiker die het uiterst merkbaar vond.

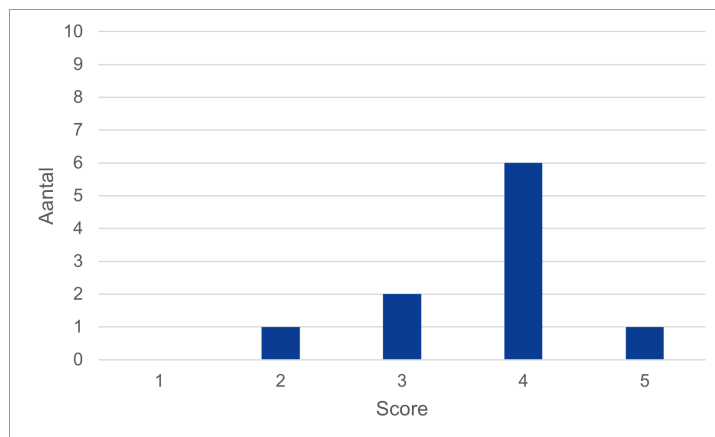
Figuur 5.3 geeft weer hoe storend de gebruikers het vonden dat de videokwaliteit veranderde bij de verandering in video-omvang.



Figuur 5.3: Resultaten of gebruikers het erg vonden dat de videokwaliteit veranderde.

Figuur 5.3 weergeeft dat 90% van de gebruikers het niet storend vonden dat de kwaliteit veranderde op basis van de fysieke ruimte die de video inneemt. Hiervan vonden 6 gebruikers het helemaal niet storend en 3 gebruikers vonden het, maar lichtelijk storend. Daarentegen was er 1 gebruiker die het matig storend vond dat de resolutie zo veranderde.

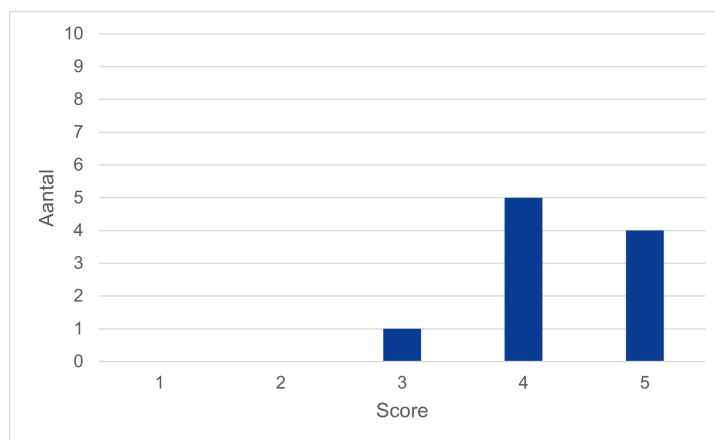
Figuur 5.4 illustreert hoe prettig de gebruiker de videokwaliteit vond per fysieke grootte van de video in het algemeen.



Figuur 5.4: Resultaten van of de videokwaliteit per omvang van video-element prettig was.

Zoals weergegeven in Figuur 5.4, vonden bijna alle gebruikers de resolutie per fysieke omvang van de video prettig. Waarvan 1 gebruiker het uiterst prettig vond en 6 gebruikers vonden het zeer prettig. Verder vonden nog 2 gebruikers het matig prettig. Echter vond 1 gebruiker het maar lichtelijk prettig.

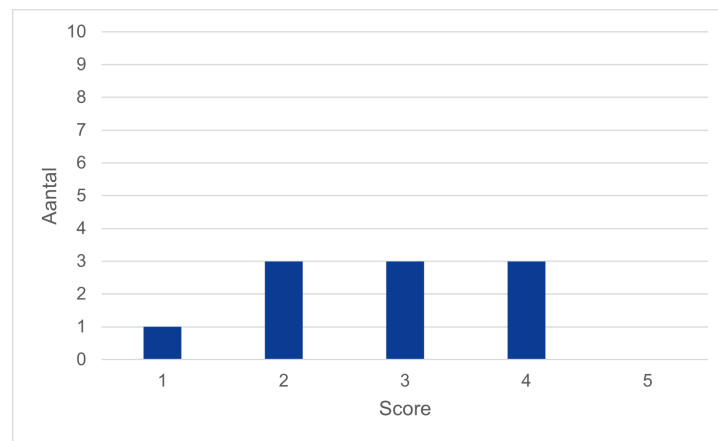
Figuur 5.5 demonstreert hoeveel, gebruikers een streamingdienst nog zouden gebruiken, als die deze methode implementeert. Indien deze streamingdienst de enige is die de gewilde content aanbiedt.



Figuur 5.5: Resultaten van gebruikers die de streamingdienst zou blijven gebruiken ondanks kwaliteitsverandering (enige aanbieder van gewenste content).

De grafiek van Figuur 5.5 toont dat 1 gebruiker er matig gebruik van zou maken, indien dit zou worden geïmplementeerd door een streamingdienst. De helft van de gebruikers zou zeker gebruik maken van deze implementatie. Bovendien zouden 4 gebruikers uiterst gebruik maken van deze implementatie, indien dit de enige manier is om de gewilde content te consumeren.

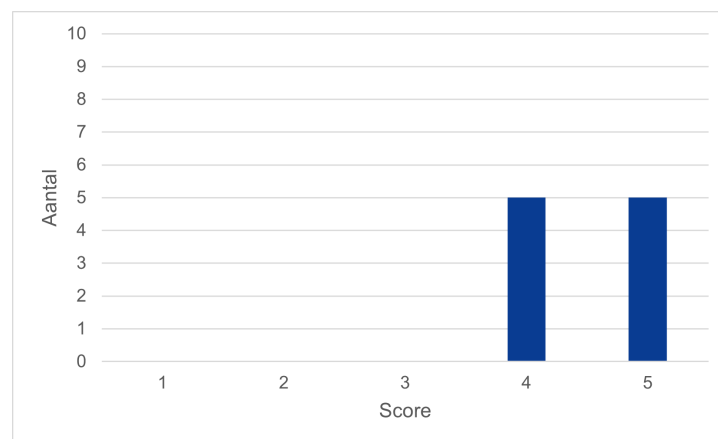
In Figuur 5.6 wordt getoond hoeveel gebruikers een streamingdienst nog zouden gebruiken als deze methode geïmplementeerd is, maar een andere streamingdienst biedt de gewilde content aan voor dezelfde prijs.



Figuur 5.6: Resultaat van gebruikers die de streamingdienst zou blijven gebruiken ondanks kwaliteitsverandering (zelfde prijs, alternatieve aanbieder beschikbaar).

Figuur 5.6 toont dat 1 gebruiker helemaal geen gebruik zou maken van de streamingdienst met deze methode geïmplementeerd, als een andere streamingdienst dezelfde content aanbiedt. verder zouden 3 gebruikers nog lichtelijk gebruik maken van deze streamingdienst. Daarentegen, zouden 3 gebruikers nog matig gebruik maken van de streamingdienst. Daarnaast zouden 3 gebruikers nog zeer veel gebruik maken van deze streamingdienst als een andere streamingdienst ook de gewilde content aanbiedt.

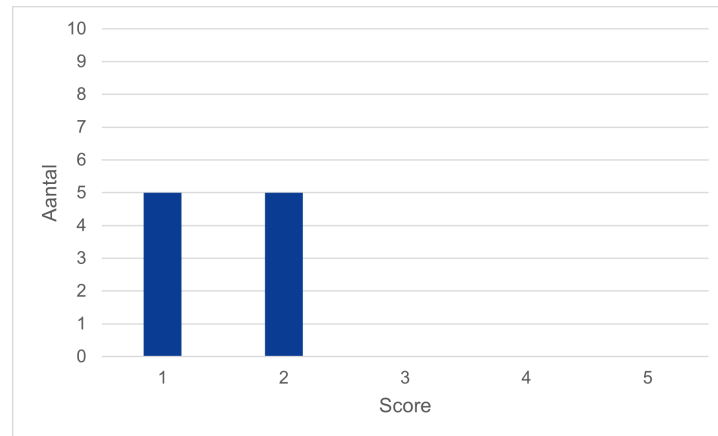
Figuur 5.7 illustreert hoeveel gebruikers een streamingdienst met deze methode zouden gebruiken, als een andere streamingdienst dezelfde content aanbiedt, maar voor een duurdere prijs.



Figuur 5.7: Resultaten van gebruikers die de streamingdienst zou blijven gebruiken ondanks kwaliteitsverandering (alternatieve aanbieder beschikbaar tegen hogere prijs).

Alle gebruikers zouden veel gebruik maken van de streamingdienst met de ontwikkelde methode gebruiken indien de alternatieve aanbieder duurder is, zoals weergeven in Figuur 5.7. Hiervan zouden 5 gebruikers zeer veel gebruik maken van deze streamingdienst. Verder zouden 5 gebruikers uiterst veel gebruik maken van deze streamingdienst als het alternatief duurder is.

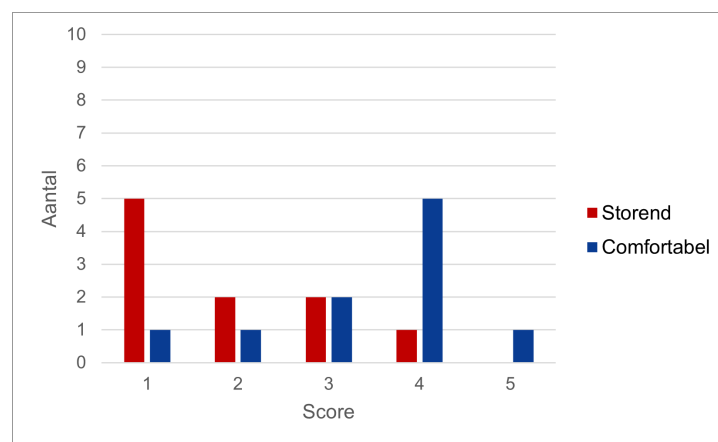
Komende Figuur 5.8 weergeeft hoeveel gebruik gemaakt zou worden van de streamingdienst met de geïmplementeerde methode, indien een alternatieve goedkopere aanbieder is.



Figuur 5.8: Resultaten van gebruikers die de streamingdienst zou blijven gebruiken ondanks kwaliteitsverandering (alternatieve aanbieder beschikbaar tegen goedkopere prijs).

De bovenstaande grafiek toont dat de gebruikers niet veel gebruik zouden maken van de streamingdienst met de ontwikkelde methoden indien het alternatief goedkoper is. Hiervan zouden 5 gebruikers er helemaal geen gebruik van maken. Daarnaast zouden 5 gebruikers er maar lichtelijk gebruik van maken, indien een alternatieve aanbieder goedkoper is.

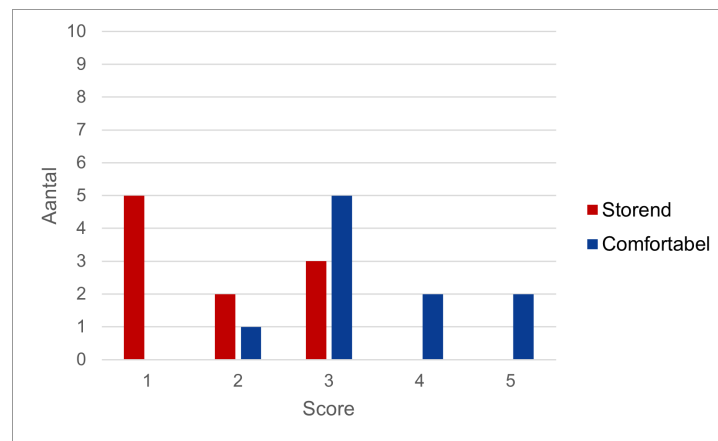
Figuur 5.9 toont hoe storend en hoe comfortabel de gebruikers de geadapteerde resolutie vonden voor het video-element met de fysieke grootte, klein.



Figuur 5.9: Resultaten van de gebruikerservaring met videokwaliteit bij kleine videoweergave.

Uit Figuur 5.9 blijkt dat aan de ene kant, 1 gebruiker de geadapteerde kwaliteit voor de kleine omvang helemaal niet comfortabel vond en 1 gebruiker vond het maar lichtelijk comfortabel. Verder vonden 3 gebruikers het matig comfortabel, en 5 gebruikers vonden het zeer comfortabel. Daarnaast vond 1 gebruiker het uiterst comfortabel. Aan de andere kant, vonden 4 gebruikers de geadapteerde kwaliteit helemaal niet storend en 2 gebruikers vonden het, maar lichtelijk storend. Verder vonden 2 gebruikers de geadapteerde kwaliteit matig storend en 1 gebruiker vond het zeer storend.

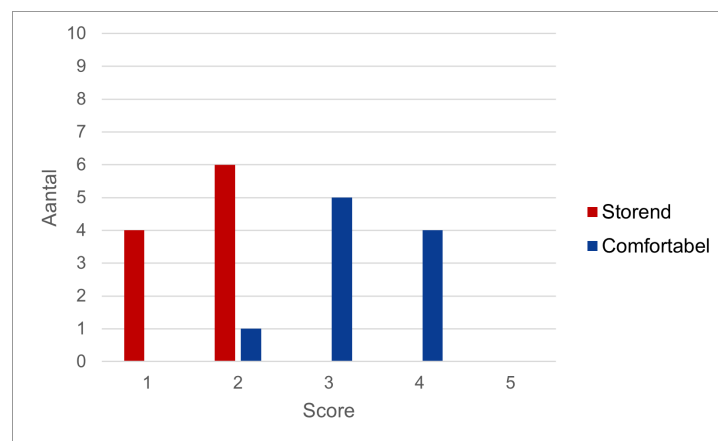
Onderstaande Figuur 5.10 geeft weer hoe de gebruikers het zouden vinden, indien de geadapteerde videokwaliteit in volledig scherm op een telefoon wordt getoond. Aangezien de kleine omvang gelijkaardig is aan de omvang van een telefoon.



Figuur 5.10: Resultaten van de verwachte gebruikerservaring met videokwaliteit bij kleine video-weergave op een telefoon.

Zoals Figuur 5.10 toont enerzijds dat, 1 gebruiker het, maar lichtelijk comfortabel zou vinden. Terwijl 2 andere gebruikers het uiterst comfortabel zouden vinden. verder zouden 5 gebruikers het matig comfortabel vinden, terwijl 2 gebruikers het zeer comfortabel zouden vinden. Anderzijds, zouden 5 gebruikers het helemaal niet storend vinden en 2 gebruikers zouden het, maar lichtelijk storend vinden. Verder, zouden 3 gebruikers het matig storend vinden.

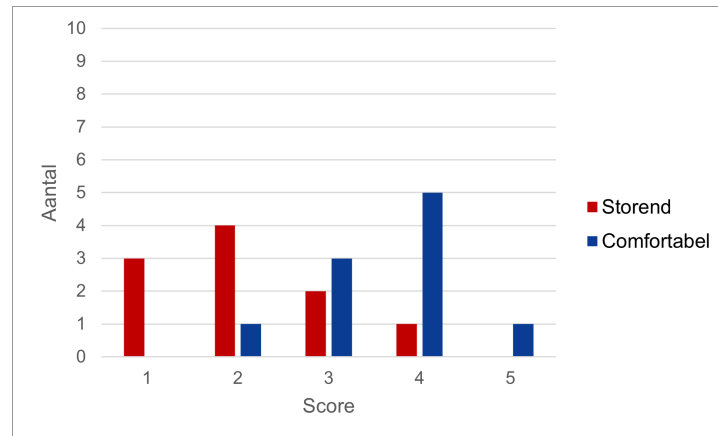
Figuur 5.11 toont de ervaring van de geadapteerde videokwaliteit voor het video-element met de fysieke grootte, middel.



Figuur 5.11: Resultaten van de gebruikerservaring met videokwaliteit bij middel videoweergave.

Bovenstaande Figuur 5.11 toont dat 4 gebruikers het helemaal niet storend vonden en 6 gebruikers vonden het, maar lichtelijk storend. Daarentegen vond 1 gebruiker het maar lichtelijk comfortabel. Vervolgens, vonden 5 gebruikers het, matig comfortabel en 4 gebruikers vonden het zeer comfortabel.

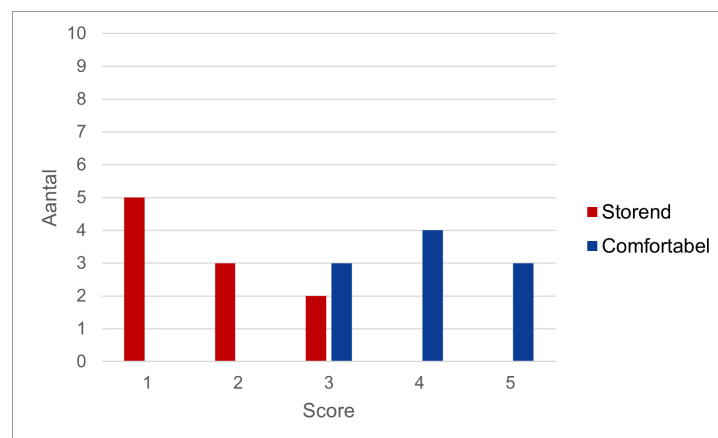
Figuur 5.12 weergeeft hoe de gebruikers de geadapteerde videokwaliteit zouden vinden, indien dit op het volledig scherm van een tablet zou worden bekeken.



Figuur 5.12: Resultaten van de verwachte gebruikerservaring met videokwaliteit bij middel videoweergave op een tablet.

Zoals weergegeven in Figuur 5.12 zouden 3 gebruikers het helemaal niet storend vinden om de geadapteerde videokwaliteit op een tablet te kijken. Verder zouden 4 gebruikers het, maar lichtelijk storend vinden. Daarnaast zouden 2 gebruikers het matig storend vinden en 1 gebruiker zou het zeer storend vinden. Daarentegen, zou 1 gebruiker het uiterst comfortabel vinden en 5 gebruikers zouden het zeer comfortabel vinden. Verder zouden 3 gebruikers het matig comfortabel vinden en 1 gebruiker maar lichtelijk comfortabel.

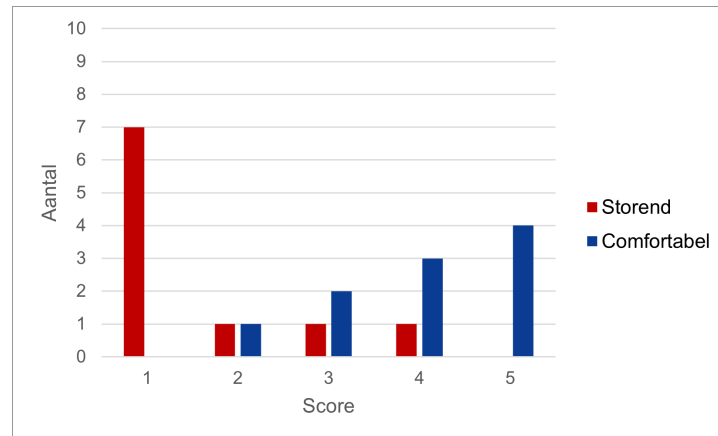
Figuur 5.13 illustreert hoe de gebruikers de geadapteerde videokwaliteit bij het video-element met de fysieke grootte, standaard.



Figuur 5.13: Resultaten van de gebruikerservaring met videokwaliteit bij standaard videoweergave.

In Figuur 5.13 wordt enerzijds getoond dat 5 gebruikers de geadapteerde videokwaliteit helemaal niet storend vinden. verder vinden 3 gebruikers het lichtelijk storend en 2 gebruikers vinden het matig storend. Anderzijds is de ervaring van meeste gebruikers comfortabel. Hierbij vinden 3 gebruikers de geadapteerde videokwaliteit uiterst comfortabel. Vervolgens vinden 4 gebruikers het zeer comfortabel. Echter, vinden 3 gebruikers de geadapteerde videokwaliteit matig comfortabel.

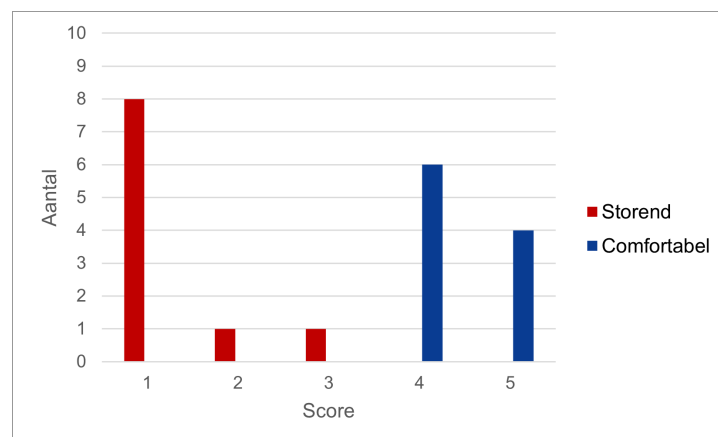
Figuur 5.14 toont wat de gebruikers verwachten te ervaren indien ze de geadapteerde videokwaliteit op het volledig scherm van een laptop zouden kijken.



Figuur 5.14: Resultaten van de verwachte gebruikerservaring met videokwaliteit bij standaard videoweergave op een laptop.

De resultaten van Figuur 5.14 toont aan de ene kant dat, 7 gebruikers verwachten de geadapteerde kwaliteit helemaal niet storend te vinden op het volledig scherm van een laptop. Verder verwacht 1 gebruiker het lichtelijk storend te vinden en 1 gebruiker verwacht het matig storend te vinden. Vervolgens verwacht 1 gebruiker het zeer storend te vinden. Aan de andere kant, verwachten 4 gebruikers de geadapteerde videokwaliteit uiterst comfortabel te vinden en 3 gebruikers verwachten het zeer comfortabel te vinden. echter verwachten 2 gebruiker het matig comfortabel te vinden en 1 gebruiker verwacht het lichtelijk comfortabel te vinden.

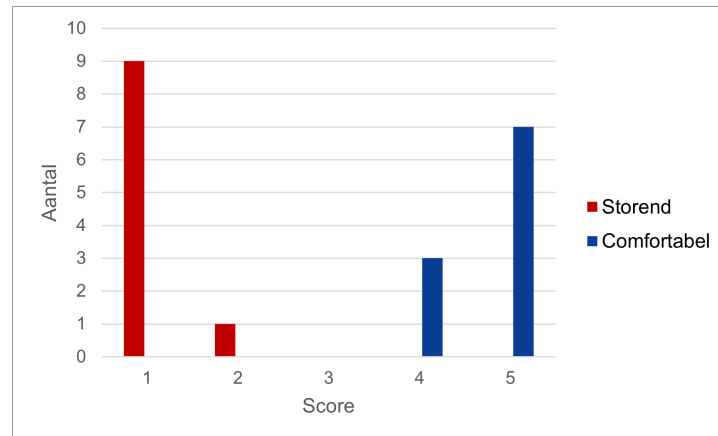
Figuur 5.15 laat zien hoe gebruikers de geadapteerde videokwaliteit voor het video-element fysieke grootte, groot.



Figuur 5.15: Resultaten van de gebruikerservaring met videokwaliteit bij grote videoweergave.

Zoals in Figuur 5.15 te zien valt, vonden 8 gebruikers de geadapteerde videokwaliteit helemaal niet storend. Verder vond 1 gebruiker het lichtelijk storend en 1 gebruiker vond het matig storend. Echter vonden 4 gebruikers de gekozen videokwaliteit uiterst comfortabel. Vervolgens vonden 6 gebruikers de geadapteerde videokwaliteit zeer comfortabel.

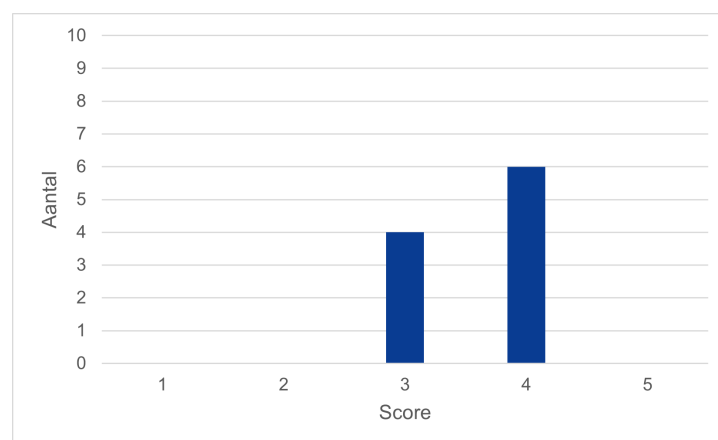
Figuur 5.16 geeft weer hoe de gebruikers de geadapteerde videokwaliteit bij volledig scherm video weergaven.



Figuur 5.16: Resultaten van de gebruikerservaring met videokwaliteit bij volledig scherm voor videoweergave.

Bovenstaande Figuur 5.16 toont dat 9 gebruikers de geadapteerde videokwaliteit helemaal niet storend vonden. Verder vond 1 gebruiker het lichtelijk storend. Daarentegen vonden 4 van deze gebruikers het uiterst comfortabel. Daarnaast vonden 6 gebruikers de geadapteerde videokwaliteit zeer comfortabel.

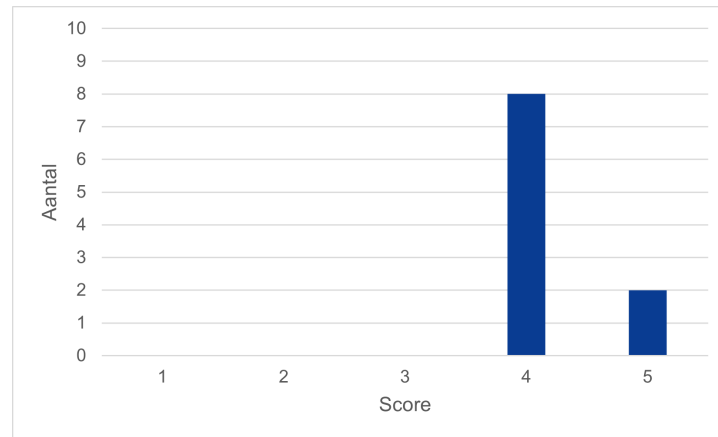
Figuur 5.17 illustreert hoe wenselijk de gebruikers het vinden om deze methode te implementeren bij bestaande streamingdiensten.



Figuur 5.17: Resultaten over de wenselijkheid van deze methode bij bestaande streamingdiensten volgens gebruikers.

Zoals weergegeven in Figuur 5.17, schaalde 4 gebruikers een score van 3 op hoe wenselijk ze het vinden dat een streamingdienst deze methode implementeert. Deze score heeft de betekenis, "het zou mij niet storen als ze het doen". Verder schaalde 6 gebruikers een score van 4 op hoe wenselijk ze het vinden. Deze score betekent, "Ja, maar indien het mij stoort wil ik het zelf kunnen aanpassen".

Figuur 5.18 toont hoe geschikt gebruikers deze methode vinden, wetende wat de impact is op de aardopwarming.



Figuur 5.18: Resultaten over de geschiktheid van deze methode om de impact op de opwarming van de aarde te verminderen.

De resultaten van Figuur 5.18 toont dat 8 gebruikers de geschiktheid schaalde op een score van 4. Deze score betekent "Ja, als de overgangen iets vloeiender zijn". Verder schaalde 2 gebruikers een score van 5 op deze stelling. Dit betekent, "Ja, ik denk dat het kan werken op deze wijze"

5.2 Discussie

De adaptie methode is een innovatieve benadering om videokwaliteit aan te passen op basis van de fysieke grootte van het weergegeven video-element. Dit kan niet alleen helpen bij het besparen van bandbreedte, maar ook bijdragen aan het verminderen van de ecologische voetafdruk van videostreaming.

Uit de resultaten blijkt dat de meerderheid van de gebruikers de verandering in videokwaliteit nauwelijks merkten wanneer de video-omvang veranderde. Slechts één gebruiker merkte de verandering helemaal niet, terwijl vijf gebruikers het slechts lichtelijk merkten. Dit impliceert dat voor 60% van gebruikers de perceptie van videokwaliteit niet significant wordt beïnvloed door kleine veranderingen in de resolutie, wat positief is voor de acceptatie van dergelijke adaptieve technieken. Echter, wanneer een gebruiker een video thuis kijkt, zal het niet zo vaak wisselen van omvang. Dit zou ook nog een positieve invloed kunnen hebben, aangezien indien ze niet weten wat de andere kwaliteit is en daarnaast ze de resolutie prettig vinden per omvang zoals verder aangegeven in de volgende alinea. Zou de gebruiker het in deze situatie niet kunnen merken.

Over het algemeen vonden de meeste gebruikers de gekozen videokwaliteit per omvang prettig. Bij kleine video-elementen waren de meningen verdeeld: één gebruiker vond het helemaal niet comfortabel, terwijl vijf gebruikers het zeer comfortabel vonden. Bij middelgrote video-elementen vonden de meeste gebruikers het matig tot zeer comfortabel. Voor standaard en grote video-elementen vonden de meeste gebruikers de videokwaliteit uiterst of zeer comfortabel. Dit kwam meestal omdat gebruikers de ervaring van de videokwaliteit associeerde met de grootte van het video-element. Aangezien ze het niet comfortabel vonden om op het klein video-element de content te consumeren. Hierbij werd wel vermeld door een aantal gebruikers dat indien ze iets anders tegelijkertijd bezig zouden zijn dat ze verwachten het wel comfortabeler te vinden.

Aangezien ze na de test met een korte bespreking bijna allemaal indiceerde dat de geadapteerde kwaliteit wel in orde was.

De bereidheid van gebruikers om een streamingdienst te blijven gebruiken, indien deze methode wordt geïmplementeerd, varieert afhankelijk van de omstandigheden. Als de streamingdienst de enige aanbieder van de gewenste content is, zou de helft van de gebruikers zeker gebruik maken van de dienst, en vier gebruikers uiterst. Echter, als er een alternatieve aanbieder is met dezelfde prijs, zou de voorkeur voor de huidige dienst aanzienlijk dalen. Wanneer de alternatieve aanbieder duurder is, zouden alle gebruikers nog steeds de huidige dienst gebruiken, wat de effectiviteit van kostenstrategieën onderstreept. Bij een goedkopere alternatieve aanbieder zouden de meeste gebruikers overstappen. Wat wijst op indien streamingdiensten dit zouden implementeren en goedkoper maken, gebruikers zouden overstappen naar hun. Dit is waarschijnlijk ook doenbaar aangezien streaming diensten ook zullen besparen op de kosten van transmissie. Dit is wel afhankelijk van welke toestellen meer gebruikt worden bij zulke streamingdiensten.

Gebruikers gaven aan dat ze de methode wenselijk zouden vinden bij andere streamingdiensten, vooral als ze wisten dat het impact op de aardopwarming zou verminderen. De meerderheid vond dat het geen probleem zou zijn als de overgang tussen kwaliteitsniveaus iets vloeiender zou zijn. Dit benadrukt de potentie van adaptieve videokwaliteitstechnieken als een duurzame oplossing, mits de gebruikerservaring optimaal blijft.

De implementatie van adaptieve videokwaliteit op basis van de video-omvang wordt over het algemeen positief ontvangen door gebruikers. Hoewel sommige gebruikers aanvankelijk enige veranderingen in videokwaliteit merkten, vonden de meesten deze niet storend. De bereidheid om een streamingdienst met deze methode te gebruiken, hangt sterk af van prijs- en contentbeschikbaarheid van alternatieven. De meeste gebruikers vinden deze methode geschikt en wenselijk, vooral gezien de positieve impact op de aardopwarming. Dit suggereert dat adaptieve videokwaliteit een veelbelovende benadering is voor duurzame streamingdiensten.

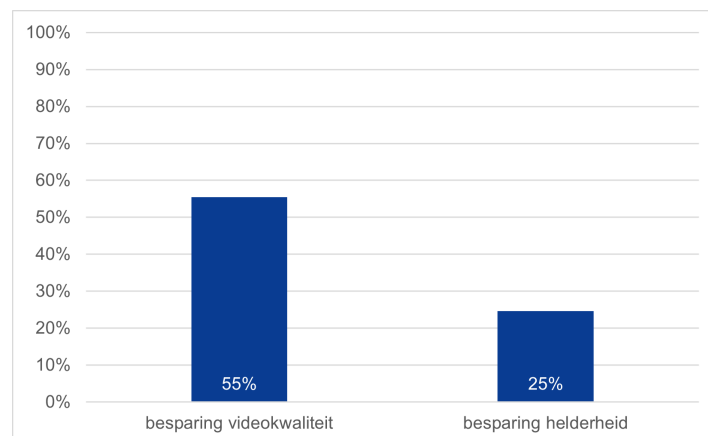
Hoofdstuk 6

Besparingen door methodes

6.1 Resultaten

6.1.1 Groene Videospeler

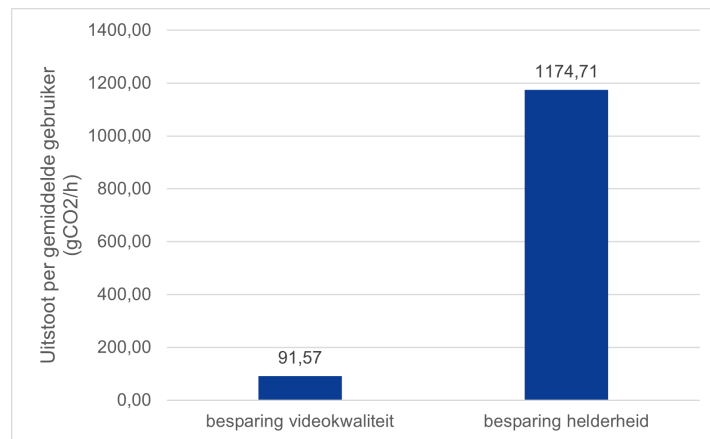
Figuur 6.1 illustreert hoeveel procentueel bespaard werd per instelling, aan de hand van wat gebruikers normaal zouden gebruiken in vergelijking met wat ze gebruiken na de invloed van de UI-elementen.



Figuur 6.1: Resultaten percentage besparing per mogelijke instelling.

Zoals Figuur 6.1 toont, wordt door de invloed van de UI-elementen 55% bespaard op het verbruik van de Videokwaliteit. Daarnaast wordt er 25% bespaard op het verbruik van de helderheid.

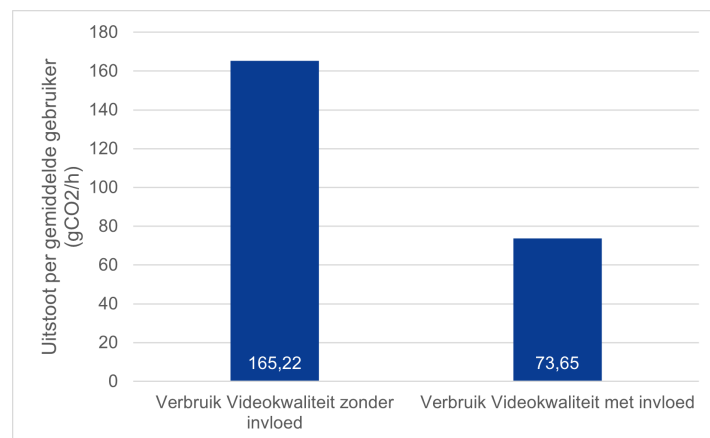
Figuur 6.2 geeft weer hoeveel bespaard werd per instelling in gCO₂/h, aan de hand van wat gebruikers normaal zouden gebruiken in vergelijking met wat ze gebruiken na de invloed van de UI-elementen.



Figuur 6.2: Resultaten besparing per mogelijke instelling.

Bovenstaande Figuur 6.2 toont dat in gCO₂/h meer bespaard wordt bij de helderheid dan de videokwaliteit. Aangezien de besparing door de invloed van de UI-elementen bij de helderheid 1174,71 gCO₂/h is. Daarentegen is de besparing van de videokwaliteit maar 91,57 gCO₂/h.

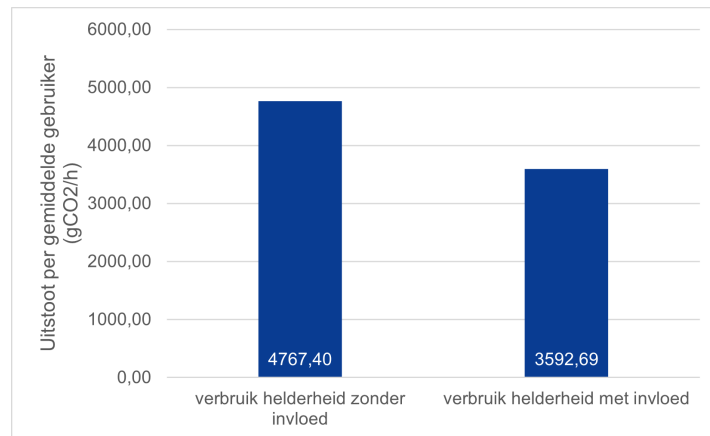
Figuur 6.3 laat zien wat het gemiddeld verbruik in gCO₂/h is, met en zonder invloed van de UI-elementen op de videokwaliteit.



Figuur 6.3: Vergelijking tussen het verbruik van de videokwaliteit tussen met en zonder invloed van de UI-elementen.

Zoals weergegeven in Figuur 6.3 verbruikte de gemiddelde gebruiker 165,22 gCO₂/h zonder invloed van de UI-elementen. Verder daalde dit gemiddelde verbruik van de gebruikers naar 73,65 gCO₂/h met de invloed van de UI-elementen.

Figuur 6.4 weergeeft wat het gemiddeld verbruik in gCO₂/h is, met en zonder invloed van de UI-elementen op de helderheid.

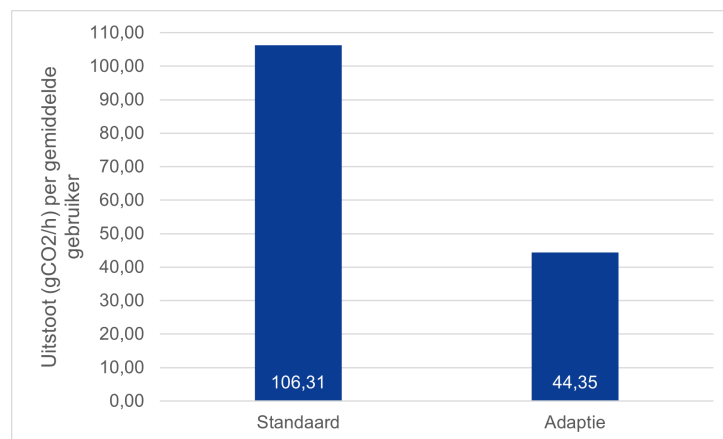


Figuur 6.4: Vergelijking tussen het verbruik van de helderheid tussen met en zonder invloed van de UI-elementen.

In overeenstemming met Figuur 6.4 verbruikte de gemiddelde gebruiker 4767,40 gCO₂/h zonder de invloed. Indien de gebruiker beïnvloed wordt door de UI-elementen, daalt het gemiddeld verbruik van de gebruikers naar 3592,69 gCO₂/h

6.1.2 Adaptie o.b.v. fysieke video-omvang

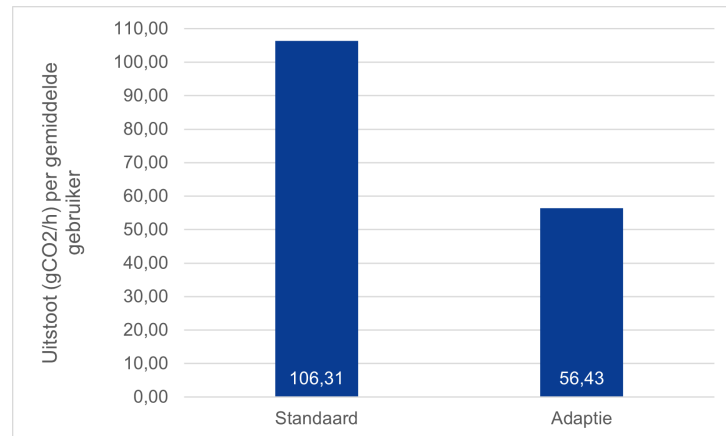
Figuur 6.5 toont de vergelijking van verbruiken met en zonder methode per gemiddelde gebruiker gebaseerd op de percentages van de meest gebruikte toestellen van de gebruikers.



Figuur 6.5: Resultaten besparing van testgroep gebaseerd op meest gebruikt toestel.

Zoals weergegeven in Figuur 6.5 zou de standaard methode in een stabiele omgeving met de nodige bandwijdte voor de video, 106,31 gCO₂/h verbruiken. Daarentegen zou de geïmplementeerde methode bij deze test groep gemiddeld 44,35 gCO₂/h per gemiddelde gebruiker.

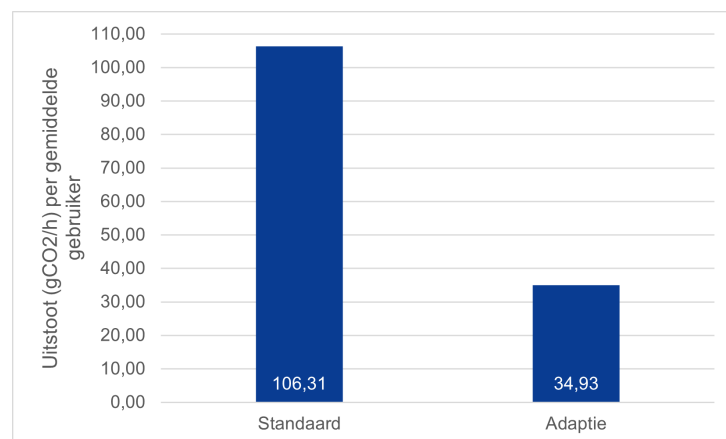
Figuur 6.6 illustreert, de vergelijking van verbruiken met en zonder methode per gemiddelde gebruiker gebaseerd op de percentages van alle gebruikte toestellen van de gebruikers.



Figuur 6.6: Resultaten besparing van testgroep gebaseerd op alle gebruikte toestel.

In Figuur 6.6 valt te zien dat de standaard methode hetzelfde als in Figuur 6.5. Daarnaast stoot de geïmplementeerd methode voor alle toestellen van deze groep 56,43 gCO₂/h uit.

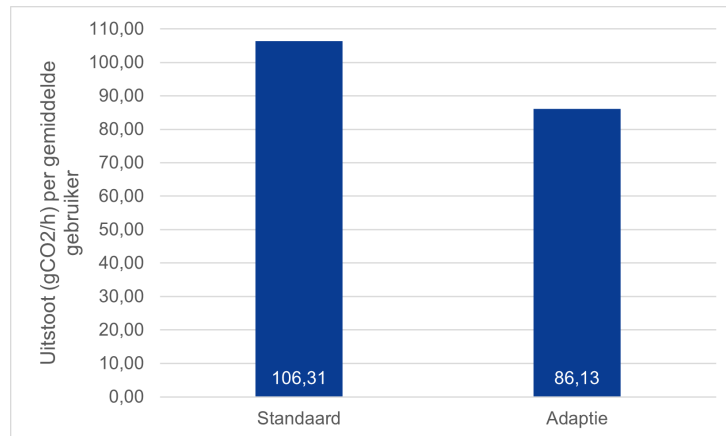
Onderstaande Figuur 6.7 toont hoeveel gCO₂/h YouTube zou besparen op deze video per gemiddelde gebruiker, indien gebruik gemaakt wordt van deze methode.



Figuur 6.7: Resultaten besparing gebaseerde op de demografie van het uurverbruik per toestel op YouTube.

Figuur 6.7 geeft weer dat indien YouTube deze methode zou implementeren voor deze video, enkel 34,93 gCO₂/h per uur zou verbruiken per gemiddelde gebruiker op dit platform. Dit is een besparing van 67% tegenover de standaard methode om de best mogelijke kwaliteit aan te bieden in een ideale situatie.

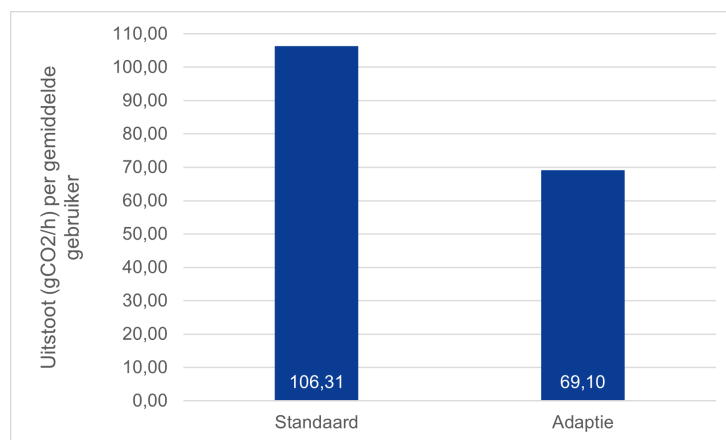
Figuur 6.8 illustreert hoeveel gCO₂/h YouTube zou besparen op deze video per gemiddelde gebruiker, indien gebruik gemaakt wordt van deze methode.



Figuur 6.8: Resultaten besparing gebaseerde op de demografie van het uurverbruik per toestel op Netflix.

Uit Figuur 6.8 blijkt dat indien dit wordt toegepast op Netflix er niet veel besparing zou zijn. Hier zou maar een besparing van 19% zijn. Dit kan gezien worden aangezien van de standaard naar de geïmplementeerde methode is, 106,31 gCO₂/h naar 86,13 gCO₂/h.

Figuur 6.9 illustreert hoeveel gCO₂/h YouTube en Netflix ten samen zouden besparen op deze video per gemiddelde gebruiker, met de verhouding van streaminguren in gedachten. Indien gebruik gemaakt wordt van deze methode.



Figuur 6.9: Resultaten besparing gebaseerde op de demografie van het uurverbruik per toestel op Netflix en YouTube.

Bovenstaande Figuur 6.9 toont dat de gecombineerde besparing van beide streamingdiensten 35% is. Hierbij verbruikt de combinatie van beide streaming diensten 69,10 gCO₂/h, indien ze deze video gebruikt zouden hebben.

6.2 Discussie

In deze sectie worden de resultaten en bevindingen van de studie besproken. Hierbij wordt gekeken naar de impact van verschillende methoden om het energieverbruik bij het streamen,

van een gekozen video, te verminderen. Hier wordt gekeken naar de invloed van de UI-elementen en de geïmplementeerde ABR-algoritme op basis van de fysieke omvang van het video-element. Waarbij de besparingen in energieverbruik en CO₂-uitstoot gekwantificeerd worden.

6.2.1 Groene Videospeler

De groene videospeler met aangepaste UI-elementen heeft aanzienlijke besparingen opgeleverd. De invloed van UI-elementen leidde tot een besparing van 55% op videokwaliteit en 25% op helderheid. Deze resultaten wijzen op het potentieel van eenvoudige aanpassingen in de gebruikersinterface om het energieverbruik te optimaliseren en de impact op de aardopwarming te verminderen.

Wanneer deze besparingen worden bekeken in absolute waarden in gCO₂/h, blijkt dat de besparing bij helderheid (1174,71 gCO₂/h) aanzienlijk groter is dan bij videokwaliteit (91,57 gCO₂/h). Dit resultaat suggereert dat het toestel zelf een grotere impact heeft op het totale energieverbruik dan de datatransmissie. Dit is een belangrijke bevinding, aangezien het aanpassen van de helderheid wellicht een minder merkbare verandering voor gebruikers kan zijn, vooral in donkere omgevingen, dan het verlagen van de videokwaliteit. Door gebruikers hiervan bewust te maken, kan deze methode een grote impact hebben.

Verder bevestigen de gegevens de aanzienlijke reductie in CO₂-uitstoot door invloed van de UI-elementen. Het gemiddelde verbruik daalde voor videokwaliteit van 165,22 gCO₂/h naar 73,65 gCO₂/h, en voor helderheid van 4767,40 gCO₂/h naar 3592,69 gCO₂/h. Deze resultaten tonen duidelijk aan hoe effectief de groene videospeler kan zijn in het verlagen van het energieverbruik en daarmee de CO₂-uitstoot.

6.2.2 Adaptie o.b.v. fysieke video-omvang

De besparingen door aanpassingen in de video-omvang variëren afhankelijk van het type apparaat dat door de gebruiker wordt gebruikt. De standaard methode verbruikte 106,31 gCO₂/h, terwijl de aangepaste methode gemiddeld slechts 44,35 gCO₂/h verbruikte indien de meest gebruikte apparaten bekeken worden. Dit verschil benadrukt het potentieel van deze aangepaste methoden om aanzienlijke besparingen te realiseren.

Indien alle gebruikte apparaten van de testgroep bekeken worden, is de besparing iets minder significant maar nog steeds duidelijk aanwezig, met een daling van 106,31 gCO₂/h naar 56,43 gCO₂/h. Deze resultaten tonen aan dat de methode ook effectief is wanneer rekening wordt gehouden met verschillende typen apparaten en gebruikspatronen.

Wanneer deze methode op grotere schaal wordt toegepast, bijvoorbeeld bij een platform als YouTube, kan er een besparing van 67% worden gerealiseerd, wat neerkomt op een verbruik van slechts 34,93 gCO₂/h per gebruiker. Dit is een indrukwekkende daling tegenover de standaard methode en toont het potentieel van grootschalige implementatie van deze methoden.

Aan de andere kant, bij een platform als Netflix, zijn de besparingen minder significant, slechts 19%. Dit kan worden verklaard aan de hand van de toesteldemografie bij Netflix-gebruikers, aangezien de meeste uren op tv worden gekeken, waardoor een hogere resolutie vereist is vanwege de grotere fysieke omvang. Dit suggereert dat de impact van de aangepaste methode sterk kan variëren afhankelijk van de streamingdienst en gebruikersdemografie.

Tot slot, de gecombineerde impact van zowel YouTube als Netflix laat zien dat de totale besparing 35% bedraagt. Dit benadrukt de cumulatieve voordelen wanneer meerdere grote platforms dergelijke energiebesparende methoden implementeren. De gecombineerde uitstoot van 69,10 gCO₂/h tegenover 106,31 gCO₂/h voor beide diensten toont aan dat er aanzienlijke milieuvordelen kunnen worden behaald door samenwerking tussen streamingdiensten bij het implementeren van duurzame methoden.

Hoofdstuk 7

Besluit

In deze thesis werd onderzocht hoe energie-efficiënte optimalisaties kunnen worden toegepast binnen adaptieve streaming om zowel de kwaliteit van de gebruikerservaring te behouden als de ecologische impact te verminderen. Het hoofddoel van dit project was om verschillende manieren te onderzoeken om energie-efficiënter te streamen en/of over te schakelen op groenere energie, met specifieke aandacht voor twee benaderingen: de ontwikkeling van een groene videospeler en de adaptieve resolutie-aanpassing op basis van de fysieke omvang van het video-element.

De eerste methode, de groene videospeler, beoogde gebruikers inzicht te geven in hoe ze energie kunnen besparen door middel van UI-elementen. De resultaten toonden aan dat deze methode inderdaad effectief is in het verminderen van de ecologische impact. Gebruikers waren in staat om door bewuste keuzes in helderheid en resolutie respectievelijk 25% en 55% energie te besparen. De gebruikerservaring bleef overwegend positief, met 100% van de geteste gebruikers die de groene videospeler wenselijk vonden voor andere streamingdiensten onder bepaalde voorwaarde. Dit zorgt ervoor dat doelstellingen voor de groene video speler bereikt zijn.

De tweede methode richtte zich op de aanpassing van de resolutie op basis van de fysieke grootte van het video-element. Uit de resultaten bleek dat deze methode een vergelijkbare energiebesparing van 35% kon realiseren. Daarnaast vond 70% van gebruikers de aangepaste resolutie zeer of uiterst comfortabel, wat suggereert dat dergelijke optimalisaties haalbaar zijn zonder concessies te doen aan de kijkervaring.

Beide doelstellingen van het project zijn dus behaald: het onderzoek heeft aangetoond dat het mogelijk is om de ecologische impact van streamingdiensten te verminderen door middel van zowel UI-gebaseerde aanpassingen als technische optimalisaties in de videoweergave. De inzichten uit deze resultaten benadrukken het potentieel voor gecombineerde optimalisatiestrategieën in toekomstige duurzame streamingtechnologieën.

Hoofdstuk 8

Toekomstig onderzoek

Voor toekomstig onderzoek is het aan te bevelen om deze technieken verder te optimaliseren en te testen op verschillende toestellen.

Daarnaast zou een verder uitbreiding op de adaptie van resolutie aan de hand van de fysieke omvang van het video-element zijn om de afstand van de gebruiker te berekenen en in rekening te brengen. Hierbij zou de resolutie niet meer bepaald worden aan de absolute fysieke omvang van het video-element, maar op basis van het perspectief van de fysieke omvang. Verder zou onderzocht kunnen worden of het mogelijk is om meer tussen resoluties te encoderen, zodat er minder verbruikt kan worden indien een schermomvang niet 720p nodig heeft, maar 480p is te laag. Onderzoek naar *machine learning* om dit probleem te verhelpen zou interessant zijn. Vervolgens aanpassingen tot de groene videospeler die gedaan kunnen worden zijn om factoren toe te voegen die meer over de invloed zeggen. Bijvoorbeeld dat de gebruiker kan instellen dat ze volledig op eigen groene energie hun toestellen opladen. Daarnaast kunnen verschillende manieren van de emissie nummers geïmplementeerd worden en vergeleken of andere beter zouden werken. Deze andere vertoningen zou een percentage kunnen zijn dat ze verbruiken ten opzichte van het maximumverbruik. Een andere optie zou zijn om het aantal km's rijden dat bespaard is te vertonen. Hierbij zou ook een optie toegevoegd kunnen worden dat de gebruiker de opties krijgt van CDN's en laat zien wat de ecologische impact is van elke CDN. Dit zou gelijkaardig zijn aan de tweede beschreven methode in materiaal en methode. Andere mogelijke opties zijn de niet geïmplementeerde beschreven methodes in materiaal en methodes.

Ten slotte zou het ook waardevol zijn om het gebruikersonderzoek uit te breiden naar diverse demografische groepen om bredere inzichten te verkrijgen in gebruikersgedrag en -voorkeuren.

Literatuurlijst

- [1] D. Gurus, “Content delivery network (cdn) - system design basics,” 2023. [Online]. Available: <https://www.designgurus.io/blog/content-delivery-network-cdn-system-design-basics>. [Geopend 7 juni 2024].
- [2] L. Moreira, “How video works.” <https://howvideo.works/>. [Online]. Available: <https://howvideo.works/>. [Geopend 7 juni 2024].
- [3] Bitmovin, “Adaptive streaming,” 2023. [Online]. Available: <https://teyuto.com/blog/what-is-adaptive-bitrate-streaming-abs-history-pros-cons-algorithms>. [Geopend 7 juni 2024].
- [4] Teyuto, “What is adaptive bitrate streaming (abs)? history, pros, cons, and algorithms,” 2023. [Online]. Available: <https://teyuto.com/blog/what-is-adaptive-bitrate-streaming-abs-history-pros-cons-algorithms>. [Geopend 7 juni 2024].
- [5] Sarah Griffiths, “Why your internet habits are not as clean as you think,” 2020. [Online]. Available: <https://www.bbc.com/future/article/20200305-why-your-internet-habits-are-not-as-clean-as-you-think>. [Geopend 9 juni 2024].
- [6] Hannah Ritchie, “What share of global CO₂ emissions come from aviation?,” 2020. [Online]. Available: <https://ourworldindata.org/global-aviation-emissions>. [Geopend 9 juni 2024].
- [7] Jean-Noël Geist, “Climate crisis: the unsustainable use of online video,” 2019. [Online]. Available: <https://theshiftproject.org/en/article/unsustainable-use-online-video/>. [Geopend 9 juni 2024].
- [8] Cisco, “Cisco visual networking index: Forecast and trends, 2017–2022.” <https://twiki.cern.ch/twiki/pub/HEPIX/TechwatchNetwork/HtwNetworkDocuments/white-paper-c11-741490.pdf>, 2019. White paper, Cisco public.
- [9] R. Lindsey and L. Dahlman, “Climate change: Global temperature,” January 18 2024. [Online]. Available: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-temperature>. [Geopend 7 juni 2024].
- [10] I. E. Agency, “The carbon footprint of streaming video: fact-checking the headlines,” 2020. [Online] Available: <https://www.iea.org/commentaries/the-carbon-footprint-of-streaming-video-fact-checking-the-headlines>. [Geopend 29 mei 2024].
- [11] T.-Y. Huang, C. Ekanadham, A. J. Berglund, and Z. Li, “Hindsight: evaluate video bitrate adaptation at scale,” in *Proceedings of the 10th ACM Multimedia Systems Conference, MMSys '19*, (New York, NY, USA), p. 86–97, Association for Computing Machinery, 2019.

- [12] R. Seeliger, S. Pham, and S. Arbanowski, “End-to-end optimizations for green streaming,” in *Proceedings of the First International Workshop on Green Multimedia Systems*, GMSys ’23, (New York, NY, USA), p. 10–12, Association for Computing Machinery, 2023.
- [13] Y. Li, D. Shen, and G. Zhou, “Energy optimization for mobile video streaming via an aggregate model,” *Multimedia Tools and Applications*, vol. 76, 10 2017.
- [14] C. Yue, S. Sen, B. Wang, Y. Qin, and F. Qian, “Energy considerations for abr video streaming to smartphones: measurements, models and insights,” in *Proceedings of the 11th ACM Multimedia Systems Conference*, MMSys ’20, (New York, NY, USA), p. 153–165, Association for Computing Machinery, 2020.
- [15] B. O. Turkkan, T. Dai, A. Raman, T. Kosar, C. Chen, M. F. Bulut, J. Zola, and D. Sow, “Greenabr: energy-aware adaptive bitrate streaming with deep reinforcement learning,” in *Proceedings of the 13th ACM Multimedia Systems Conference*, MMSys ’22, (New York, NY, USA), p. 150–163, Association for Computing Machinery, 2022.
- [16] L. Tao, Y. Gong, S. Jin, and Z. Quan, “Energy efficient video qoe optimization for dynamic adaptive http streaming over wireless networks,” in *2016 IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS)*, pp. 1–6, 2016.
- [17] Q. Jiang, V. C. M. Leung, H. Tang, and H.-S. Xi, “Energy-efficient traffic rate adaptation for wireless streaming media transmission,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 28, no. 11, pp. 3313–3319, 2018.
- [18] H. Zhang, P. V. Rengasamy, S. Zhao, N. C. Nachiappan, A. Sivasubramaniam, M. T. Kandemir, R. Iyer, and C. R. Das, “Race-to-sleep + content caching + display caching: a recipe for energy-efficient video streaming on handhelds,” in *Proceedings of the 50th Annual IEEE/ACM International Symposium on Microarchitecture*, MICRO-50 ’17, (New York, NY, USA), p. 517–531, Association for Computing Machinery, 2017.
- [19] H. Yousef, J. Le Feuvre, P.-L. Ageneau, and A. Storelli, “Enabling adaptive bitrate algorithms in hybrid cdn/p2p networks,” in *Proceedings of the 11th ACM Multimedia Systems Conference*, MMSys ’20, (New York, NY, USA), p. 54–65, Association for Computing Machinery, 2020.
- [20] B. O. Turkkan, T. Dai, A. Raman, T. Kosar, C. Chen, M. F. Bulut, J. Zola, and D. Sow, “Greenabr+: Generalized energy-aware adaptive bitrate streaming,” *ACM Trans. Multimedia Comput. Commun. Appl.*, mar 2024. Just Accepted.
- [21] X. Chen, T. Tan, and G. Cao, “Energy-aware and context-aware video streaming on smartphones,” in *2019 IEEE 39th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS)*, pp. 861–870, 2019.
- [22] Y. Li, D. Shen, and G. Zhou, “Energy optimization for mobile video streaming via an aggregate model,” *Multimedia Tools and Applications*, vol. 76, 10 2017.
- [23] D. Lorenzi, “Qoe- and energy-aware content consumption for http adaptive streaming,” in *Proceedings of the 14th ACM Multimedia Systems Conference*, MMSys ’23, (New York, NY, USA), p. 348–352, Association for Computing Machinery, 2023.

- [24] N. Jiang, Y. Liu, T. Guo, W. Xu, V. Swaminathan, L. Xu, and S. Wei, “Qurate: power-efficient mobile immersive video streaming,” in *Proceedings of the 11th ACM Multimedia Systems Conference*, MMSys ’20, (New York, NY, USA), p. 99–111, Association for Computing Machinery, 2020.
- [25] “Youtube.com monthly visits distribution by device,” 2023. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/1256738/youtubecom-monthly-visits-distribution-by-device/>. [Geopend 9 juni 2024].
- [26] “Netflix usage by device,” 2023. [Online]. Available: <https://www.statista.com/chart/13191/netflix-usage-by-device/>. [Geopend 9 juni 2024].
- [27] “Netflix upfront 2024: The year of growth and momentum,” 2024. [Online]. Available: <https://about.netflix.com/en/news/netflix-upfront-2024-the-year-of-growth-and-momentum>. [Geopend 9 juni 2024].
- [28] Debamalya, “Youtube statistics 2023: Who watched what on youtube in 2023?,” *Social Media Magazine*, 2024. [Online]. Available: <https://www.socialmediamagazine.org/youtube-statistics-2023/>. [Geopend 9 juni 2024].
- [29] J. Herbots, M. Vandersanden, P. Quax, and W. Lamotte, “Vegvisir: A testing framework for http/3 media streaming,” in *Proceedings of the 14th ACM Multimedia Systems Conference*, MMSys ’23, (New York, NY, USA), p. 403–409, Association for Computing Machinery, 2023.
- [30] Adobe, “Pixels per inch (ppi) resolution.” [Online]. Available: <https://www.adobe.com/uk/creativecloud/photography/discover/pixels-per-inch-ppi-resolution.html#: :text=72>
- [31] Dash.js, “Dash.js api documentation.” [Online]. Available: <https://cdn.dashjs.org/latest/jsdoc/index.html>. [Geopend 7 juni 2024].
- [32] Bitmovin, “Channel switching demo.” [Online]. Available: <https://bitmovin.com/demos/channel-switching>. [Geopend 7 juni 2024].
- [33] N. Riley, “brightness: Command-line utility to control display brightness on macos.” [Online]. Available: <https://github.com/nriley/brightness>. [Geopend 7 juni 2024].
- [34] M. D. Network, “Batterymanager.” [Online]. Available: <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/BatteryManager>. [Geopend 7 juni 2024].
- [35] O. W. in Data, “Carbon intensity of electricity,” 2023. [Online]. Available: <https://ourworldindata.org/grapher/carbon-intensity-electricity?tab=table>. [Geopend 29 mei 2024].
- [36] M. W. Docs, “Geolocation api,” 2024. [Online] Available: https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/Geolocation_API. [Geopend 29 mei 2024].