

Energieverbrauch und CO₂-Emissionen durch Videostreaming in Abhängigkeit von technischen und geographischen Parametern

Beitrag zu einem Energie- und CO₂-Rechner für Videostreaming

Bachelorarbeit im Fach Informatik

vorgelegt von

Marvin Münger

Matrikelnummer 19-743-434

Institut für Informatik der Universität Zürich



**University of
Zurich^{UZH}**

Prof. Lorenz Hilty

Abgabe der Arbeit:

27. Juli 2022

Abstract

This study sought to calculate the environmental impacts of streaming video in terms of energy use and carbon dioxide emissions, based on technical and geographical parameters. The resulting data was used to create an online carbon dioxide calculator, which allows users to estimate the environmental impact of their own video consumption. The calculator can be accessed online at <https://streaming-co2-rechner.ch/>. To calculate the environmental impacts, the energy consumption of the various components involved in the distribution and playback of the video content was taken into account: the data centers, the communication networks and the end devices. In an engagement with current studies, it was found that, on average, streaming video emits 66 g CO₂e per hour. This is equivalent to driving a car for 460 meters. However, this value can not be applied indiscriminately to any streaming scenario, as there is inherent variability in the estimates depending on various factors. The calculator allows users to identify the factors that most significantly affect the results. These include the country-specific emissions factor for the electricity grid, the video quality and the choice of network connection. The study also identified a need for further research into the use of appropriate allocation rules in order to calculate the impacts of streaming video in a more precise and consistent way. It was found that the use of energy consumption values per unit of data is not suitable for streaming and other data-intensive services. This leads to significant uncertainty in calculating the energy consumption of network components, as there is currently a lack of quantitative data and appropriate calculation methods need to be further validated and refined.

Zusammenfassung

In dieser Studie wurden die Umweltauswirkungen des Videostreaming auf der Grundlage technischer und geographischer Parameter berechnet. Die daraus resultierenden Daten wurden verwendet, um einen Online-CO₂-Rechner zu erstellen, mit dem die Nutzer die Umweltauswirkungen ihres eigenen Videokonsums abschätzen können. Der Rechner kann online unter <https://streaming-co2-rechner.ch/> aufgerufen werden. Zur Berechnung der Umweltauswirkungen wurde der Energieverbrauch der verschiedenen Komponenten berücksichtigt, die an der Verteilung und Wiedergabe der Videoinhalte beteiligt sind: die Rechenzentren, die Kommunikationsnetze und die Endgeräte. In einer Auseinandersetzung mit aktuellen Studien wurde festgestellt, dass das Streaming von Videos im Durchschnitt für 66 g CO₂e verantwortlich ist. Das entspricht einer Autofahrt von 460 Metern. Dieser Wert kann jedoch nicht pauschal auf jedes Streaming-Szenario angewandt werden, da die Schätzungen in Abhängigkeit verschiedener Faktoren variieren. Der Rechner ermöglicht es den Nutzern, die Faktoren zu ermitteln, die sich am stärksten auf die Ergebnisse auswirken. Dazu gehören der länderspezifische Emissionsfaktor, die Videoqualität und die Wahl der Netzverbindung. In der Studie wurde festgestellt, dass weiterer Forschungsbedarf im Hinblick auf die Anwendung geeigneter Allokationsregeln besteht, um die Auswirkungen des Videostreaming präziser und einheitlicher zu berechnen. Es wurde aufgezeigt, dass die Verwendung von Energieverbrauchswerten pro Dateneinheit für Streaming und andere datenintensive Dienste nicht geeignet ist. Dies führt zu erheblichen Unsicherheiten bei der Berechnung des Energieverbrauchs von Netzkomponenten, da es derzeit an quantitativen Daten mangelt und geeignete Berechnungsmethoden weiter validiert und verfeinert werden müssen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Verwandte Studien	3
3	Annahmen und Methoden	7
3.1	Systemgrenzen	7
3.2	Berechnungsgrundlage	9
3.3	Allokationen	10
4	Rechenzentren	11
4.1	Energieeffizienz	11
4.2	Energieverbrauch	13
5	Kommunikationsnetze	15
5.1	Weitverkehrsnetz	16
5.1.1	Energieeffizienz	16
5.1.2	Energieverbrauch	16
5.2	Zugangsnetze	17
5.2.1	Festnetz	17
5.2.2	Mobilfunknetz	18
6	Endgeräte	20
6.1	Energieeffizienz	20
6.2	Energieverbrauch	21
7	Resultate	23
8	CO₂-Rechner	28

8.1	Konzept	28
8.2	Design	29
8.3	Implementierung	31
9	Diskussion	34
10	Fazit und Ausblick	37
	Literaturverzeichnis	39
A	Daten und Berechnungen	42
A.1	Modellierungsparameter	42
A.2	Top-Down Berechnung für Rechenzentren	43
A.3	Netzwerkberechnung nach Malmodin (2020, S. 94)	43
B	Quellcode	45

Abbildungsverzeichnis

1	Videostreaming Systemgrenzen	8
2	Globale Rechenzentrumsauslastung nach Anwendungen (2021)	12
3	Anteil der Systemkomponenten am gesamten Energieverbrauch eines Videost- reams	25
4	Energieverbrauch eines Full-HD-Videostreams pro Stunde	26
5	CO ₂ -Emissionen für unterschiedliche Auflösungen	26
6	CO ₂ -Emissionen einer Stunde Videostreaming in verschiedenen Ländern (TV 1080p Festnetz)	27
7	Aufbau der Webapplikation mit Navigationsmöglichkeiten	29
8	Layout der Eingabemaske strukturiert nach Gestalt-Prinzipien	30
9	Figma Design der Eingabemaske für Smartphone- und Desktop-Bildschirme . .	31

Tabellenverzeichnis

1	Resultate bisheriger Studien	3
2	Zusammenfassung der Annahmen für den Energieverbrauch	23
3	Länderspezifische Modellierungsparameter	42
4	Videoauflösung Modellierungsparameter	43

Kapitel 1

Einleitung

Immer mehr Menschen schauen Filme, Serien und Videoclips im Netz. Das Streaming von Videos ist mittlerweile für rund 80 % des Datenverkehrs in Telekommunikationsnetzen verantwortlich (Gröger, Köhn, & Stobbe, 2020). Dieses schnelle Wachstum und ein allgemein gestärktes Bewusstsein für Nachhaltigkeit führen zu einem erhöhten Interesse an den Umweltfolgen des Videostreamings. Hinzu kommt, dass die Umweltauswirkungen des Videokonsums derzeit stark diskutiert werden, wobei die Medienberichterstattung teilweise irreführend ist. Wiederholt wird vor dem Energieverbrauch und den CO₂-Emissionen gewarnt, die durch das Videostreaming verursacht werden. Ausgangspunkt der medialen Diskurse bildet eine Studie von The Shift Project (2019), die verlautete, dass Videostreaming im Jahr 2018 für rund 300 Millionen Tonnen CO₂ verantwortlich war, was in etwa einem Prozent der globalen Emissionen gleichkommt.

Aufgrund von verschiedenen Annahmen und Rechenverfahren weichen publizierte Schätzungen zu den Umweltauswirkungen von Videostreaming stellenweise stark voneinander ab, wobei die Resultate von The Shift Project (2019) am pessimistischen Ende anzusiedeln sind. Die Schwierigkeit, eine eindeutige Aussage zu treffen, kommt daher, dass verschiedene Aspekte berücksichtigt werden müssen: die Rechenzentren, die Telekommunikationsnetze und die Endgeräte, auf denen das Video geschaut wird. Insbesondere für die Rechenzentren und Telekommunikationsnetze müssen dafür verschiedene Annahmen getroffen und grobe Schätzungen durchgeführt werden. Ausserdem existiert eine breite Anzahl an Verfahren und Modellen zur Berechnung des Energieverbrauchs und des CO₂-Ausstosses.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, den Energiebedarf und die CO₂-Emissionen des Videostreamings in Abhängigkeit von technischen und geografischen Parametern zu bestimmen. In einer Auseinandersetzung mit aktuellen Studien wird gezeigt, wie sich verschiedene Verfahren und Annahmen auf die Resultate auswirken. Die ausgemachten Daten sollen anschliessend zusam-

men mit der Arbeit über technische Parameter des Videostreamings (Graze, 2022) zu einer Webapplikation in Form eines CO₂-Rechners beitragen. Der CO₂-Rechner, welcher im Rahmen der beiden Arbeiten entwickelt wird, soll über den effektiven Energiebedarf und CO₂-Ausstoss des Videostreamings aufklären und so den Nutzern einen Einblick in die Umweltauswirkungen des eigenen Medienkonsums gewähren.

Kapitel 2

Verwandte Studien

Das Bewusstsein und die Bedenken über die Umweltauswirkungen des IKT-Sektors, einschliesslich der Auswirkungen von Videostreaming, nehmen in den Medien seit einiger Zeit zu. Infolgedessen wurden bereits verschiedene Schätzungen über den Energieverbrauch und die CO₂-Emissionen eines Videostreams veröffentlicht. Tabelle 1 veranschaulicht die Variabilität bisher veröffentlichter Schätzungen.

Tabelle 1

Resultate bisheriger Studien

Referenz	Bezugsjahr	Relevante Parameter	Resultat (gCO _{2e} / Stunde Videostreaming)
Stephens et al. (2021)	2020	Europäischer Durchschnitt	55
Obringer et al. (2021)	2020	ohne Endgeräte	84-186
Gröger et al. (2021)	2020	Glasfaser (FTTH) ohne Endgeräte	2
Gröger et al. (2021)	2020	Mobilfunk (3G) ohne Endgeräte	90

Fortsetzung nächste Seite

Andrae (2020)	2020	ohne Endgeräte	142 ¹
Kamiya (2020) (Überarbeitete Schätzung, Dezember 2020)	2020	gewichteter Durchschnitt für Netflix	36
Kamiya (2020) (Ori- ginale Schätzung, Februar 2020)	2020	gewichteter Durchschnitt für Netflix	82
Hinterholzer and Hintemann (2020)	2018	TV 1080p Festnetz	140
The Shift Project (2019) (AFP Inter- view)	2018	1-byte Modell Notebook/Smartphone	3200
The Shift Project (2019) (angepasst)	2018	1-byte Modell Notebook/Smartphone	394
Konen (2020)	2017/2018	Full-HD ohne Endgeräte und Rechenzentren	330
Schien et al. (2021)	2016	BBC iPlayer Durchschnitt in England	93
Schien et al. (2015)	2015 ²	BBC iPlayer HD-Video iPad	51 ¹
Shehabi et al. (2014)	2011	Durchschnitt USA inkl. Herstellung und Entsorgung	420

¹Für Vergleichszwecke wurde der Energiebedarf in CO₂e-Emissionen umgerechnet

²Basierend auf einer Annahme, da das Bezugsjahr nicht explizit genannt wird

Neben unterschiedlichen Annahmen und Rechenverfahren, gibt es verschiedene Gründe für die Abweichungen der publizierten Resultate. Zum einen werden Technologien ständig aktualisiert und in ihrer Energieeffizienz verbessert. Daher ist das Jahr, auf das sich die Ergebnisse beziehen, bedeutend. Die Verwendung veralteter Zahlen zur Energieintensität (und damit zur Kohlenstoffintensität) führt meist zu einer Überschätzung des Ergebnisses (Aslan, Mayers, Koomey, & France, 2018). Dies ist oft auch dann der Fall, wenn eine Extrapolation von historischen Schätzungen und Abschätzungen zukünftiger Trends anhand von Modellprojektionen durchgeführt wird (Stephens et al., 2021). Ein Beispiel dafür ist die Studie "Lean ICT: Towards digital sobriety" von The Shift Project aus dem Jahr 2019 (The Shift Project, 2019). Die Resultate der Studie basieren hauptsächlich auf einer Quelle von Andrae and Edler (2015), welche vom Jahr 2015 ausgehend Prognosen bis ins Jahr 2030 zum Energieverbrauch des IKT-Sektors macht. Die Prognosen sind mit grossen Unsicherheiten verbunden und die Schätzungen fallen vergleichsweise pessimistisch aus. Es wird ein starker Anstieg des Energiebedarfs angenommen, der basierend auf aktuellen Trends nicht realistisch erscheint (Coroama, Hintemann, Hinterholzer, & Arbanowski, 2020). Dies erklärt die vergleichsweise hohen Schätzungen zu den CO₂-Emissionen von The Shift Project (2019).

Die Wahl der technischen Parameter haben ebenfalls eine bedeutende Rolle. Die Videoauflösung, das Endgerät sowie die Netzwerkverbindung sind Faktoren, die das Endergebnis gravierend beeinflussen. Nach Gröger et al. (2021) sind die CO₂-Emissionen zur Übertragung der gleichen Datenmenge mit dem alten 3G-Netz (UMTS) alleine mehr als 20-mal höher als mit dem 5G-Netz. Darüber hinaus hat der geographische Standort einen entscheidenden Einfluss auf die berechneten Umweltauswirkungen. Das ist darauf zurückzuführen, dass die Emissionen mit einem länderspezifischen Strommix berechnet werden. Verschiedene Länder erzeugen, importieren und nutzen Energien auf unterschiedliche Art und Weise und setzen unterschiedliche Mischungen aus erneuerbaren und konventionellen Energien ein. Berechnungen von Stephens et al. (2021) zeigen, dass die CO₂-Emissionen einer Stunde Videostreaming in Deutschland rund 25-mal höher sind als in Schweden. Die Wahl verschiedener Parameter in den bisherigen Studien erschwert daher eine korrekte Interpretation der Ergebnisse und kann leicht zu Fehleinschätzungen führen.

Die vorliegende Arbeit soll ermöglichen, die Umweltauswirkungen des Videostreamings anschaulich und transparent bereitzustellen. Dafür wird eine Webapplikation entwickelt, bei der die technischen und geographischen Parameter vom Nutzer definiert werden können. Der Einfluss der verschiedenen Faktoren wird dadurch direkt einsehbar. Darüber hinaus soll der CO₂-Rechner den Nutzern einen Einblick in die Umweltauswirkungen des eigenen Medienkonsums gewähren. Marks, Clark, Livingston, Oleksijczuk, and Hilderbrand (2020, S. 8) heben die Wichtigkeit ei-

ner solchen Möglichkeit hervor „I propose developing an app that would track an individual’s streaming carbon footprint. [...] it should be possible to identify streaming times and data transfer quantities, and to translate those into energy consumption and thus into IRL consequences.” Der ”Carbonalyser” von The Shift Project wird als erster Schritt in diese Richtung identifiziert (Marks et al., 2020). Es handelt sich dabei um ein Browser-Add-on, das die CO₂-Emissionen berechnet, die durch das Surfen im Internet entstehen. Die CO₂-Schätzungen basieren dabei auf der Menge der übertragenen Daten und werden mit dem ”1-byte” Modell berechnet. Dieses Modell wurde auch für die Studie ”Lean ICT: Towards digital sobriety” (The Shift Project, 2019) verwendet, deren Resultate seither widerlegt wurden (Kamiya, 2020; Coroama et al., 2020). Ausserdem basiert das Browser-Add-on auf fixen Annahmen, welche vom Nutzer nicht verändert werden können und auch nicht transparent einsehbar sind (beispielsweise die Wahl des verwendeten Endgeräts und der Netzwerkverbindung). Diese Punkte sollen im Rahmen dieser Arbeit adressiert werden.

Kapitel 3

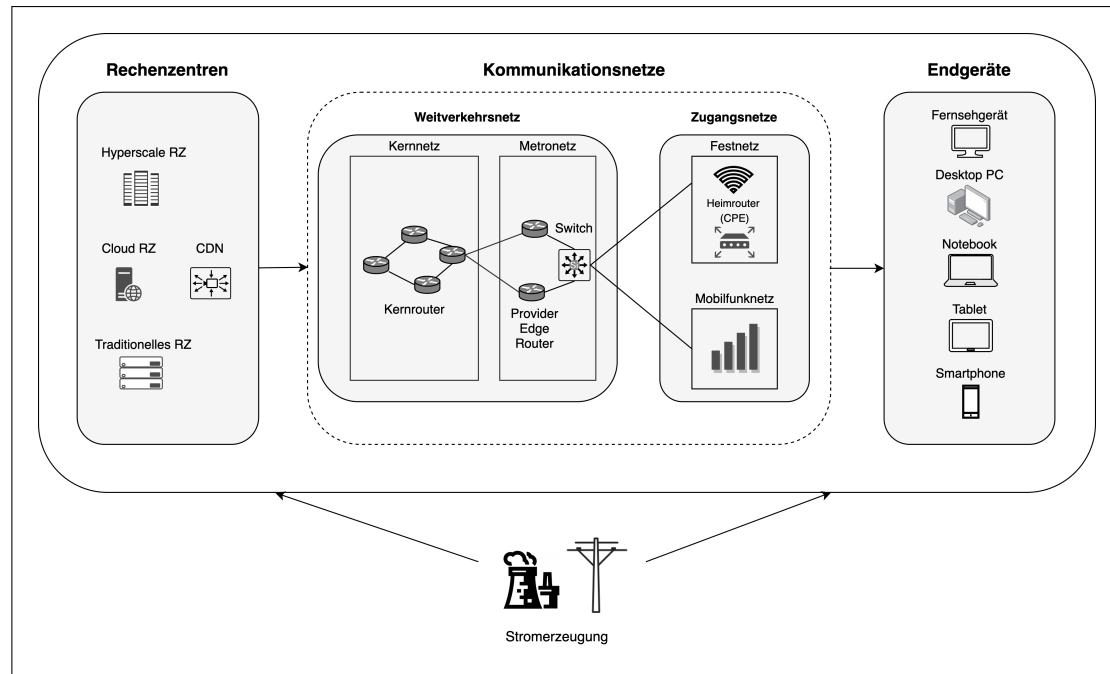
Annahmen und Methoden

Bei der Berechnung des Energiebedarfs und CO₂-Ausstosses von Videostreaming müssen zunächst Annahmen getroffen und Systemgrenzen gezogen werden. Betrachtete Studien unterscheiden sich teilweise stark hinsichtlich der verwendeten Methoden, wobei die konkreten Abgrenzungen und Annahmen nicht immer transparent sind (Coroama & Hilty, 2014). In diesem Kapitel soll aufgezeigt werden, mit welchen Methoden bisherige Studien im Rahmen dieser Arbeit analysiert werden. Ausserdem wird dargelegt, welche Systemgrenzen gezogen werden, welche Annahmen getroffen werden und mit welchen Verfahren gerechnet wird.

3.1 Systemgrenzen

Unterschiedliche Definitionen der Systemgrenze erklären, warum die Berechnungen der Stromintensität des Internets so stark variieren (Coroama & Hilty, 2014). Der Stromverbrauch beim Videostreaming kann grundsätzlich in zwei Elemente unterteilt werden: der Stromverbrauch der Endgeräte auf der Seite der Verbraucher und der Stromverbrauch des Datenverkehrs auf der Seite der Produzenten (Madlener, Sheykha, & Briglauer, 2022). Letzteres umfasst sowohl den Strombedarf der Kommunikationsnetze, als auch den Strombedarf der Rechenzentren. Nach Coroama and Hilty (2014) ist es wichtig, die Endgeräte und Rechenzentren in die Berechnungen miteinzubeziehen: „If, for example, the objective of the research is to determine the energy consumption caused by streaming and watching a video from the Internet, the system under study should include (a) the end-user device’s electricity consumption for the duration of the video being watched, (b) the consumption caused in the Internet by transmitting the data, and (c) a properly allocated share of the consumption of the server providing the video” (Coroama und Hilty, 2014, S. 67). Darauf aufbauend umfasst die Systemgrenze der vorliegenden Arbeit die, in Abbildung 1 dargestellten, Komponenten.

Abbildung 1. Videostreaming Systemgrenzen



Quelle: Eigene Darstellung

Wichtig für die Resultate der Studie sind ausserdem Annahmen bezüglich des regionalen Strommixes. Verschiedene Länder erzeugen, importieren und nutzen Energien auf unterschiedliche Art und Weise. Effektive Werte zum Strommix sind deshalb von geographischen Faktoren abhängig, wobei die Daten stark variieren können. In dieser Arbeit wird der Strommix deshalb als variabler Einflussfaktor betrachtet. Im Energie- und CO₂-Rechner soll es den Nutzern überlassen sein, einen Strommix basierend auf ihrer geographischen Lage zu wählen, um ein akkurates Ergebnis sicherzustellen.

Zuletzt ist für die Systemgrenze wichtig zu bestimmen, ob die Endgeräte und Infrastrukturen über den gesamten Lebenszyklus oder nur über die Nutzungsdauer betrachtet werden. Die, für die Herstellung der Geräte benötigte, Energie ist schwierig zu bestimmen, weshalb existierende Schätzungen jeweils weit auseinander klaffen (Coroama et al., 2020). Hinzu kommt, dass die für das Videostreaming verwendeten Geräte oft nicht ausschliesslich zum Streamen verwendet werden. Dies erschwert eine klare Zuweisung der CO₂-Emissionen. Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Arbeit jeweils nur die Nutzungsdauer der Geräte und Infrastrukturen betrachtet.

Für grosse Geräte mit langer Lebensdauer, wie die Server in den Rechenzentren, sind nach Hinterholzer und Hintemann (2020) die Emissionen der Herstellung ohnehin vernachlässigbar. Für die Endgeräte mit kurzer Lebensdauer macht die Herstellung jedoch oft den grösseren Teil der Gesamtemissionen aus (Bieser et al., 2020). Aus diesem Grund wird in der Webapplikation explizit auf diese Limitation hingewiesen. Die Berechnungen der vorliegenden Arbeit beziehen sich auf das Jahr 2020, was auf die Verfügbarkeit von Daten zurückzuführen ist.

3.2 Berechnungsgrundlage

Für die Bestimmung des Energiebedarfs weisen Coroama und Hilty (2014) darauf hin, dass eine klare Unterscheidung zwischen der Datenübertragung über das Internet und der Datenverarbeitung an den Endknoten (durch Endnutzergeräte oder Rechenzentren) essentiell ist. Für die Berechnung sollte demnach wie folgt vorgegangen werden: „[...] for the purpose of assessing the total energy cost of an Internet-based application, a sound approach should assess the three components (a) [end-user devices], (b) [networks], and (c) [datacenters] separately” (Coroama und Hilty, 2014, S. 67). Basierend darauf wird der Energieverbrauch für die individuellen Komponenten isoliert betrachtet und die Teilergebnisse werden zum Schluss aufsummiert. Insbesondere für Rechenzentren und Kommunikationsnetze sind Messdaten zum Energieverbrauch jeweils nur selten verfügbar (Hintemann, 2014). Es wird daher auf akademische Schätzungen zurückgegriffen, die sich auf die Bestimmung der Energieintensität bzw. der Leistungsaufnahme der Datenübertragung und Datenverarbeitung konzentrieren.

Einige der betrachteten Studien berechnen jeweils den Energiebedarf, während andere Studien nur Resultate zu den CO₂-Emissionen publizieren. Für eine bessere Vergleichbarkeit der Resultate werden diese Studien berücksichtigt, indem der weltweite Strommix von 465g CO_{2e}/kWh (<https://ourworldindata.org/grapher/carbon-intensity-electricity?tab=table>) zugrunde gelegt wird. Ausserdem unterscheiden sich bei bisherigen Schätzungen häufig die Einheiten der Resultate. Einige Studien beziehen sich auf die Bereitstellung eines Videostreams über einen gewissen Zeitraum, während andere Studien die Umweltauswirkungen pro Datenmenge berechnen. Um diese Studien zu analysieren, wird im Rahmen dieser Arbeit von einer durchschnittlichen Datenmenge von 3 Gigabyte pro Stunde Videomaterial ausgegangen. Dies korreliert mit einer Datenmenge eines Full-HD-Videostreams (Graze, 2022).

3.3 Allokationen

Wie bereits gezeigt werden konnte, erfordert die Messung des CO₂-Fussabdrucks durch Videostreaming die Berechnung des Verbrauchs aller Ressourcen, die Treibhausgasemissionen in den verschiedenen Phasen verursachen (Stephens et al., 2021). Viele dieser Ressourcen werden jedoch nicht ausschliesslich für das Videostreaming verwendet, weshalb jeweils eine Zuweisung benötigt wird.

Die Rechenzentren speichern die Videoinhalte, kodieren sie und bereiten sie für das Videostreaming vor (The Carbon Trust, 2021). Das bedeutet, dass diese Ressourcen von allen Nutzern geteilt werden. Hinzu kommt, dass die Server der Rechenzentren auch Strom im Ruhezustand verbrauchen und normalerweise, unabhängig von der Arbeitsauslastung, 24 Stunden am Tag aktiv sind (Montevecchi, Hintemann, 2020). Dies erschwert eine transparente Zuweisung des Energieverbrauchs. In der vorliegenden Arbeit wird die, für das Videostreaming insgesamt verbrauchte Energie, auf die Streamingdauer bezogen (kWh pro Stunde Videostreaming).

Das Internet besteht aus einer grossen Anzahl von Ressourcen, die alle miteinander verbunden sind und die Übertragung von Daten steuern. Diese Geräte sind ständig eingeschaltet und verbrauchen jeweils eine nahezu konstante Energiemenge (Stephens et al., 2021). Das Internet stellt die Verbindung zu mehreren Geräten für verschiedene Zwecke her, sodass es auch hier potenziell viele verschiedene Möglichkeiten gibt, wie die Energie zugewiesen werden kann. In der vorliegenden Arbeit wird mit der konventionellen Methode gerechnet, bei der die, für das Videostreaming insgesamt verbrauchte Energie, einer bestimmten Datenmenge (kWh/GB) zugewiesen wird. Dies hat zur Folge, dass auch der Standby-Stromverbrauch der Netzgeräte auf Grundlage der übertragenen Datenmenge zugewiesen wird. Beim Videostreaming fällt dieser Anteil vergleichsweise hoch aus, da es sich um einen Dienst mit hoher Bitrate handelt (Stephens et al., 2021). Es wird dennoch auf diese Zuweisungsmethode zurückgegriffen, da andere Allokationsmöglichkeiten bisher noch wenig untersucht wurden und daher noch wenige quantitative Daten verfügbar sind.

Wenn ein Endgerät, wie beispielsweise ein Fernsehgerät, für das Videostreaming verwendet wird, kann 100 % des Stromverbrauchs dem Videostreaming zugewiesen werden. Damit wird vereinfacht angenommen, dass währenddessen keine anderen Funktionen auf dem Gerät ausgeführt werden. Es wird ausserdem nur der Stromverbrauch während der Nutzung der Geräte betrachtet. Der Standby-Stromverbrauch der Endgeräte ist nach Stephens et al. (2021) ohnehin sehr gering, sodass dieser vernachlässigt werden kann. Für die Endgeräte hat die Datenmenge keinen Einfluss auf den Energiebedarf (Coroama und Hilty, 2014). Es wird deshalb erneut der Strombedarf auf die Nutzungsdauer bezogen (kWh pro Stunde Videostreaming).

Kapitel 4

Rechenzentren

Rechenzentren bilden die Grundlage unserer zunehmend digitalisierten Welt. Sie fungieren als zentrale Knotenpunkte für die Verarbeitung und Speicherung von Daten, die für alle Internetaktivitäten verwendet werden. Beim Videostreaming sind die Rechenzentren dafür da, die Videos zu speichern und den Nutzern für das Streaming zur Verfügung zu stellen. Es gibt verschiedene Arten von Rechenzentren, die unterteilt werden können in traditionelle Rechenzentren, Cloud Rechenzentren und Hyperscale Rechenzentren (Cisco, 2019). Hyperscale Rechenzentren sind seit einigen Jahren auf dem Vormarsch und weisen vielversprechende Entwicklungen hinsichtlich der Energieeffizienz auf. Sie sind weitaus energieeffizienter und bieten eine bessere Servervirtualisierung als herkömmliche Rechenzentren.

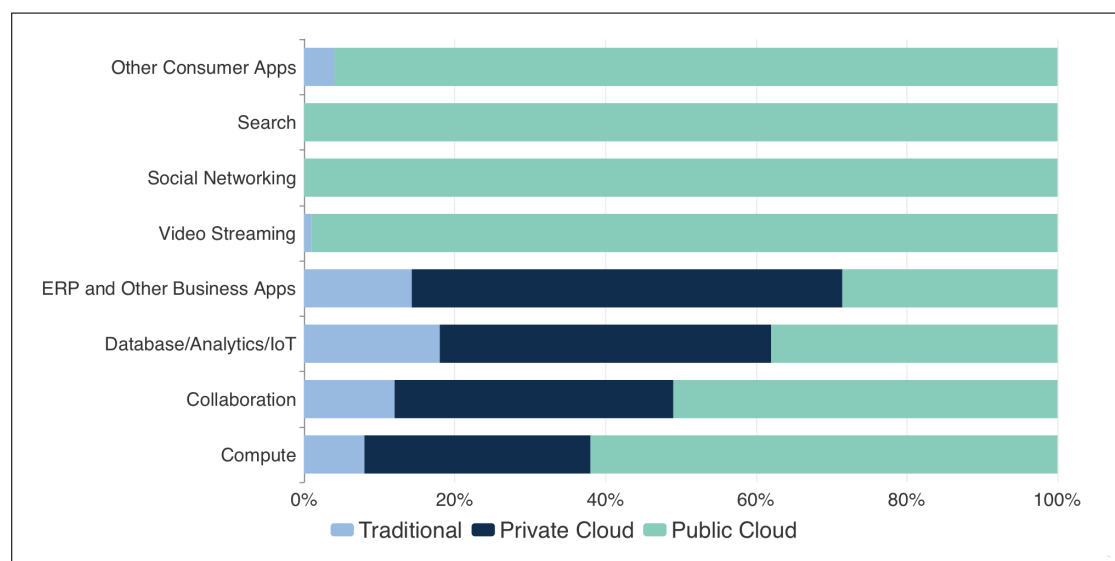
Die Prozesskomponente der Rechenzentren beinhaltet im Rahmen dieser Arbeit auch die Content Delivery Networks (CDN). CDNs bedienen eine bestimmte Region, indem sie Kopien der Originalvideodaten in grösserer Nähe speichern. Das trägt dazu bei, die Überlastung des Netzes zu verringern und die Übertragungszeiten zu verbessern (Stephens et al., 2021).

4.1 Energieeffizienz

Der Datenverkehr in den Rechenzentren wächst seit einiger Zeit stark an und wird voraussichtlich noch weiter steigen, insbesondere in den Cloud-Rechenzentren. Die Meinungen, wie sich der steigende Datenverkehr auf den CO₂-Fussabdruck auswirkt, gehen auseinander. So argumentieren Kamiya (2020) und Masanet, Shehabi, Lei, Smith, and Koomey (2020) dafür, dass die CO₂-Emissionen aufgrund der Effizienzsteigerungen auf einem konstanten Niveau stagnieren. Dagegen sprechen Andrae (2020), Belkhir and Elmeligi (2018), und Hintemann and Hinterholzer (2019) davon, dass der Energieverbrauch und der damit verbundene CO₂-Abdruck ansteigen.

Bedeutend in dieser Diskussion sind die, mit der Innovation verbundenen, Effizienzsteigerungen. Das Tempo der technologischen Innovation hat bisher eine kontinuierliche Verbesserung der Energieeffizienz in der gesamten Wertschöpfungskette des IKT-Sektors ermöglicht. Nach Koomey's Law verdoppelt sich die Effizienz von Rechenzentren fast alle zwei Jahre (Gaukler, 2021). Zu einem grossen Teil lässt sich das auf das Mooresche Gesetz zurückführen, welches besagt, dass sich bei Computer-Mikroprozessoren die Transistordichte alle zwei Jahre verdoppelt, wodurch sich die Anzahl der Transistoren pro Flächeneinheit erhöht und somit die Leistung verbessert wird (Stephens et al., 2021). Langsam nähert sich die Technologie jedoch den physikalischen Grenzen der Transistordichte. In diesem Fall bietet Software weitere Energieeffizienzverbesserungen, die den Energieverbrauch der Hardware teilweise ausgleichen können. Insbesondere hat die Konsolidierung und Virtualisierung von Rechenzentrumsarbeitslasten in die Cloud bisher erhebliche Effizienzgewinne ermöglicht (Masanet, 2020). Zusammenfassend ist für die Energieeffizienz vor allem bedeutend, in welchem Umfang und wie schnell Cloud-Rechenzentren die traditionellen, weniger energieeffizienten Rechenzentren ersetzen (Stephens et al., 2021). Daten von Cisco Global Cloud (2018) zeigen, dass für Verbraucheranwendungen wie Videostreaming bereits mehrheitlich öffentliche Cloud-Rechenzentren verwendet werden.

Abbildung 2. Globale Rechenzentrumsauslastung nach Anwendungen (2021)



Quelle: Eigene Darstellung nach Cisco Global Cloud (2018)

4.2 Energieverbrauch

Es gibt verschiedene Methoden, wie der Energieverbrauch der Rechenzentren beim Videostreaming bestimmt werden kann. Arbeiten von Shehabi, Smith, Masanet und Koomey (2019) oder von Gröger et al. (2020) basieren auf einem Bottom-up-Modell. Demnach kann der Energiebedarf eines Rechenzentrums wie folgt berechnet werden:

$$E = E_S + E_{SS} + E_N + E_G \quad (1)$$

wobei E_S , E_{SS} , E_N und E_G die Stromverbräuche von Servern, Speichersystemen, Netzwerkgeräten und der Gebäudetechnik sind. Häufig sind in Rechenzentren noch weitere Komponenten installiert, welche für den Energieverbrauch jedoch weniger relevant sind und deshalb in der Analyse meistens nicht berücksichtigt werden (Montevecchi, Hintemann, 2020). Der resultierende Energieverbrauch kann dann beispielsweise mit der GCC-Methodik auf das Videostreaming bezogen werden, um deren Umweltwirkungen zu bestimmen. Bei der, vom deutschen Umweltbundesamt (Gröger et al., 2020) entwickelten, GCC-Methodik wird der Aufwand im Rechenzentrum mit Hilfe von Allokationsregeln einer einzelnen Cloud-Dienstleistung zugeordnet. Beim Videostreaming wird dafür der komplette Aufwand im Rechenzentrum der Auslieferung eines Videostreams über einen bestimmten Zeitraum zugeordnet (Gröger et al., 2020). Das Problem bei Bottom-Up Verfahren ist, dass die Rechenzentren Informationen zum Energieverbrauch in den meisten Fällen als vertraulich behandeln und deshalb nur selten zur Verfügung stellen. Im Allgemeinen erfordert das Bottom-Up Modell sehr detaillierte Kenntnisse über alle Rechenzentren, die für das Videostreaming verwendet werden, und ist daher nicht leicht zu verallgemeinern (Makonin, Marks, Przedpełski, Rodriguez-Silva und ElMallah, 2022). Basierend auf einem Bottom-Up Verfahren mit Messdaten ermittelte das deutsche Umweltbundesamt einen Energiebedarf für eine Stunde Videostreaming von 0,0023 kWh/h im Rechenzentrum (Gröger et al., 2020). Im Forschungsprojekt DIMPACT wurde, ebenfalls basierend auf realen Messdaten, ein Energiebedarf von 0.0013 kWh/h bestimmt (Stephens et al., 2021).

Der Energieverbrauch der Rechenzentren kann auch mit einem Top-Down Verfahren berechnet werden. Basierend auf Hintemann und Hinterholzer (2020) kann der Anteil von Videostreaming auf den Energiebedarf der weltweiten Rechenzentren geschätzt und anschliessend auf den weltweiten Video-Datenverkehr bezogen werden. Exemplarisch wird eine solche Berechnung für das Jahr 2020 durchgeführt. Schätzungen zum weltweiten Energieverbrauch der Rechenzentren reichen diesbezüglich von 200 Mrd. kWh bis zu 1000 Mrd. kWh (Bieser et al., 2020). Im Rahmen dieser Arbeit wird, basierend auf Hintemann (2020) und Bieser et al. (2020), ein Ener-

gieverbrauch von 400 Mrd. kWh als plausibel angesehen. Nach Cisco (2018) ist Videostreaming dabei für rund 9.18 % der Workloads in den Rechenzentren verantwortlich. Dies entspricht einem Energieverbrauch von 39.24 Mrd. kWh. Der weltweite Video Datenverkehr im Jahr 2020 beträgt ca. 1'680 Mrd. GB (Cisco, 2019). Basierend auf diesen Annahmen errechnet sich eine Energieintensität von 0.0234 kWh/GB für die Nutzungsphase. Im Vergleich zu den Bottom-Up basierten Schätzungen ist dieser Wert bedeutend höher. Umgerechnet auf eine Stunde Videostreaming in einer Full-HD Auflösung sind es 0.0702 kWh/h, was um den Faktor 30 bis 50 mal höher ist. Dies, obwohl sich alle Schätzungen auf das Jahr 2020 beziehen und ähnliche Systemgrenzen definiert wurden.

Zum Einen kommt die Diskrepanz davon, dass der Wert beim Top-Down Verfahren einer Verallgemeinerung entspricht, die weniger effiziente Rechenzentren in die Berechnung miteinbezieht und die Tendenz zu Videostreaming in Cloud-Rechenzentren vernachlässigt. Darüber hinaus wird der Energieverbrauch beim Top-Down Verfahren auf die Datenmenge bezogen, welche dafür nicht direkt ausschlaggebend ist. „Data traffic is not proportional to energy consumption. Netflix share of global data traffic was about 15% in 2018 but its share of data center electricity consumption was only about 0.2%” (Malmudin, 2020, S. 93). Basierend auf diesen Erkenntnissen wird im Rahmen dieser Arbeit mit der Energieintensität von The Carbon Trust (2020) gerechnet. Diese beruht auf Messdaten aus dem Jahr 2020 und beinhaltet zusätzlich den Strombedarf der CDNs. Ausserdem beschränkt sich der Wert auf die Nutzungsphase und entspricht somit der Systemgrenze der vorliegenden Arbeit. Davon ausgehend wird der Energieverbrauch für einen einzelnen Videostream mit der folgenden Gleichung berechnet.

$$\begin{aligned} E_{RZ} &= I_{RZ} * D \\ &= 0.0013 \text{ kWh} * D \end{aligned} \tag{2}$$

E_{RZ} ist der Energieverbrauch der Rechenzentren, I_{RZ} ist die Energieintensität der Rechenzentren (in kWh/h) und D ist die Streamingdauer.

Kapitel 5

Kommunikationsnetze

Die Telekommunikationsnetze dienen zur Übertragung der Videodaten von den Rechenzentren zu den Endgeräten. Wie bereits bei den Rechenzentren liegen auch bei den Telekommunikationsnetzen die publizierten Schätzungen verschiedener Studien zum Teil weit auseinander. Das Netz besteht aus dem Weitverkehrsnetz (WAN) und den Zugangsnetzen. Das WAN besteht grösstenteils aus Glasfaserkabeln (sowohl an Land als auch unter Wasser) und grossen Internet-Routern, die die Datenübertragungswege des Internets bilden (Coroama, 2021). Die Daten erreichen die Endnutzer mit dem Zugangsnetz. Ursprünglich waren Zugangsnetze ausschliesslich Festnetze (FANs), was bedeutet, dass ein Kabel (Kupferkabel oder zunehmend Glasfaserkabel) bis in die Wohnungen der Nutzer reicht, in dem es dann eine drahtlose WiFi-Komponente geben kann. Mittlerweile wird vermehrt das Mobilfunknetz genutzt. Dieses besteht aus einer Basisstationen (BS) oder Funk-Basisstationen (RBS), die mehrere Arten von Geräten enthält, um die Verbindung der BS mit dem Kernnetz zu ermöglichen (Coroama, 2021). Ausserdem ist beim Mobilfunknetz kein spezielles Gerät erforderlich, um die Endgeräte mit der Basisstation zu verbinden, da die drahtlosen Kommunikationsmodule in die Endgeräte eingebaut sind (Coroama, 2021).

Basierend auf Coroama (2021) wird angenommen, dass der gesamte Datenverkehr, der über das WAN übertragen wird, entweder über das Festnetz oder das Mobilfunknetz zugestellt wird. Demnach kann der Energieverbrauch des gesamten Internets wie folgt berechnet werden:

$$E_{Internet} = E_{WAN} + E_{FAN} + E_{RAN} \quad (3)$$

wobei $E_{Internet}$, E_{WAN} , E_{FAN} und E_{RAN} die Gesamtenergie des Internets, WANs, FANs (Festnetz) und des RANs (Mobilfunknetz) sind.

5.1 Weitverkehrsnetz

Beim Weitverkehrsnetz wird in der Literatur manchmal zwischen Kern-, Metro- und Edgenetzen (Baliga et al. 2009; 2011) oder Kern- und Metronetzen (Coroama et al. 2015; Schien et al. 2015) unterschieden. Eine solche Unterscheidung ist weniger relevant für den Umfang dieser Arbeit, weshalb das simple Modell des Weitverkehrsnetzes (WAN) nach Coroama (2021) verwendet wird. Das Wan wird demnach als ein Netz definiert, das sich über eine Region, ein Land oder den gesamten Globus erstreckt und somit die Datenübertragung des Internets bildet.

5.1.1 Energieeffizienz

Grundsätzlich ist das WAN energieeffizienter als die beiden Zugangsnetze (Coroama, 2021). Ausserdem wird die Energieeffizienz kontinuierlich erhöht. Nach Aslan, Mayers, Koomey und France (2017) ist die Energieintensität des Kernnetzes alleine von 2012 bis 2015 um den Faktor 10 zurückgegangen. Nach Coroama (2021) wird insbesondere beim Videostreaming in Zukunft vermehrt auf CDNs gesetzt. Dies wird zu einer weiteren Steigerung der Energieeffizienz (und damit zur Verringerung der Energieintensität) des WAN beitragen, welches für einen zunehmenden Teil des Verkehrs nur noch aus wenigen Edge- und Metro-Routern bestehen wird. Der Transport im modernen WAN erfolgt fast ausschliesslich auf optischem Weg, ältere Netze sind jedoch in vielen Ländern noch in Betrieb, einschliesslich der Backhaul- und Metrobereiche für herkömmliche PSTN-Telefonleitungen (Anson, Ryan Smith, 2019). Diese Netze sind für einen grossen Teil des Gesamtenergieverbrauchs des WAN verantwortlich. Es lassen sich noch weitere Energieeinsparungen durch technologische Fortschritte erzielen, am effektivsten für das WAN wäre es jedoch, weitflächiger auf die bereits bestehenden, modernen Lösungen der nächsten Generation umzustellen (Anson, Ryan & Smith, 2019).

5.1.2 Energieverbrauch

Die Studie von Aslan et al. (2018) spiegelt den aktuellen Stand der akademischen Forschung über die Energieintensität des WAN (Coroama, 2021). Die Extrapolation der exponentiellen Trends der Vergangenheit (bis 2017) ergibt demnach einen Wert von etwa 0.007 kWh/GB (Coroama, 2021). Basierend darauf wird für einen Videostream der Energieverbrauch im Weitverkehrsnetz mit der folgenden Gleichung berechnet:

$$\begin{aligned} E_{WAN} &= I_{WAN} * D * R \\ &= 0.007 \text{ kWh} * D * R \end{aligned} \tag{4}$$

wobei E_{WAN} und I_{WAN} der Energieverbrauch und die Energieintensität des WAN sind.

5.2 Zugangsnetze

Das Zugangsnetz verbindet die einzelnen Haushalte und Büros mit dem WAN (Anson, Ryan Smith, 2019). Bei mobilen Geräten wird vermehrt das Mobilfunknetz (RAN) genutzt und in Gebäuden erfolgt die Verbindung in der Regel über das Festnetz (FAN) mit bestehenden Kupfer- oder Glasfaserkabeln. Aktuell wird in den meisten Fällen davon ausgegangen, dass sich der gesamte Energiebedarf der Zugangsnetze etwa zur Hälfte auf das Mobilfunknetz und das Festnetz aufteilen (Bieser et al., 2020).

5.2.1 Festnetz

Beim Festnetz kann eine Unterscheidung zwischen dem Glasfaser- und dem Kupfernetz vorgenommen werden. Beim Kupferkabel handelt es sich um die herkömmliche Technologie des elektrischen Signalleiters. Diese wurde aufgrund von diversen Nachteilen, wie beispielsweise dem Signalverlust und der reduzierten Bandbreite, überwiegend durch Glasfaser-Kabel ersetzt. Die Glasfasertechnologie basiert auf optischer Basis. Es werden Lichtwellen mittels LED oder Laser in eine Glasfaser geleitet, welche diese nicht mehr verlassen können. Dadurch kann die Frequenz und die digitale Durchsatzrate gesteigert werden (Fischer Hofer, 2011).

Energieeffizienz

Es ist davon auszugehen, dass der Energieverbrauch pro übertragenem GB in Zugangsnetzen stetig sinkt, hauptsächlich durch höhere Bandbreiten und eine höhere Datenübertragungsrate (Montevecchi, Hintemann, 2020). Die Technik, die massgebend dazu beiträgt, ist das elektrooptische System (Glasfasernetz). Nach Gröger et al. (2020) ist die höhere Energieeffizienz dieser Technologie in der Realität aber nicht immer spürbar. Das Potenzial wird erst bei einer hohen Auslastung des Netzanschlusses, zum Beispiel bei Datenströmen deutlich über 150 Mbps, ausgeschöpft. Dennoch ist die Glasfasertechnik über weite Strecken klar im Vorteil, da das Signal auch dann noch verlustarm übertragen werden kann (Gröger et al., 2020). Wie bei den Rechenzentren hat die Netztechnik auch durch neue Modulations- und Kodierungsverfahren, Virtualisierung und andere softwarebasierte Verfahren erhebliche Energieeinsparpotentiale (Gröger et al., 2020). Beim Festnetzzugang wird der Grossteil des Energieverbrauchs jedoch von den Routern der Endnutzer verursacht (Montevecchi, Hintemann, 2020). Diese werden nicht von allen Streamingnutzern geteilt, weshalb der Stromverbrauch vollständig dem individuellen Nutzer zugewiesen werden kann. Aus diesem Grund werden die Geräte (Englisch: Customer Premises Equipment, CPE) in einigen Studien auch zu den Endgeräten gezählt oder isoliert betrachtet (Stephens et al., 2021). Nach Coroama (2021) handelt es sich jedoch um Geräte, die für die

Bereitstellung des Internets verwendet werden und somit semantisch Teil des Festnetzes sind. Ausserdem wird mit dem Inkludieren der CPEs verhindert, dass die Resultate zum Nachteil der RANs verzerrt werden.

Energieverbrauch

Zu den CPEs, die für den Festnetzzugang benötigt werden, gehören traditionell ein Modem und/oder ein Router. Es können aber auch Repeater oder andere spezielle Netzwerkgeräte zum Einsatz kommen. Die verwendete Energieintensität für das Festnetz beträgt 0.0150 kWh/GB basierend auf Wu, Ryan und Smith (2019, zitiert nach Coroama, 2021). Eine approximative Top-Down Berechnung von Coroama (2021) bestätigt diesen Wert für das Jahr 2020. Der Energieverbrauch für die Übertragung im Festnetz wird demnach mit der folgenden Gleichungen für einen einzelnen Videostream berechnet.

$$\begin{aligned} E_{FAN} &= I_{FAN} * D * R \\ &= 0.015 \text{ kWh} * D * R \end{aligned} \tag{5}$$

E_{FAN} ist der Energieverbrauch des Festnetzes und I_{FAN} die Energieintensität der Festnetzübertragung.

5.2.2 Mobilfunknetz

Das Mobilfunknetz entwickelt sich seit einiger Zeit rasant weiter. Mit der fünften Mobilfunkgeneration 5G (LTE) wird mittlerweile eine hohe Datenrate, kurze Latenzzeit und gute Skalierbarkeit geboten (Gröger et al., 2020).

Energieeffizienz

Der Performance-Gewinn der fortschrittlichen Technik erhöht nicht zwingend den Energiebedarf. Nach Gröger et al. (2020) ist sogar das Gegenteil der Fall - der Energiebedarf pro übertragener GB sinkt. So kann innerhalb des RAN die verbrauchte Energie durch hohe Datenübertragungsraten verbessert werden, sodass bei vergleichbarem Stromverbrauch mehr Daten von einem einzigen Sender übertragen werden können (Montevecchi, Hintemann, 2020). Das 4G-Netz braucht in etwa drei- bis viermal soviel Energie wie die moderne 5G-Technik (Wu, 2020 zitiert nach Coroama, 2021; Gröger et al., 2020) und die alten 3G-Netze benötigen sogar mehr als 20-mal soviel Energie und sind somit für hochbitratige Datenübertragungen ungeeignet (Gröger et al., 2020). Der Mobilfunk hat aufgrund der komplexeren Dämpfungscharakteristik

insgesamt einen höheren Energiebedarf als kabelgebundene Anschlüsse, wenn der Energiebedarf der CPEs nicht miteinbezogen wird (Gröger et al., 2020).

Energieverbrauch

Da der Energieverbrauch des Mobilfunknetzes stark von der verwendeten Technologie abhängig ist, soll im Rahmen dieser Arbeit eine Differenzierung der verschiedenen Netzwerktechnologien vorgenommen werden. Es wurden zwei Studien identifiziert, die eine solche Differenzierung für das Jahr 2020 vornehmen. Die erste Studie von Gröger et al. (2020) basiert auf einem Modell, welches einen anteiligen Energiebedarf des Netzes zu einem bestimmten Zeitpunkt und über einen bestimmten Transportweg abbildet. Es wurden dabei die, durch den Datenstrom verursachten, Leistungsaufnahmen der verschiedenen Netzwerke identifiziert. Diese Werte sind nicht direkt auf die Datenmenge beziehbar und daher für die Methodik der vorliegenden Arbeit nicht geeignet. Aus diesem Grund wird auf den Resultaten der zweiten Studie von Wu, Ryan, and Smith (2019) aufgebaut, welche eine Systemgrenze definiert, die mit der vorliegenden Studie kompatibel ist. Es wird diesbezüglich eine Energieintensität von 0.022 kWh/GB für das 5G- und 0.073 kWh/GB für das 4G-Netz angenommen (zitiert nach Coroama, 2021). Da für das 3G Netz keine quantitativen Daten verfügbar sind, wird basierend auf Gröger et al. (2020) angenommen, dass das 3G-Netz 20-mal soviel Energie benötigt wie das 5G-Netz. Dies ergibt eine Energieintensität von rund 0.440 kWh/GB. Der Energieverbrauch für die Übertragung im Mobilfunknetz wird demnach mit den folgenden Gleichungen für einen einzelnen Videostream berechnet.

$$\begin{aligned} E_{5G} &= I_{5G} * D * R \\ &= 0.022 \text{ kWh} * D * R \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} E_{4G} &= I_{4G} * D * R \\ &= 0.073 \text{ kWh} * D * R \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} E_{3G} &= I_{3G} * D * R \\ &= 0.440 \text{ kWh} * D * R \end{aligned} \quad (8)$$

E_{5G} , E_{4G} und E_{3G} sind die Energieverbräuche des 5G, 4G und 3G Mobilfunknetzes. I_{5G} , I_{4G} und I_{3G} sind die Energieintensitäten des 5G, 4G und 3G Netzes.

Kapitel 6

Endgeräte

Benutzergeräte sind für die meisten Emissionen des IKT-Sektors verantwortlich, wobei Desktop Computer und Notebooks den grössten Teil beisteuern (Malmudin, 2020). Nach Cisco (2020) wird die Zahl der an IP-Netze angeschlossenen Geräte bis 2023 mehr als dreimal so hoch sein wie die Weltbevölkerung. Für das Videostreaming relativieren sich die Emissionen der Netzwerke und Rechenzentren auf dem Nutzer-Level aufgrund der Aufteilung des Energieverbrauchs auf eine grosse Anzahl von Nutzern (Stephens et al., 2021). Der Stromverbrauch der Endgeräte unterliegt hingegen vollumfänglich dem individuellen Nutzer.

Es zeigt sich, dass die Wahl des Endgerätes auch vom Streamingdienst abhängig ist. Netflix Filme werden zu 70 % auf Fernsehgeräten geschaut, wohingegen der Streamingdienst TikTok zu 90 % auf Android Smartphones genutzt wird. Diese Wahl kann den Stromverbrauch und damit die CO₂-Emissionen erheblich beeinflussen.

6.1 Energieeffizienz

Geräte verfügen in der Regel über ein internes Energiemanagement, um den Stromverbrauch in Zeiten geringer Nutzung automatisch zu senken. Obwohl Endgeräte energieeffizient sind, machen sie aufgrund ihrer kurzen Lebensdauer und der Energieintensität ihrer Produktion einen grossen Teil des CO₂-Fussabdrucks der IKT aus (Marks, 2021). Generell hat sich die Energieeffizienz von Endgeräten durch eine Mischung aus technologischen Verbesserungen und einem Wandel hin zu kleineren Geräten (z.B. Laptops, Tablets und Smartphones) in den letzten Jahren erheblich verbessert (Stephens et al., 2021).

6.2 Energieverbrauch

Es gibt eine grosse Anzahl an Geräten, die für das Videostreaming benutzt werden können. Diese unterscheiden sich teilweise erheblich im Energieverbrauch. Die Gleichung für die Berechnung des Energieverbrauchs eines einzelnen Videostreams stellt sich wie folgt zusammen:

$$E_{EG} = L_{EG} * D \quad (9)$$

E_{EG} ist der Energieverbrauch des Endgeräts und L_{EG} die Leistungsaufnahme (pro Stunde) des Endgeräts. Bei den Endgeräten ist der Stromverbrauch nicht abhängig von der Übertragungsrate, weshalb hier lediglich die Leistungsaufnahme mit der Streamingdauer multipliziert wird.

Fernsehgeräte

Nach Urban, Roth, Singh und Howes (2017) machen Fernsehgeräte seit 2006 den grössten Anteil am Gesamtenergieverbrauch der Unterhaltungselektronik aus, wobei dieser Trend mittlerweile abnimmt. Gleichzeitig ist auch die durchschnittliche Leistungsaufnahme und damit der Energieverbrauch pro Gerät gesunken, vor allem weil ältere Röhrenfernseher durch neuere, effizientere Bildschirme ersetzt wurden (Urban et al., 2017). Für die Fernsehgeräte kann eine Unterscheidung zwischen normalen Fernsehgeräten und Smart-TVs vorgenommen werden. Bei der Verwendung von normalen Fernsehgeräten werden für das Streaming zusätzliche Peripheriegeräte benötigt, welche ebenfalls Strom verbrauchen. Zu diesen Geräten gehören beispielsweise Set-Top-Boxen oder Gaming-Konsolen (The Carbon Trust, 2021; Kamiya, 2020). Im Rahmen dieser Arbeit wird, basierend auf Urban et al. (2017), ein durchschnittliches Fernsehgerät mit einer Leistungsaufnahme von 74 W bilanziert. Ausserdem wird für Set Top-Boxen ein Durchschnittswert von 18 W bestimmt und für Gaming Konsolen 89 W, was der Leistungsaufnahme einer Sony PlayStation 4 entspricht (The Carbon Trust, 2021).

Desktop Computer

Die Schätzungen für den aktiven Stromverbrauch von Desktop Computern erhöhte sich um etwa 15 % von 2013 bis 2017 (Urban et al., 2017). Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich durch die höhere Rechenleistung der Computer und die höhere Auflösung der Monitore der Energiebedarf erhöht hat. Zugleich hat sich jedoch auch die Energieeffizienz im Laufe der Zeit verbessert. Infolgedessen verbrauchen neuere Computer und Monitore in der Regel mehr Energie, wenn sie aktiv sind, aber weniger Energie im Energiesparmodus (Bray, 2006). Für das Video-Streaming wird jedoch ausschliesslich der Energieverbrauch während der Nutzung betrachtet. Nach Ur-

ban et al. (2017) entspricht dies einer durchschnittlichen Leistungsaufnahme von 85W für den Desktop Computer und 30W für den Monitor.

Notebooks

Notebooks sind ebenfalls beliebte Streaming-Geräte. Im Vergleich zum Desktop Computer werden beim Notebook keine weiteren Peripheriegeräte (ausschliesslich der Netzwerkgeräte) benötigt. Ausserdem sind Notebooks gegenüber dem Desktop Computer darauf ausgelegt, lange ohne eine Stromversorgung auszukommen (Dehli, 2020). Aus diesem Grund sind sie wesentlich energieeffizienter. Im Rahmen dieser Arbeit wird basierend auf Urban et al. (2017) das Notebook mit einer durchschnittlichen Leistungsaufnahme von 22W bilanziert.

Tablets

Tablets sind eine beliebte Alternative zu herkömmlichen Computern, da sie in der Regel kleiner, leichter und energieeffizienter sind. Im Gegensatz zu den Notebooks und Desktop Computern können bestimmte Tablets auch mit dem Mobilfunknetz genutzt werden. Diese Eigenschaften machen sie ideal für die mobile Nutzung. Dennoch werden Tablets nach Suski, Pohl und Frick (2020) am wenigsten häufig für das Streaming verwendet. Der Stromverbrauch für Tablets setzt sich ähnlich wie bei einem Notebook zusammen. Es werden erneut keine Peripheriegeräte benötigt und aufgrund des durchschnittlich kleineren Displays ist der Energieaufwand noch geringer. Es wird im Rahmen dieser Arbeit eine Leistungsaufnahme von 7W für Tablets verwendet (Suski, Pohl und Frick, 2020).

Smartphones

Smartphones wurden in den letzten Jahren immer effizienter. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Bildschirme immer grösser werden und eine höhere Auflösung besitzen, was aufgrund der annähernd gleichbleibenden Akkus eine bessere Energie-Effizienz fordert. Um das Streaming Erlebnis zu verbessern werden verschiedene Verfahren wie algorithmisches Prefetching eingesetzt. Dies bietet erhebliche Verbesserungen der Performance, reduziert den Akkuverbrauch und senkt die Kosten für die Video-Bereitstellung für Nutzer und Anbieter. Generell ist der Energieverbrauch über das Festnetz (WLAN) geringer als über das Mobilfunknetz (Gaukler, 2020). Der Unterschied ist jedoch gering und wird deshalb im Rahmen dieser Arbeit als vernachlässigbar angesehen. Für die Smartphones wird basierend auf The Carbon Trust (2020) eine durchschnittliche Leistungsaufnahme von 1W verwendet. Dieser Wert basiert auf der Annahme von einem ungefähr 11 Wh grossen Akku mit einer 10-stündigen Akkulaufzeit beim Videostreamen.

Kapitel 7

Resultate

Dieser Abschnitt setzt sich mit den Ergebnissen des Energieverbrauchs und der CO₂-Emissionen eines Videostreams zusammen. Basierend auf den Annahmen in Tabelle 2 werden verschiedene Streaming-Szenarien behandelt und die wichtigsten Faktoren für die Auswirkungen auf den CO₂-Ausstoss identifiziert.

Tabelle 2

Zusammenfassung der Annahmen für den Energieverbrauch

Systemkomponente	Annahmen für den Energieverbrauch
Rechenzentrum	$E_{RZ} = I_{RZ} * D$ $I_{RZ,2020} = 0.0013 \text{ kWh/h}$
Kommunikationsnetze	$E_{Internet} = E_{WAN} + E_{FAN} + E_{RAN}$
Weitverkehrsnetz	$E_{WAN} = I_{WAN} * D * R$ $I_{WAN,2020} = 0.0070 \text{ kWh/GB}$
Festnetz	$E_{FAN} = I_{FAN} * D * R$ $I_{FAN,2020} = 0.0150 \text{ kWh/GB}$
Mobilfunknetz	$E_{RAN} = I_{RAN} * D * R$
<i>Fortsetzung nächste Seite</i>	

	$I_{5G,2020} = 0.0220 \text{ kWh/GB}$
	$I_{4G,2020} = 0.0730 \text{ kWh/GB}$
	$I_{3G,2020} = 0.4400 \text{ kWh/GB}$

Endgeräte	$E_{EG} = L_{EG} * D$
Fernsehgerät	$L_{TV} = 0.074 \text{ kW}$
Set-Top Box	$L_{STB} = 0.018 \text{ kW}$
Gaming Konsole	$L_{GK} = 0.089 \text{ kW}$
Desktop Computer	$L_{PC} = 0.115 \text{ kW}$
Notebook	$L_{NB} = 0.022 \text{ kW}$
Tablet	$L_T = 0.007 \text{ kW}$
Smartphone	$L_S = 0.001 \text{ kW}$

Insgesamt ist der Energieverbrauch eines Videostreams gleich der Summe des Energieverbrauchs der verschiedenen Systemkomponenten, wie in Gleichung 8 dargestellt. Die CO₂-Emissionen werden durch Anwendung eines Emissionsfaktors für den länderspezifischen Strommix berechnet, wie in Gleichung 9 dargestellt.

$$E_V = E_{RZ} + E_{Internet} + E_{EG} \quad (10)$$

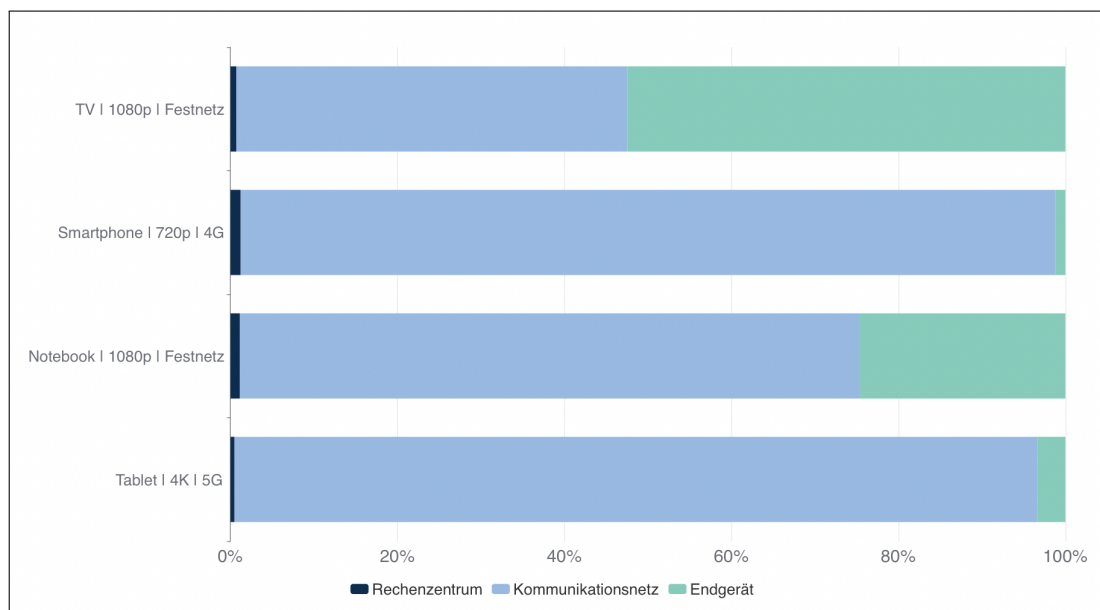
$$THG_V = E_V * SM_L \quad (11)$$

E_V ist der Energieverbrauch eines Videostreams, THG_V die dadurch verursachten CO₂-Emissionen. Diese sind abhängig von einem (länder-)spezifischen Strommix, welcher durch SM_L gekennzeichnet ist.

Die Berechnung verschiedener Streamingszenarien macht deutlich, dass die Kommunikationsnetze im Durchschnitt für den grössten Teil des Energieaufwands verantwortlich sind, gefolgt von den Endgeräten. Insbesondere beim Streamen im Mobilfunknetz ist der Anteil der Netzwerke hoch, da die dafür verwendeten Endgeräte (Smartphones und Tablets) einen kleinen Energieverbrauch aufweisen und das Mobilfunknetz im Vergleich zum Festnetz weniger energieeffizient

ist. Ausgehend davon, dass Videos zu 70 % auf Fernsehgeräten gestreamt werden und davon 96 % in einer Full-HD-Auflösung (Stephens et al., 2021), werden die Parameter TV, 1080p und Festnetz als Referenzwerte bestimmt. In diesem Fall ist das Endgerät für 52 %, das Kommunikationsnetz für 47 % und das Rechenzentrum für 1 % des gesamten Energieaufwands verantwortlich.

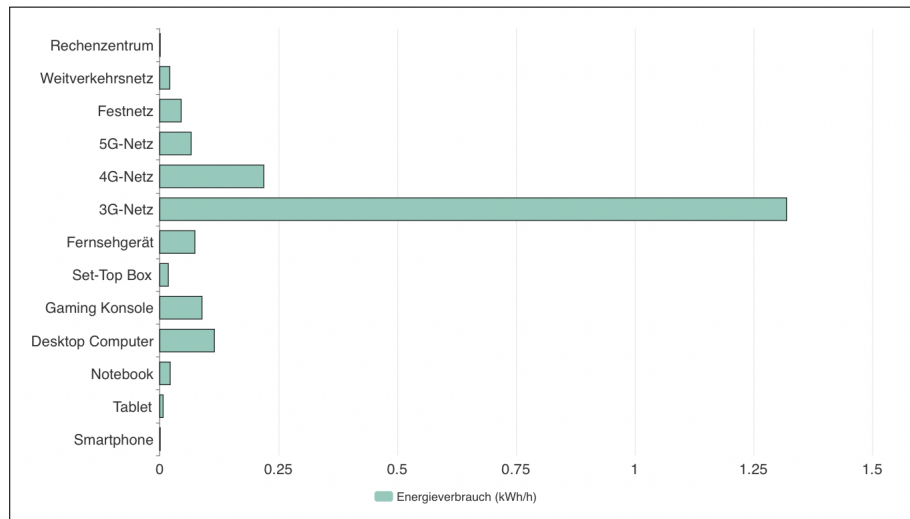
Abbildung 3. Anteil der Systemkomponenten am gesamten Energieverbrauch eines Videostreams



Quelle: Eigene Darstellung

Bemerkenswert ist die Variabilität der Ergebnisse, die auf die Wahl der technischen Parameter zurückzuführen ist. Ausgehend vom weltweiten Strommix erstreckt sich die Bandbreite der Ergebnisse von 14.6 g CO₂e bis 1.5 kg CO₂e für eine Stunde Videostreaming. Am meisten Energie benötigt dabei das veraltete 3G-Netz, was bestätigt, dass diese Generation nicht für hochbitratige Internetdienste geeignet ist. Für ein Video in einer 4K-Auflösung benötigt das Netz alleine 1.320 kWh. Ebenfalls essenziell ist die Wahl des Streaminggeräts. Im Vergleich zu einem Smartphone benötigt ein Fernseher mit Gaming Konsole als Peripheriegerät mehr als hundertmal so viel Energie. Die einzige Konstante, die von den technischen Parametern nicht beeinflusst wird, ist das Rechenzentrum, das mit 0.001 kWh stets den kleinsten Teil zum Energieverbrauch beisteuert.

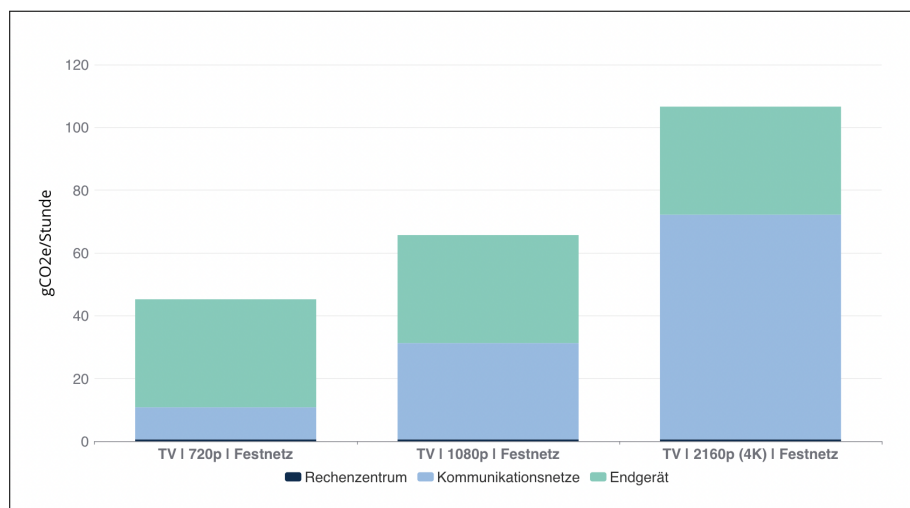
Abbildung 4. Energieverbrauch eines Full-HD-Videostreams pro Stunde



Quelle: Eigene Darstellung

Abgesehen von der gewählten Mobilfunktechnologie, besteht für die Netzwerke auch eine Abhängigkeit zu der Videoauflösung. In Abbildung 4 ist zu sehen, dass die CO₂e-Emissionen eines 4K-Videos im Vergleich zu einem SD-Video (720p) mehr als doppelt so hoch sind.

Abbildung 5. CO₂-Emissionen für unterschiedliche Auflösungen



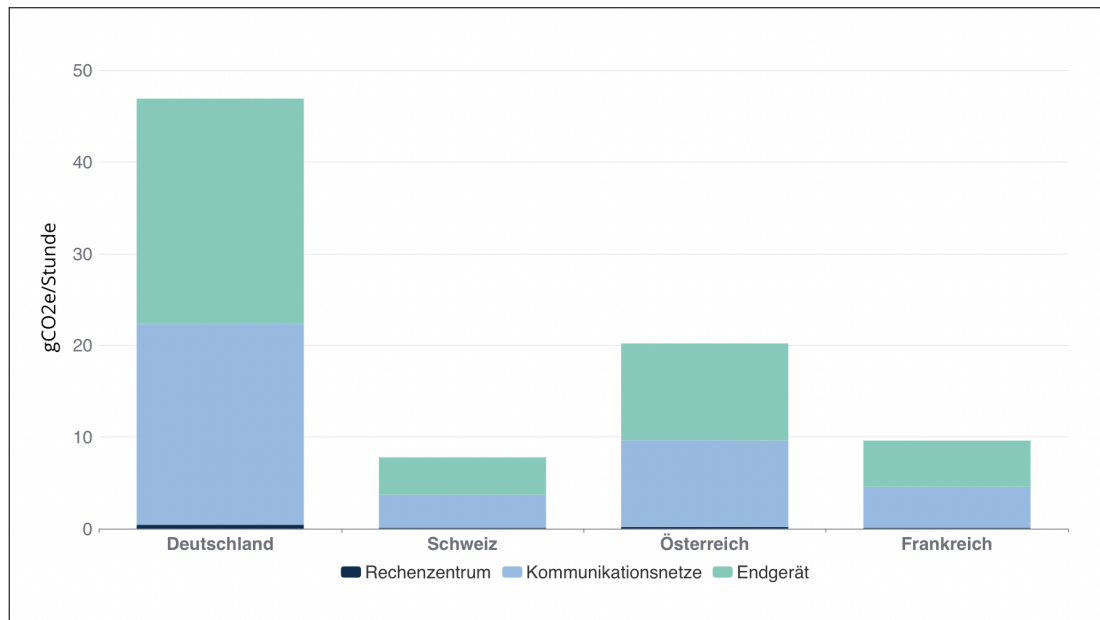
Quelle: Eigene Darstellung

Für das Referenzszenario mit einer Full-HD-Auflösung belaufen sich die Umweltauswirkungen auf 66 g CO₂e, was einem Stromverbrauch von 0.14kWh gleichkommt. Um die Grössenordnung der Treibhausgasemissionen in einen Kontext zu setzen, wird der Wert von 66 Gramm CO₂-Äquivalent pro Stunde Videostream in einem anderen Massstab ausgedrückt. Umgerechnet auf die Personenkilometer mit einem PKW nach Gröger et al. (2021) (143 g CO₂e/km) entsprechen die Emissionen einer Autofahrt von rund 460 Metern.

Wie bereits von Stephens et al. (2021) identifiziert wurde, hat zuletzt auch der geographische Standort des Videostreaming-Konsums einen entscheidenden Einfluss auf die berechnete Kohlenstoffbelastung. Da die CO₂-Emissionen mit einem länderspezifischen Strommix berechnet werden, können die Ergebnisse von Land zu Land erhebliche Unterschiede aufweisen. Abbildung 4 zeigt die CO₂-Emissionen einer Stunde Videostreaming in unterschiedlichen Ländern. Für die technischen Parameter wurde das Referenzszenario mit Fernsehgerät, Festnetzverbindung und einer Full-HD-Auflösung gewählt. Es zeigt sich, dass die Schweiz mit 7.77 g CO₂e einen deutlich niedrigeren CO₂-Austoss als beispielsweise Deutschland mit 46.91 g CO₂e aufweist.

Abbildung 6. CO₂-Emissionen einer Stunde Videostreaming in verschiedenen Ländern

(TV | 1080p | Festnetz)



Quelle: Eigene Darstellung

Kapitel 8

CO₂-Rechner

Es konnte gezeigt werden, dass die technischen Parameter den Energieverbrauch und damit die CO₂-Emissionen eines Videostreams massgebend beeinflussen. Eine Analyse bisheriger Publikationen bestätigt, dass die Auswahl verschiedener Parameter teilweise zu irreführenden Ergebnissen führt und das Vergleichen historischer Schätzungen erschwert. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es deshalb, die Resultate in Form einer Webapplikation zur Verfügung zu stellen, bei der die technischen und geographischen Parameter vom Nutzer definiert werden können. Dadurch werden die Ergebnisse transparent dargestellt und der Einfluss der verschiedenen Faktoren kann einfacher visualisiert werden.

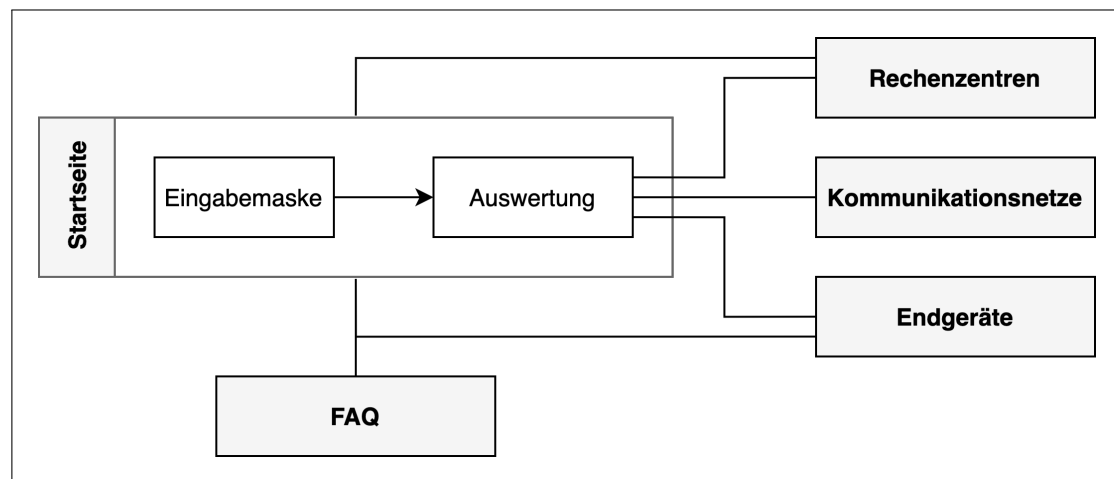
8.1 Konzept

Die Applikation soll eine einfache Bedienbarkeit aufweisen, sodass auch Nutzer ohne Vorkenntnisse in der Materie die Ergebnisse verstehen und interpretieren können. Dafür soll die Applikation eine Eingabemaske bereitstellen, in der die Nutzer die technischen und geographischen Parameter für einen Videostream einstellen können. Die Maske soll die relevantesten Einflussgrössen abdecken und dennoch benutzerfreundlich sein. Dafür wurden die folgenden Parameter bestimmt:

- Land
- Streaminggerät
- Auflösung
- Netzwerkverbindung
- Streamingdauer

Nach Eingabe aller Parameter sollen die Nutzer über den Energieverbrauch und die resultierenden CO₂-Emissionen des gewählten Videostreams informiert werden. Den Nutzern soll es danach jederzeit möglich sein, die Parameter anzupassen und direktes Feedback zu den neuen Einstellungen zu erhalten. Sowohl die Eingabemaske, als auch die Auswertung sollen daher auf der Startseite der Webapplikation stattfinden. Dadurch ist keine Rücknavigation nötig und die Ergebnisse können transparent den entsprechenden Parametern zugeordnet werden. Zusätzlich zur Startseite soll es für jede Systemkomponente (Rechenzentren, Kommunikationsnetze und Endgeräte) eine Übersichtsseite geben, in der die Nutzer mehr darüber erfahren können, wie die CO₂-Emissionen zustande kommen. Zuletzt werden häufig gestellte Fragen in einer FAQ-Seite beantwortet, in der mehr auf die Berechnungen und die inhärenten Limitationen eingegangen wird. Abbildung 5 zeigt den gesamten Aufbau der Webapplikation mit allen Navigationsmöglichkeiten.

Abbildung 7. Aufbau der Webapplikation mit Navigationsmöglichkeiten



Quelle: Eigene Darstellung

8.2 Design

Für eine gelungene Webapplikation sollte sowohl das UI- als auch das UX-Design gleichermaßen berücksichtigt werden. UI konzentriert sich auf das Erscheinungsbild wie z.B. die Schriftarten, Farben und Schaltflächen, während sich UX darauf fokussiert, ein positives Nutzungserlebnis zu bieten. (Canziba, 2018). Für das UI-Design wurde auf ein minimalistisches Designparadigma gesetzt, um die bedeutenden Abschnitte hervorzuheben und visuelle Interferenzen zu reduzieren (Dong, 2019). Es wurde dafür ein stimmiges Farbkonzept definiert, das sich an ei-

nem schwachen Grünton orientiert. Diese Wahl stützt sich auf eine Studie von Lim, Baek, Yoon, and Kim (2020), in der Grün als ein peripherer Hinweis auf Umweltfreundlichkeit identifiziert wurde. Damit werden die Anforderungen an die Harmonie und Einheitlichkeit der Benutzeroberfläche nach Dong (2019) berücksichtigt und gleichermassen wird die umweltbasierte Auslegung der Webapplikation kommuniziert.

Für den UX-Aspekt des Designs wird auf ein, nach Gestalt-Prinzipien strukturiertes, Layout gesetzt. Die Gestalttheorie wurde eingeführt in einer Arbeit von Wertheimer (1922) und versucht, die Art und Weise zu erklären, wie Menschen Muster wahrnehmen und erkennen (Chang, Nesbitt, & Wilkins, 2007). Unter Berücksichtigung der Figur-Grund-Relation und dem Gesetz der Nähe wurde die Benutzeroberfläche so gestaltet, dass die Nutzer sich schnell zurechtfinden und die Funktionen intuitiv erfassen können.

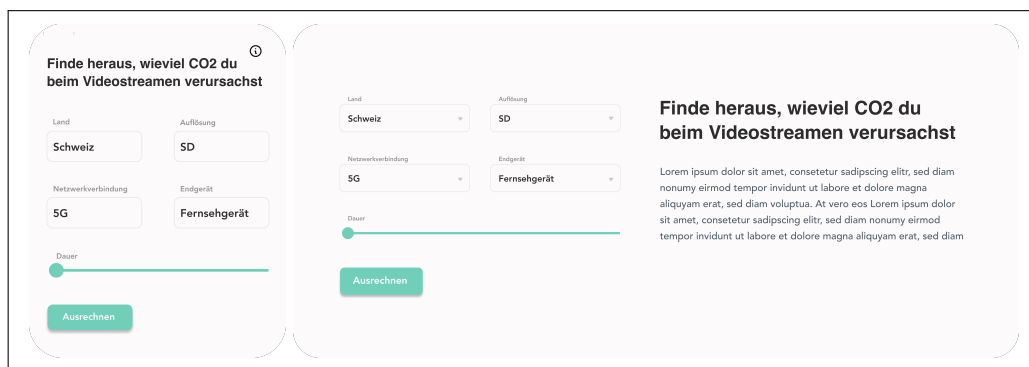
Abbildung 8. Layout der Eingabemaske strukturiert nach Gestalt-Prinzipien

Quelle: Eigene Darstellung

In Abbildung 6 wird der Fokus nach dem Prinzip der Figur-Grund-Regel intuitiv auf den Inhalt in den weissen Vordergrundbereichen geleitet. Darin sorgt die Nähe zusammengehörender Elemente für eine wahrgenommene Gruppierung.

Da es sich um eine Webapplikation handelt, ist es bedeutend, dass auch Nutzer mit unterschiedlichen Endgeräten (Desktop, Smartphone, Tablet) eine gute User-Experience haben. Daher soll die Webapplikation so optimiert sein, dass sie auf unterschiedlichen Endgeräten gleichermassen komfortabel benutzt werden kann. Es gilt dabei, dem mobilen Ansatz («mobile first») zu folgen. Das gesamte Nutzerinterface wurde demnach initial für einen kleinen Smartphone-Bildschirm entwickelt. Dabei wurden flexible Komponenten eingesetzt, die sich bei einer grösseren Bildschirmgröße fließend umverteilen und ausbreiten können. Abbildung 6 zeigt einen Figma Entwurf der Eingabemaske mit flexiblen Designkomponenten.

Abbildung 9. Figma Design der Eingabemaske für Smartphone- und Desktop-Bildschirme



Quelle: Eigene Darstellung

Ein elementarer Aspekt der entwickelten Webapplikation ist die Darstellung der Ergebnisse. Diese sollen so aufbereitet sein, dass sie einfach verständlich und visuell ansprechend sind. Es wurde dazu die Darstellung mithilfe eines gestapelten Balkendiagramms gewählt. Das Diagramm setzt sich aus den drei Systemkomponenten zusammen und kann dadurch die Komposition des Energieverbrauchs und der CO₂-Emissionen visuell darstellen. Zusätzlich wird in einem zweiten Balken jeweils ein Vergleichswert abgebildet. Dieser soll dazu beitragen, die Umweltauswirkungen verständlich und transparent zu gestalten.

8.3 Implementierung

Für die Implementierung der Weboberfläche wurden die gängigen Sprachen JavaScript, CSS und HTML eingesetzt. Dafür baut die Webapplikation auf dem React-Framework Next.js auf. Das Next.js-Framework ist eine Webentwicklungs-Plattform, die auf Node.js basiert und React-

basierte Webanwendungsfunktionen wie Client- und Server-seitiges Rendering ermöglicht. Das statische Rendering auf der Server-Seite bringt den Vorteil, dass die Webseite schneller geladen wird, da sie nicht dynamisch auf dem Client-Gerät generiert werden muss. Die Webapplikation wird auf diese Weise beim initialen Zugriff umgehend bereitgestellt.

Zur Umsetzung des Design-Konzepts wurde das Material-UI Framework verwendet. Dieses stellt React-Komponenten zur Verfügung, die die Material-Designsprache von Google implementieren. Material ist ein anpassungsfähiges System aus Komponenten und Werkzeugen, die die Best Practices für das Design von Benutzeroberflächen unterstützen (Google, n.d.). Mit dem Gestaltungsstil «Flat Design» ist die Designsprache insbesondere für den Minimalismus bekannt. Das vorgegebene Thema des Frameworks wurde mithilfe der ThemeProvider-Komponente in Javascript so angepasst, dass es den definierten UI-Anforderungen entspricht.

Listing 1: JavaScript ThemeProvider Komponente

```
1  import { createTheme } from '@mui/material/styles';
2
3  export const theme = createTheme({
4    palette: {
5      type: 'light',
6      primary: {
7        main: '#70CEB9',
8      },
9      secondary: {
10       main: '#F5F7F6',
11       contrastText: '#111',
12     },
13   },
14   typography: {
15     fontSize: 12,
16     fontFamily: 'Arial',
17   },
18 });
```

Das flexible Design für unterschiedliche Bildschirmgrößen wurde mit der @Media-Regel in CSS erzielt. Es wurden Medienabfragen verwendet, die basierend auf der Breite des Geräts ein massgeschneidertes Stylesheet für Desktops, Laptops, Tablets und Smartphones bereitstellt. Listing 2 zeigt ein Beispiel einer solchen Medienabfrage.

Listing 2: Beispiel einer CSS Medienabfrage

```
1  @media (max-width: 345px) {  
2    .cardWrapper {  
3      grid-template-rows: 1fr;  
4    }  
5    .selectContainer {  
6      grid-template-columns: 1fr;  
7    }  
8  }
```

Softwareprojekte werden ab einem gewissen Funktionsumfang teilweise schwer wartbar, da der zugrunde liegende Programmcode mit wachsendem Umfang komplexer wird. Um die Wartbarkeit zu verbessern, gibt es einige Best Practices, die bei der Entwicklung der Webapplikation befolgt wurden. Dazu gehören eine systematische Modularisierung und Auslagerung von Teilkomponenten, eine aufgeräumte Projektstruktur und eine einheitliche Namenskonvention.

Die Webapplikation wird mit Vercel veröffentlicht und kann online unter <https://streaming-co2-rechner.ch/> abgerufen werden. Vercel ist eine Cloud-Plattform, die administrative Aufgaben der Bereitstellung der Webseite übernimmt und zugleich eine automatische Skalierung und Verwaltung der SSL-Zertifikate unterstützt (WALLIS, 2022). Die Bereitstellung der Webseite erfordert dadurch keine Überwachung, sodass die Webseite in Zukunft wartungsfrei betrieben werden kann.

Kapitel 9

Diskussion

In der vorliegenden Arbeit wurde der Energiebedarf und die CO₂-Emissionen des Videostreamings in Abhängigkeit von technischen und geographischen Parametern untersucht. Ausgehend von einem Basisszenario wurde berechnet, dass im Durchschnitt 66 g CO₂e pro Stunde Videostreaming emittiert werden. Diese Zahl ist mit Vorsicht zu geniessen und nicht dazu bestimmt, als repräsentativer Wert für beliebige Szenarien verwendet zu werden. Die Berechnungen beruhen auf einer Reihe von Parametern, die ein typisches Streamingszenario darstellen. Weitere Einflussgrössen und Szenarien wurden in Kapitel 8 präsentiert und in Form einer Webapplikation bereitgestellt. In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Analyse erörtert und die inhärenten Limitationen diskutiert, die aus den verwendeten Methoden und Annahmen einhergehen.

Es wurde berechnet, dass die Rechenzentren für eine Stunde Videostreaming 0.0013 kWh benötigen. Damit weisen sie, zusammen mit dem Smartphone, den kleinsten Energieverbrauch auf. Das ist darauf zurückzuführen, dass der Energieverbrauch im Rechenzentrum von mehreren Millionen Streamingnutzern geteilt wird und daher nur ein kleiner Bruchteil dem individuellen Nutzer zugerechnet wird. Dieses Ergebnis widerlegt die Resultate von Hintemann and Hinterholzer (2019), Andrae (2020) und The Shift Project (2019), die dem Rechenzentrum einen grösseren Anteil an den CO₂-Emissionen zuordnen. Als Grund wird die Verwendung einer abweichenden Allokationsregel identifiziert. Die genannten Studien beziehen den Energieverbrauch auf die übertragene Datenmenge, während in der vorliegenden Studie nur die Streamingdauer ausschlaggebend ist. Rechenzentren sind 24 Stunden am Tag aktiv und verbrauchen dabei eine beinahe konstante Strommenge, unabhängig von den bereitgestellten Daten. Eine Auswirkung der Verwendung von Energieverbrauchswerten pro Datenmenge ist daher, dass implizit eine sehr lange Standby-Zeit zur tatsächlichen Datennutzungszeit hinzugerechnet wird (Malmodin,

2020). Für das hochbitratige Videostreamen wird der Energieverbrauch unter Verwendung einer solchen Allokationsregel deshalb meist überschätzt. Das ist insbesondere dann der Fall, wenn Durchschnittswerte ausgehend vom weltweiten Stromverbrauch aller Rechenzentren verwendet werden, da Streamingdienste überwiegend energieeffiziente Cloud-Rechenzentren verwenden. Resultate von Stephens et al. (2021), Gröger et al. (2021), Shehabi et al. (2014) und Preist, Schien, and Shabajee (2019) bestätigen diese Erkenntnisse. So schrieben Shehabi et al. (2014, S. 6) bereits für das Jahr 2011: «The nearly negligible relative energy contribution from data centers is due to the large capacity and high utilization of video streaming available from cloud-based IT equipment».

Die Resultate der Studie haben gezeigt, dass ein grosser Teil des Energieaufwands den Kommunikationsnetzen zuzuordnen ist. In Kapitel 3 wurde bereits ausgeführt, dass die Berechnungsgrundlage aufgrund mangelnder quantitativer Daten für die Kommunikationsnetze noch auf der Verwendung von kWh/GB beruht. Für das Videostreamen führt das zu Leistungswerten, die teilweise nicht möglich sind (mehr als 100 W) (Malmodin, 2020). Ausserdem zeigte die Covid-19 Pandemie mit einem signifikanten Anstieg des Datenverkehrs, dass keine direkte Proportionalität von der übertragenen Datenmenge zum Energieverbrauch besteht (Stephens et al., 2021). Telekommunikationsnetzbetreiber berichteten über marginale (weniger als 1 %) Anstiege des Energieverbrauchs trotz einer Erhöhung des Datenverkehrs von bis zu 50 % (GSMA, 2020). Die ausgemachte Abhängigkeit des Stromverbrauchs zur Videoauflösung wird daher durch die verwendete Allokationsregel implizit überschätzt. Auf der Grundlage der neuen Forschungsergebnisse von Malmodin (2020) wird basierend auf der Formel für das 4G-Mobilfunknetz (Malmodin, 2020, S. 94) berechnet, dass der Stromverbrauch des Netzes 0.0046 kWh für eine SD-Auflösung, 0.0114 kWh für eine Full-HD-Auflösung und 0.0250 kWh für eine 4K-Auflösung betragen. Es zeigt sich, dass die Resultate der vorliegenden Studie im Vergleich dazu durchgehend höher sind, was darauf zurückzuführen ist, dass implizit eine Standby-Zeit der Infrastrukturen zur Streamingdauer hinzugerechnet wird. Abgesehen davon wird der Einfluss der Videoauflösung auf den Strombedarf überschätzt. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Wachstum von 700 % von SD auf 4K verzeichnet und auf der Berechnungsgrundlage nach Malmodin (2020) handelt es sich um ein Wachstum von 546%. Beim Festnetz ist die Abhängigkeit von der Datenmenge in der Realität noch geringer, da die CPEs den grössten Teil am Energiebedarf beitragen (Montevocchi, Hintemann, 2020) und nach Malmodin (2020) eine konstante Energiemenge verbrauchen, selbst wenn keine Daten zu senden oder zu verarbeiten sind. Eine Limitation der Arbeit ist demnach eine Überschätzung des Energieverbrauchs der Netzwerke, insbesondere für hochbitratige Videostreams. Daraus ergibt sich weiterer Forschungsbedarf für eine repräsentative Zuweisungsmethode der Netzenergie. Die von Malmodin (2020) vorgebrachte Allokationsre-

gel bietet bereits eine relevante Berechnungsmethode für die Merkmale effizienter europäischer Netze, wie die Berechnungen zum 4G-Netz dieser Arbeit aufzeigen (Stephens et al., 2021). Für die Gegenüberstellung verschiedener technischer Parameter, wie es in der vorliegenden Arbeit und in der Webapplikation gefordert wird, fehlt jedoch eine Aufschlüsselung nach Netzarten, d. h. Festnetz, 3G-, 4G- und 5G-Mobilfunknetz.

Im Vergleich zu den Rechenzentren und Kommunikationsnetzen ist der Energieverbrauch der Endgeräte einfacher zu bestimmen. Daten zu den Leistungsaufnahmen verschiedener Gerätetypen sind meist öffentlich zugänglich und die Allokation der Umweltauswirkungen auf das Videostreaming ist unkompliziert. Diesbezüglich sind auch die Ergebnisse verwandter Studien konsistent und Abweichungen ergeben sich hauptsächlich durch die Betrachtung unterschiedlicher Gerätetypen oder Generationen. Insgesamt zeigen die Resultate der Studie, dass grosse Geräte wie Fernseher und Desktop Computer einen erheblichen Teil zu den Umweltauswirkungen eines Videostreams beitragen können. Durch das Videostreaming auf einem kleineren und energieeffizienteren Gerät wie einem Tablet oder einem Smartphone, lässt sich der Stromverbrauch bedeutend senken. Eine Limitation dieser Arbeit ergibt sich daraus, dass für den Energieverbrauch jeweils nur die Nutzungsphase der Geräte betrachtet wurde. Nach Bieser et al. (2020) liegt der Anteil der Emissionen aus der Herstellung und dem Transport der Geräte oft bei über 50% der Gesamtemissionen. In diesem Zusammenhang wäre es lohnenswert, in zukünftiger Forschung zu untersuchen, wie sich die Betrachtung des gesamten Lebenszyklus der Endgeräte auf die Ergebnisse auswirkt.

Zuletzt wurde der Einfluss des geographischen Standorts auf die Umweltauswirkungen des Videokonsums untersucht. Die Ergebnisse zeigen, wie entscheidend sich ein dekarbonisiertes Stromnetz auf die Emissionen auswirkt. Auch wenn der Energieverbrauch pro Stunde Streaming aufgrund des dezentralen Charakters relativ niedrig ist, hat der Strommix zuletzt einen entscheidenden Einfluss auf die Umweltauswirkungen.

Die Aufbereitung der Ergebnisse in Form einer Webapplikation stellen einen relevanten Mehrwert für den aktuellen Forschungsstand dar. Bisherige Studien richten sich mit politischen und organisatorischen Handlungsempfehlungen überwiegend an die Seite der Produzenten und damit an die Netzinfrastrukturen und Rechenzentren. In der vorliegenden Arbeit wurde identifiziert, dass die Wahl der Endgeräte und der Videoauflösung ebenfalls einen beachtlichen Einfluss auf die Umweltauswirkungen hat. Mithilfe des Streamingrechners können die Endnutzer mehr über diese Einflüsse erfahren und lernen, wie sie ihren Medienkonsum umweltbewusster gestalten können.

Kapitel 10

Fazit und Ausblick

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, anhand technischer und geographischer Parameter die Umweltauswirkungen des Videostreamings zu berechnen. Die ausgemachten Daten wurden in Form eines CO₂-Rechners aufbereitet, welcher online unter <https://streaming-co2-rechner.ch/> abgerufen werden kann. Es handelt sich dabei um ein frei zugängliches, transparentes Modell für die Energie- und CO₂-Analyse des Videokonsums.

Zur Berechnung der Umweltauswirkungen wurde der Energieverbrauch der verschiedenen Systemkomponenten berücksichtigt, die an der Verarbeitung und dem Abspielen der Videoinhalte beteiligt sind: die Rechenzentren (inklusive CDNs), die Kommunikationsnetze (Weitverkehrsnetz und Zugangsnetze) und die Endgeräte. In einer Auseinandersetzung mit aktuellen Studien konnte gezeigt werden, mit welchen Herausforderungen und Unsicherheiten die Abschätzungen zu den Emissionen verbunden sind. Die Ergebnisse der Arbeit sollen die Komplexität und Variabilität bisheriger Forschungsergebnisse transparent machen und Missverständnissen und Fehlinterpretationen entgegenwirken.

Ausgehend von einem Basisszenario wurde berechnet, dass im Durchschnitt 66 g CO₂e pro Stunde Videostreaming emittiert werden. Umgerechnet auf die Personenkilometer mit einem PKW entspricht das einer Autofahrt von rund 460 Metern. Dies zeigt, dass auf individueller Ebene der Fussabdruck von einer Stunde Videostreaming gering ist. Der Wert ist jedoch nicht pauschal für beliebige Streamingszenarien anzuwenden. Wie bei den meisten Bewertungen des CO₂-Fussabdrucks gibt es bei der Schätzung der Umweltauswirkungen des Videostreaming eine inhärente Variabilität, die abhängig von verschiedenen Faktoren zu unterschiedlichen Ergebnissen führt. Mithilfe des CO₂-Rechners können die Faktoren identifiziert werden, die das Ergebnis massgebend beeinflussen. Dabei zeigt sich, dass insbesondere der länderspezifische Emissionsfaktor des Stromnetzes, die Wahl der Netzwerkverbindung und die Videoauflösung von grosser

Relevanz sind.

Abschliessend konnte in der Arbeit gezeigt werden, dass bei der Analyse der Umweltauswirkungen von Videostreaming noch Forschungsbedarf besteht. Ein wichtiger Bereich, den es weiter zu untersuchen gilt, ist die Verwendung angemessener Allokationsregeln. Es wurde identifiziert, dass die Verwendung von Energieverbrauchswerten pro Datenmenge für übertragungsintensive Dienstleistungen wie Streaming nicht geeignet ist. Es besteht insbesondere für die Netzkomponenten des Fussabdrucks eine erhebliche Unsicherheit, da noch wenig quantitative Daten für geeignete Allokationsregeln vorliegen.

Literaturverzeichnis

- Andrae, A. (2020). New perspectives on internet electricity use in 2030. *Engineering and Applied Science Letters*, 3, 19-31. doi: 10.30538/psrp-easl2020.0038
- Andrae, A., & Edler, T. (2015). On global electricity usage of communication technology: trends to 2030. *Challenges*, 6(1), 117–157.
- Aslan, J., Mayers, K., Koomey, J. G., & France, C. (2018). Electricity intensity of internet data transmission: Untangling the estimates. *Journal of Industrial Ecology*, 22(4), 785-798. doi: <https://doi.org/10.1111/jiec.12630>
- Belkhir, L., & Elmeligi, A. (2018). Assessing ict global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations. *Journal of cleaner production*, 177, 448–463.
- Bieser, J., Hintemann, R., Beucker, S., Schramm, S., Hilty, L., Kühn, M., et al. (2020). Klimaschutz durch digitale technologien–chancen und risiken.
- Canziba, E. (2018). *Hands-on ux design for developers: Design, prototype, and implement compelling user experiences from scratch*. Packt Publishing Ltd.
- Chang, D., Nesbitt, K. V., & Wilkins, K. (2007). The gestalt principles of similarity and proximity apply to both the haptic and visual grouping of elements. In *Proceedings of the eight australasian conference on user interface - volume 64* (p. 79–86). AUS: Australian Computer Society, Inc.
- Cisco Global Cloud, I. (2018). Forecast and methodology, 2016–2021 white paper. *Updated: February, 1*.
- Coroama, V. C. (2021). *Investigating the inconsistencies among energy and energy intensity estimates of the internet. metrics and harmonising values*. Bern, Switzerland: Swiss Federal Office of Energy SFOE.
- Coroama, V. C., & Hilty, L. M. (2014). Assessing internet energy intensity: A review of methods and results. *Environmental Impact Assessment Review*, 45, 63-68. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2013.12.004>
- Coroama, V. C., Hintemann, R., Hinterholzer, S., & Arbanowski, S. (2020). Nachhaltigkeit von streaming co. energiebedarf und co2-ausstoß der videonutzung im netz.

- Dong, R. (2019). Minimalist style of ui interface design in the age of self-media. In *Proc. of international conference on information and social science* (pp. 217–221).
- Gaukler, F. (2021). Energie-effizienz von streaming-plattformen und möglichkeiten zur verbesserung. In R. H. Reussner, A. Koziolk, & R. Heinrich (Eds.), *Informatik 2020* (p. 237–249). Gesellschaft für Informatik, Bonn. doi: 10.18420/inf2020_22
- Google. (n.d.). *Design*. <https://material.io/design>. (Abgerufen am: 17. Juli 2022)
- Graze, J. (2022). Technische parameter des videostreamings mit potenzieller relevanz für den energieverbrauch - beitrag zu einem energie- und co2-rechner für videostreaming.
- Gröger, J., Liu, R., Stobbe, L., Druschke, J., & Richter, N. (2021). *Green cloud computing. lebenszyklusbasierte datenerhebung zu umweltwirkungen des cloud computing [abschlussbericht]*. umweltbundesamt.
- Gröger, J., Köhn, M., & Stobbe, L. (2020). *Energie- und ressourceneffizienz digitaler infrastrukturen* (Tech. Rep.).
- GSMA. (2020). *Covid-19 network traffic surge isn't impacting environment confirm telecom operators*. <https://www.gsma.com/gsmadeurope/latest-news-2/covid-19-network-traffic-surge-isnt-impacting-environment-confirm-telecom-operators/>. (Abgerufen am: 22. Juli 2022)
- Hintemann, R., & Hinterholzer, S. (2019). Energy consumption of data centers worldwide. *Business, Computer Science (ICT4S)*.
- Hinterholzer, S., & Hintemann, R. (2020, 06). Videostreaming: Energiebedarf und co2-emissionen hintergrundpapier das wichtigste in kürze.
- Kamiya, G. (2020). The carbon footprint of streaming video: fact-checking the headlines.
- Konen, W. (2020). Die co2-kosten des video-streaming.
- Lim, D., Baek, T. H., Yoon, S., & Kim, Y. (2020). Colour effects in green advertising. *International Journal of Consumer Studies*, 44(6), 552–562.
- Madlener, R., Sheykha, S., & Briglauer, W. (2022). The electricity- and co2-saving potentials offered by regulation of european video-streaming services. *Energy Policy*, 161, 112716. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112716>
- Malmodin, J. (2020). The power consumption of mobile and fixed network data services-the case of streaming video and downloading large files. In *Electronics goes green* (Vol. 2020).
- Marks, L. U., Clark, J., Livingston, J., Oleksijczuk, D., & Hilderbrand, L. (2020, October). Streaming media's environmental impact. *MediaEnvironment*, 2(1). Retrieved from <https://doi.org/10.1525/001c.17242> doi: 10.1525/001c.17242
- Masanet, E., Shehabi, A., Lei, N., Smith, S., & Koomey, J. (2020). Recalibrating global data center energy-use estimates. *Science*, 367(6481), 984–986.

- Obringer, R., Rachunok, B., Maia-Silva, D., Arbabzadeh, M., Nateghi, R., & Madani, K. (2021). The overlooked environmental footprint of increasing internet use. *Resources, Conservation and Recycling*, 167, 105389. doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105389>
- Preist, C., Schien, D., & Shabajee, P. (2019). Evaluating sustainable interaction design of digital services: The case of youtube. In *Proceedings of the 2019 chi conference on human factors in computing systems* (pp. 1–12).
- Schien, D., Coroama, V. C., Hilty, L. M., & Preist, C. (2015). The energy intensity of the internet: edge and core networks. In *Ict innovations for sustainability* (pp. 157–170). Springer.
- Schien, D., Shabajee, P., Chandaria, J., Williams, D., & Preist, C. (2021). Using behavioural data to assess the environmental impact of electricity consumption of alternate television service distribution platforms. *Environmental Impact Assessment Review*, 91, 106661.
- Shehabi, A., Walker, B., & Masanet, E. (2014). The energy and greenhouse-gas implications of internet video streaming in the united states. *Environmental Research Letters*, 9(5), 054007.
- Stephens, A., Tremlett-Williams, C., Fitzpatrick, L., Acerini, L., Anderson, M., & Crabbendam, N. (2021). Carbon impact of video streaming.
- The Shift Project. (2019). Lean ict-towards digital sobriety. *Report for the Think Tank The Shift Project*, 6.
- WALLIS, J. (2022). *What is vercel? is it the right platform for front-end developers?* <https://webo.digital/blog/what-is-vercel-is-it-the-right-platform-for-front-end-developers/>. (Abgerufen am: 24. Juli 2022)
- Wertheimer, M. (1922). Untersuchungen zur lehre von der gestalt. *Psychologische forschung*, 1(1), 47–58.
- Wu, A., Ryan, P., & Smith, T. (2019). Intelligent efficiency for data centres and wide area networks.

Anhang A

Daten und Berechnungen

A.1 Modellierungsparameter

Tabelle 3

Länderspezifische Modellierungsparameter

Land	Annahmen für den Emissionsfaktor
Schweiz	55 g CO ₂ e/kWh
Deutschland	332 g CO ₂ e/kWh
Österreich	143 g CO ₂ e/kWh
Schweden	42 g CO ₂ e/kWh
Finnland	142 g CO ₂ e/kWh
Spanien	200 g CO ₂ e/kWh
Italien	337 g CO ₂ e/kWh
Frankreich	68 g CO ₂ e/kWh
England	246 g CO ₂ e/kWh

Quelle:

Tabelle 4*Videoauflösung Modellierungsparameter*

Auflösung	Datenübertragung pro Stunde Streaming
Standard Definition (720p)	1 GB/h
Full High-Definition (1080p)	3 GB/h
4K (2160p)	7 GB/h

Quelle:

A.2 Top-Down Berechnung für Rechenzentren

Top-Down Berechnung für die Energieintensität der Rechenzentren, basierend auf dem weltweiten Video Datenverkehr von 1'680 Mrd. GB () und einem Energieverbrauch von 400 Mrd. kWh (Bieser et al., 2020; Coroama et al., 2020), wovon Videostreaming für 9.18 % verantwortlich ist (Cisco Global Cloud, 2018).

$$I_{RZ} = \frac{0.0918 * 400 \text{ kWh}}{1680 \text{ GB}} = 0.0234 \text{ kWh/GB} \quad (\text{A.1.1})$$

A.3 Netzwerkberechnung nach Malmodin (2020, S. 94)

Berechnungen für den Energieverbrauch des 4G-Mobilfunknetzes für verschiedene Videoauflösungen:

$$\begin{aligned} E_{SD} &= 1 \text{ W} + 1.5 \text{ W/Mbps} * 2.22 \text{ Mbps/h} + 0.2 \text{ W} + 0.03 \text{ W/Mbps} * 2.22 \text{ Mbps/h} \\ &= 0.0046 \text{ kWh} \end{aligned} \quad (\text{A.2.1})$$

$$\begin{aligned} E_{FHD} &= 1 \text{ W} + 1.5 \text{ W/Mbps} * 6.67 \text{ Mbps/h} + 0.2 \text{ W} + 0.03 \text{ W/Mbps} * 6.67 \text{ Mbps/h} \quad (\text{A.2.2}) \\ &= 0.0114 \text{ kWh} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{4K} &= 1 \text{ W} + 1.5 \text{ W/Mbps} * 15.56 \text{ Mbps/h} + 0.2 \text{ W} + 0.03 \text{ W/Mbps} * 15.56 \text{ Mbps/h} \quad (\text{A.2.3}) \\ &= 0.0250 \text{ kWh} \end{aligned}$$

Anhang B

Quellcode

Listing 3: app.js

```
1  import '../styles/globals.css'
2  import { ThemeProvider } from '@mui/material/styles';
3  import { theme } from '../theme/theme.js'
4
5  function MyApp({ Component, pageProps }) {
6    return (
7      <ThemeProvider theme={theme}>
8        <Component {...pageProps} />
9      </ThemeProvider>
10    )
11  }
12
13  export default MyApp
```