

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



Prof. Lorenz Hilty

Abgabe der Arbeit:

5. August 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 62 g CO_{2e} per hour. This is equivalent to driving a car for 430 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 resolution, the choice of end device 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 Videostreamings auf der Grundlage technischer und geographischer Parameter berechnet. Die daraus resultierenden Daten wurden für die Erstellung eines Online-CO₂-Rechners verwendet, mit dem die Nutzerinnen und 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 62 g CO_{2e} verantwortlich ist. Das entspricht einer Autofahrt von 430 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 Nutzerinnen und Nutzern, die Faktoren zu ermitteln, die sich am stärksten auf die Ergebnisse auswirken. Dazu gehören der länderspezifische Emissionsfaktor, die Videoauflösung, die Wahl des Endgeräts 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 Videostreamings 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 Methodik	7
3.1	Systemgrenzen	7
3.2	Berechnungsgrundlage	9
3.3	Zuweisungen	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	21
6.1	Energieeffizienz	21
6.2	Energieverbrauch	22
7	Resultate	24
8	CO₂-Rechner	29

INHALTSVERZEICHNIS

8.1	Konzept	29
8.2	Design	30
8.3	Implementierung	33
9	Diskussion	35
10	Fazit und Ausblick	39
A	Daten und Berechnungen	45
A.1	Modellierungsparameter	45
A.2	Top-Down Berechnung für Rechenzentren	46
A.3	Netzwerkberechnung nach Malmodin (2020, S. 94)	47
B	Quellcode	48
B.1	Components	48
B.2	Pages	60
B.3	Theme	80
B.4	Styles	80

Abbildungsverzeichnis

1	Videostreaming Systemgrenzen	8
2	Globale Rechenzentrumsauslastung nach Anwendungen (2021)	12
3	Stromanteile der Systemkomponenten	26
4	Energieverbrauchswerte pro Stunde (Full-HD Videostream)	26
5	CO ₂ -Emissionen für unterschiedliche Auflösungen	27
6	CO ₂ -Emissionen einer Stunde Videostreaming in verschiedenen Ländern (TV 1080p Festnetz)	28
7	Aufbau der Webapplikation mit Navigationsmöglichkeiten	30
8	Layout der Eingabemaske strukturiert nach Gestalt-Prinzipien	31
9	Figma Design der Eingabemaske für Smartphone- und Desktop-Bildschirme	32

Tabellenverzeichnis

1	Resultate bisheriger Studien	3
2	Zusammenfassung der Annahmen für den Energieverbrauch	24
3	Länderspezifische Modellierungsparameter (Quelle: Ember, 2022)	45
4	Videoauflösung Modellierungsparameter (Quelle: Netflix, o.J.)	46

Abkürzungsverzeichnis

BS Basisstation. 15, 18

CDN Content Delivery Network. 11, 14, 16, 39

CPE Ausrüstung in Kunden-Räumlichkeiten (Customer Premise Equipment). 17, 18, 36

FAN Festnetz (Fixed Access Network). 15

FTTH Fibre to the Home. 3

IKT Informations- und Kommunikationstechnik. 3, 5, 21

RAN Mobilfunknetz (Radio Access Network). 15

THG Treibhausgas. 25

UI User Interface. 30, 33

UX User Experience. 30, 31

WAN Weitverkehrsnetz (Wide-Area Network). 15–17

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 et al., 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 geographischen 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 zusammen 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 Nutzerinnen und Nutzern einen Einblick in die Umweltauswirkungen des eigenen Medienkonsums gewähren.

Kapitel 2

Verwandte Studien

Medial wird zunehmend über Bedenken hinsichtlich der Umweltauswirkungen des IKT-Sektors berichtet, einschliesslich der Auswirkungen von Videostreaming. 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 (g CO _{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	111 - 324 ¹
Kamiya, 2020 (Überarbeitete Schätzung, Dezem- ber 2020)	2020	gewichteter Durchschnitt für Netflix	36
Kamiya, 2020 (Ori- ginale Schätzung, Februar 2020)	2020	gewichteter Durchschnitt für Netflix	82
Hinterholzer und 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	48 ¹
Shehabi et al., 2014	2011	Durchschnitt USA inkl. Herstellung und Entsorgung	420

¹Für Vergleichszwecke wurde der Energiebedarf in CO_{2e}-Emissionen umgerechnet (437 g CO_{2e}/kWh).

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 et al., 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. Die Resultate der Studie basieren hauptsächlich auf einer Quelle von Andrae und 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 et al., 2020). Dies erklärt die vergleichsweise hohen Schätzungen zu den CO₂-Emissionen von The Shift Project (2019).

Die Wahl der technischen Parameter ist ebenfalls von Bedeutung. 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 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. Dies wird mit einer Webapplikation erreicht, bei der die technischen und geographischen Parameter von der Nutzerin oder dem Nutzer definiert werden können. Der Einfluss der verschiedenen Faktoren wird dadurch direkt einsehbar. Darüber hinaus soll der CO₂-Rechner einen Einblick in die Umweltauswirkungen des

eigenen Medienkonsums gewähren. Marks et al. (2020, S. 8) heben die Wichtigkeit einer 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 (Coroama et al., 2020; Kamiya, 2020). Ausserdem basiert das Browser-Add-on auf fixen Annahmen, welche von der nutzenden Person nicht verändert werden können und auch nicht transparent einsehbar sind (beispielsweise die Wahl des verwendeten Endgeräts und der Netzwerkverbindung). Die vorliegende Arbeit soll diese Lücken schliessen, indem eine Webapplikation entwickelt wird, die eine akkurate Schätzung des CO₂-Ausstosses gewährleistet und in der die Nutzerin oder der Nutzer selbst die relevanten Faktoren definieren kann.

Kapitel 3

Annahmen und Methodik

Für die 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 im Rahmen dieser Arbeit vorgegangen wird. Insbesondere wird dargelegt, welche Systemgrenzen gezogen werden, welche Annahmen getroffen werden und mit welchen Verfahren gerechnet wird.

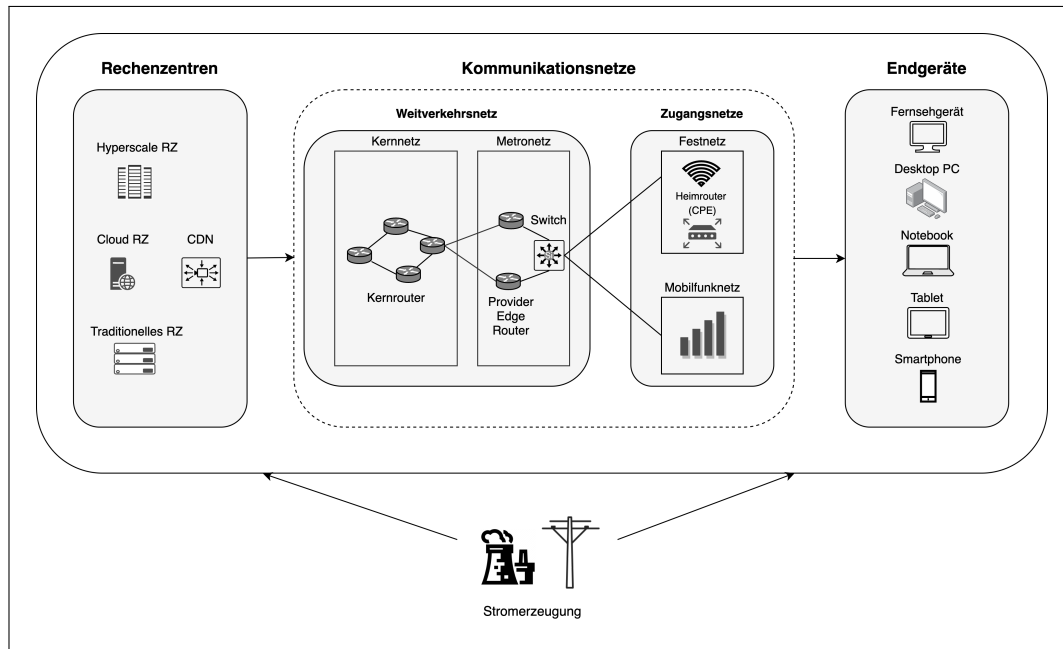
3.1 Systemgrenzen

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 Konsumierenden und der Stromverbrauch des Datenverkehrs auf der Seite der Produzierenden (Madlener et al., 2022). Letzteres umfasst sowohl den Strombedarf der Kommunikationsnetze, als auch den Strombedarf der Rechenzentren. Nach Coroama und 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 & Hilty, 2014, S. 67). Darauf aufbauend umfasst die Sys-

3.1. SYSTEMGRENZEN

temgrenze der vorliegenden Arbeit die in Abbildung 1 dargestellten Komponenten.

Abbildung 1. Videostreaming Systemgrenzen



Quelle: Eigene Darstellung

Effektive Werte zum Strommix sind 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 der nutzenden Person 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 Infra-

3.2. BERECHNUNGSGRUNDLAGE

strukturen betrachtet. Für grosse Geräte mit langer Lebensdauer, wie die Server in den Rechenzentren, sind nach Coroama et al. (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 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 Endnutzengeräte oder Rechenzentren) essentiell ist. 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 (Coroama et al., 2020). Aus diesem Grund wird 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 437 g CO_{2e}/kWh (Ember, 2022) zugrunde gelegt wird. Ausserdem unterscheiden sich bei bisherigen Schätzungen häufig die Einheiten der Resultate. Einige beziehen sich auf die Bereitstellung eines Videostreams über einen gewissen Zeitraum, während andere 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 Zuweisungen

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). Weil viele dieser Ressourcen jedoch nicht ausschliesslich für das Videostreaming verwendet werden, wird jeweils eine Zuweisung benötigt.

Die Rechenzentren speichern die Videoinhalte, kodieren sie und bereiten sie für das Videostreaming vor (Stephens et al., 2021). Das bedeutet, dass diese Ressourcen von allen Nutzerinnen und 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 et al., 2020). Dies erschwert eine transparente Zuweisung des Energieverbrauchs. In der vorliegenden Arbeit wird die, für das Videostreaming insgesamt verbrauchte Energie, auf die Streamingdauer bezogen.

Das Internet besteht aus einer grossen Anzahl von Ressourcen, die alle miteinander verbunden sind und die Übertragung der Daten steuern. 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 Allokationsmethode zurückgegriffen, da andere Verfahren bisher noch wenig untersucht wurden und 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 & Hilty, 2014). Es wird deshalb erneut der Strombedarf auf die Nutzungsdauer bezogen.

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 Nutzerinnen und Nutzern für das Streaming zur Verfügung zu stellen. Es gibt verschiedene Arten von Rechenzentren, die unterteilt werden 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 Energieintensität auf. Sie sind weitaus effizienter und bieten eine bessere Servervirtualisierung als herkömmliche Rechenzentren.

Die Systemkomponente 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).

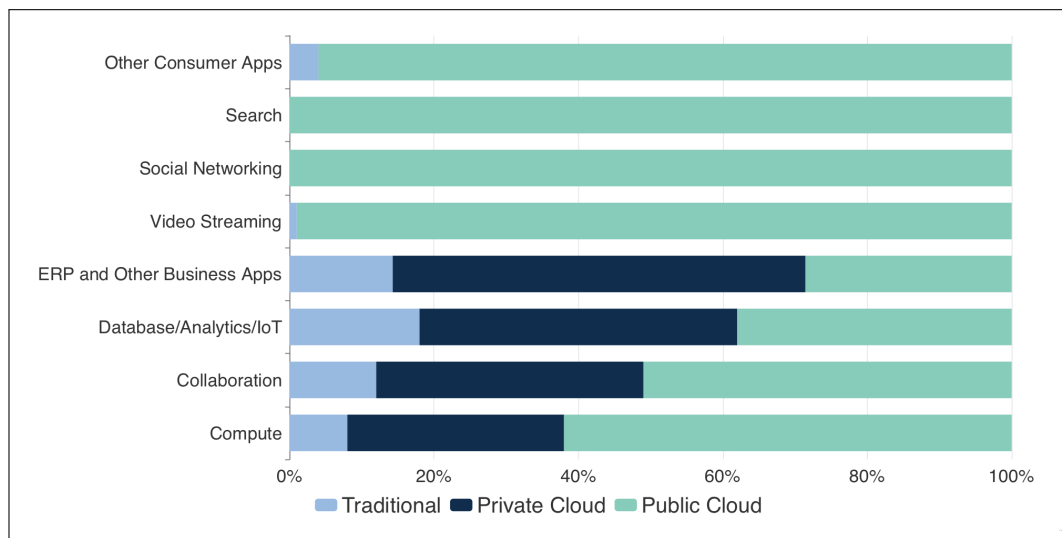
4.1 Energieeffizienz

Der Datenverkehr in den Rechenzentren wächst seit einiger Zeit stark an und wird voraussichtlich noch weiter steigen, insbesondere in den Cloud-Rechenzentren. Die Meinungen zu den Auswirkungen des Datenverkehrs auf den CO₂-Fussabdruck gehen auseinander. So argumentieren Kamiya (2020) und Masanet et al. (2020) dafür, dass die CO₂-Emissionen aufgrund der Effizienzsteigerungen auf einem konstanten Niveau stagnieren. Dagegen sprechen Andrae (2020), Belkhir und Elmeligi (2018), und Hintemann und Hinterholzer (2019)

4.1. ENERGIEEFFIZIENZ

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 die Konsolidierung und Virtualisierung von Rechenzentrumsarbeitslasten in die Cloud hat bisher erhebliche Effizienzgewinne ermöglicht (Masanet et al., 2020). Zusammenfassend ist für die Energieeffizienz vor allem bedeutend, in welchem Umfang und wie schnell moderne Cloud-Rechenzentren die traditionellen, weniger energieeffizienten Rechenzentren ersetzen (Stephens et al., 2021). Daten von Cisco (2018) zeigen, dass für Verbraucheranwendungen wie Videostreaming bereits mehrheitlich öffentliche Cloud-Rechenzentren genutzt werden.

Abbildung 2. Globale Rechenzentrumsauslastung nach Anwendungen (2021)



Quelle: Eigene Darstellung nach Cisco (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, Netzwerk-Geräten 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 et al., 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., 2021) entwickelten GCC-Methodik wird der Aufwand im Rechenzentrum mit Hilfe von Allokationsregeln einer einzelnen Cloud-Dienstleistung zugeordnet. Beim Videostreaming wird dafür der komplette Aufwand der Auslieferung eines Videostreams über einen bestimmten Zeitraum zugeordnet (Gröger et al., 2021). Das Problem beim 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 Modell jedoch sehr detaillierte Kenntnisse über alle Rechenzentren, die für das Videostreaming verwendet werden. Für einen allgemeingültigen Wert ist daher eine Induktion notwendig, die mit Unsicherheiten verbunden ist (Makonin et al., 2022).

Basierend auf einem Bottom-Up Verfahren mit Messdaten aus einem Streaming-Rechenzentrum ermittelte das deutsche Umweltbundesamt einen Energiebedarf für eine Stunde Videostreaming von 0,0023 kWh/h (Gröger et al., 2021). 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 Hinterholzer und Hintemann (2020) kann der Anteil von Videostreaming auf den Energiebedarf der weltweiten Rechenzentren geschätzt und anschliessend auf den weltweiten Video-Datenverkehr bezogen werden. Exemplarisch wurde eine solche

4.2. ENERGIEVERBRAUCH

Berechnung für das Jahr 2020 durchgeführt (siehe Anhang A.2). Basierend auf festgelegten Annahmen errechnete 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 höher ist. Dies, obwohl sich alle Schätzungen auf das Jahr 2020 beziehen und ähnliche Systemgrenzen definiert wurden.

Einerseits entsteht die Diskrepanz dadurch, 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. Andererseits 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%“ Malmodin (2020, S. 93). Basierend auf diesen Erkenntnissen wird im Rahmen dieser Arbeit mit der Energieintensität von Stephens et al. (2021) 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 Kommunikationsnetze dienen zur Übertragung der Videodaten von den Rechenzentren zu den Endgeräten. Wie bereits bei den Rechenzentren liegt auch bei den Kommunikationsnetzen eine grosse Diskrepanz bei den publizierten Schätzungen vor. Das Netz besteht aus dem Weitverkehrsnetz (WAN) und den Zugangsnetzen, wobei das WAN grösstenteils aus Glasfaserkabeln (sowohl an Land als auch unter Wasser) und grossen Internet-Routern besteht, welche die Datenübertragungswege des Internets bilden (Coroama, 2021). Die Daten erreichen die Endnutzerinnen und Endnutzer mit dem Zugangsnetz. Ursprünglich wurde dafür ausschliesslich das Festnetz verwendet (FANs), was bedeutet, dass ein Kabel bis in die Wohnung reicht, in dem es dann eine drahtlose (WiFi-)Komponente geben kann. Mittlerweile wird vermehrt das Mobilfunknetz (RAN) genutzt. Dieses besteht aus einer Basisstation (BS) oder Funk-Basisstation, 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 BS 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 Edgernetzen (Baliga et al., 2010) oder Kern- und Metronetzen (Schien et al., 2015) unterschieden. Eine solche Unterscheidung ist weniger relevant für den Umfang dieser Arbeit, weshalb das simplere 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

Das WAN ist im Allgemeinen energieeffizienter als die beiden Zugangsnetze (Coroama, 2021). Darüber hinaus wird die Energieeffizienz kontinuierlich verbessert. Nach Aslan et al. (2018) ist die Energieintensität des Kernnetzes alleine von 2012 bis 2015 um den Faktor 10 zurückgegangen. Beim Videostreaming wird 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 (Coroama, 2021). Der Transport im modernen WAN erfolgt fast ausschliesslich auf optischem Weg, ältere Netze sind jedoch in vielen Ländern noch in Betrieb und sind für einen grossen Teil des Gesamtenergieverbrauchs des WAN verantwortlich (Wu et al., 2019). Am effektivsten für das WAN wäre es daher, weitflächiger auf die bereits bestehenden, modernen Lösungen der nächsten Generation umzustellen, obwohl sich noch weitere Energieeinsparungen durch technologische Fortschritte erzielen lassen (Wu et al., 2019).

5.1.2 Energieverbrauch

Die Studie von Aslan et al. (2018) spiegelt den aktuellen Stand der akademischen Forschung über die Energieintensität des WAN wider (Coroama, 2021). Die Extrapolation der exponentiellen Trends der Vergangenheit ergibt demnach einen Wert von etwa 0.007 kWh/GB (Coroama, 2021) für das Jahr 2020. Basierend darauf wird für einen Videostream der Energieverbrauch im Weitverkehrsnetz mit der folgenden Gleichung berechnet:

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

I_{WAN} ist die Energieintensität des WAN und R die Datenübertragungsrate.

5.2 Zugangsnetze

Das Zugangsnetz verbindet die einzelnen Haushalte und Büros mit dem WAN (Wu et al., 2019). Bei mobilen Geräten wird vermehrt das Mobilfunknetz genutzt und in Gebäuden erfolgt die Verbindung in der Regel über das Festnetz mit bestehenden Kupfer- oder Glasfaserkabeln. Aktuell wird in den meisten Fällen angenommen, 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 Glasfaserkabel ersetzt (Fischer & Hofer, 2011). 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). Um die Endgeräte mit dem Netzwerk zu verbinden werden zusätzliche Geräte (CPE, Englisch: Customer Premise Equipment) benötigt. Die CPEs befinden sich auf der Kundenseite des Netzwerks und ermöglichen die Verbindung zum eigentlichen Datennetz.

Energieeffizienz

Es ist davon auszugehen, dass der Energieverbrauch pro übertragenem GB in Zugangsnetzen stetig sinkt, hauptsächlich durch höhere Bandbreiten und eine höhere Datenübertragungsrate (Montevecchi et al., 2020). Die Technik, die massgebend dazu beiträgt, ist das elektrooptische System (Glasfasernetz). Nach Gröger et al. (2021) 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., 2021). Wie bei den Rechenzentren hat die Netztechnik auch durch neue Modulations- und Kodierungsverfahren, Virtualisierung und andere softwarebasierte Verfahren erhebliche Energieeinsparpotentiale (Gröger et al., 2021). Beim Festnetzzugang wird der Grossteil des Energieverbrauchs jedoch von den Routern (CPEs) verursacht (Montevecchi et al., 2020). Diese werden nicht

5.2. ZUGANGSNETZE

von allen Streamingnutzerinnen und Streamingnutzern geteilt, weshalb der Stromverbrauch vollständig der individuellen Person zugewiesen werden kann. Aus diesem Grund werden die CPEs in einigen Studien auch zu den Endgeräten gezählt oder isoliert betrachtet (Stephens et al., 2021). Nach Coroama (2021) handelt es sich um Geräte, die für die Bereitstellung des Internets verwendet werden und somit semantisch Teil des Festnetzes sind. Im Rahmen dieser Arbeit werden sie daher für die Berechnungen zu den Festnetzen gezählt. Mit dem Inkludieren der CPEs wird dadurch verhindert, dass die Resultate zum Nachteil des Mobilfunknetzes verzerrt werden.

Energieverbrauch

Zu den CPEs, die für den Festnetzzugang benötigt werden, gehören traditionell ein Modem und/oder ein Router. Zusätzlich können 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.

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

wobei I_{FAN} für die Energieintensität der Festnetzübertragung steht.

5.2.2 Mobilfunknetz

Für das Mobilfunknetz wird eine BS benötigt, die mehrere Arten von Geräten wie Funksteuerungen, Standortausrüstung (z. B. Klimaanlage) sowie Backhaul-Ausrüstung für die Verbindung der BS mit dem Kernnetz enthalten (Coroama, 2021). Im Gegensatz zur Architektur von Festnetzen wird beim Mobilfunknetz kein CPE benötigt, um die Endgeräte mit der BS zu verbinden. 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., 2021).

Energieeffizienz

Der Performance-Gewinn der fortschrittlichen Technik erhöht nicht zwingend den Energiebedarf. Nach Gröger et al. (2021) ist sogar das Gegenteil der Fall; der Energiebedarf pro übertragenem GB sinkt. Innerhalb des Mobilfunknetzes kann die verbrauchte Energie durch hohe Datenübertragungsraten verbessert werden, sodass bei vergleichbarem Stromverbrauch mehr Daten von einem einzigen Sender übertragen werden können (Montevecchi et al., 2020). Das 4G-Netz braucht in etwa drei- bis viermal soviel Energie wie die moderne 5G-Technik (Wu et al., 2019 zitiert nach Coroama, 2021; Gröger et al., 2021). Die alten 3G-Netze benötigen sogar mehr als 20-mal soviel Energie und sind somit für hochbitratige Datenübertragungen ungeeignet (Gröger et al., 2021). Der Mobilfunk hat aufgrund der komplexeren Dämpfungscharakteristik insgesamt einen höheren Energiebedarf als kabelgebundene Anschlüsse (Gröger et al., 2021).

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. (2021) 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 et al. (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. (2021) 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.

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

5.2. ZUGANGSNETZE

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

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

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 (Malmodin, 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 Nutzerinnen und Nutzern (Stephens et al., 2021). Der Stromverbrauch der Endgeräte unterliegt hingegen vollumfänglich der individuellen Person. Die Wahl des Endgerätes ist vom Streamingdienst abhängig. Netflix Filme werden zu 70 % auf Fernsehgeräten geschaut (Kafka, 2018), wohingegen der Streamingdienst TikTok zu 90 % auf Android Smartphones genutzt wird (Geyser, 2022). 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 basierend auf der Nutzung automatisch zu regulieren. Generell hat sich die Energieeffizienz von Endgeräten durch eine Mischung aus technologischen Verbesserungen und einem Wandel hin zu kleineren Geräten (z.B. Tablets und Smartphones) in den letzten Jahren erheblich verbessert (Stephens et al., 2021). Ein Grossteil des CO₂-Fussabdrucks der Endgeräte ergibt sich jedoch aus einer kurzen Lebensdauer, der weltweit ständig steigenden Anzahl von Geräten und dem Trend zu höheren Auflösungen (Marks et al., 2020).

6.2 Energieverbrauch

Es gibt eine grosse Anzahl an Geräten, die für das Videostreaming benutzt werden können. Diese unterscheiden sich teilweise erheblich im Energieverbrauch. Im Rahmen dieser Arbeit werden einige der beliebtesten Endnutzergeräte behandelt. Die Gleichung für die Berechnung des Energieverbrauchs eines Endgeräts 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 et al. (2019) machen Fernsehgeräte seit 2006 den grössten Anteil am Gesamtenergieverbrauch der Unterhaltungselektronik aus, wobei dieser Trend mittlerweile abnimmt. Gleichzeitig ist die durchschnittliche Leistungsaufnahme und damit der Energieverbrauch pro Gerät gesunken, vor allem weil ältere Röhrenfernseher durch neuere, effizientere Bildschirme ersetzt wurden (Urban et al., 2019). 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 (Kamiya, 2020; Stephens et al., 2021). Im Rahmen dieser Arbeit wird, basierend auf Urban et al. (2019), 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 (Stephens et al., 2021).

Desktop Computer

Die Schätzungen für den aktiven Stromverbrauch von Desktop Computern erhöhte sich zwischen 2013 und 2017 um etwa 15 % (Stephens et al., 2021). Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich durch die höhere Rechenleistung der Computer und die höhere Auflösung der Monitore der Energiebedarf erhöht hat. Nach Stephens et al. (2021) belaufen sich die durch-

6.2. ENERGIEVERBRAUCH

schnittlichen Leistungsaufnahmen auf 85 W für den Desktop Computer und 30 W 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), wodurch sie wesentlich energieeffizienter sind. Im Rahmen dieser Arbeit wird basierend auf Urban et al. (2019) das Notebook mit einer durchschnittlichen Leistungsaufnahme von 22 W 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. 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 7 W für Tablets verwendet (Suski et al., 2020).

Smartphones

Smartphones wurden in den letzten Jahren immer effizienter. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die technologischen Fortschritte, aufgrund der annähernd gleichbleibenden Akkus, eine höhere Energieeffizienz forderten. Wie bei den meisten Endgeräten hat auch beim Smartphone das Display einen entscheidenden Einfluss auf den Stromverbrauch. Da jedoch das Display beim Smartphone wesentlich kleiner ist, ist hier insbesondere die Datenübertragung im Netzwerk ausschlaggebend. Das liegt daran, dass während des Streamings ständig Datenpakete übertragen werden und das Smartphone die drahtlose Netzwerkschnittstelle für den Empfang dieser Pakete immer aktiv halten muss (Hoque et al., 2014). Es werden daher verschiedene Verfahren wie das Prefetching eingesetzt um den Stromverbrauch zu reduzieren (Gaukler, 2021). Für die Smartphones wird basierend auf Stephens et al. (2021) eine durchschnittliche Leistungsaufnahme von 1 W verwendet.

Kapitel 7

Resultate

Dieser Abschnitt setzt sich mit den Ergebnissen des Energieverbrauchs und der CO₂-Emissionen eines Videostreams auseinander. 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	$E_{Internet} = E_{WAN} + E_{FAN} + E_{RAN}$ ³
Weitverkehrsnetz	$E_{WAN} = I_{WAN} * D * R$ $I_{WAN,2020} = 0.0070 \text{ kWh/GB}$
<i>Fortsetzung nächste Seite</i>	

³Für einen einzelnen Videostream schliessen sich E_{FAN} und E_{RAN} gegenseitig aus, da der Zugang entweder über das Festnetz oder das Mobilfunknetz stattfindet.

Festnetz	$E_{FAN} = I_{FAN} * D * R$ $I_{FAN,2020} = 0.0150 \text{ kWh/GB}$
Mobilfunknetz	$E_{RAN} = I_{RAN} * D * R$ $I_{5G,2020} = 0.0220 \text{ kWh/GB}$ $I_{4G,2020} = 0.0730 \text{ kWh/GB}$ $I_{3G,2020} = 0.4400 \text{ kWh/GB}$
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 10 dargestellt. Die CO₂-Emissionen werden durch Anwendung eines Emissionsfaktors für den länderspezifischen Strommix berechnet, wie in Gleichung 11 dargestellt.

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

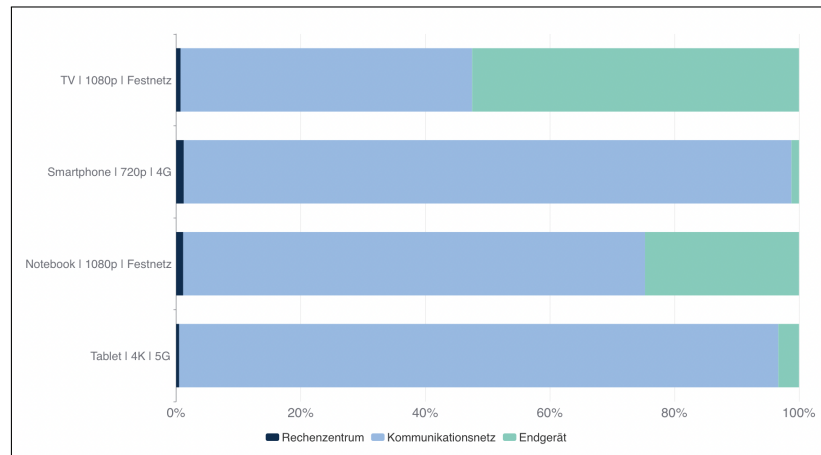
$$THG_V = E_V * SM_L \quad (11)$$

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

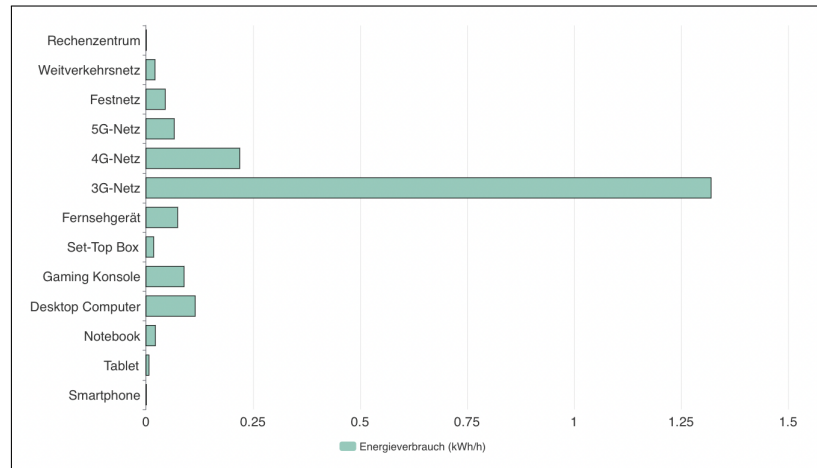
Abbildung 3. Stromanteile der Systemkomponenten



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 10.6 g CO_{2e} bis 1.4 kg CO_{2e} für eine Stunde Videostreaming. Am meisten Energie benötigt dabei das veraltete 3G-Netz, wodurch bestätigt wird, dass diese Generation nicht für hochbitratige Internetdienste geeignet ist. Für ein Video in einer Full-HD-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 100-mal 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. Die Größenordnung aller Energieverbrauchswerte ist in Abbildung 4 dargestellt.

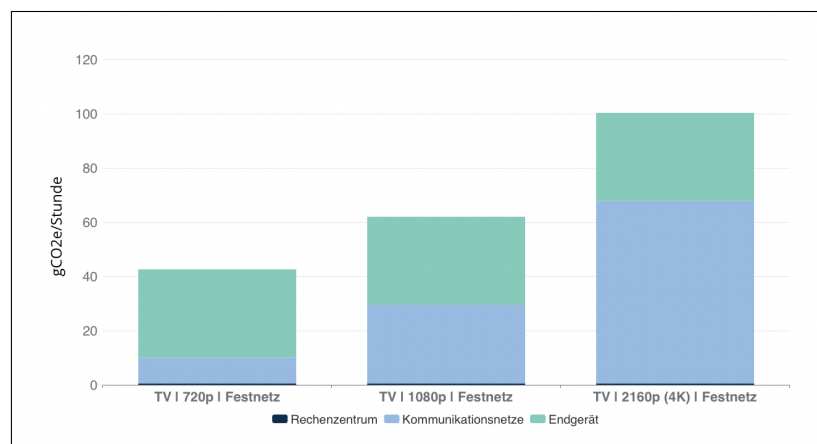
Abbildung 4. Energieverbrauchswerte pro Stunde (Full-HD Videostream)



Quelle: Eigene Darstellung

Abgesehen von der gewählten Mobilfunktechnologie, besteht für die Netzwerke auch eine Abhängigkeit zu der Videoauflösung. In Abbildung 5 ist ersichtlich, dass die CO_2 -Emissionen eines 4K-Videos im Vergleich zu einem SD-Video (720p) mehr als doppelt so hoch sind.

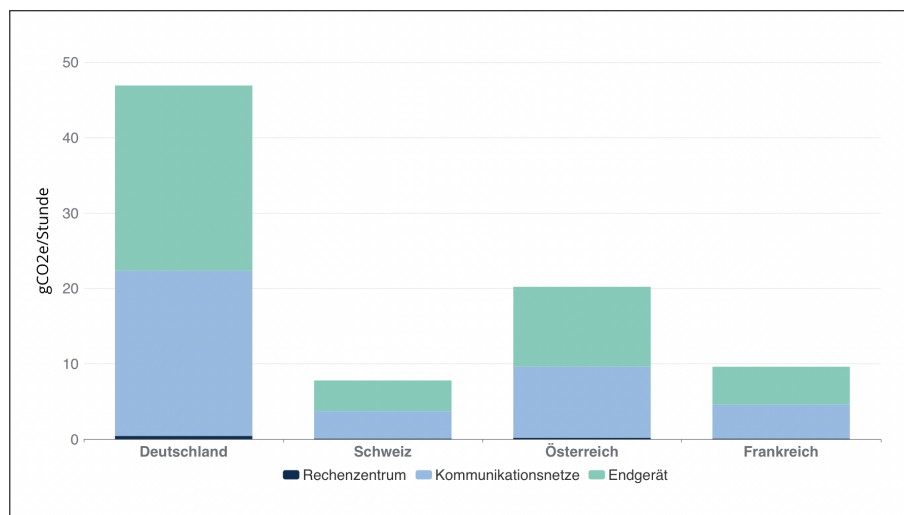
Abbildung 5. CO_2 -Emissionen für unterschiedliche Auflösungen



Quelle: Eigene Darstellung

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 6 bildet die CO₂-Emissionen einer Stunde Videostreaming in unterschiedlichen Ländern ab. 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 CO_{2e} einen deutlich niedrigeren CO₂-Ausstoss als beispielsweise Deutschland mit 46.91 g CO_{2e} aufweist.

Abbildung 6. CO₂-Emissionen einer Stunde Videostreaming in verschiedenen Ländern (TV | 1080p | Festnetz)



Quelle: Eigene Darstellung

Basierend auf dem weltweiten Strommix belaufen sich die Umweltauswirkungen für das Referenzszenario auf 62 g CO_{2e}. Um die Grössenordnung dieser Treibhausgasemissionen in einen Kontext zu setzen, wird der Wert in anderen Bezugsgrössen ausgedrückt. Umgerechnet auf die Personenkilometer mit einem PKW nach Gröger et al. (2021) (143 g CO_{2e}/km) entsprechen die Emissionen einer Autofahrt von rund 430 Metern. Auf die Energiemenge bezogen, ausgehend von dem verwendeten Emissionsfaktor, entpricht der Wert rund 0.14 kWh. Dies kommt exakt der Energiemenge gleich, die benötigt wird, um Wasser für eine Tasse Tee in einem Wasserkocher zu erhitzen (Quinn, 2022).

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 definiert werden können. Dadurch werden die Ergebnisse transparent dargestellt und der Einfluss der verschiedenen Faktoren kann übersichtlich visualisiert werden.

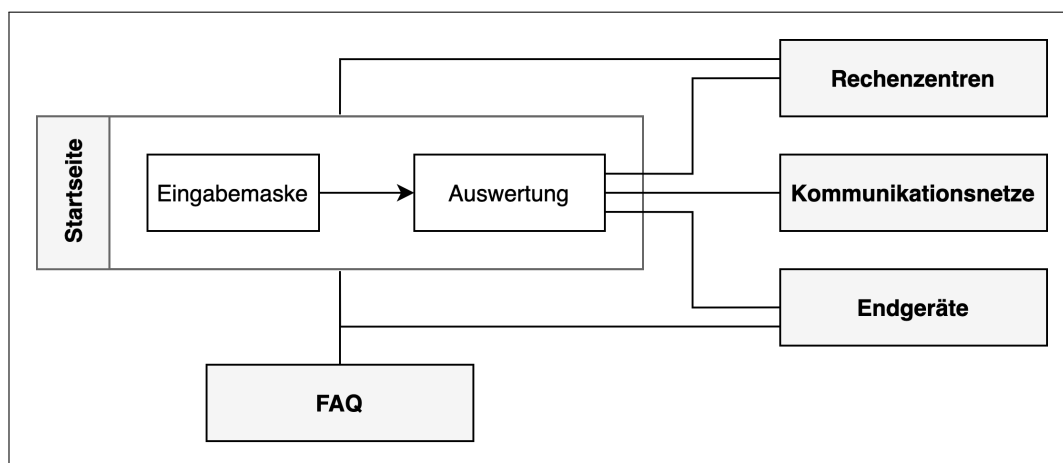
8.1 Konzept

Die Applikation soll eine einfache Bedienbarkeit aufweisen, sodass auch Nutzerinnen und Nutzer ohne Vorkenntnisse in der Materie die Ergebnisse verstehen und interpretieren können. Dafür soll die Applikation eine Eingabemaske bereitstellen, in der die technischen und geographischen Parameter für einen Videostream definiert werden können. Die Maske soll die relevantesten Einflussgrössen abdecken:

- Land
- Streaminggerät
- Auflösung
- Netzwerkverbindung
- Streamingdauer

Nach Eingabe aller Parameter soll der Rechner über den Energieverbrauch und die resultierenden CO₂-Emissionen des gewählten Videostreams informieren. Den Nutzerinnen und 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 darüber informiert wird, 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 7 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

8.2. DESIGN

Interferenzen zu reduzieren (Dong, 2019). Zu diesem Zweck wurde ein stimmiges Farbkonzept definiert, das sich an einem schwachen Grünton orientiert. Diese Wahl stützt sich auf eine Studie von Lim et al. (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 in einer Arbeit von Wertheimer (1922) eingeführt und versucht, die Art und Weise zu erklären, wie Menschen Muster wahrnehmen und erkennen (Chang et al., 2007). Unter Berücksichtigung der Figur-Grund-Relation und dem Gesetz der Nähe wurde die Benutzeroberfläche so gestaltet, dass die Nutzerinnen und Nutzer sich schnell zurechtfinden und die Funktionen intuitiv erfassen können.

Abbildung 8. Layout der Eingabemaske strukturiert nach Gestalt-Prinzipien

The image shows a web application interface titled "Streaming Energie- und CO2-Rechner". Below the title is a subtitle: "Mit diesem Rechner kannst du den Energieverbrauch und die CO2-Emissionen eines Video-Streams berechnen." The main input area is a white box containing four dropdown menus: "Gerät", "Auflösung", "Netzwerk", and "Land". Below these is a slider for "Dauer (Stunden)" with a green handle and a value of "2". A green button labeled "AUSRECHNEN" is at the bottom left of the input box. To the right of the input box, there is a heading "Finde heraus, wieviel CO2 du beim Videostreamen verursachst" and a paragraph: "Der Energieverbrauch eines Videostreams ist von mehreren Faktoren, wie dem Endgerät, der Videoauflösung und der Netzwerkverbindung, abhängig."

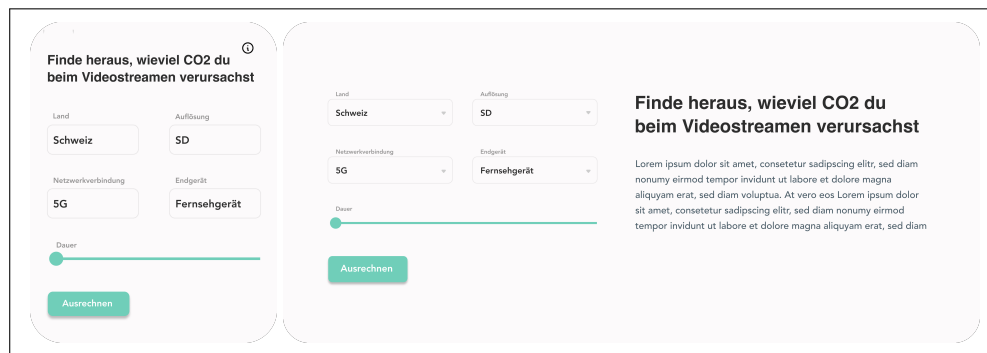
Quelle: Eigene Darstellung

In Abbildung 8 wird der Fokus nach dem Prinzip der Figur-Grund-Regel intuitiv auf den Inhalt in den weissen Vordergrundbereichen gelenkt. Darin sorgt die Nähe zusammengehörender Elemente für eine wahrgenommene Gruppierung.

8.2. DESIGN

Da es sich um eine Webapplikation handelt, ist es bedeutend, dass auch für unterschiedliche Endgeräte (Desktop, Smartphone, Tablet) eine gute User-Experience ermöglicht wird. Daher soll die Webapplikation so optimiert sein, dass sie auf allen Endgeräten gleichermassen komfortabel genutzt 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 einem grösseren Bildschirm fließend umverteilen und ausbreiten können. Abbildung 9 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. Dafür wurde 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 serverseitiges Rendering ermöglicht. Das statische Rendering auf der Serverseite 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, welche die Best Practices für das Design von Benutzeroberflächen unterstützen (Google, o.J.). Mit dem Gestaltungsstil "Flat Design" ist die Designsprache insbesondere für den Minimalismus bekannt und daher mit dem Designkonzept dieser Arbeit kompatibel. Das vorgegebene Thema des Frameworks wurde mithilfe der ThemeProvider-Komponente in Javascript so angepasst, dass es den definierten UI-Anforderungen entspricht.

Listing 1: Ausschnitt aus der JavaScript ThemeProvider Komponente

```
1  export const theme = createTheme({
2    palette: {
3      primary: {
4        main: '#70CEB9',
5      },
6      secondary: {
7        main: '#F5F7F6',
8        contrastText: "#111",
9      },
10   },
11   typography: {
12     fontFamily: 'Arial',
13   })
```

8.3. IMPLEMENTIERUNG

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 unübersichtlich und fehleranfällig, da der zugrunde liegende Programmcode mit wachsendem Umfang zunehmend komplexer wird. Um dem entgegenzuwirken, 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. Veröffentlicht wird die Webapplikation mit Vercel und sie 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 62 g CO_{2e} 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 7 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 gezeigt, 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 Menschen geteilt wird und daher nur ein kleiner Bruchteil der Streamingnutzerin oder dem Streamingnutzer zugerechnet wird. Dieses Ergebnis widerlegt die Resultate von Hintemann und 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 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 Streamingplattformen überwiegend energieeffiziente Cloud-Rechenzentren verwenden. Resultate von Stephens et al. (2021), Gröger et al. (2021), Shehabi et al. (2014) und Preist et al. (2019) unterstützen 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). Kommunikationsnetzbetreiber 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 (siehe Anhang A.3). Es zeigt sich, dass die Resultate der vorliegenden Studie im Vergleich dazu durchgehend höher sind. Das ist zum einen darauf zurückzuführen, dass in der Methode der vorliegenden Arbeit eine Standby-Zeit der Infrastrukturen zur Streamingdauer hinzugerechnet wird. Ausserdem 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 lediglich um ein Wachstum von 546 %. Beim Festnetz ist der Abstand noch grösser. Die CPEs tragen in diesem Fall den grössten Teil am Energiebedarf bei (Montevecchi et al., 2020) und nach Malmodin (2020) verbrauchen diese eine konstante Energiemenge, selbst wenn keine Daten zu senden oder zu verarbeiten sind. Eine Limitation der Arbeit ist demnach eine Überschätzung des Energieverbrauchs der

Netzwerke, insbesondere für hochauflösende Videostreams. Daraus ergibt sich weiterer Forschungsbedarf für eine repräsentative Zuweisungsmethode der Netzenergie. Die von Malm-odin (2020) vorgebrachte Allokationsregel 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. 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. Von den Ländern, die in der Analyse einbezogen wurden, ist der höchste Wert in Deutschland mit 46.91 g CO_{2e} zu verzeichnen. Dieser Wert ist immer noch tiefer als der weltweite Durchschnitt, was nach Daten von Ember (2022) darauf zurückzuführen ist, dass einige Länder mit einem besonders hohen CO₂-Emissionsfaktor den weltweiten Durchschnitt anheben. Für die Netzwerke dürfte in der Realität ein ähnliches Verhältnis vorliegen. Der netzbezogene Energieverbrauch variiert ebenfalls in Bezug auf den geographischen Standort (Stephens et al., 2021), da die Effizienz

der Geräte im Netz unterschiedlich ist (Wu et al., 2019). Weniger effiziente Infrastrukturen, die in einigen Ländern noch in Betrieb sind, können die Ergebnisse verzerren, da die Kommunikationsnetze in dieser Arbeit anhand von Durchschnittswerten modelliert wurden. Eine Differenzierung des netzbezogenen Energieverbrauchs zwischen den Ländern wäre deshalb ein nächster Schritt, um die Ergebnisse der Arbeit noch weiter zu präzisieren.

Die berechneten Resultate wurden in Form einer Webapplikation aufbereitet und online zur Verfügung gestellt. Dies stellt einen relevanten Mehrwert für den aktuellen Forschungsstand dar. Bisherige Studien richten sich mit politischen und organisatorischen Handlungsempfehlungen überwiegend an die Seite der Produzierenden und damit an die Netzinfrastrukturen und Rechenzentren. Es wurde identifiziert, dass die Wahl der Endgeräte und der Videoauflösung ebenfalls einen beachtlichen Einfluss auf die Umweltauswirkungen hat. Mithilfe des Streamingrechners können die Endnutzerinnen und Endnutzer mehr über diese Einflüsse erfahren und lernen, wie sie ihren Medienkonsum umweltbewusster gestalten können. In Zukunft könnte der Rechner noch weiterentwickelt werden. Eine bedeutende Funktion, die ergänzt werden kann, ist die automatische Erkennung der relevanten Parameter. Es wäre hilfreich, wenn der Rechner während dem Videostreamen die Verbrauchsdaten automatisch erfassen würde, ohne dass diese manuell definiert werden müssen, wie es bereits partiell beim "Carbonalyser" von The Shift Project (2019) gemacht wird. Die Einbindung einer solchen Technologie in den Rechner wäre zeitaufwändig und würde bestenfalls in Zusammenarbeit mit Streaminganbietern erfolgen.

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 Schätzungen zu den CO₂-Emissionen verbunden sind. Die transparente Bereitstellung der Ergebnisse dieser Arbeit sollen dazu beitragen, die Komplexität der Berechnungen aufzudecken und die Diskussion weiter voranzutreiben. Ausgehend von einem Basisszenario wurde berechnet, dass im Durchschnitt 62 g CO_{2e} 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, die Wahl des Endgeräts 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. Dies führt zu erheblichen Unsicherheiten bei der Berechnung des Energieverbrauchs von Netzkomponenten, da es derzeit an quantitativen Daten mangelt und geeignete Berechnungsmethoden noch weiterentwickelt werden müssen.

Literatur

- Andrae, A. (2020). New perspectives on internet electricity use in 2030. *Engineering and Applied Science Letters*, 3, 19–31. <https://doi.org/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. <https://doi.org/10.1111/jiec.12630>
- Baliga, J., Ayre, R. W., Hinton, K. & Tucker, R. S. (2010). Green cloud computing: Balancing energy in processing, storage, and transport. *Proceedings of the IEEE*, 99(1), 149–167.
- 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. *Proceedings of the Eight Australasian Conference on User Interface - Volume 64*, 79–86.
- Cisco. (2018). Forecast and methodology, 2016–2021 white paper. *Updated: February, 1*.
- Cisco. (2019). Cisco visual networking index: global mobile data traffic forecast update, 2017–2022. *Update, 2017, 2022*.
- Cisco. (2020). Cisco annual internet report (2018–2023) white paper. *Cisco: San Jose, CA, USA*.

- 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. <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.
- Dehli, M. (2020). Grüne Informationstechnik in Unternehmen. *Energieeffizienz in Industrie, Dienstleistung und Gewerbe: Energietechnische Optimierungskonzepte für Unternehmen* (S. 637–651). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-23204-7_17
- Dong, R. (2019). Minimalist style of UI interface design in the age of self-media. *Proc. Of International Conference on Information and Social Science*, 217–221.
- Ember. (2022). *Ember Global Electricity Review*.
- Fischer, P. & Hofer, P. (2011). K. *Lexikon der Informatik* (S. 473–507). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-15126-2_12
- Gaukler, F. (2021). Energie-Effizienz von Streaming-Plattformen und Möglichkeiten zur Verbesserung. In R. H. Reussner, A. Koziolk & R. Heinrich (Hrsg.), *INFORMATIK 2020* (S. 237–249). Gesellschaft für Informatik, Bonn. https://doi.org/10.18420/inf2020_22
- Geyser, W. (2022). *TikTok Statistics – 63 TikTok Stats You Need to Know [2022 Update]* [Abgerufen am: 12. Juli 2022].
- Google. (o.J.). *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., Köhn, M. & Stobbe, L. (2020). *Energie- und Ressourceneffizienz digitaler Infrastrukturen* (Techn. Ber.).
- Gröger, J., Liu, R., Stobbe, L., Druschke, J. & Richter, N. (2021). Green Cloud Computing. Lebenszyklusbasierte Datenerhebung zu Umweltwirkungen des Cloud Computing [Abschlussbericht]. Umweltbundesamt.
- GSMA. (2020). *COVID-19 Network Traffic Surge Isn't 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). Videostreaming: Energiebedarf und CO₂-Emissionen Hintergrundpapier Das Wichtigste in Kürze.
- Hoque, M. A., Siekkinen, M., Nurminen, J. K., Tarkoma, S. & Aalto, M. (2014). Saving Energy in Mobile Devices for On-Demand Multimedia Streaming – A Cross-Layer Approach. *ACM Trans. Multimedia Comput. Commun. Appl.*, 10(3). <https://doi.org/10.1145/2556942>
- Kafka, P. (2018). *You can watch Netflix on any screen you want, but you're probably watching it on a TV* [Abgerufen am: 12. Juli 2022].
- 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., Sheykhha, S. & Briglauer, W. (2022). The electricity- and CO₂-saving potentials offered by regulation of European video-streaming services. *Energy Policy*, 161, 112716. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112716>
- Makonin, S., Marks, L. U., Przedpełski, R., Rodriguez-Silva, A. & ElMallah, R. (2022). Calculating the Carbon Footprint of Streaming Media: Beyond the Myth of Efficiency.
- Malmodin, J. (2020). The power consumption of mobile and fixed network data services- The case of streaming video and downloading large files. *Electronics Goes Green*, 2020.
- Marks, L. U., Clark, J., Livingston, J., Oleksijczuk, D. & Hilderbrand, L. (2020). Streaming Media's Environmental Impact. *MediaEnvironment*, 2(1). <https://doi.org/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.
- Montevecchi, F., Stickler, T., Hintemann, R. & Hinterholzer, S. (2020). Energy-efficient cloud computing technologies and policies for an eco-friendly cloud market. *European Commission, final study report, Vienna, report commissioned by the Directorate-General for Communications Networks, Content and Technology*.
- Netflix. (o.J.). *How to control how much data Netflix uses* [Abgerufen am: 15. Juli 2022].
- Obringer, R., Rachunok, B., Maia-Silva, D., Arbabzadeh, M., Nateghi, R. & Madani, K. (2021). The overlooked environmental footprint of increasing Internet use. *Re-*

- sources, Conservation and Recycling*, 167, 105389. <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. *Proceedings of the 2019 CHI conference on human factors in computing systems*, 1–12.
- Quinn, S. (2022). *How much could you save by not using your oven?* [Abgerufen am: 02. August 2022].
- Schien, D., Coroama, V. C., Hilty, L. M. & Preist, C. (2015). The energy intensity of the Internet: edge and core networks. *ICT Innovations for Sustainability* (S. 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. & Crabben-dam, N. (2021). Carbon impact of video streaming.
- Suski, P., Pohl, J. & Frick, V. (2020). All you can stream: Investigating the role of user behavior for greenhouse gas intensity of video streaming. *Proceedings of the 7th International Conference on ICT for Sustainability*, 128–138.
- The Shift Project. (2019). Lean ICT-towards digital sobriety. *Report for the Think Tank The Shift Project*, 6.
- Urban, B., Roth, K., Singh, M. & Howes, D. (2019). Residential Consumer Electronics Energy Consumption in the United States in 2017. <https://doi.org/10.2760/667696>
- WALLIS, J. (2022). *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 (Quelle: Ember, 2022)

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

Tabelle 4

Videoauflösung Modellierungsparameter (Quelle: Netflix, o.J.)

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

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 (Cisco, 2019) und einem Energieverbrauch von 400 Mrd. kWh aller Rechenzentren (Schätzung des Autors basierend auf Bieser et al., 2020; Coroama et al., 2020), wovon Videostreaming für 9.18 % verantwortlich ist (Cisco, 2018).

$$I_{RZ} = \frac{0.0918 * 400 \text{ kWh}}{1680 \text{ GB}} = 0.0234 \text{ kWh/GB} \quad (\text{A.2.1})$$

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

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

$$\begin{aligned} E_{SD} &= 1 \text{ W} + 1.5 \text{ W/Mbps} * 2.22 \text{ Mbps/h} + 0.2 \text{ W} + 0.03 \text{ W/Mbps} * 2.22 \text{ Mbps/h} \\ &= 0.0046 \text{ kWh} \end{aligned} \tag{A.3.1}$$

$$\begin{aligned} E_{FHD} &= 1 \text{ W} + 1.5 \text{ W/Mbps} * 6.67 \text{ Mbps/h} + 0.2 \text{ W} + 0.03 \text{ W/Mbps} * 6.67 \text{ Mbps/h} \\ &= 0.0114 \text{ kWh} \end{aligned} \tag{A.3.2}$$

$$\begin{aligned} E_{4K} &= 1 \text{ W} + 1.5 \text{ W/Mbps} * 15.56 \text{ Mbps/h} + 0.2 \text{ W} + 0.03 \text{ W/Mbps} * 15.56 \text{ Mbps/h} \\ &= 0.0250 \text{ kWh} \end{aligned} \tag{A.3.3}$$

...

Anhang B

Quellcode

B.1 Components

Listing B.1.1: resultgraph.js

```
1  import * as React from 'react';
2  import styles from '../styles/Home.module.css'
3  import {Bar} from 'react-chartjs-2';
4  import Chart from 'chart.js/auto'
5
6  const options = {
7    scales: {
8      xAxes: [{
9        stacked: true
10      }],
11      yAxes: [{
12        stacked: true
13      }]
14    },
15    maintainAspectRatio: false,
16    plugins: {
17      legend: {
18        labels: {
19          font: {
20            family: 'Arial',
21          }
22        }
23      }
24    }
25  }
```



```

24     }
25 }
26
27 export default function Resultgraph(props) {
28     const data = {
29         labels: ['Videostreaming', '1km Autofahrt'],
30         datasets: [{
31             label: 'Rechenzentrum',
32             barPercentage: 0.7,
33             data: [props.Datacenter, 0],
34             stack: "",
35             backgroundColor: [
36                 '#022E51',
37                 '#022E51'
38             ]
39         },
40         {
41             label: 'Kommunikationsnetz',
42             barPercentage: 0.7,
43             data: [props.Network, 0],
44             stack: "",
45             backgroundColor: [
46                 '#8FBAE5',
47                 '#8FBAE5'
48             ]
49         },
50         {
51             label: 'Endgerät',
52             barPercentage: 0.7,
53             data: [props.Device, 0],
54             stack: "",
55             backgroundColor: [
56                 '#70CEB9',
57                 '#70CEB9'
58             ]
59         },
60         {
61             label: 'Autofahrt',
62             barPercentage: 0.7,
63             data: [0, props.Car],
64             stack: "",
65             backgroundColor: [
66                 '#9EA4D2',
67                 '#9EA4D2'

```

```

68         ]
69     }, ]
70 }
71
72 return (
73     <div>
74         <div style={{textAlign: 'center', marginTop: '5rem'}}>
75             <h3>
76                 Resultat:
77             </h3>
78             <p>
79                 <strong style={{fontSize: '1.25rem'}}>{props.Emissions}</strong> g
80                 ↳ CO2e oder <strong style={{fontSize: '1.25rem'}}>{props.Energy ||
81                 ↳ 0}</strong> kWh
82             </p>
83         </div>
84
85         <card className={styles.chartcontainer}>
86             <div className={styles.chart}>
87                 <Bar
88                     data={data}
89                     width={10}
90                     height={2}
91                     options={options}
92                 />
93             </div>
94         </card>
95     </div>
96 )
97 }

```

Listing B.1.2: modal.js

```

1  import * as React from 'react';
2  import Box from '@mui/material/Box';
3  import Typography from '@mui/material/Typography';
4  import Modal from '@mui/material/Modal';
5  import Info from '../public/info.svg';
6  import styles from '../styles/Home.module.css'
7
8  const style = {

```

```

9     position: 'absolute',
10     top: '50%',
11     left: '50%',
12     transform: 'translate(-50%, -50%)',
13     width: 400,
14     bgcolor: '#fff',
15     boxShadow: 24,
16     borderRadius: 1,
17     p: 4,
18   };
19
20   export default function BasicModal() {
21     const [open, setOpen] = React.useState(false);
22     const handleOpen = () => setOpen(true);
23     const handleClose = () => setOpen(false);
24
25     return (
26       <div>
27         <Info onClick={handleOpen} style={{overflow: 'visible', float: 'right',
28           ↳ marginTop: '-1.2rem', marginRight: '0.3rem', marginBottom: '1rem', width:
29           ↳ '20px', color: 'rgba(0, 0, 0, 0.75)}} className={styles.info} />
30         <Modal
31           open={open}
32           onClose={handleClose}
33           aria-labelledby="modal-modal-title"
34           aria-describedby="modal-modal-description"
35         >
36           <Box sx={style}>
37             <Typography id="modal-modal-title" variant="h6" component="h2">
38               Berechnung des Energieverbrauchs
39             </Typography>
40             <Typography id="modal-modal-description" sx={{ mt: 2 }}>
41               Der Energieverbrauch eines Videostreams ist von mehreren Faktoren, wie
42               ↳ dem Endgerät, der Videoauflösung und der Netzwerkverbindung,
43               ↳ abhängig.
44             </Typography>
45           </Box>
46         </Modal>
47       </div>
48     );
49   }

```

Listing B.1.3: header.js

```
1  import * as React from 'react';
2  import Box from '@mui/material/Box';
3  import AppBar from '@mui/material/AppBar';
4  import Toolbar from '@mui/material/Toolbar';
5  import MenuIcon from '@mui/icons-material/Menu';
6  import Drawer from '@mui/material/Drawer';
7  import Button from '@mui/material/Button';
8  import IconButton from '@mui/material/IconButton';
9  import Link from 'next/link';
10 import Divider from '@mui/material/Divider';
11 import List from '@mui/material/List';
12 import ListItem from '@mui/material/ListItem';
13 import ListItemButton from '@mui/material/ListItemButton';
14 import ListItemText from '@mui/material/ListItemText';
15 import { useRouter } from 'next/router';
16 import styles from '../styles/Home.module.css'
17
18 const drawerWidth = 240;
19
20 export default function Header(props) {
21   const { window } = props;
22   const [mobileOpen, setMobileOpen] = React.useState(false);
23
24   const handleDrawerToggle = () => {
25     setMobileOpen(!mobileOpen);
26   };
27
28   const router = useRouter();
29
30   const drawer = (
31     <Box onClick={handleDrawerToggle} sx={{ textAlign: 'center' }}>
32       <Divider />
33       <List>
34         <Link href="/" passHref>
35           <ListItem component="a" disablePadding>
36             <ListItemButton sx={{ textAlign: 'center' }}>
37               <ListItemText primary="Übersicht" />
38             </ListItemButton>
39           </ListItem>
40         </Link>
```

```

41     <Link href="/rechenzentren" passHref>
42       <ListItem component="a" disablePadding>
43         <ListItemButton sx={{ textAlign: 'center' }}>
44           <ListItemText primary="Rechenzentren" />
45         </ListItemButton>
46       </ListItem>
47     </Link>
48     <Link href="/netzwerke" passHref>
49       <ListItem component="a" disablePadding>
50         <ListItemButton sx={{ textAlign: 'center' }}>
51           <ListItemText primary="Netzwerke" />
52         </ListItemButton>
53       </ListItem>
54     </Link>
55     <Link href="/endgeraete" passHref>
56       <ListItem component="a" disablePadding>
57         <ListItemButton sx={{ textAlign: 'center' }}>
58           <ListItemText primary="Endgeräte" />
59         </ListItemButton>
60       </ListItem>
61     </Link>
62     <div style={{ 'borderTop': 'rgba(0, 0, 0, 0.3) 1px solid' }}></div>
63     <Link href="/faq" passHref>
64       <ListItem component="a" disablePadding>
65         <ListItemButton sx={{ textAlign: 'center' }}>
66           <ListItemText primary="FAQ" />
67         </ListItemButton>
68       </ListItem>
69     </Link>
70   </List>
71 </Box>
72 );
73
74 const container = window !== undefined ? () => window().document.body :
75   ↪ undefined;
76
77 return (
78   <Box>
79     <AppBar component="nav" position="static" color={"secondary"} sx={{
80       ↪ boxShadow: '0 2px 4px -50px rgba(0, 0, 0, 0.2),2px 9px 13px -12px
81       ↪ rgba(0, 0, 0, 0.14),0 1px 10px -50px rgba(0, 0, 0, 0.12)' }}>
82       <Toolbar>
83         <IconButton
84           color="inherit"

```

```

82         aria-label="open drawer"
83         edge="start"
84         onClick={handleDrawerToggle}
85         sx={{ mr: 2, display: { sm: 'none' }, color: 'black !important' }}
86     >
87         <MenuIcon />
88     </IconButton>
89     <Box sx={{ display: { xs: 'none', sm: 'flex' } }}>
90         <div style={{ display: 'flex', width: 'calc(100vw*0.95)' }}>
91             <Link href="/" passHref>
92                 <Button sx={{ color: 'black !important' }}
93                     ↪ className={router.pathname === "/" ? styles.activeLink :
94                     ↪ styles.disabledLink}>
95                     Übersicht
96                 </Button>
97             </Link>
98             <Link href="/rechenzentren" passHref>
99                 <Button sx={{ color: 'black !important' }}
100                     ↪ className={router.pathname === "/rechenzentren" ?
101                     ↪ styles.activeLink : styles.disabledLink}>
102                     Rechenzentren
103                 </Button>
104             </Link>
105             <Link href="/netzwerke" passHref>
106                 <Button sx={{ color: 'black !important' }}
107                     ↪ className={router.pathname === "/netzwerke" ? styles.activeLink
108                     ↪ : styles.disabledLink}>
109                     Netzwerke
110                 </Button>
111             </Link>
112             <Link href="/endgeraete" passHref>
113                 <Button sx={{ color: 'black !important' }}
114                     ↪ className={router.pathname === "/endgeraete" ? styles.activeLink
115                     ↪ : styles.disabledLink}>
116                     Endgeräte
117                 </Button>
118             </Link>
119             <Link href="/faq" passHref>
120                 <Button sx={{ color: 'black !important', marginLeft: 'auto' }}
121                     ↪ className={router.pathname === "/faq" ? styles.activeLink :
122                     ↪ styles.disabledLink}>
123                     FAQ
124                 </Button>
125             </Link>

```

```

116         </div>
117     </Box>
118 </Toolbar>
119 </AppBar><Box component="nav">
120     <Drawer
121         container={container}
122         variant="temporary"
123         open={mobileOpen}
124         onClose={handleDrawerToggle}
125         color="secondary"
126         ModalProps={{
127             keepMounted: true, // Better open performance on mobile.
128         }}
129         sx={{
130             display: { xs: 'block', sm: 'none' },
131             '& .MuiDrawer-paper': { boxSizing: 'border-box', width: drawerWidth },
132         }}
133     >
134         {drawer}
135     </Drawer>
136 </Box>
137 </Box>
138 )
139 }

```

Listing B.1.4: footer.js

```

1  import * as React from 'react';
2  import styles from '../styles/Home.module.css'
3  import Link from 'next/link';
4
5  export default function Footer() {
6      return (
7          <div style={{display: 'flex', justifyContent: 'center', marginTop: '5rem',
8              ↪ marginBottom: '2rem'}}>
9              <box className={styles.footer}>
10                 <div style={{textAlign: 'center'}}>Bachelorarbeit UZH</div>
11                 <div style={{textAlign: 'center'}}> 2022</div>
12                 <div style={{display: 'grid', gridTemplateColumns: 'repeat(2,
13                     ↪ 1fr)', marginTop: '1rem', height: '40px' }}>

```

```

12 <div style={{display: 'grid', justifyContent: 'start',
    ↳ alignContent: 'center'}}>
13 <div style={{lineHeight: '0.75rem'}}><a
    ↳ href='https://www.freepik.com/vectors/smart-devices'>Smart
    ↳ devices vector</a><a
    ↳ href="https://www.freepik.com/vectors/data-center">, data
    ↳ center vector</a><a
    ↳ href='https://www.freepik.com/vectors/mobile-tower'>,
    ↳ mobile tower vector </a><a href='https://www.flaticon.com/d
    ↳ e/kostenloses-icon/pdf-datei_80942?term=pdf&page=1&position
    ↳ =7&page=1&position=7&related_id=80942&origin=tag'>, and pdf
    ↳ vector</a><a href='https://www.freepik.com/'> created by
    ↳ macrovector - www.freepik.com</a></div>
14 </div>
15 <div style={{display: 'grid', justifyContent: 'end', alignContent:
    ↳ 'center'}}>
16 <div style={{display: 'grid', gridTemplateRows: 'repeat(2, 1fr)}}>
17 <div style={{fontSize: '0.75rem'}}>PDF Bachelorarbeiten</div>
18 <div style={{display: 'grid', gridTemplateColumns: 'repeat(2,
    ↳ 1fr)', gap: '1rem', marginTop: '-0.5rem'}}>
19 <Link href='/files/test.pdf' passHref alt='Energieverbrauch
    ↳ und CO2-Emissionen durch Videostreaming in Abhngigkeit von
    ↳ technischen und geographischen Parametern' target='_blank'
    ↳ rel='noopener noreferrer'>
20 <div style={{width: '40px', height: '40px', cursor:
    ↳ 'pointer', borderRadius: '50%', backgroundColor:
    ↳ '#cfe0ea', display: 'flex', justifyContent: 'center',
    ↳ alignItems: 'center'}}><img src='/pdf-datei.png'
    ↳ width='14.5px' className={styles.filterColor}/></div>
21 </Link>
22 <Link href='/files/test.pdf' passHref alt='Energieverbrauch
    ↳ und CO2-Emissionen durch Videostreaming in Abhngigkeit von
    ↳ technischen und geographischen Parametern' target='_blank'
    ↳ rel='noopener noreferrer'>
23 <div style={{width: '40px', height: '40px', cursor:
    ↳ 'pointer', borderRadius: '50%', backgroundColor:
    ↳ '#cfe0ea', display: 'flex', justifyContent: 'center',
    ↳ alignItems: 'center'}}><img src='/pdf-datei.png'
    ↳ width='14.5px' className={styles.filterColor}/></div>
24 </Link>
25 </div>
26 </div>
27 </div>
28 </div>

```



```

29         </box>
30     </div>
31 )
32 }

```

Listing B.1.5: cards.js

```

1  /* eslint-disable @next/next/no-img-element */
2  import * as React from 'react';
3  import styles from '../styles/Home.module.css'
4  import Link from 'next/link'
5
6  export default function Cards(props) {
7      return (
8          <div>
9              <div className={styles.resultContainer}>
10                 <svg className={styles.resultRechenzentrenContainer} width='100%'
11                     ↪ viewBox="0 0 510 395" fill="none"
12                     ↪ xmlns="http://www.w3.org/2000/svg">
13                     <path opacity="0.1" d="M62.1634 40.5224C66.705 16.9969 87.297 0
14                         ↪ 111.257 0H459.999C487.614 0 509.999 22.3858 509.999
15                         ↪ 509.999 335.614 487.614 358 459.999 358H61.45C30.034 358
16                         ↪ 6.40147 329.369 12.3564 298.522L62.1634 40.5224Z"
17                         ↪ fill="#68C9BA"/>
18                     <path d="M472.682 124.03C502.313 153.207 467.325 181.381 405.745
19                         ↪ 182.141C283.317 175.137 255.69 81.0076 264.943 59.9029C274.196
20                         ↪ 38.7983 301.746 38.2223 342.567 81.2153C383.388 124.208 435.643
21                         ↪ 87.5574 472.682 124.03Z" stroke="white" strokeWidth="1.5"/>
22                     <foreignObject x="-10%" y="20%" width="100%" height="100%">
23                         </img>
26                     </foreignObject>
27                     <foreignObject x="40%" y="10%" width="100%" height="100%">
28                         <br/>
29                         <h3 className={styles.resultTextOne}>Rechenzentren</h3>
30                         <h3
31                             ↪ className={styles.resultTextTwo}>{Math.round(props.Datacenter*100)
32                             ↪ / 100}<span className={styles.resultTextThree}> g
33                             ↪ C02e</span></h3>

```

```

20      <p className={styles.resultTextFour}>entspricht in etwa:
      ↪ <strong>{props.DataCenterPercentage}%</strong> der
      ↪ Gesamtemissionen</p>
21      <Link passHref href="/rechenzentren">
22      <p className={styles.resultTextFive}>Erfahre mehr +</p>
23      </Link>
24    </foreignObject>
25  </svg>
26  <svg className={styles.resultNetzwerkeContainer} width='100%'
    ↪ viewBox="0 0 510 395" fill="none"
    ↪ xmlns="http://www.w3.org/2000/svg">
27    <path opacity="0.5" d="M62.1634 40.5224C66.705 16.9969 87.297 0
    ↪ 111.257 0H459.999C487.614 0 509.999 22.3858 509.999
    ↪ 50V308C509.999 335.614 487.614 358 459.999 358H61.45C30.034 358
    ↪ 6.40147 329.369 12.3564 298.522L62.1634 40.5224Z"
    ↪ fill="#d4d2e4"/>
28    <ellipse rx="35.0679" ry="18.6437" transform="matrix(0.950089
    ↪ 0.311978 -0.399416 0.91677 440.521 312.032)" stroke="white"
    ↪ strokeWidth="1.5"/>
29    <path d="M124.968 253.712C55.2412 265.919 38.3959 201.795 86.0723
    ↪ 127.691C194.343 -12.8766 365.34 28.8655 391.418 56.6612C417.496
    ↪ 84.457 396.539 117.798 296.052 132.395C195.564 146.991 212.128
    ↪ 238.454 124.968 253.712Z" stroke="white" strokeWidth="1.5"/>
30    <foreignObject x="-15%" y="10%" width="100%" height="100%">
31      </img>
32    </foreignObject>
33    <foreignObject x="40%" y="10%" width="100%" height="100%">
34      <br/>
35      <h3 className={styles.resultTextOne}>Netzwerke</h3>
36      <h3
    ↪ className={styles.resultTextTwo}>{Math.round(props.Network*100)}
    ↪ / 100}<span className={styles.resultTextThree}> g
    ↪ CO2e</span></h3>
37      <p className={styles.resultTextFour}>entspricht in etwa:
    ↪ <strong>{props.NetworkPercentage}%</strong> der
    ↪ Gesamtemissionen </p>
38      <Link passHref href="/netzwerke">
39      <p className={styles.resultTextFive}>Erfahre mehr +</p>
40      </Link>
41    </foreignObject>
42  </svg>

```

```

43      <svg className={styles.resultEndgeräteContainer} width='100%'
      ↪   viewBox="0 0 510 395" fill="none"
      ↪   xmlns="http://www.w3.org/2000/svg">
44      <path opacity="0.1" d="M62.1634 40.5224C66.705 16.9969 87.297 0
      ↪   111.257 0H459.999C487.614 0 509.999 22.3858 509.999
      ↪   50V308C509.999 335.614 487.614 358 459.999 358H61.45C30.034 358
      ↪   6.40147 329.369 12.3564 298.522L62.1634 40.5224Z"
      ↪   fill="#0772BF"/>
45      <path d="M248.628 259.341C216.323 227.53 254.467 196.813 321.604
      ↪   195.985C455.08 203.621 485.2 306.245 475.113 329.254C465.025
      ↪   352.263 434.988 352.891 390.484 306.019C345.979 259.146 289.009
      ↪   299.104 248.628 259.341Z" stroke="white" strokeWidth="1.5"/>
46      <foreignObject x="-10%" y="20%" width="100%" height="100%">
47      </img>
48      </foreignObject>
49      <foreignObject x="40%" y="10%" width="100%" height="100%">
50      <br/>
51      <h3 className={styles.resultTextOne}>Endgeräte</h3>
52      <h3
      ↪   className={styles.resultTextTwo}>{Math.round(props.Device*100)
      ↪   / 100}<span className={styles.resultTextThree}> g
      ↪   CO2e</span></h3>
53      <p className={styles.resultTextFour}>entspricht in etwa:
      ↪   <strong>{props.DevicePercentage}%</strong> der
      ↪   Gesamtemissionen </p>
54      <Link passHref href="/endgeraete">
55      <p className={styles.resultTextFive}>Erfahre mehr </p>
56      </Link>
57      </foreignObject>
58      </svg>
59      </div>
60    </div>
61  )
62 }

```

B.2 Pages

Listing B.2.1: 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
```

Listing B.2.2: index.js

```
1  /* eslint-disable @next/next/no-img-element */
2  import * as React from 'react';
3  import { useRef, useEffect } from 'react';
4  import styles from '../styles/Home.module.css'
5  import Footer from '../components/footer';
6  import Header from '../components/header';
7  import Cards from '../components/cards';
8  import Resultgraph from '../components/resultgraph';
9  import BasicModal from '../components/modal';
10 import Box from '@mui/material/Box';
11 import InputLabel from '@mui/material/InputLabel';
12 import FormControl from '@mui/material/FormControl';
13 import OutlinedInput from '@mui/material/OutlinedInput';
14 import Grid from '@mui/material/Grid';
15 import Slider from '@mui/material/Slider';
16 import MuiInput from '@mui/material/Input';
17 import NativeSelect from '@mui/material/NativeSelect';
18 import MuiButton from '@mui/material/Button';
19
20 const kWhDataCenter = 0.0013;
```

```

21
22  const kWhSD = 1;
23  const kWhHD = 3;
24  const kWh4K = 7;
25
26  const kWhSwitzerland = 437;
27  const kWhGermany = 332;
28  const kWhAustria = 143;
29  const kWhSweden = 42;
30  const kWhFinland = 142;
31  const kWhSpain = 200;
32  const kWhItaly = 337;
33  const kWhFrance = 68;
34  const kWhEngland = 246;
35
36  const kWhTV = 0.074;
37  const kWhSmartphone = 0.001;
38  const kWhNotebook = 0.022;
39  const kWhTablet = 0.007;
40  const kWhComputer = 0.115;
41
42  const kWhWLAN = 0.022;
43  const kWh3G = 0.447;
44  const kWh4G = 0.080;
45  const kWh5G = 0.029;
46
47  const scrollToRef = (ref) => window.scrollTo({left: 0, top: ref.current.offsetTop,
    ↪ behavior: 'smooth'});
48
49  const ITEM_HEIGHT = 48;
50  const ITEM_PADDING_TOP = 8;
51  const MenuProps = {
52    PaperProps: {
53      style: {
54        maxHeight: ITEM_HEIGHT * 4.5 + ITEM_PADDING_TOP,
55        width: 250,
56      },
57    },
58  };
59
60  export default function Home() {
61    const [deviceName, setDeviceName] = React.useState(null);
62    const [hasDeviceError, setHasDeviceError] = React.useState(false);
63    const [connection, setConnection] = React.useState(null);

```

```

64  const [hasConnectionError, setHasConnectionError] = React.useState(false);
65  const [resolution, setResolution] = React.useState(null);
66  const [hasResolutionError, setHasResolutionError] = React.useState(false);
67  const [country, setCountry] = React.useState(null);
68  const [hasCountryError, setHasCountryError] = React.useState(false);
69  const [datacenter, setDatacenter] = React.useState([]);
70  const [network, setNetwork] = React.useState([]);
71  const [device, setDevice] = React.useState([]);
72  const [emissionFactor, setEmissionFactor] = React.useState([]);
73  const [duration, setDuration] = React.useState(1);
74  const [car, setCar] = React.useState(null);
75  const [clicked, setClicked] = React.useState(false);
76  const myRef = useRef(null)
77
78  const emissions = Math.round((datacenter+network+device)*100)/100;
79  const energy = Math.round(((datacenter+network+device)/emissionFactor)*100)/100;
80  const dataCenterPercentage = Math.round((datacenter/emissions)*100) || 0;
81  const networkPercentage = Math.round((network/emissions)*100) || 0;
82  const devicePercentage = Math.round((device/emissions)*100) || 0;
83
84  const handleSliderChange = (_event, newDuration) => {
85    setDuration(newDuration);
86    sessionStorage.setItem("duration", newDuration);
87  };
88
89  const handleInputChange = (event) => {
90    setDuration(event.target.value === '' ? '' : Number(event.target.value));
91  };
92
93  const handleBlur = () => {
94    if (duration < 0) {
95      setDuration(0);
96    } else if (duration > 100) {
97      setDuration(100);
98    }
99  };
100
101  const handleDeviceChange = (event) => {
102    const {
103      target: { value },
104    } = event;
105    setDeviceName(value);
106    hideDeviceInput();
107    if (document.getElementById("Smartphone").selected){

```

```

108     sessionStorage.setItem("device", "Smartphone");
109 }
110 else if (document.getElementById("Tablet").selected){
111     sessionStorage.setItem("device", "Tablet");
112 }
113 else if (document.getElementById("Notebook").selected){
114     sessionStorage.setItem("device", "Notebook");
115 }
116 else if (document.getElementById("Computer").selected){
117     sessionStorage.setItem("device", "Computer");
118 }
119 else if (document.getElementById("TV").selected){
120     sessionStorage.setItem("device", "TV");
121 }
122 };
123
124 const handleNetworkChange = (event) => {
125     const {
126         target: { value },
127     } = event;
128     setConnection(value);
129     hideNetworkInput();
130     if (document.getElementById("3G").selected){
131         sessionStorage.setItem("network", "3G");
132     }
133     else if (document.getElementById("4G").selected){
134         sessionStorage.setItem("network", "4G");
135     }
136     else if (document.getElementById("5G").selected){
137         sessionStorage.setItem("network", "5G");
138     }
139     else if (document.getElementById("WLAN").selected){
140         sessionStorage.setItem("network", "WLAN");
141     }
142 };
143
144 const handleResolutionChange = (event) => {
145     const {
146         target: { value },
147     } = event;
148     setResolution(value);
149     if (document.getElementById("SD").selected){
150         sessionStorage.setItem("resolution", "SD");
151     }

```

```

152     else if (document.getElementById("FHD").selected){
153         sessionStorage.setItem("resolution", "FHD");
154     }
155     else if (document.getElementById("4K").selected){
156         sessionStorage.setItem("resolution", "4K");
157     }
158 };
159
160 const handleCountryChange = (event) => {
161     const {
162         target: { value },
163     } = event;
164
165     setCountry(value);
166     if (document.getElementById("switzerland").selected){
167         sessionStorage.setItem("country", "switzerland");
168     }
169     else if (document.getElementById("germany").selected){
170         sessionStorage.setItem("country", "germany");
171     }
172     else if (document.getElementById("france").selected){
173         sessionStorage.setItem("country", "france");
174     }
175     else if (document.getElementById("italy").selected){
176         sessionStorage.setItem("country", "italy");
177     }
178     else if (document.getElementById("sweden").selected){
179         sessionStorage.setItem("country", "sweden");
180     }
181     else if (document.getElementById("finland").selected){
182         sessionStorage.setItem("country", "finland");
183     }
184     else if (document.getElementById("austria").selected){
185         sessionStorage.setItem("country", "austria");
186     }
187     else if (document.getElementById("spain").selected){
188         sessionStorage.setItem("country", "spain");
189     }
190     else if (document.getElementById("england").selected){
191         sessionStorage.setItem("country", "england");
192     }
193 };
194
195 function executeSubmit() {

```



```

196     validateInput();
197     if (deviceName && connection && resolution && country) {
198         scrollToRef(myRef);
199     }
200 }
201
202 function validateInput() {
203     if (!deviceName) {
204         setHasDeviceError(true);
205     } else {
206         setHasDeviceError(false);
207     }
208     if (!connection) {
209         setHasConnectionError(true);
210     } else {
211         setHasConnectionError(false);
212     }
213     if (!resolution) {
214         setHasResolutionError(true);
215     } else {
216         setHasResolutionError(false);
217     }
218     if (!country) {
219         setHasCountryError(true);
220     } else {
221         setHasCountryError(false);
222     }
223     setValues();
224 }
225
226 function setValues() {
227     if (deviceName && connection && resolution && country) {
228         setDatacenter(parseFloat(country)*duration*kWhDataCenter);
229
230         ↪ setNetwork(parseFloat(country)*duration*parseFloat(connection)*parseFloat(resolution));
231         setDevice(parseFloat(country)*duration*parseFloat(deviceName));
232         setEmissionFactor(parseFloat(country));
233         setCar(143);
234     }
235 }
236
237 function hideDeviceInput(){

```

```

237     if (document.getElementById("TV").selected ||
        ↪ document.getElementById("Computer").selected ||
        ↪ document.getElementById("Notebook").selected){
238         document.getElementById("3G").setAttribute("disabled", "disabled");
239         document.getElementById("4G").setAttribute("disabled", "disabled");
240         document.getElementById("5G").setAttribute("disabled", "disabled");
241     }
242     else{
243         document.getElementById("3G").removeAttribute("disabled");
244         document.getElementById("4G").removeAttribute("disabled");
245         document.getElementById("5G").removeAttribute("disabled");
246     }
247 }
248
249 function hideNetworkInput(){
250     if (document.getElementById("3G").selected ||
        ↪ document.getElementById("4G").selected ||
        ↪ document.getElementById("5G").selected){
251         document.getElementById("TV").setAttribute("disabled", "disabled");
252         document.getElementById("Computer").setAttribute("disabled", "disabled");
253         document.getElementById("Notebook").setAttribute("disabled", "disabled");
254     }
255     else{
256         document.getElementById("TV").removeAttribute("disabled");
257         document.getElementById("Computer").removeAttribute("disabled");
258         document.getElementById("Notebook").removeAttribute("disabled");
259     }
260 }
261
262 useEffect(() => {
263     if (sessionStorage.getItem("device") !== null){
264         document.getElementById(sessionStorage.getItem("device")).selected =
            ↪ "selected";
265
            ↪ setDeviceName(document.getElementById(sessionStorage.getItem("device")).value);
266         hideDeviceInput();
267     }
268     if (sessionStorage.getItem("resolution") !== null){
269         document.getElementById(sessionStorage.getItem("resolution")).selected =
            ↪ "selected";
270
            ↪ setResolution(document.getElementById(sessionStorage.getItem("resolution")).value);
271     }
272     if (sessionStorage.getItem("network") !== null){

```

```

273     document.getElementById(sessionStorage.getItem("network")).selected =
        ↳ "selected";
274
        ↳ setConnection(document.getElementById(sessionStorage.getItem("network")).value);
275     hideNetworkInput();
276 }
277 if (sessionStorage.getItem("country") !== null){
278     document.getElementById(sessionStorage.getItem("country")).selected =
        ↳ "selected";
279     setCountry(document.getElementById(sessionStorage.getItem("country")).value);
280 }
281 if (sessionStorage.getItem("duration") !== null){
282     setDuration(Number(sessionStorage.getItem("duration")));
283 }
284 setClicked(!clicked);
285 }, []);
286
287 useEffect(() => {
288     setValues();
289 }, [clicked]);
290
291 return (
292     <div>
293         <Header />
294         <div className={styles.site}>
295             <h1 className={styles.title}>
296                 Streaming Energie- und CO2-Rechner
297             </h1>
298
299             <h2>
300                 Mit diesem Rechner kannst du den Energieverbrauch und die CO2-Emissionen
301                 ↳ eines Video-Streams berechnen.
302             </h2>
303
304             <main>
305                 <card className={styles.settings}>
306                     <div className={styles.cardText}>
307                         <h3 style={{overflow: 'visible'}}>
308                             <BasicModal />
309                             Finde heraus, wieviel CO2 du beim Videostreamen verursacht
310                         </h3>
311                         <p className={styles.paragraph}>

```

```

311         Der Energieverbrauch eines Videostreams ist von mehreren Faktoren,
           ↳ wie dem Endgerät, der Videoauflösung und der
           ↳ Netzwerkverbindung, abhängig.
312     </p>
313 </div>
314 <div className={styles.controls}>
315     <div className={styles.cardWrapper}>
316     <div className={styles.selectContainer}>
317         <FormControl className={styles.select} error={hasDeviceError}>
318             <InputLabel id="device-name-label"
           ↳ shrink={!deviceName}>Gerät</InputLabel>
319             <NativeSelect
320                 labelId="device-label"
321                 id="device-name"
322                 value={deviceName}
323                 onChange={handleDeviceChange}
324                 input=<OutlinedInput notched={!deviceName} label="Device"
           ↳ />
325                 MenuProps={MenuProps}
326             >
327                 <option hidden selected></option>
328                 <option id="TV" value={kWhTV}>TV</option>
329                 <option id="Computer" value={kWhComputer}>Computer</option>
330                 <option id="Notebook" value={kWhNotebook}>Notebook</option>
331                 <option id="Tablet" value={kWhTablet}>Tablet</option>
332                 <option id="Smartphone"
           ↳ value={kWhSmartphone}>Smartphone</option>
333             </NativeSelect>
334         </FormControl>
335
336         <FormControl className={styles.select} error={hasResolutionError}>
337             <InputLabel id="resolution-name-label"
           ↳ shrink={!resolution}>Auflösung</InputLabel>
338             <NativeSelect
339                 labelId="resolution-label"
340                 id="device-name"
341                 value={resolution}
342                 onChange={handleResolutionChange}
343                 input=<OutlinedInput notched={!resolution}
           ↳ label="Resolution" />
344                 MenuProps={MenuProps}
345             >
346                 <option hidden selected></option>
347                 <option id="SD" value={kWhSD}>Standard Definition</option>

```

```

348         <option id="FHD" value={kWhHD}>Full HD</option>
349         <option id="4K" value={kWh4K}>UHD 4K</option>
350     </NativeSelect>
351 </FormControl>
352
353 <FormControl className={styles.select}
354   ↪ error={hasConnectionError}>
355   <InputLabel id="network-name-label"
356     ↪ shrink={!connection}>Netzwerk</InputLabel>
357   <NativeSelect
358     labelId="network-label"
359     id="network-name"
360     value={connection}
361     onChange={handleNetworkChange}
362     input=<OutlinedInput notched={!connection}
363       ↪ label="Connection" />
364     MenuProps={MenuProps}
365   >
366     <option hidden selected></option>
367     <option id="WLAN" value={kWhWLAN}>WLAN</option>
368     <option id="3G" value={kWh3G}>3G</option>
369     <option id="4G" value={kWh4G}>4G</option>
370     <option id="5G" value={kWh5G}>5G</option>
371   </NativeSelect>
372 </FormControl>
373
374 <FormControl className={styles.select} error={hasCountryError}>
375   <InputLabel id="country-name-label"
376     ↪ shrink={!country}>Land</InputLabel>
377   <NativeSelect
378     labelId="country-label"
379     id="country-name"
380     value={country}
381     onChange={handleCountryChange}
382     input=<OutlinedInput notched={!country} label="Land" />
383     MenuProps={MenuProps}
384   >
385     <option hidden selected></option>
386     <option id="switzerland"
387       ↪ value={kWhSwitzerland}>Schweiz</option>
388     <option id="germany" value={kWhGermany}>Deutschland</option>
389     <option id="france" value={kWhFrance}>Frankreich</option>
390     <option id="italy" value={kWhItaly}>Italien</option>
391     <option id="sweden" value={kWhSweden}>Schweden</option>

```

```

387         <option id="finland" value={kWhFinland}>Finnland</option>
388         <option id="austria" value={kWhAustria}>Österreich</option>
389         <option id="spain" value={kWhSpain}>Spanien</option>
390         <option id="england" value={kWhEngland}>England</option>
391     </NativeSelect>
392 </FormControl>
393 </div>
394
395 <div style={{display:'grid', gridTemplateColumns: '1fr', alignItems:
    ↪ 'center'}}>
396     <Box>
397         <a id="input-slider" gutterBottom className={styles.label}>
398             Dauer (Stunden)
399         </a>
400         <Grid container alignItems="center" justifyContent="center">
401             <Grid item xs>
402                 <Slider
403                     value={typeof duration === 'number' ? duration : 0}
404                     onChange={handleSliderChange}
405                     aria-labelledby="input-slider"
406                     defaultValue={1}
407                     step={0.1}
408                     max={24}
409                 />
410             </Grid>
411             <Grid item>
412                 <MuiInput
413                     className={styles.input}
414                     sx={{ ml: 1.5 }}
415                     value={duration}
416                     size="small"
417                     onChange={handleInputChange}
418                     onBlur={handleBlur}
419                     inputProps={{
420                         step: 0.5,
421                         min: 0,
422                         max: 24,
423                         type: 'number',
424                         'aria-labelledby': 'input-slider',
425                     }}
426                 />
427             </Grid>
428         </Grid>
429     </Box>

```

```

430         </div>
431     <div>
432         <MuiButton
433             onClick={executeSubmit}
434             variant="contained" >
435             Ausrechnen
436         </MuiButton>
437     </div>
438 </div>
439 </div>
440 </card>
441 <div id="result" ref = { myRef }>
442     <Resultgraph
443         Datacenter = { datacenter }
444         Device = { device }
445         Network = { network }
446         Emissions = { emissions }
447         Energy = { energy }
448         Car = { car }
449     />
450 </div>
451
452 <div style={{textAlign: 'left', marginTop: '5rem', marginBottom:
    ↪ '-1rem'}}>
453     <h3>
454         Zusammensetzung der CO2-Emissionen:
455     </h3>
456 </div>
457 <Cards
458     Datacenter = { datacenter }
459     DataCenterPercentage = { dataCenterPercentage }
460     Network = { network }
461     NetworkPercentage = {networkPercentage }
462     Device = { device }
463     DevicePercentage = { devicePercentage }
464 />
465 </main>
466 </div>
467 <Footer />
468 </div>
469 );
470 }

```

Listing B.2.3: faq.js

```
1  import React, { useEffect, useState } from "react";
2  import Faq from "react-faq-component";
3  import Link from 'next/link';
4  import styles from '../styles/Home.module.css';
5  import Header from "../components/header";
6  import Footer from "../components/footer";
7
8  const data = {
9    title: "FAQ",
10   rows: [
11     {
12       title: "Was kann ich als Endnutzer tun, um den Energieverbrauch durch
13         ↳ Streaming zu reduzieren?",
14       content: `Ein kleineres Gerät wie ein Tablet oder ein Smartphone
15         ↳ verbraucht weniger Energie. Die Helligkeit des Endgeräts kann
16         ↳ reduziert werden und am umweltfreundlichsten ist es, über das
17         ↳ Festnetz oder das 5G-Mobilfunknetz mit einer niedrigen Auflösung zu
18         ↳ streamen.`,
19     },
20     {
21       title: "Was können Rechenzentren tun, um ihren Energieverbrauch zu
22         ↳ reduzieren?",
23       content: `Rechenzentren können ihren Energieverbrauch reduzieren, indem
24         ↳ sie die Energieeffizienz und die Auslastung der Server erhöhen.
25         ↳ Abgesehen davon bietet Software mit der Konsolidierung und
26         ↳ Virtualisierung von Rechenzentrumsarbeitslasten in die Cloud
27         ↳ erhebliche Effizienzgewinne. Zuletzt gibt es verschiedene
28         ↳ nachhaltige
29         ↳ Konzepte wie die freie Kühlung, um den Energieverbrauch durch die
30         ↳ Kühlung zu reduzieren.`,
31     },
32     {
33       title: "Ist es umweltfreundlicher mit dem Mobilfunknetz oder mit dem
34         ↳ Festnetz zu streamen?",
35       content: `Die Datenübertragung über das Festnetz benötigt weniger
36         ↳ Energie als die Übertragung über das Mobilfunknetz. Beim
37         ↳ Mobilfunknetz gibt es insbesondere erhebliche Unterschiede zwischen
38         ↳ den verschiedenen Netzwerkgenerationen. Mit der fünften
39         ↳ Mobilfunkgeneration 5G (LTE) wird mittlerweile eine hohe Datenrate,
40         ↳ kurze Latenzzeit und gute Skalierbarkeit geboten, sodass der
41         ↳ Unterschied zum Festnetz nicht mehr gross ist.`,
42     }
43   ]
44 }
```



```

23     },
24     {
25         title: "Weshalb ist die CO2-Auslastung in den verschiedenen Ländern
        ↳ unterschiedlich gross?",
26         content: `Die Emissionen werden mit einem länderspezifischen Strommix
        ↳ berechnet. Verschiedene Länder erzeugen, importieren und nutzen
        ↳ Energien auf unterschiedliche Art und Weise und setzen
        ↳ unterschiedliche Mischungen aus erneuerbaren und konventionellen
        ↳ Energien ein. Auch wenn der Stromverbrauch in den Ländern gleich
        ↳ gross ist, hat der Strommix zuletzt einen entscheidenden Einfluss
        ↳ auf die Umweltauswirkungen.`,
27     },
28     {
29         title: "Wie exakt sind die Angaben zu den Energie- und
        ↳ Emissionswerten?",
30         content: `Die Berechnungen basieren auf Literaturdaten, die den
        ↳ aktuellen Forschungsstand widerspiegeln. Da keine eindeutige
        ↳ Berechnungsmethode vorliegt, sind die Angaben implizit mit einigen
        ↳ Limitation verbunden. Zum Einen wurde jeweils nur die Nutzungsphase
        ↳ der Geräte betrachtet (ohne Herstellung und Transport). Ausserdem
        ↳ gibt es Unsicherheiten bei der Berechnung des Energieverbrauchs von
        ↳ Netzkomponenten, da es derzeit an quantitativen Daten mangelt und
        ↳ geeignete Berechnungsmethoden weiter validiert und verfeinert werden
        ↳ müssen.`,
31     },
32     {
33         title: "Wie wird sich der Energieverbrauch in der Zukunft entwickeln?",
34         content: `Es werden für die Zukunft noch weitere Effizienzsteigerungen
        ↳ erwartet, die den Energieverbrauch und damit die THG-Emissionen
        ↳ einer Stunde Videostreaming weiter senken werden. Gleichermassen
        ↳ wird jedoch erwartet, dass der weltweite Videokonsum weiter steigt,
        ↳ sodass die Gesamtemissionen voraussichtlich auf einem konstanten
        ↳ Niveau stagnieren oder gar ansteigen.`,
35     }
36 ],
37 };
38
39 const faqstyles = {
40     bgColor: '#F5F7F6',
41     titleTextColor: "#F5F7F6",
42     rowTitleColor: "black",
43     rowContentColor: 'darkslategray',
44 };
45

```

```

46  const config = {
47      animate: true,
48      tabFocus: true
49  };
50
51  export default function Home() {
52
53      return (
54          <div className={styles.spaceFooter}>
55              <Header />
56              <div className={styles.site}>
57                  <div className={styles.content}>
58                      <h1 className={styles.title}>
59                          <Link href="/" passHref>
60                              <div className={styles.backButton}>
61                                  <svg className={styles.backArrow}
62                                      ↪ xmlns="http://www.w3.org/2000/svg" height="100%"
63                                      ↪ viewBox="0 0 24 24" width="100%"><path d="M0
64                                      ↪ 0h24v24H0z" fill="none"/><path d="M20
65                                      ↪ 11H7.8315.59-5.59L12 41-8 8 8 8 1.41-1.41L7.83
66                                      ↪ 13H20v-2z"/></svg>
67                                  </div>
68                              </Link>
69                              FAQ
70                          </h1>
71                          <h2>
72                              Hier gibt es Antworten zu häufig gestellten Fragen.
73                          </h2>
74                          <div style={{marginTop: "-2rem", marginLeft: "0.5rem", width:
75                              ↪ "95%"}}>
76                              <Faq
77                                  data={data}
78                                  styles={faqstyles}
79                                  config={config}
80                              />
81                          </div>
82                      </div>
83                  </div>
84              </div>
85              <Footer />
86          </div>
87      );
88  }

```

Listing B.2.4: endgeraete.js

```
1  import * as React from 'react';
2  import styles from '../styles/Home.module.css';
3  import Link from 'next/link';
4  import Header from '../components/header';
5  import Footer from '../components/footer';
6
7  export default function Home() {
8
9      return (
10         <div className={styles.spaceFooter}>
11             <Header />
12             <div className={styles.site}>
13                 <div className={styles.content}>
14                     <h1 className={styles.title}>
15                         <Link href="/" passHref>
16                             <div className={styles.backButton}>
17                                 <svg className={styles.backArrow}>
18                                     ↪ xmlns="http://www.w3.org/2000/svg" height="100%"
19                                     ↪ viewBox="0 0 24 24" width="100%"><path d="M0
20                                     ↪ 0h24v24H0z" fill="none"/><path d="M20
21                                     ↪ 11H7.83l5.59-5.59L12 4l-8 8 8 8 1.41-1.41L7.83
22                                     ↪ 13H20v-2z"/></svg>
23                                 </div>
24                             </Link>
25                             Endgeräte
26                     </h1>
27                     <h2>
28                         Hier erfährst du mehr über die Engeräte.
29                     </h2>
30                     <main>
31                         <card className={styles.textBoxPages}>
32                             <p className={styles.cardTextPages}>
```

28

Für den Energieverbrauch des Endgeräts, auf dem
→ gestreamt wird, ist insbesondere die
→ Bildschirmgrösse ausschlaggebend. Grosse
→ Fernseher haben einen höheren Energieverbrauch
→ als Smartphones, Tablets oder Notebooks. Bei
→ Geräten wie Smartphones oder Tablets ist der
→ Energieverbrauch durch die Produktion aufgrund
→ ihrer kurzen Lebensdauer relevant, die
→ Berechnungen des Energierechners beziehen sich
→ jedoch ausschliesslich auf die Nutzungsphase.
→ Durch den hohen Energieverbrauch grosser
→ Fernseher sind kleinere Geräte, was den
→ Energieverbrauch betrifft, klar vorzuziehen.
→ Ausserdem ist es sinnvoll, wenn möglich auf
→ weitere Peripheriegeräte (wie z.B.
→ Gamingkonsolen oder Set-Top Boxen) zu verzichten
→ um den Energieverbrauch auf ein Minimum zu
→ reduzieren.

```
29         </p>
30     </card>
31 </main>
32 </div>
33 </div>
34 <Footer />
35 </div>
36 );
37 }
```

Listing B.2.5: netzwerke.js

```
1 import styles from '../styles/Home.module.css';
2 import Link from 'next/link';
3 import React from "react";
4 import Header from "../components/header";
5 import Footer from "../components/footer";
6
7 export default function Home() {
8
9     return (
10         <div className={styles.spaceFooter}>
11             <Header />
```

```

12     <div className={styles.site}>
13         <div className={styles.content}>
14             <h1 className={styles.title}>
15                 <Link href="/" passHref>
16                     <div className={styles.backButton}>
17                         <svg className={styles.backArrow}
18                             ↪ xmlns="http://www.w3.org/2000/svg" height="100%"
19                             ↪ viewBox="0 0 24 24" width="100%"><path d="M0
20                             ↪ 0h24v24H0z" fill="none"/><path d="M20
21                             ↪ 11H7.8315.59-5.59L12 41-8 8 8 8 1.41-1.41L7.83
22                             ↪ 13H20v-2z"/></svg>
23                         </div>
24                     </Link>
25                     Netzwerke
26             </h1>
27             <h2>
28                 Hier erfährst du mehr über die Netzwerke.
29             </h2>
30             <main>
31                 <card className={styles.textBoxPages}>
32                     <p className={styles.cardTextPages}>
33                         Die Kommunikationsnetze verbrauchen bei der
34                         ↪ Übertragung der gewünschten Videodatei an den
35                         ↪ Nutzer des Streamingangebots Energie.
36                         ↪ Entscheidend für die Höhe des Energieverbrauchs
37                         ↪ sind hier die Grösse der Videodatei und die
38                         ↪ Effizienz der Infrastruktur und Netzwerkgeräte.
39                         ↪ Dateien werden entweder über das Festnetz oder
40                         ↪ das Mobilfunknetz übertragen. Generell wird bei
41                         ↪ der Übertragung mit dem Festnetz weniger Energie
42                         ↪ benötigt. Die neuen Netzwerkgenerationen
43                         ↪ (Glasfaserkabel und 5G) sind ihren Vorgängern
44                         ↪ Kupferkabel, 3G und 4G klar vorzuziehen und ein
45                         ↪ Ausbau dieser Infrastruktur kann den
46                         ↪ Energieverbrauch erheblich reduzieren. Um die
47                         ↪ Grösse der Videodatei zu reduzieren und damit
48                         ↪ den Energieverbrauch zu senken, kann der Nutzer
49                         ↪ eine geringere Auflösung wählen. Ausserdem
50                         ↪ ermöglichen Komprimierungsstandards immer
51                         ↪ effektivere Möglichkeiten, die Grösse der
52                         ↪ Videodateien zu reduzieren.
53                     </p>
54                 </card>
55             </main>

```

```

32         </div>
33     </div>
34     <Footer />
35 </div>
36 );
37 }

```

Listing B.2.6: rechenzentren.js

```

1  import styles from '../styles/Home.module.css';
2  import Link from 'next/link';
3  import React from "react";
4  import Header from "../components/header";
5  import Footer from "../components/footer";
6
7  export default function Home() {
8
9      return (
10         <div className={styles.spaceFooter}>
11             <Header />
12             <div className={styles.site}>
13                 <div className={styles.content}>
14                     <h1 className={styles.title}>
15                         <Link href="/" passHref>
16                             <div className={styles.backButton}>
17                                 <svg className={styles.backArrow}
18                                     ↪ xmlns="http://www.w3.org/2000/svg" height="100%"
19                                     ↪ viewBox="0 0 24 24" width="100%"><path d="M0
20                                     ↪ 0h24v24H0z" fill="none"/><path d="M20
21                                     ↪ 11H7.8315.59-5.59L12 4l-8 8 8 8 1.41-1.41L7.83
22                                     ↪ 13H20v-2z"/></svg>
23                                 </div>
24                             </Link>
25                             Rechenzentren
26                         </h1>
27                         <h2>
28                             Hier erfährst du mehr über die Rechenzentren.
29                         </h2>
30                         <main>
31                             <card className={styles.textBoxPages}>
32                                 <p className={styles.cardTextPages}>

```

28

Rechenzentren sind grosse Gebäude, in denen die

- Videodateien, die für das Streaming benötigt
- werden, gespeichert und für den jeweiligen
- Streamingnutzer bereitgestellt werden. Ihr
- Energieverbrauch setzt sich aus Servern,
- Speichersystemen, Netzwerkgeräten, der Kühlung
- der Server und der restlichen Infrastruktur
- zusammen. Zur Infrastruktur eines Rechenzentrums
- gehören komplexe Brandschutzsysteme, eine
- unterbrechungsfreie Stromversorgung,
- Sicherheitssysteme und sonstige Geräte, die für
- die Betreibung des Gebäudes nötig sind. Die
- Server sind für den grössten Teil des
- Energieverbrauchs verantwortlich, gefolgt von
- der Kühlung. Der Energieverbrauch durch die
- Kühlung und die restliche Infrastruktur hängen
- jedoch direkt von der Anzahl der Server und der
- Menge an Energie ab, die von den Servern in
- Wärme umgewandelt wird. Es gibt verschiedene
- Arten von Rechenzentren, die unterteilt werden
- können in traditionelle Rechenzentren, Cloud
- Rechenzentren und Hyperscale Rechenzentren.
- Hyperscale Rechenzentren weisen
- vielversprechende Entwicklungen hinsichtlich der
- Umweltauswirkungen auf, da sie weitaus
- energieeffizienter sind und eine bessere
- Servervirtualisierung als herkömmliche
- Rechenzentren bieten.

```
29         </p>
30     </card>
31 </main>
32 </div>
33 </div>
34 <Footer />
35 </div>
36 );
37
38 }
```

B.3 Theme

Listing B.3.1: theme.js

```
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   shape: {
19     borderRadius: 10,
20   },
21   key: {
22     color: "#cfe8fc"
23   }
24 });
```

B.4 Styles

Listing B.4.1: globals.css

```
1  html,
2  body {
3    padding: 0;
4    margin: 0;
5    text-align: center;
6    font-family: Arial, sans-serif;
7    text-align: left;
```



```

8     background: #F5F7F6;
9     mix-blend-mode: normal;
10    color: #111;
11  }
12
13  a {
14    color: inherit;
15    text-decoration: none;
16    font-size: 0.6rem;
17    display: inline-block;
18  }
19
20  h1 {
21    font-size: 2rem;
22    margin: 3rem 0.4rem;
23    font-weight: 650;
24  }
25
26  h2 {
27    font-weight: 500;
28    line-height: 1.5;
29    font-size: 1rem;
30    color: #111;
31    margin: 3em 0.4rem;
32  }
33
34  h3 {
35    margin: 0;
36    font-weight: 600;
37    line-height: 2.1rem;
38    font-size: max(calc(0.75vw + 0.25rem), 1.2rem);
39  }
40
41  p {
42    line-height: 1.75rem;
43    font-size: 1rem;
44    color: rgba(0, 0, 0, 0.75);
45  }
46
47  card {
48    background-color: white;
49    border-radius: 1rem;
50    margin: 2rem 0;
51    padding: min(4vw, 4rem);

```

```

52 }
53
54 button {
55     height: 2.75rem !important;
56     color: #fff !important;
57 }
58
59 * {
60     box-sizing: border-box;
61 }
62
63 @media (max-width: 650px) {
64     a {
65         font-size: 0.5rem;
66     }
67 }
68
69 @media (min-width: 1300px) {
70     h1 {
71         font-size: 2.25rem;
72     }
73
74     h2 {
75         font-size: 1.2rem;
76     }
77
78     h3 {
79         font-size: 1.35rem;
80     }
81
82     p {
83         font-size: 1.2rem;
84     }
85 }

```

Listing B.4.2: Home.module.css

```

1 .site {
2     padding: 2rem 5.5rem;
3     margin: auto;
4     max-width: 80rem;

```

```

5     min-height: 50rem;
6 }
7
8 .info {
9     cursor: pointer;
10    position: initial;
11    display: none;
12 }
13
14 .activeLink {
15     color: #111 !important;
16     text-decoration: underline !important;
17     font-family: Arial, Helvetica, sans-serif !important;
18 }
19
20 .disabledLink {
21     color: rgba(17, 17, 17, 0.761) !important;
22     text-decoration: none !important;
23     font-family: Arial, Helvetica, sans-serif !important;
24 }
25
26 .filterColor {
27     filter: invert(89%) sepia(80%) saturate(5%) hue-rotate(80deg) brightness(100%)
28     ↪ contrast(95%);
29 }
30
31 .faq {
32     padding: 1rem;
33 }
34
35 .chartcontainer {
36     display: block;
37 }
38
39 .chart {
40     padding: 2rem;
41     height: min(-moz-calc(10vw + 12rem), 25rem);
42     height: min(-webkit-calc(10vw + 12rem), 25rem);
43     height: min(-o-calc(10vw + 12rem), 25rem);
44     height: min(calc(10vw + 12rem), 25rem);
45 }
46
47 .resultTextOne{
48     font-weight: 400;

```

```

48     font-size: 1.5rem;
49     margin-bottom: 5%;
50 }
51
52 .resultTextTwo{
53     font-size: max(calc(3rem - 4vw), 2.5rem);
54     color: rgba(0, 0, 0, 0.75);
55 }
56
57 .resultTextThree{
58     font-size: 1.25rem;
59     font-weight: normal;
60     color: rgba(0, 0, 0, 0.75);
61 }
62
63 .resultTextFour{
64     font-size: 1.35rem;
65     font-weight: normal;
66     width: 18rem;
67     font-family: 'Avenir';
68     font-style: normal;
69     font-weight: 500;
70     line-height: 160%;
71     color: #3c4a53;
72 }
73
74 .resultTextFive{
75     margin-top: 2.25rem;
76     cursor: pointer;
77     font-size: 1.25rem;
78     font-weight: 500;
79 }
80
81 .resultTextFive:hover {
82     text-decoration: underline;
83 }
84
85 .resultContainer{
86     margin-top: 4rem;
87     display: grid;
88     row-gap: max(calc(7.5vw - 2.5rem), 0.75rem);
89     column-gap: max(calc(15vw - 5rem), 1.25rem);
90     width: inherit;
91     grid-template-columns: repeat(2, 1fr);

```

```

92  }
93
94  .cardWrapper {
95      display: grid;
96      grid-template-rows: repeat(2, 1fr);
97  }
98
99  .resultRechenzentrumContainer{
100      margin-left: 8%;
101      grid-column: 1;
102      width: 90%;
103      overflow: visible;
104      max-width: 20.5rem;
105  }
106
107  .resultNetzwerkeContainer{
108      margin-left: 8%;
109      grid-column: 2;
110      width: 90%;
111      overflow: visible;
112      max-width: 20.5rem;
113  }
114
115  .resultEndgeräteContainer{
116      margin-left: 8%;
117      grid-column: 1;
118      width: 90%;
119      overflow: visible;
120      max-width: 20.5rem;
121  }
122
123  .resultTextContainer{
124      grid-column: 2;
125      background-color: yellow;
126      gap: 2rem;
127      grid-template-columns: repeat(2, 1fr);
128  }
129
130  .datacenterSvg{
131      height: 40%;
132      width: 40%;
133  }
134
135  .networkSvg{

```

```

136     height: 50%;
137     width: 50%;
138 }
139
140 .resultSvg{
141     height: 40%;
142     width: 40%;
143 }
144
145 .cardText {
146     grid-column: 2;
147     padding: 1rem 0.5rem;
148     display: grid;
149     grid-template-rows: repeat(2, 1fr);
150     gap: 0.5rem;
151 }
152
153 .controls {
154     grid-column: 1;
155     padding: 1.2rem 0.5rem;
156 }
157
158 .backButton{
159     background-color: rgb(122,206,185);
160     height: 2rem;
161     width: 2rem;
162     offset-anchor: 20% 80%;
163     float: left;
164     margin-right: 0.5rem;
165     border-radius: 50%;
166     transition: 0.5s;
167     margin-top: 2px;
168 }
169
170 .backButton:hover{
171     background-color: rgb(78,144,129);
172     cursor: pointer;
173     box-shadow: 0 0 0 0.2rem rgb(122,206,185);
174 }
175
176 .backArrow{
177     fill: white;
178     display: block;
179     width: 1.5rem;

```

```

180     margin: auto;
181 }
182
183 .settings {
184     position: relative;
185     display: grid;
186     gap: 0 3vw;
187     grid-template-columns: repeat(2, 1fr);
188     grid-template-rows: 0;
189     justify-content: center;
190     align-content: center;
191 }
192
193 .textBoxPages {
194     position: relative;
195     display: grid;
196     justify-content: center;
197     align-content: center;
198     grid-template-rows: 1fr;
199     padding: 2rem 2.5rem;
200     gap: 0;
201 }
202
203 .cardTextPages {
204     padding: 1rem 0.5rem;
205     line-height: 1.75;
206 }
207
208 .input {
209     font-family: 'Avenir';
210     line-height: 1.4375rem;
211     letter-spacing: 0.009368rem;
212     color: rgba(0, 0, 0, 0.6);
213     font-weight: 400;
214     margin-bottom: 0.5rem;
215 }
216
217 .selectContainer {
218     display: grid;
219     gap: 2rem;
220     width: inherit;
221     grid-template-columns: repeat(2, 1fr);
222 }
223

```

```

224 .label {
225     font-family: 'Avenir';
226     font-size: 0.8rem;
227     line-height: 1.4375rem;
228     letter-spacing: 0.009368rem;
229     color: rgba(0, 0, 0, 0.6);
230     font-weight: 400;
231     margin-bottom: 0.5rem;
232 }
233
234 .select {
235     min-width: 10rem;
236 }
237
238 .footer {
239     position: static;
240     bottom: 0;
241     width: 90%;
242     padding: 2rem;
243     box-shadow: 0 2px 4px -50px rgba(0, 0, 0, 0.2), 2px -9px 13px -12px rgba(0, 0, 0,
↵ 0.14), 0 1px 10px -50px rgba(0, 0, 0, 0.12);
244 }
245
246 .spaceFooter {
247     display: flex;
248     min-height: 100vh;
249     flex-direction: column;
250 }
251 .content {
252     flex: 1;
253 }
254
255 @media (max-width: 900px) {
256     .info {
257         display: unset;
258     }
259
260     .settings {
261         gap: 0;
262     }
263
264     .chart {
265         max-width: 33rem;
266         padding: 1rem 0;

```



```

267     margin: auto;
268 }
269
270 .selectContainer {
271     gap: max(1rem, 4vw);
272 }
273
274 .select {
275     min-width: unset;
276 }
277
278 .site {
279     padding: 0.25rem max(20vw - 5rem, 1.5rem);
280 }
281
282 .title {
283     font-size: 2rem;
284 }
285
286 .paragraph {
287     display: none;
288 }
289
290 .settings {
291     grid-template-columns: 0;
292     grid-template-rows: 1fr;
293     padding: 2rem 1rem;
294 }
295
296 .cardText {
297     display: block;
298 }
299
300 .controls {
301     grid-column: 2;
302 }
303
304 }
305
306 @media (max-width: 600px) {
307     .resultContainer {
308         grid-template-columns: 1fr;
309         margin-top: 2rem;
310     }

```

```

311
312 .resultNetzwerkeContainer {
313     grid-column: 1;
314 }
315
316 .resultTextOne{
317     font-size: 1.5rem;
318 }
319
320 .resultTextTwo{
321     font-size: 2rem;
322 }
323
324 .resultTextThree{
325     font-size: 1.25rem;
326 }
327
328 .resultTextFour{
329     font-size: 1.25rem;
330 }
331
332 .resultTextFive{
333     font-size: 1.25rem;
334 }
335 }
336
337 @media (max-width: 345px) {
338
339     .cardWrapper {
340         grid-template-rows: 1fr;
341     }
342
343     .selectContainer {
344         grid-template-columns: 1fr;
345     }
346 }
347
348 @media (min-width: 1100px) {
349     .resultContainer {
350         grid-template-columns: repeat(3, 1fr);
351         gap: 2.5rem;
352     }
353
354     .resultEndgeräteContainer {

```

```
355     grid-column: 3;
356   }
357 }
358
359 @media (min-width: 1300px) {
360   .backButton{
361     height: 2.25rem;
362     width: 2.25rem;
363     margin-right: 0.5rem;
364     margin-top: 2px;
365   }
366 }
```