

Analyse des CO₂-Fußabdrucks des Video-Streamingdienstes RTL+

Im Jahr 2020 wurde ein deutlicher Anstieg des gesamten Datenverkehrs im Internet um 44 % beobachtet, was größtenteils auf die COVID-19-Pandemie und das damit verbundene veränderte Nutzer:innenverhalten zurückzuführen ist. Mehr als 57 % des weltweiten Datenverkehrs können dabei auf Online-Videostreaming-Anwendungen zurückgeführt werden [1]. Aufgrund dieser hohen Bandbreitenkapazitätsnutzung und den vergleichsweise rechenintensiven Technologien und Prozessen, die mit Streamingdiensten einhergehen, ist es von besonderem Interesse, den CO₂-Fußabdruck zu untersuchen, der durch den Konsum von Online-Videoinhalten entsteht. Dieses Whitepaper analysiert die CO₂-äquivalenten (CO₂e) Treibhausgasemissionen für den deutschen Video-on-Demand- (VOD) und Live-Streamingdienst RTL+ (früher TVNOW) von RTL Deutschland.

Durch die Modellierung aller Aspekte der Videoübertragung, beginnend mit der Anlieferung eintreffender Videoinhalte im hauseigenen Rechenzentrum, der weiteren Verarbeitung und Caching durch Cloud-Computing-Dienste von Drittanbietern und schließlich der Auspielung an die Endkunden, lassen sich die durchschnittlichen Treibhausgasemissionen pro Stunde gestreamter Videoinhalte schätzen. Da RTL Deutschland und beteiligte Dritte bereits aktiv Maßnahmen zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen ergreifen, werden in dieser Studie zwei verschiedene Berechnungsweisen unterschieden: Für jene Teilbereiche der Videostreaming Übertragungskette, für die bereits Maßnahmen zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen ergriffen wurden und für die quantifizierbare Daten zur Verfügung stehen, werden die reduzierten CO₂-Emissionen in der Gesamtschätzung berücksichtigt. Um auch einen Vergleich der Schätzung der Gesamtemissionen mit früheren Studien zu ermöglichen und die potenziellen Auswirkungen von Emissionsreduzierungen zu bewerten, wird ebenfalls eine auf dem Energieverbrauch basierende Berechnung durchgeführt, die den spezifischen CO₂-Emissionsfaktor der deutschen Stromerzeugung berücksichtigt.

Über die reine Quantifizierung der Emissionen hinaus zielt diese Studie darauf ab, technische Bereiche und Optimierungen für RTL Deutschland und RTL+ zu identifizieren, die den CO₂-Fußabdruck des Streamingdienstes weiter minimieren können und einen Beitrag zum CO₂-Reduktionsziel des Unternehmens leisten [2].

Unter Berücksichtigung der bereits erfolgten Maßnahmen zur Emissionsreduzierung ergibt die Schätzung eine durchschnittliche Gesamtemission von 42,7 g CO₂e pro Stunde gestreamter Videoinhalte. Ein großes Potenzial zur CO₂-Reduzierung lässt sich dabei auf Seiten der Endkunden identifizieren: Durch Sensibilisierung der Kunden für energieeffiziente Geräte und Nutzung von Eco-Einstellungen kann der Verbrauch an elektrischer Energie und damit der CO₂-Fußabdruck weiter verringert werden. Weitere Optimierungen können auf die verbraucher:innenunabhängigen Aspekte des Streamingdienstes angewendet werden, wie z. B. eine effizientere Nutzung von Rechenkapazitäten und die Übertragung von Videos mit reduzierten Bitraten. Schließlich wird die langfristige Umstellung auf Ökostrom aus erneuerbaren Energiequellen die Emissionen in allen Teil der Übertragungskette verringern.

RTL Deutschland GmbH
Picassoplatz 1
50679 Cologne, Germany
Tel +49 221 456-0

Deutsche Bank
IBAN DE98 3707 0060 0131 9417 00
Swift Code DEUTDE33XXX

Sitz der Gesellschaft Köln
Köln HRB 62896
USt-ID DE 814 967 412

Geschäftsführende
Dr. Thomas Rabe (Vors.), Matthias Dang,
Andreas Fischer

Schlüsselwörter

Streaming, Videostreaming, CO₂-Fußabdruck von Produkten

Einführung

Die Nutzung von Online-Video hat in den letzten zehn Jahren stetig zugenommen. In Deutschland ist der Anteil der Bevölkerung, der mindestens einmal pro Woche Online-Videos konsumiert, von lediglich 23 % im Jahr 2009 auf 61 % im Jahr 2019 gestiegen. Die COVID-19-Pandemie hat diesen Trend weiter beschleunigt und zu einem Gesamtanteil von 69 % im Jahr 2020 geführt [3]. Ähnliche Entwicklungen sind weltweit zu beobachten [1]. Videostreaming war schon immer eine technisch anspruchsvolle Anwendung, im Hinblick auf die für die Übertragung erforderlichen Datenraten. Im Gegensatz zu klassischen Broadcast- (z. B. DVB) und Multicast-Übertragungen handelt es sich bei dem heute weit verbreiteten adaptiven Streaming via HTTP um eine Unicast-Übertragung, unabhängig davon, ob es sich bei dem zu übertragenden Stream um VOD oder Live handelt. Daher steigt die gesamte Bandbreitennutzung mit jeder einzelnen Streaming-Verbindung. Adaptives Streaming via HTTP bietet den Vorteil, dass der Stream mit Hilfe clientseitiger Logik an wechselhafte Übertragungsraten, unterschiedliche Geräte und deren Fähigkeiten angepasst werden kann. So entfallen im Jahr 2020 mehr als 57 % des weltweiten Internet-Datenverkehrs auf Online-Videostreaming [1]. Da ein solch erheblicher Anteil der globalen Informations- und Kommunikationsinfrastruktur (ICT) von Internet-Streamingdiensten genutzt wird, ist die Bewertung der Treibhausgasemissionen, die direkt und indirekt durch diese Dienste entstehen, von großem Interesse. Ein Streamingdienst wie RTL+ ist ein komplexes technisches System, an dem viele Teilsysteme zusammenwirken, um Streaming mit adaptiver Bitrate für Millionen von Kunden über mehrere verschiedene Plattformen und Geräteklassen zu ermöglichen. Viele dieser Teilsysteme müssen die erforderlichen Ressourcen dynamisch an die erwartete Nachfrage anpassen, z. B. an die Anzahl der gleichzeitigen Streaming Sessions. Oft wird bei Berechnungen von Treibhausgasemissionen im ICT-Bereich die Analyse in einzelne Teilsysteme aufgeschlüsselt und die Treibhausgasemissionen für jedes System einzeln geschätzt, wobei die Daten über einen definierten Analysezeitraum gemittelt werden. In diesem Bericht werden die Daten vom April 2021 für die Analyse herangezogen.

Frühere Evaluierungen

Der CO₂-Fußabdruck von Video-Streamingdiensten hat in den letzten Jahren viel Aufmerksamkeit erfahren, anfänglich bedingt durch einen Bericht, der 2019 von der französischen gemeinnützigen Denkfabrik "The Shift Project" veröffentlicht wurde [4]. In einem AFP-geführten Interview mit einem Verfasser des Berichts wurde eine Zahl von 3200 g/h CO₂e genannt, die von weiteren Medien schnell aufgegriffen und verbreitet wurde [5]. Eine später veröffentlichte Studie von *CarbonBrief* [6], eine von der European Climate Foundation finanzierten Website, deckte erhebliche Mängel in dem viel zitierten *Shift Project* Bericht auf, wie etwa Fehler bei der Umrechnung von Bitraten in Bytes und falsche Modellannahmen. Neuere Studien von *Carbon Trust* [7], der *Internationalen Energieagentur* (IEA) [8] und dem deutschen *Umweltbundesamt* [11] scheinen sich bei deutlich geringeren Schätzungen zu konsolidieren. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die jüngsten Studien und die dort angegebenen Treibhausgasemissionen pro Stunde gestreamter Inhalte. Da die Streuung der verschiedenen, unabhängigen Schätzungen immer noch fast zwei Größenordnungen umfasst, lässt dies vermuten, dass bei der Modellierung des CO₂-Fußabdrucks solch hochkomplexer technischer Systeme, wie es bei einem typischen Online-Streamingdienst der Fall ist, große Unsicherheiten bestehen. Darüber hinaus haben länderspezifische Unterschiede in der Nutzung von Primärenergiequellen einen erheblichen Einfluss auf die Emissionen von Videostreaming und sind daher von besonderer Bedeutung. Dies wird im jüngsten Bericht des *Carbon Trust* durch den Vergleich der Schätzungen für Frankreich (10 g/h CO₂e), Schweden (3 g/h CO₂e) und Deutschland (76 g/h CO₂e) deutlich. Diese Unterschiede beruhen auf der Zusammensetzung der Primärenergieträger und den sich daraus ergebenden unterschiedlichen spezifischen Kohlendioxid-Emissionen der Stromerzeugung. Während die Grundlaststromerzeugung in Frankreich und Schweden von nahezu emissionsfreier Kernenergie (>70 % der gesamten TWh) bzw. einer Kombination aus Wasserkraft und Kernenergie (>85 % der gesamten TWh) dominiert wird, stammt der deutsche Energiemix noch immer überwiegend aus fossilen Brennstoffen.

Tabelle 1: Zusammenfassung früherer Evaluierungen der Emissionen beim Videostreaming.

Referenz	Jahr	Schätzung der Kohlenstoffintensität [g/h CO ₂ e]
Carbon Trust (Deutschland) [7]	2020	76
Carbon Trust (EU-Durchschnitt) [7]	2020	56
BBC (UK, iPlayer) [18]	2019 / 2020	33
BBC (UK, IPTV) [18]	2019 / 2020	32
IEA (Deutschland) [8]	2019	31
IEA (weltweit) [8]	2019	36
BITKOM (Global, 720p, 65" TV) [10]	2018	130
BITKOM (Global, 4K, 65" TV) [10]	2018	610
Shift Project (Global, aktualisiert) [4]	2018	394
Shift Project (Global, AFP-Interview) [5]	2018	3200

Forscher von Ericsson wiesen kürzlich darauf hin, dass die Verwendung von Energie-pro-Daten Kennzahlen (z. B. in kWh/GB) in Netzmodellen, die zur Berechnung des Energieverbrauchs von IT Diensten allgemein und auch in vielen Studien verwendet werden, problematisch sei, da es aufgrund des Energieverbrauchs im Leerlauf der beteiligten Infrastruktur nur eine geringe oder gar keine Korrelation zwischen dem Energie- und Stromverbrauch und der Datenmenge gäbe [9]. Solche Zahlen könnten sogar den Eindruck erwecken, dass mehr Daten auch zu mehr eingesetzter Energie führen müssen, was demnach nicht der Fall sei. Die hier vorliegende Studie erkennt dieses Problem an und verwendet daher Energie-pro-Daten-Kennzahlen allein zur Verrechnung der Emissionen in Übertragungsnetzen und wenn keine bessere Methode zur Verfügung stand.

Modellierung der Videostreaming Emissionen

Wie bei jeder Bewertung des CO₂-Fußabdrucks muss die operative Grenze der Analyse definiert werden. Die Quantifizierung eines Carbon Footprints eines Produkts oder einer Dienstleistung nach ISO 14067 berücksichtigt den gesamten Lebenszyklus der betrachteten Einheit. Dazu gehören im konkreten Fall nicht nur die von RTL Deutschland direkt kontrollierten Emissionsquellen, sondern auch die Emissionen in der Wertschöpfungskette, die durch eine Vielzahl von Drittanbietern verursacht werden. Dieser Aspekt verkompliziert die Analyse zusätzlich, da die an der Videostreaming-Übertragung beteiligten Drittanbieter beispielsweise unterschiedliche Berichterstattungsmethoden, operative Grenzen oder Detailebenen verwenden. Einige Cloud-Computing-Anbieter und Internetdienstleister veröffentlichen beispielsweise keine umfassenden Daten über kumulierte oder kundenbezogenen Treibhausgasemissionen. In diesen Fällen kann ein messbarer Proxy in Kombination mit Heuristiken verwendet werden, um eine Schätzung zu erstellen, wie z. B. die gemessene durchschnittliche Rechenlast in (virtuellen) Cores/h, in Kombination mit einem durchschnittlichen Energieverbrauch pro Core. Verständlicherweise erhöht ein solcher Ansatz die Unsicherheit der Schätzung.

Die funktionelle Einheit, die in dieser Studie bewertet wird, ist eine Stunde Videostreaming. Diese Studie konzentriert sich dabei auf die technischen Systeme, die an der Videostreaming-Übertragungskette beteiligt sind, und auf die CO₂-Emissionen, die durch den Betrieb dieser Systeme entstehen. Daher wird die eigentliche Produktion der Videoinhalte, die für sich genommen eine weitere große Emissionsquelle darstellen kann, in diesem Bericht nicht berücksichtigt. Auch die Emissionen, die bei der Herstellung der physischen Infrastruktur und der beteiligten Geräte entstehen, werden nicht berücksichtigt. Die Berechnungen des CO₂-Fußabdrucks dieser Studie berücksichtigen alle im Kyoto-Protokoll aufgeführten Treibhausgase und werden in

Kohlenstoffäquivalenten unter Anwendung des 100-Jahres-Global Warming Potentials ausgedrückt.

Die einzelnen Teile des Videostreaming-Systems werden anhand von zwei verschiedenen Verrechnungsmethoden modelliert: Für interne und cloudbasierte Systeme wird nur der durchschnittliche Stromverbrauch der beteiligten technischen Infrastruktur berücksichtigt. Da diese Systeme hinter einer ersten Caching-Schicht angesiedelt sind, arbeiten sie unabhängig von der übertragenen Datenmenge, d.h. der Stromverbrauch wird als nahezu identisch angesehen, unabhängig davon, ob der Streamingdienst unter Grund- oder Spitzenlast läuft. Eine ähnliche Annahme wird auch für die Endgeräte getroffen. Im zweiten Ansatz wird eine alloktionsbasierte Methode verwendet, bei dem die Treibhausgasemissionen auf der Grundlage der übertragenen Datenmenge geschätzt werden. Diese Methode gilt für die physische Übertragung der Videodaten über Server, die von Content-Delivery-Network (CDN) Providern betrieben werden, und für die weitere Übertragung durch das Internet durch Internet Service Provider (ISPs).

Insgesamt werden vier Hauptkomponenten des Video-Streamingdienstes berücksichtigt, wie in Gleichung 1 dargestellt:

- Inhouse-Dienste und Verarbeitung D_{Inhouse} von Videoinhalten, die auf technischer Infrastruktur unter direkter Kontrolle von RTL Deutschland laufen. Dazu gehören etwa Subsysteme wie Media-Asset-Management-Systeme und die Transcodierung aller Video-Assets und Live-Videosignale in mehrere Renditions bei unterschiedlicher Auflösung und Bitrate,
- Cloud-Verarbeitung und Content-Delivery-Netzwerke D_{Cloud} , die technische Teilsysteme wie Loadbalancing, Webservices, Originserver und Caching von Videosegmenten umfassen,
- Transport $D_{\text{Transport}}$, wozu die Übertragung von Videosegmenten über physische Backbone Netze (Glasfaser-, Kupfer- oder Mobilfunkverbindungen) und auf der „letzten Meile“ zum Kunden zählt,
- Endgeräte D_{User} , wozu Fernsehgeräte, Smartphones oder Laptops zählen, sowie zusätzliche Geräte wie Set-Top-Boxen, digitale Medienabspielgeräte und integrierte Router / Modems für den Internetzugang.

Die gesamten Treibhausgasemissionen D_{Total} die somit die Kohlenstoffintensität des RTL+-Streamingdienstes in Gramm CO₂e-Emissionen pro Stunde gestreamter Videoinhalte darstellen, werden als Summe der einzelnen Komponenten in der Verarbeitungs- und Übertragungskette berechnet:

$$D_{\text{Total}} = D_{\text{Inhouse}} + D_{\text{Cloud}} + D_{\text{Transport}} + D_{\text{User}} \quad 1$$

Inhouse Verarbeitung

Die Emissionen der Inhouse-Verarbeitung, die im lokalen Rechenzentrum von RTL Deutschland in Köln durchgeführt wird, berechnet sich, indem der Gesamtenergieverbrauch der lokalen Recheninfrastruktur berücksichtigt wird (E_{Inhouse}) sowie die Treibhausgasemissionen für Strom, der von einem lokalen Stromversorger geliefert wird (C_{Inhouse}) und der Gesamtstunden der gestreamten Inhalte T_{Content} für die gegebene Zeitspanne im April 2021:

$$D_{\text{Inhouse}} = \frac{E_{\text{Inhouse}} \cdot C_{\text{Inhouse}}}{T_{\text{Content}}} \quad 2$$

Cloud und Content Delivery Networks

Der Beitrag von Cloud- und Content-Delivery-Netzwerken D_{Cloud} wird zum einen durch einen heuristischen Anteil für Infrastrukturkomponenten modelliert, der von der Menge der gestreamten Videodaten unabhängig ist (D_{Static}) und durch einen weiteren Anteil $D_{\text{CDN}}(R_{\text{Content}}, T_{\text{Content}})$, der Emissionsdaten wie sie von CDNs bereitgestellt werden berücksichtigt und abhängig ist von der durchschnittlichen Videobitrate R_{Content} und der Gesamtstundenzahl der gestreamten Videos T_{Content} :

$$D_{\text{Cloud}} = D_{\text{Static}} + D_{\text{CDN}}(R_{\text{Content}}, T_{\text{Content}}) \quad 3$$

Transport

Für den Beitrag zu den Gesamtemissionen, der durch den Transport ($D_{\text{Transport}}$) der Daten zu den Kunden entsteht werden zwei Komponenten berücksichtigt: Für die Übertragung auf überregionaler Ebene werden die Daten in der Regel über das glasfaserbasierte Internet-Backbone der ISPs geleitet. Dieser Beitrag wird bezeichnet als $D_{\text{Backbone}}(R_{\text{Content}}, T_{\text{Content}})$, der wiederum von der Gesamtmenge der zu transportierenden Daten abhängt. Ein zweiter Beitrag $D_{\text{LastMile}}(p_{\text{Connection}})$ wird durch die Übertragung auf der „letzten Meile“ zur Verbraucher:in erzeugt, bei der es sich um eine feste Breitband- oder Mobilfunkverbindung handeln kann, und somit zu unterschiedlichen CO₂e-Emissionen führen kann. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung $p_{\text{Connection}}$, mit $0 \leq p_{\text{Connection}} \leq 1$, beschreibt, wie die Verbraucher:innen auf den Streamingdienst auf der letzten Meile zugreifen. Der gesamte Emissionsbeitrag durch den Transport von Videoinhalten zur Verbraucher:in kann nun wie folgt berechnet werden:

$$D_{\text{Transport}} = D_{\text{Backbone}}(R_{\text{Content}}, T_{\text{Content}}) \quad 4 \\ + D_{\text{LastMile}}(p_{\text{Connection}})$$

Endgeräte

Schließlich werden in der Studie auch die Emissionen berücksichtigt, die von den Endgeräten beim Kunden (CPE) erzeugt werden und für den Konsum der Inhalte erforderlich sind. Mit Hilfe der Verteilung der verschiedenen Verbraucher:innengeräteklassen p_{Device} (Fernseher, Smartphones, PCs oder Tablets) und ihrem jeweiligen durchschnittlichen Energieverbrauch E_{Device} pro Stunde werden die durchschnittlichen Treibhausgasemissionen der Verbraucher:innen geschätzt. Um die Berechnung zu vereinfachen, wird davon ausgegangen, dass der Stromverbrauch der Endgeräte unabhängig von der gestreamten Bitrate und anderen technischen Eigenschaften des Videostreams ist. Es sei darauf hingewiesen, dass diese Annahme in der Realität nicht zutrifft und dass der Zusammenhang zwischen Stromverbrauch und Eigenschaften des Videostroms bei Wiedergabegeräten mit geringerem Stromverbrauch, wie z. B. Smartphones, zunehmend an Bedeutung gewinnt, siehe Herglotz et al. [14]. Diese Ungenauigkeit bei der Modellierung ist akzeptabel, da konservative Schätzungen für den durchschnittlichen Stromverbrauch von Wiedergabegeräten verwendet werden. Um letztlich den potenziellen Einfluss der Verbraucher:innen auf ihren eigenen Strommix zu modellieren (z. B. eigene Photovoltaikanlagen, Wahl eines Anbieters von Strom aus erneuerbaren Energien), wird auch ein kundenbezogener Emissionsfaktor C_{Consumer} mit einbezogen:

$$D_{\text{User}} = C_{\text{Consumer}} \cdot \sum_{\text{Devices}} E_{\text{Device}} \cdot p_{\text{Device}} \quad 5$$

Ergebnisse

Standortbezogene und marktbezogene Modellannahmen

Maßnahmen zur Verringerung der CO₂-Emissionen werden von RTL Deutschland und anderen Dritten bereits ergriffen. Zu diesen Maßnahmen gehört zum Beispiel der Bezug von Ökostrom für Rechenzentren. Um diese Maßnahmen berücksichtigen zu können, werden in dieser Studie zwei unterschiedliche Berichtsmethoden unterschieden: Die reduzierten Treibhausgasemissionen werden, sofern Daten verfügbar sind, als *marktbezogene* Kohlenstoffemissionen zusammengefasst. In der zweiten, *standortbezogenen* Berichtsmethode werden die CO₂-Emissionen auf der Grundlage des Gesamtbedarfs an elektrischer Energie und der spezifischen Kohlendioxid-Emission der Stromerzeugung des deutschen Strommixes geschätzt. Diese Unterscheidung zwischen marktbezogenen und standortbezogenen Treibhausgasemissionen folgt der Empfehlung der Scope 2 Guidance des Greenhouse Gas Protocol (GHG) [27].

Für die Modellierung der Emissionen, die durch die eigene technische Infrastruktur und durch die Verbraucher:in entstehen, sind Schätzungen für die Emissionsintensitätsfaktoren C_{Inhouse} und C_{Consumer} erforderlich. Dabei können unterschiedliche Werte für die Emissionsintensitäten die markt- und standortbezogenen Unterschiede für elektrische Energie widerspiegeln. Für Deutschland wird ein CO₂-Emissionsintensitätsfaktor von $C_{\text{Ger,Mix}} = 375 \text{ g CO}_2\text{e} / \text{kWh}$ angenommen [13]. Dieser

Wert entspricht den durchschnittlichen deutschen Emissionen des Jahres 2020¹, ohne Berücksichtigung der indirekten vorgelagerten Emissionen. Daher wird für die standortbezogenen Schätzungen in Tabelle 2, $C_{\text{Inhouse}} \equiv C_{\text{Ger,Mix}}$ verwendet.

RTL Deutschland reduziert oder kompensiert aktiv Emissionen (z.B. durch den Kauf von Strom aus erneuerbaren Quellen oder Emissionszertifikaten). Das Rechenzentrum, die Büros und die Studios am Hauptsitz des Senders in Köln werden mit erneuerbaren Energien betrieben. Daher kann für die marktbezogene Schätzung ein Kohlenstoffemissionsfaktor von $C_{\text{Inhouse}} = 0$ angesetzt werden.

Cloud-basierte Computing-Dienste, die Teil des Backends von RTL+ sind und das Hosting von Servern, Datenbanken, Speicher oder Netzwerken umfassen kann, werden teilweise von Drittanbietern betrieben. Daher hängt die Genauigkeit des Modells von Daten ab, die von diesen Betreibern bereitgestellt wurden.

Für die Emissionen, die durch Backbone-Netze während der Übertragung entstehen, werden öffentlich verfügbare Daten verwendet, wie z. B. die von der Deutschen Telekom AG für Deutschland gemeldeten ESG-KPIs zur Kohlenstoffintensität [15]. Mehr als 30 % der RTL+-Kunden nutzen die Deutsche Telekom AG als ihren Internetdienstleister. Auf der letzten Meile greifen die meisten Verbraucher:innen über eine kabelgebundene Breitband-Internetverbindung auf RTL+ zu. Es wird daher konservativ angenommen, dass 10 % der Verbraucher:innen direkt auf Videoinhalte via Mobilfunknetzen zugreifen. Für die Berechnung der Emissionen auf der letzten Meile werden die vom Umweltbundesamt veröffentlichten Schätzungen der Emissionen einzelner Internetzugangsmethoden [11] verwendet.

Eine marktbezogene Berechnung von Emissionen beim Endkunden, die die individuelle Wahl des Energieversorgers oder andere Faktoren widerspiegelt, wie etwa die Reduktion persönlicher CO₂ Emissionen (z. B. durch eigene photovoltaische Erzeugung von Strom, Nutzung von Kraft-Wärme-Kopplung), ist aus Mangel an Daten nicht möglich. Daher wird für die in den Tabellen 2 und 3 dargestellten verbrauchsbedingten Emissionen stets der Wert von $C_{\text{Consumer}} \equiv C_{\text{Ger,Mix}}$ angenommen.

Durchschnittliche Emissionen

Die Analyse ergibt, dass beim Streaming einer Stunde Videoinhalte auf RTL+ durchschnittlich etwa 42.7 g CO₂e emittiert werden bei einer durchschnittlichen Datenrate von 5.43 Mbit/s. Diese Schätzung berücksichtigt die marktbezogenen Emissionen, mit Ausnahme der von der Verbraucher:in verursachten Emissionen, wie oben angedeutet. Die standortbezogene Schätzung kommt zu dem Ergebnis, dass im Durchschnitt 92.3 g CO₂e pro Stunde gestreamter Videoinhalte emittiert würden. Diese Zahl liegt in der gleichen Größenordnung wie die Schätzung der zuletzt im Jahr 2021 veröffentlichten Carbon Trust-Studie für Deutschland.

Unabhängig von der marktbezogenen oder standortbezogenen Methodik wird der geringste Anteil an den Gesamtemissionen durch die Inhouse Verarbeitung erzeugt. Bei standortbezogener Berechnung liegt diese bei $D_{\text{Inhouse}} = 0.4$ g CO₂e/h, und für die marktbezogene Berechnung entsprechend bei null, unter Verwendung lokalen Ökostroms. Cloud-Dienste, einschließlich Content-Delivery-Netzwerke, tragen ebenfalls einen geringen Anteil zu den Emissionen bei, der mit $D_{\text{Cloud}} = 0.8$ g CO₂e/h (marktbezogen) bzw. $D_{\text{Cloud}} = 1.5$ g CO₂e/h (standortbezogen).

Die Emissionen, die beim Transport der Videodaten zur Verbraucher:in entstehen, tragen mit $D_{\text{Transport}} = 11.1$ g CO₂e/h (marktbezogen) bzw. $D_{\text{Transport}} = 59.5$ g CO₂e/h (standortbezogen), was alle Emissionen von Backbone-Netzen und Breitband- oder Mobilfunkverbindungen auf der letzten Meile einschließt. Der große Unterschied zwischen den markt- und standortbezogenen Schätzungen ist ein Hinweis auf die Dekarbonisierungsbemühungen der Netzbetreiber.

Beim marktbezogenen Ansatz entfällt der insgesamt größte Anteil der Emissionen auf die Geräte, die von den Verbraucher:innen betrieben werden. Unter Berücksichtigung der

¹ Wie bereits erwähnt, dürften die für 2021 prognostizierten Kohlenstoffemissionen näher am Wert für 2019 liegen als der für 2020 gemeldete verzerrte Wert.

Geräteverteilung der Kunden, die entweder Fernseher, Smartphones, PCs/Laptops oder Tablets nutzen, werden durchschnittliche Emissionen von 30.9 g CO₂e/h ausgewiesen, die somit mit über 72 % den Großteil aller Emissionen ausmachen. Bei den einzelnen Gerätetypen können die Emissionen jedoch aufgrund des unterschiedlichen Strombedarfs stark variieren. Während ein Kunde, der Inhalte auf einem typischen Fernsehgerät konsumiert, die meiste Energie benötigt und etwa 37.5 g CO₂e/h für ein Fernsehgerät mit einer Dauer-Nennleistung von 100 W erzeugt, erzeugt ein Kunde, der sich Inhalte auf einem Smartphone ansieht, nur 0.4 g CO₂e/h. Zusätzlicher Strom wird für Peripheriegeräte wie Wifi Router, Mediaplayer (FireTVs, AppleTVs) oder Set-Top-Boxen mit VOD-Funktion benötigt. Diese Geräte erzeugen zusätzlich 4.5 g CO₂e/h, unabhängig von der für die Abspielung verwendete Geräteklasse. Es sei darauf hingewiesen, dass diese Schätzung von anderen Studien abweicht, wie z. B. in [7], welche aufgrund eines anderen Verteilungsschemas von einem Energieverbrauch von 71 Wh pro gestreamte Stunde für Router ausgeht. Während [7] den Energieverbrauch eines Routers auf der Grundlage des Verhältnisses zwischen gestreamten Daten und dem durchschnittlichen Gesamtdatenvolumen zuweist, wird in dieser Studie der Energieverbrauch des Routers auf der Grundlage der tatsächlichen physischen Nutzung des Geräts pro Streaming-Stunde berechnet. Daher werden Szenarien, in denen ein Router nicht aktiv genutzt wird, aber eingeschaltet ist oder während des Streamings gleichzeitig von einem anderen Dienst genutzt wird, nicht berücksichtigt.

Tabelle 2: Durchschnittliche CO₂e-Emissionen für RTL+ nach Komponente.

Komponente	Durchschnittliche CO ₂ e-Emissionen nach Komponenten in g/h	
	Marktbezogen (tatsächlich)	Standortbezogen
D_{Inhouse}	0.0	0.4
D_{Cloud}	0.8	1.5
$D_{\text{Transport}}$	11.1	59.5
D_{User}	30.9	30.9
D_{Total}^2	42.7	92.3

Tabelle 3: Durchschnittliche CO₂e-Emissionen und typischer Stromverbrauch pro Geräteklasse.

Geräteklasse	Durchschnittliche D_{User} CO ₂ e-Emissionen und typischer Stromverbrauch pro Geräteklasse	
	D_{User} CO ₂ e-Emissionen [g/h]	Stromverbrauch [W]
TV	37.5	100.0
Telefon	0.4	1.0
PC	25.7	68.5
Tablet	1.9	5.0
Periph.	4.5	12.0
Gewichteter Durchschnitt²	30.9	82.3

² Summen können aufgrund von Rundungen abweichen.

Vergleich und Verringerung der Emissionen

Ein Vergleich der durch Videostreaming erzeugten Emissionen mit denen des klassischen Broadcasts ist aufgrund der unterschiedlichen Technologien naturgemäß schwierig. Digitale Fernsehsignale werden in der Regel über Satelliten (DVB-S/S2), Kabel (DVB-C) oder terrestrische Sendeanlagen (DVB-T2) übertragen. Wie eine von BBC-Research veröffentlichte Studie zeigt [18], können die Emissionen, die bei der Distribution über Satelliten während des Transports entstehen, vernachlässigt werden, wenn man bedenkt, dass ein einziger Satelliten-Transponder wie z.B. Astra 19.2° Ost in seiner Ausleuchtzone riesige, Kontinent-umspannende Gebiete und damit eine große Anzahl von Kunden gleichzeitig bedienen kann.

Die für Kabelfernsehen (DVB-C) erforderliche technische Infrastruktur ist ähnlich aufgebaut und zu bewerten wie die Breitband-/DSL-Infrastruktur, siehe oben. Hierfür wird das Fernsehsignal per Satellit oder Glasfaserkabel über zentrale Verteilerzentren an Kabelkopfstellen gesendet und anschließend via Breitbandkabel in das jeweilige Kabelnetz und die damit verbundenen Haushalte eingespeist.

Für den Empfang von DVB-T2 ist zunächst der Betrieb der Sendeanlagen und Antennen, die lokal begrenzte Gebiete versorgen, zu nennen. In Deutschland werden solche Sendeanlagen an über 50 Standorten betrieben. Wenn man bedenkt, dass eine strategisch gut platzierte Sendeanlage mit einer effektiven Strahlungsleistung von bis zu 50 kW viele DVB-T2-Fernsehprogramme zu Millionen von Kunden transportieren kann, entfallen ähnlich wie beim Satelliten die Treibhausgasemissionen pro Stunde konsumierter Videoinhalte entsprechend niedrig aus [19].

Für eine bessere Einordnung der einzelnen Distributionswege (DVB-S/S2/C/T2) hinsichtlich ihrer Bedeutung in Deutschland, sei abschließend auf die technische Reichweite hingewiesen. Die Mehrheit der deutschen Haushalte empfängt das Fernsehsignal über Kabel (43.7 %) oder Satellit (43.5 %) während die terrestrische Distribution mit 6.7 % nur eine untergeordnete Rolle spielt [33]. Wie in dieser Studie ersichtlich wird der CO₂-Fußabdruck pro Stunde gesehener Inhalte hauptsächlich von den Wiedergabegeräten der Verbraucher:innen und anderen CPEs (Customer Premise Equipment) bestimmt.

Der Zugang zu IPTV Angeboten großer Plattformbetreiber wie z.B. Telekom, Vodafone ist in der Regel über eine Operator- Set-Top-Box (OSTB) realisiert. Rückläufig ist die Zahl der für das lineare Broadcast verwendeten Set-Top-Boxen (STB), da die meisten Fernsehgeräte bereits mit einem DVB-S/S2/C/T2 Tuner ausgestattet sind. Generell ist darauf hinzuweisen, dass neuere STB-Modelle deutlich energieeffizienter sind als frühere, stromintensive Modelle [18]. Für den digitalen terrestrischen Empfang betreiben die Kunden oft zusätzliche aktive Antennenverstärker, um die Signalstärke zu erhöhen. Diese Geräte sind meist dauerhaft in Betrieb und tragen daher, ähnlich wie die Geräte für den Internetzugang, erheblich zum gesamten Energieverbrauch bei.

In Anbetracht der Tatsache, dass DVB-Signale fast ausschließlich auf größeren Fernsehbildschirmen konsumiert werden, ist der durchschnittliche Stromverbrauch (vgl. Tabelle 3) für eine lineare Broadcast-Nutzer:in vermutlich höher als von der Streaming-Nutzer:in, die Inhalte häufiger auf Smartphones, Tablets und Laptops mit geringem Stromverbrauch konsumiert. Aktuelle Trends zeigen jedoch auch, dass die Nutzung von OTT-Inhalten auf dem TV-Gerät stetig steigt und sich dem Verhalten linearer Broadcast-Nutzer:innen angleicht [33].

Eine beispielhafte Studie zum Energieverbrauch der einzelnen Distributionswege wurde von BBC-Research erstellt, wobei speziell die technischen Unterschiede zwischen linearem Broadcast und Streaming berücksichtigt wurden [34]. Die Studie kommt zu dem Schluss, dass der Energieverbrauch von Videostreaming pro Stunde (0.19 kWh) ähnlich hoch ist wie der von Satellit (0.16 kWh) und Kabelfernsehen (0.15 kWh) während die terrestrische Distribution (0.06 kWh) den niedrigsten Energieverbrauch pro Stunde hat. Es muss jedoch hervorgehoben werden, dass diese Zahlen nicht direkt auf Deutschland übertragbar sind, da unterschiedliche technische Reichweiten und weitere Annahmen zur Nutzung zu Grunde liegen.

Diese Ergebnisse bedeuten zusammenfassend, dass alle Distributionswege Potenzial zur Verringerung von Treibhausgasemissionen besitzen. In Bezug auf Online-Videostreaming gibt es folgende Optionen:

Am Backend des Streamingdienstes kann beispielsweise eine effizientere Codierung von Videoinhalten erfolgen, durch den Einsatz neuerer Videokomprimierungstechnologien oder eine bessere Anpassung der Bitraten an die zu übertragenden Inhalte und Gerätefähigkeiten (*content-aware* und *context-aware* encoding). Dies kann die erforderliche Bandbreite um bis zu 50 % senken, wobei eine hohe Videoqualität erhalten bleibt. Berücksichtigt man ebenfalls den Stromverbrauch der Endgeräte, entsteht ein Optimierungs-Trilemma: Die Ziele der Erzeugung von Videostreams mit hoher Qualität (QoE) bei niedrigen Bitraten und niedrigem Energieverbrauch bei der Wiedergabe stehen teilweise im Widerspruch zueinander, und die Verbesserung eines Optimierungsziels kann nur unter Inkaufnahme von Verlusten bei anderen Zielen erreicht werden und umgekehrt. Eine aktuelle Studie von Herglotz und Robitza et al. [17] hat jedoch gezeigt, dass es ein hohes Potenzial für die Optimierung des Gesamtenergieverbrauchs von Endnutzer:innengeräten bei gleichzeitig hoher QoE gibt, was zeigt, dass solche Betriebspunkte dennoch existieren können.

Ein insgesamt geringeres Datenvolumen, das für die Bereitstellung von Videoinhalten erforderlich ist, kann sich positiv auf die Übertragungskette auswirken und hat das Potenzial, weniger CO₂-Emissionen zu verursachen. Die tatsächlichen Nettoauswirkungen sind jedoch schwer vorherzusagen und zu quantifizieren. Wie von Malmodin hervorgehoben [9], gibt es im ICT-Sektor nur eine geringe bis gar keine Korrelation zwischen Datenvolumen und Stromverbrauch. Tatsächlich ist das über das Internet transportierte Datenvolumen um viele Größenordnungen gestiegen, der Energieverbrauch jedoch nicht, was auf rasche technologische Verbesserungen in Bezug auf die Energieeffizienz pro Datenvolumen hindeutet.

Effizientere Codierungsverfahren erfordern häufig eine wesentlich höhere Rechenleistung und somit mehr Infrastruktur, was teilweise die Einsparung der CO₂-Emissionen zunichtemachen kann, die aufgrund einer geringeren Gesamtdatenmenge möglich wären. Beim Wechsel von Advanced Video Coding (H.264/AVC) zu High Efficiency Video Coding (H.265/HEVC) beispielsweise vervierfacht sich im Schnitt die Codierungszeit bei einer etwa um 50 % geringeren Bitrate. Auch wirtschaftliche Erwägungen könnten den vollumfänglichen Einsatz von content- und context-aware Encoding verhindern.

Ohne auf neuere Codecs umzusteigen, kann die durchschnittliche Bitrate bei mobilen Geräten mit kleinen Bildschirmen gesenkt werden, indem die maximale Auflösung des Videoinhalts begrenzt wird, ohne dass die visuelle Qualität spürbar leidet, während gleichzeitig die Akkulaufzeit verlängert wird. Obwohl moderne Smartphones über extrem hochauflösende Displays verfügen, die sogar nativ 4K UHD-Inhalte anzeigen könnten, setzen das maximale Auflösungsvermögen des menschlichen Auges und die Betrachtungsbedingungen der maximal wahrnehmbaren Videoauflösung eine physikalische Grenze. In der Regel führt die Ausspielung von Videos mit einer höheren Auflösung als 720p auf Geräten mit kleinen Bildschirmen zu keinem wahrnehmbaren Gewinn an visueller Qualität.

Maßnahmen zur Verringerung der CO₂-Emissionen werden bereits von Drittfirmen ergriffen, die im Bereich des Videostreaming tätig sind. Der globale CDN-Anbieter Akamai gibt an, bis 2020 einen Anteil von 50 % an erneuerbaren Energien zu erreichen [20]. In ähnlicher Weise verpflichtet sich Amazon Web Services (AWS), seine globale technische Infrastruktur bis 2025 mit 100 % erneuerbaren Energien zu betreiben [21]. Alle großen deutschen ISPs, darunter die Deutsche Telekom, Vodafone und Telefónica, haben sich zu Programmen für 100 % erneuerbare Energien verpflichtet und streben bis 2025 Kohlenstoffneutralität mit Netto-Treibhausgasemissionen von Null an [15][22][23].

Diese Zusagen zur Verringerung der Treibhausgasemissionen werden nicht nur durch den verstärkten Einsatz von grüner Energie erreicht, sondern auch durch technologische Entwicklung und Innovation unterstützt. Beim Transport von Videodaten beispielsweise lassen sich die Emissionen durch energieeffizientere Technologien verringern, die derzeit entwickelt werden. Für den kabelgebundenen Internetzugang bieten optische Netze (z. B.

Fiber-to-the-Home) den Verbraucher:innen nicht nur eine höhere Bandbreite im Vergleich zu kupfer- oder koaxbasierten Zugängen, sondern verbrauchen auch weniger Energie [25][11].

Der drahtlose Zugang zum Internet hingegen wird in Zukunft von 5G dominiert werden. Obwohl einzelne Basisstationen Berichten zufolge im Vergleich zu 4G Basisstationen mehr Energie benötigen, besteht ein übergreifender Konsens darüber, dass 5G eine erhebliche Steigerung der Energieeffizienz bietet. Die großen Hersteller von 5G-Netzausrüstung berichten von Energieeffizienzverbesserungen im Bereich von 90 % [28][29]. Für weitere Details wird auf eine Metastudie [26] über die Auswirkungen von 5G auf den Energieverbrauch verwiesen.

Ein großes Potenzial zur Verringerung der CO₂-Emissionen liegt auf der Seite der Verbraucher:innen: Da der Energieverbrauch von Endgeräten den größten Einfluss auf die CO₂-Emissionen hat, ist die Sensibilisierung der Verbraucher:innen zu den Themen der Energieeffizienz und dem Einfluss des eigenen Nutzungsverhalten von großer Bedeutung. Im Allgemeinen gibt die Kennzeichnung des Energieverbrauchs für Elektrogeräte nach EU-Verordnung 2017/1369 („EU-Energielabel“) Auskunft über den durchschnittlichen Energieverbrauch und weist für jedes Gerät eine Energieeffizienzklasse zwischen „A+++“ und „G“ aus. Die Energieeffizienz von TV-Geräten hat sich in den letzten 10 Jahren deutlich verbessert. Waren im Jahr 2013 49 % aller Geräte in der Klasse „A“ oder besser zu finden, waren es im Jahr 2019 bereits 94 % aller Geräte [32]. Speziell für elektronische Displays existiert jedoch seit März 2021 ein überarbeitetes EU-Energielabel nach EU-Verordnung 2019/2013 mit einer veränderten Effizienzskala. Diese überarbeitete Skala hat zu einer Abwertung aller TV-Geräte in deutlich schlechtere Effizienzklassen geführt. Insbesondere TV-Geräte mit großen Bildschirmdiagonalen sind nun fast ausschließlich in den Klassen F und G zu finden. Die oberste Klasse A bleibt frei, um Spielraum für technischen Fortschritt offen zu lassen und einen zusätzlichen Anreiz für die Hersteller zu schaffen.

Für die Verbraucher:innen ergeben sich die folgenden Aspekte hinsichtlich Energieverbrauch und Nutzung:

- **Maßgeblich für den Stromverbrauch ist die Bildschirmgröße des Gerätes. Die optimale Bildschirmgröße ist neben der persönlichen Präferenz abhängig von den äußeren Betrachtungsbedingungen (Distanz zum Gerät).**
- **Die neue EU-Energieverbrauchskennzeichnung für TV-Geräte gibt getrennt Auskunft über den Energieverbrauch bei der Wiedergabe von SDR und HDR-Inhalten. Der oft signifikant höher ausgewiesene Energieverbrauch im HDR-Betrieb ist jedoch auch abhängig vom wiedergegebenen Inhalt bzw. dessen Dynamikumfang.**
- **Geräte ohne eingebaute Tuner/Internetzugang werden zwar automatisch besser eingestuft, da der Stromverbrauch geringer ist, zusätzliche Set-Top-Boxen oder Lautsprecher verbrauchen insgesamt jedoch mehr Energie als ein „All-in-One“ Gerät [35].**
- **Moderne TV-Geräte bieten oft eine Vielzahl an Energiespar-Einstellungen. Eine automatische Helligkeitssteuerung (ABC) passt die Bildschirmhelligkeit optimal an die vorhandene Umgebungslichtstärke an und führt zu einem geringeren Energieverbrauch [31]. Des Weiteren kann häufig der Bildmodus in Kategorien von z.B. „Sparmodus“ bis zu „Dynamisch“ gewählt werden, was sich ebenfalls auf den Stromverbrauch auswirkt.**
- **Längere Nutzung von Geräten mit geringerem Stromverbrauch (wie Smartphones und Laptops), bei denen die Emissionen aus der Herstellung den größten Anteil am gesamten Kohlenstoff-Fußabdruck während des Lebenszyklus ausmachen [30].**

Schließlich wird die unumgängliche Erhöhung des Anteils von Strom aus erneuerbaren Energiequellen im nationalen Strommix und die lokale Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen (z. B. Photovoltaik) die Verringerung der Emissionen auf der Verbraucher:innenseite erheblich vorantreiben.

Danksagung

Die Autoren danken Dr.-Ing. Christian Herglotz, Senior Scientist am Lehrstuhl für Multimediakommunikation und Signalverarbeitung der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, für die Durchsicht dieser Studie und seine wertvollen Kommentare und Hinweise.

Autoren

Dr.-Ing. Max Bläser
Media Engineer Streaming Technology
Cologne Broadcasting Center GmbH, RTL Deutschland
Köln, Deutschland
max.blaeser@rtl.de

Sascha Sadowski
Director Streaming Technology
Cologne Broadcasting Center GmbH, RTL Deutschland
Köln, Deutschland
sascha.sadowski@rtl.de

David Allum
Senior Controller
RTL Deutschland
Köln, Deutschland
david.allum@rtl.de

Mark Fabisch
Senior Director Corporate Responsibility
Bertelsmann SE & Co. KGaA
Gütersloh, Deutschland
mark.fabisch@bertelsmann.de

Frank Heineberg
VP Standards & Innovation
Cologne Broadcasting Center GmbH, RTL Deutschland
frank.heineberg@rtl.de

Referenzen

- [1] "The Global Internet Phenomena Report", Sandvine [Online], May 2020, Available: <https://www.sandvine.com/covid-internet-spotlight-report>
- [2] "Bertelsmann wird bis 2030 klimaneutral", Bertelsmann SE & Co. KGA, Pressemitteilung [Online], 17.02.2020, Available: <https://www.bertelsmann.de/news-und-media/nachrichten/bertelsmann-wird-bis-2030-klimaneutral.jsp?atn=6249&abp=6249,8182>
- [3] W. Koch and N. Beisch, "Ergebnisse der ARD/ZDF-Onlinestudie 2020", Media Perspektiven 02/2020 [Online], Available: https://www.ard-zdf-onlinestudie.de/files/2020/0920_Koch_Beisch.pdf
- [4] M. Efovi-Hess et al., "Climate Crisis: The Unsustainable Use of Online Video", The Shift Project [Online], July 2019, Available: <https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2019/07/2019-02.pdf>
- [5] "Chill your Netflix habit, climate experts say", AFP [Online], October 2019, Available: <https://www.france24.com/en/20191028-chill-your-netflix-habit-climate-experts-say>
- [6] G. Kamiya, "Factcheck: What is the carbon footprint of streaming video on Netflix?", Carbon Brief [Online], February 2020, Available: <https://www.carbonbrief.org/factcheck-what-is-the-carbon-footprint-of-streaming-video-on-netflix>
- [7] "Carbon impact of video streaming", Carbon Trust [Online], June 2021, Available: <https://www.carbontrust.com/de/node/1540>
- [8] G. Kamiya, "The carbon footprint of streaming video: fact-checking the headlines", International Energy Agency (IEA) [Online], December 2020, Available: <https://www.iea.org/commentaries/the-carbon-footprint-of-streaming-video-fact-checking-the-headlines>
- [9] J. Malmodin, "The power consumption of mobile and fixed network data services - The case of streaming video and downloading large files", Electronics Goes Green 2020+, September 2020, Available: https://online.electronicsgoesgreen.org/wp-content/uploads/2020/10/Proceedings_EGG2020_v2.pdf
- [10] V. Coroama, R. Hintemann, S. Hinterholzer and S. Arbanowski, „Nachhaltigkeit von Streaming & Co.“, Bitkom e.V. [Online], June 2020, Available: https://www.bitkom.org/sites/default/files/2020-06/200618_lf_nachhaltigkeit-von-streaming.pdf
- [11] "Hintergrundinformationen Klimawirkung von Videostreaming & Co.", Umweltbundesamt [Online], September 2020, Available: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2546/dokumente/factsheet_klimawirkung_video-streaming.pdf
- [12] „Aktuelle Informationen: Erneuerbare Energien im Jahr 2020“, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie [Online], Available: https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Aktuelle-Informationen/aktuelle-informationen.html
- [13] P. Icha and G. Kuhs, "Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 – 2021", Umweltbundesamt, Climate Change | 15/2022, April 2022, ISSN 1862-4359, Available: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2022-04-13_cc_15-2022_strommix_2022_fin_bf.pdf
- [14] C. Herglotz, S. Coulombe, C. Vazquez, A. Vakili, A. Kaup and J. -C. Grenier, "Power Modeling for Video Streaming Applications on Mobile Devices," in *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 70234-70244, 2020, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2986580.
- [15] "Corporate Responsibility Bericht 2020", Deutsche Telekom AG [Online], Available: <https://www.cr-bericht.telekom.com/site21/steuerung-fakten/umwelt/co2e-emissionen#atn-540-10896>
- [16] T. Lauf, M. Memmler and S. Schneider, „Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger 2018“, Umweltbundesamt, Climate Change | 37/2019, November 2019, ISSN 1862-4359, Available: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-11-07_cc-37-2019_emissionsbilanz-erneuerbarer-energien_2018.pdf
- [17] C. Herglotz, W. Robitzka, et al., "Modeling of Energy Consumption and Streaming Video QoE using a Crowdsourcing Dataset", 2022 14th International Conference on Quality of Multimedia Experience (QoMEX) [Accepted Paper], September 2022, Preprint
- [18] C. Fletcher, "The carbon impact of streaming: an update on BBC TV's energy footprint", BBC Research & Development [Online], June 2021, Available: <https://www.bbc.co.uk/rd/blog/2021-06-bbc-carbon-footprint-energy-environment-sustainability>
- [19] J. Chandaria, J. Hunter and A. Williams, "The carbon footprint of watching television, comparing digital terrestrial television with video-on-demand," Proceedings of the 2011

- IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology, 2011, pp. 1-6, DOI: 10.1109/ISSST.2011.5936908.
- [20] "2020 Sustainability Report", Akamai Technologies [Online], January 2021, Available: <https://www.akamai.com/content/dam/site/de/documents/sustainability/2020-akamai-sustainability-report.pdf>
- [21] AWS Sustainability Website, Amazon Web Services (AWS), Accessed August 2021, Available: <https://sustainability.aboutamazon.com/environment/the-cloud?energyType=true#section-nav-id-0>
- [22] "Annual Report 2021", Vodafone Group Plc. [Online], Accessed September 2021, Available: <https://investors.vodafone.com/sites/vodafone-ir/files/2021-05/vodafone-annual-report-2021.pdf>
- [23] "Signifikant steigende Stromeffizienz: O2 wird spätestens 2025 klimaneutral", Telefonica Germany GmbH & Co. OHG, Pressemitteilung [Online], October 2020, Available: <https://www.telefonica.de/news/corporate/2020/10/signifikant-steigende-stromeffizienz-o2-wird-spaetestens-2025-klimaneutral.html>
- [24] "Consolidated management Report 2021", Telefonica S.A.; Available: <https://www.telefonica.com/en/shareholders-investors/financial-reports/integrated-annual-report/>
- [25] S. Breide et al., "Energy consumption of telecommunication access networks", Prysmian Group [Online], December 2017, Available: <https://www.prysmiangroup.com/statics/energy-consumption-whitepaper/index.html>
- [26] L. Williams et al., "The energy use implications of 5G: Reviewing whole network operational energy, embodied energy, and indirect effects", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 157, 2022, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112033>.
- [27] "Scope 2 Guidance", Greenhouse Gas Protocol [Online], Available: https://ghgprotocol.org/scope_2_guidance
- [28] "Achieving sustainability with energy efficiency in 5G networks", Ericsson [Online], January 2021, Available : <https://www.ericsson.com/en/blog/3/2021/1/achieving-sustainability-with-energy-efficiency-in-5g-networks>
- [29] "Nokia confirms 5G as 90 percent more energy efficient", Nokia [Online], December 2020, Available: <https://www.nokia.com/about-us/news/releases/2020/12/02/nokia-confirms-5g-as-90-percent-more-energy-efficient/>
- [30] "Coolproducts don't cost the Earth – Briefing", European Environmental Bureau (EEB) [Online], September 2019, Available: <https://eeb.org/library/coolproducts-briefing/>
- [31] "The Secret Costs of Manufacturers Exploiting Loopholes in the Government's TV Energy Test: \$1.2 Billion for Consumers & Millions of Tons of Pollution", The Natural Resources Defense Council (NRDC) [Online], September 2016, Report R-16-09-B, Available: <https://www.nrdc.org/sites/default/files/costs-manufacturers-exploiting-loopholes-tv-energy-test-report.pdf>
- [32] "COMMISSION DELEGATED REGULATION (EU) .../... supplementing Regulation (EU) 2017/1369 of the European Parliament and of the Council with regard to energy labelling of electronic displays and repealing Commission Delegated Regulation (EU) No 1062/2010", European Commission, Directorate-General for Energy, Document C(2019)1796, Available: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=PL_COM:C\(2019\)1796&from=EN](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=PL_COM:C(2019)1796&from=EN)
- [33] "Digitalisierungsbericht Video 2021", die medienanstalten, Oktober 2021, Available: https://www.die-medienanstalten.de/fileadmin/user_upload/die_medienanstalten/Publikationen/Digibericht_Video/2021/Digitalisierungsbericht_Video_2021_Web_en_National.pdf
- [34] D. Schien, P. Shabajee, J. Chandaria, D. Williams, C. Preist, C. Fletcher, "Using Behavioural Data to Assess the Environmental Impact of Electricity Consumption of Alternate Television Service Distribution Platforms", BBC Research & Development [Online], September 2020, Available: <https://downloads.bbc.co.uk/rd/pubs/whp/whp-pdf-files/WHP372.pdf>
- [35] "Energiespartipps für TV, PC & Co.", Deutsche Energie-Agentur GmbH [Online], September 2018, Available: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2018/Energiespartipps_fuer_TV_PC_Co.pdf