



Green Streaming

Ein Leitfaden zur Bewertung des Energie-
bedarfs und Reduktion der CO₂-Emissionen
von Video-Streaming

Inhalt

| | |
|--|-----------|
| 1. Einleitung | 5 |
| 2. Forschungsstand und resultierender Ansatz für Green Streaming | 6 |
| 2.1 Bisherige wissenschaftliche Erkenntnisse | 6 |
| 2.2 Begrifflichkeiten und Methoden | 7 |
| 2.3 Einfluss verschiedener Nutzungsszenarien auf den Stromverbrauch | 8 |
| 3. Die Streaming-Wirkkette | 10 |
| 3.1 Definition der Streaming-Wirkkette | 10 |
| 3.2 Abgrenzung der Analyse | 11 |
| 4. Ergebnisse | 12 |
| 4.1 Produktionsinfrastruktur | 12 |
| 4.2 Ingest und Encoding | 13 |
| 4.3 Content Delivery Network | 14 |
| 4.4 Distribution | 14 |
| 4.5 Endgeräte | 17 |
| 5. Auf dem Weg zu einer CO₂-Bilanz von Video-Streaming | 20 |
| 5.1 Relevanz der Nutzungsszenarien | 20 |
| 5.2 Von Stromverbrauch und Energiebedarf zu Emissionen | 20 |
| 5.3 Energieaufwand zur Herstellung und Entsorgung der Hardware | 21 |
| 5.4 Strombedarf und Emissionen im jeweiligen Nutzungsszenario | 21 |
| 6. Schlussfolgerungen und Ausblick | 24 |
| Erkenntnisse | 24 |
| Potentiale zur Emissionsreduktion | 24 |
| Ausblick | 25 |
| 7. Literaturverzeichnis | 26 |
| 8. Anhang | 28 |
| 8.1 Nutzungsszenarien | 28 |
| 8.2 Annahmen für Embodied Emissions | 29 |
| Impressum | 30 |



**If you can't measure it,
you can't improve it.«**

Lord Kelvin (1824-1907)



1. Einleitung

Medienunternehmen, Video-Streaming-Anbieter und TV-Sender stehen vor der Herausforderung den ökologischen Fussabdruck ihrer Video-Streaming-Angebote verstehen und bewerten zu können. Dazu sind einheitliche und transparente Messmethoden, Modelle und Metriken erforderlich.

Video-Streaming ist zu einem festen Bestandteil unseres täglichen Medienkonsums geworden und macht mit 60 bis 70 Prozent den größten Anteil am globalen Internetdatenverkehr aus. Mit der zunehmenden Beliebtheit von Streaming-Diensten und massiven Nutzung von Video-Inhalten über Social Media Plattformen ist es wichtiger denn je, die Auswirkungen dieser Technologien auf unsere Umwelt verstehen und bewerten zu können. Das vorliegende Whitepaper beleuchtet die Streaming-Wirkkette und ihren ökologischen Fußabdruck, von der Content-Produktion bis zu den Endgeräten beim Kunden. Dazu werden die bei Video-Streaming anfallenden Stromverbräuche und die daraus entstehenden Treibhausgasemissionen entlang der Wirkkette betrachtet.

Das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderte Projekt Green Streaming hat sich zum Ziel gesetzt, die bisherige Studienlage, welche oftmals auf Simulationen beruht, mit Messungen entlang der Streaming-Wirkkette zu überprüfen und zu analysieren. Wann immer keine direkten Messungen möglich oder aber Messergebnisse nicht eindeutig auf einen der Wirkkette zugehörigen Prozess zurückzuführen sind, werden etablierte Rechenmodelle zur Darstellung der betroffenen Komponenten verwendet und erläutert. Zu diesem Zweck werden geeignete Messpunkte entlang der Streaming-Wirkkette definiert und AV-Verarbeitungsprozesse, Kontribution, Distribution und die Wiedergabe bei den Nutzenden berücksichtigt.

Auf dieser Grundlage werden Einspar- und Optimierungspotenziale identifiziert und technische Lösungen zur Reduktion des Energiebedarfs erarbeitet und erprobt. Die Ergebnisse dieser Analyse bilden die Grundlage dieses Whitepapers.

Das Whitepaper dient als Leitfaden für Entscheidungsträgerinnen, Entwickler und Verbraucherinnen, um die komplexen und vielfältigen Zusammenhänge zwischen Streaming-Komponenten und Umweltbelastungen zu erkennen und nachhaltige Lösungen zu fördern. Es bietet einen tiefgreifenden Einblick in die aktuellen Forschungsergebnisse, die Methodologien zur Stromverbrauchs- und Emissionsberechnung und die Bedeutung effizienter Hardware für die einzelnen Komponenten der Streaming-Wirkkette.

2. Forschungsstand und resultierender Ansatz für Green Streaming

Die Streaming-Wirkkette ist ein komplexes System aus zahlreichen Teilkomponenten für dessen Betrachtung unterschiedliche Ansätze und Modelle abhängig vom Nutzungsszenario benötigt werden

2.1 Bisherige wissenschaftliche Erkenntnisse

Eine Vielzahl von Forschungsprojekten, Gremien (IEA, GSMA, ETNO, NGMA, DIMPACT etc.) und Studien hat sich intensiv mit der Frage beschäftigt, wie viel Strom bei der Nutzung von Streaming-Diensten verbraucht wird und wie hoch der CO₂-Fußabdruck von Video-Streaming ist. Diese Untersuchungen liefern teilweise sehr unterschiedliche und widersprüchliche Ergebnisse, was auf die verschiedenen Methoden, Annahmen und Datensätze, die verwendet wurden, zurückzuführen ist. Ein Vergleich der veröffentlichten Werte für den Stromverbrauch oder den CO₂-Fußabdruck ist somit nahezu unmöglich.

Ein Ergebnis der Literaturrecherche ist, dass die errechneten Energiebedarfswerte und CO₂-Emissionen von Streaming-Diensten, abhängig von den benutzten Modellen, dem Übertragungsweg, dem verwendeten Endgerät, den Nutzungsgewohnheiten der Verbraucher und dem benutzten Strommix, erheblich variieren können.

Einen der wichtigsten Beiträge liefert hierzu das Whitepaper »Carbon impact of video streaming« der Carbon Trust-Organisation in Zusammenarbeit mit DIMPACT [1]. Unter Nutzung des DIMPACT-Modells wird hier ein mittlerer CO₂-Fußabdruck von 55 g CO₂e pro Stunde Video-Streaming für Europa berechnet. Weiterhin wird festgestellt, dass der CO₂-Fußabdruck für Video-Streaming im Vergleich zu anderen menschlichen Aktivitäten gering ist.

RTL Deutschland hat in einer Studie die Umweltauswirkungen seines Video-Streaming-Dienstes (RTL+) untersucht. Im Rahmen der Studie wurden die Emissionen verschiedener Komponenten analysiert, darunter die interne Verarbeitung, die Nutzung von Cloud-Diensten, der Transport sowie die

Endgeräte. Die Ergebnisse zeigen, dass das Streaming von Video-Inhalten auf RTL+ bei einer durchschnittlichen Bitrate von 5,43 Mbit/s marktbasierend etwa 42,7 g CO₂e (ohne die von den Verbrauchenden verursachten Emissionen) und standortbasiert etwa 92,3 g CO₂e pro Stunde ausstößt. Die Endgeräte haben hierbei einen Anteil von 30,9 g CO₂e pro Stunde an den Gesamtemissionen. [2]

Weitere wichtige Quellen beschreiben ausführlich die beiden maßgeblichen Modelle zur Berechnung des Energiebedarfs in Netzen, das Energy Intensity Model [3] und das Power Model [4].

Zusammenfassend lässt sich aus den Literaturquellen folgendes schlussfolgern:

- Die Streaming-Wirkkette ist ein komplexes digitales und physikalisches System mit zahlreichen Abhängigkeiten und einer Vielzahl von Marktteilnehmern.
- Trotz stark gestiegener Datenvolumen in den letzten Jahren hat sich der Energiebedarf der Distributionsnetze nur marginal erhöht.
- Die oft verwendete einfache Angabe der Energy Intensität in kWh/GB führt zu der Annahme, dass sich der Gesamtenergiebedarf proportional zum Datenverkehr verhält. Dies entspricht nicht der Realität und ist unzureichend für eine genauere Analyse.
- Viele Experten schlagen deshalb eine zeitbasierte Metrik zur Angabe des Energiebedarfs für Video-Streaming vor (kWh pro Stunde Video-Streaming) [4] [5].
- Der Hauptteil der Energie in der Streaming-Wirkkette (ca. 70-80 Prozent) wird von den Endgeräten (Smart-TV, Customer Premises Equipment (CPE) etc.) der Nutzenden verbraucht [1].
- Distributionsnetze weisen auch einen hohen Energiebedarf



- auf, wenn keine Daten übertragen werden (»Idle Load«). Diese »Idle Load« liegt nach Schätzungen bei 50 bis 70 Prozent ihres Gesamtenergiebedarfs.
- Glasfaser ist hinsichtlich des Stromverbrauchs die effizienteste Technologie zur Verteilung von Streaming-Inhalten. [6]

2.2 Begrifflichkeiten und Methoden

Die Literaturrecherche hat gezeigt, dass die berechneten Energiebedarfswerte und CO₂-Emissionen von Streaming-Diensten stark variieren können. Diese Variabilität hängt von verschiedenen Faktoren wie den verwendeten Modellen, dem Übertragungsweg, dem Endgerät, den Nutzungsgewohnheiten der Verbraucher und dem zugrunde liegenden Strommix ab. Green Streaming möchte diese Datenlage durch Messungen analysieren und validieren. Die Ergebnisse sollen transparent und nachvollziehbar dargelegt und im Kontext von Optimierungspotenzialen für eine nachhaltigere und energieeffiziente Streaming-Wirkkette diskutiert werden. Dazu werden im Nachfolgenden die wichtigsten Methoden, Begrifflichkeiten und KPIs erläutert, sowie der Einfluss verschiedener Nutzungsszenarien erörtert.

2.2.1 Methoden

Um die CO₂-Emissionen von Streaming-Diensten zu bestimmen, werden verschiedene Methoden und Modelle verwendet. Zu den Wichtigsten gehören:

- **Energy-Intensity-Model:** Das Energie-Intensitätsmodell ist die konventionelle Methode zur Berechnung des Stromverbrauchs bei der Datenübertragung. Es gibt den Energiebedarf pro übertragener Datenmenge in kWh/GB an und wird von vielen Netzbetreibern als KPI in ESG-Berichten angegeben.

- **Power Model:** Das Power Model geht davon aus, dass der Energiebedarf zeitabhängig ist und ein Großteil der Energie auch ohne Datenübertragung verbraucht wird, d.h. Distributionsnetze auf Grund des 24/7 Betriebs der Komponenten eine hohe Grundlast (»idle Load«) aufweisen. Oft wird ein zusätzlicher, geringer Anstieg des Energiebedarfs bei Datenübertragung modelliert.
- **Stromverbrauchsmessungen:** Direkte Messungen des Stromverbrauchs verschiedener Komponenten der Streaming-Wirkkette, wie Server, Netzwerkausrüstung und Endgeräte, zur Ermittlung möglichst genauer Daten.
- **Ökobilanz (Life Cycle Assessment, LCA):** Eine umfassende Methode zur Bewertung der Umweltauswirkungen eines Produkts oder einer Dienstleistung über den gesamten Lebenszyklus, von der Rohstoffgewinnung über die Produktion und Nutzung bis hin zur Entsorgung.
- **Product Carbon Footprint (PCF):** Der CO₂-Fußabdruck eines Produkts, der alle Emissionen umfasst, die während seines gesamten Lebenszyklus anfallen.
- **Allokation:** Die Zuweisung von Umweltauswirkungen auf verschiedene Produkte oder Dienstleistungen, die gemeinsam produziert werden oder gemeinsame Strukturen nutzen.

2.2.2 Begriffe

- **Funktionelle Einheit:** Eine definierte Menge eines Produkts oder einer Dienstleistung, die als Basis für die Berechnung der Umweltauswirkungen verwendet wird.
- **Systemgrenze:** Die Grenze, innerhalb derer die Umweltauswirkungen eines Produkts oder einer Dienstleistung bewertet werden.
- **Embodied Emissions:** Die Emissionen, die bei der Herstellung, dem Transport und der Entsorgung eines Produkts anfallen.
- **CO₂-Äquivalente:** Eine Maßeinheit, die verwendet wird,



um die Auswirkungen verschiedener Treibhausgase auf das Klima zu vergleichen, indem sie in äquivalente Mengen von CO₂ umgerechnet werden. Hinweis: In diesem Bericht wird vereinfacht von CO₂-Emissionen gesprochen, es ist aber immer die vollständige Treibhausgasbilanz in CO₂-Äquivalenten gemeint.

- **Stromverbrauch:** Beschreibt eine rein elektrische Betrachtung.
- **Energiebedarf:** Beschreibt eine Betrachtung, bei der neben elektrischer Energie auch andere Energieformen berücksichtigt werden.

2.2.3 KPIs

Die wichtigsten Kennziffern für den Energiebedarf von Video-Streaming sind im Folgenden aufgeführt:

- **Energieintensität** umfasst den Energiebedarf pro übertragenes Datenvolumen und wird in kWh/GB oder kWh/TB angegeben.
- **CO₂-Footprint** umfasst die Menge an CO₂-Äquivalent-Emissionen pro funktioneller Einheit und wird in kg CO₂e/Einheit angegeben.
- **Energie per Subscriber Line/Connection:** Energiebedarf für eine Datenverbindung definiert in W/line.
- **Energiebedarf pro Stunde Video-Streaming:** Vergleichswert für den Energiebedarf in einer Stunde Video-Streaming angegeben in W oder kW.
- **CO₂-Footprint pro Stunde Video-Streaming** gemessen in g CO₂e.
- **Energiebedarf pro Endgerätestunde:** Angabe des Energiebedarfs eines Endgerätes (Smart TV) oder eines Teilnehmeretzgerätes (CPE; Customer Premise Equipment) in W pro Stunde Nutzung.

- **PUE-Wert (Power Usage Effectiveness):** Ein Maß für die Energieeffizienz von Rechenzentren, welches das Verhältnis des gesamten Energiebedarfs eines Rechenzentrums zur Energie, die tatsächlich für die IT-Ausrüstung verwendet wird, angibt.

2.3 Einfluss verschiedener Nutzungsszenarien auf den Stromverbrauch

Zusätzlich zu den detaillierten Messungen an den Komponenten, die im Laufe des Projektes geplant sind, analysieren wir die CO₂-Emissionen für verschiedene Nutzungsszenarien. Die Anzahl der Zuschauer und deren Wahl von Endgerät und Übertragungsnetz können erhebliche Auswirkungen auf den errechneten Energiebedarf von Video-Streaming haben. Um diesen Zusammenhang zu untersuchen, betrachten wir fünf idealisierte Nutzungsszenarien und bestimmen jeweils die CO₂-Emissionen für eine Stunde Video-Streaming.

Allokation nach Zuschauenden

Die Streaming-Wirkkette umfasst verschiedene Komponenten wie Ingest, Encoding, Content Delivery Networks (CDNs), Netzwerk und Endgeräte. Für die Berechnung des Gesamtstromverbrauchs und der daraus resultierenden CO₂-Emissionen pro Stunde Video-Streaming auf einem Endgerät ist es wichtig, den Stromverbrauch der einzelnen Komponenten detailliert zu verstehen. Darüber hinaus ist eine Zuordnung der anteiligen Energiebedarfe auf die einzelnen Streams notwendig. Da hier die Emissionen für eine Stunde Video-Streaming an einem Endgerät betrachtet werden, teilen wir für die korrekte Zuordnung die Emissionen, die am Anfang der Streaming-Wirkkette entstehen (also Produktionsinfrastruktur

bei Live-Streams, zudem Ingest und Encoding) durch die Anzahl der Zuschauenden. Alle weiteren Komponenten der Streaming-Wirkkette skalieren mit der Anzahl der Zuschauenden, tauchen also jeweils einmal im Fußabdruck pro Stunde Video-Streaming an einem Endgerät auf.

Nutzungsszenarien

In Kapitel 5 werden die Emissionen aus fünf idealisierten Nutzungsszenarien betrachtet, die detaillierten Annahmen zu den jeweiligen Szenarien finden sich im Anhang. Diese unterscheiden sich in der Anzahl von Zuschauenden, der Art des Inhalts (Live oder VoD), der Encoding-Strategie, dem Übertragungsnetz und dem Endgerät. Dabei sind die Parameter so gewählt, dass jeweils ein minimaler und ein maximaler Stromverbrauch ermittelt werden kann. Die hier betrachteten Nutzungsszenarien sind idealisiert aufgrund der Annahme, dass alle Zuschauenden sich bezüglich der gewählten Auflösung und des Endgeräts gleich verhalten.

Sensitivitätsanalyse

Eine erste Schätzung zeigt, wie empfindlich die Relevanz einzelner Komponenten auf Änderungen in den Nutzungszahlen reagiert. Diese Sensitivitätsanalyse ist entscheidend, um die Auswirkungen von Nutzungsänderungen auf den Gesamtstromverbrauch und die CO₂-Emissionen zu verstehen. Eine detaillierte Analyse wird im Laufe des Projekts durchgeführt, um die Optimierungspotenziale weiter zu bewerten.

Einfluss der Inhaltsart

Darüber hinaus sind Messungen mit unterschiedlichen Inhalten notwendig, um den möglichen Einfluss der Art des Inhalts auf den Energiebedarf zu bewerten. Dies umfasst sowohl die Nutzung von Streaming-Inhalten als auch die Optimierungspotenziale von inhaltsbezogenem Encoding. Die Art des Inhalts und die gewählte Encoding-Strategie kann den Energiebedarf beeinflussen, da verschiedene Inhalte

unterschiedliche Anforderungen an die Datenübertragung und Verarbeitung stellen.

2.4 Resultierender Ansatz

Basierend auf den Erkenntnissen der bisherigen Forschung verfolgt das Projekt einen ganzheitlichen Ansatz zur Bewertung und Reduzierung der CO₂-Emissionen von Streaming-Diensten. Dieser Ansatz umfasst mehrere Schlüsselkomponenten:

- 1. Detaillierte Analyse der gesamten Streaming-Wirkkette:** Von der Content-Produktion über die Datenübertragung bis hin zur Nutzung durch die Endverbraucher. Dabei werden alle relevanten Komponenten und Prozesse berücksichtigt, um ein vollständiges Bild der Energiebedarfe und der daraus resultierenden CO₂-Emissionen zu erhalten.
- 2. Messungen des Stromverbrauchs:** Die Ermittlung des Energiebedarfs durch Messungen an den Einzelkomponenten entlang der Streamingkette sowie die Erfassung und Analyse vorhandener Betriebsdaten zum Stromverbrauch.
- 3. Definition von Kriterien für nachhaltiges Video-Streaming:** Die Sensibilisierung der Nutzer für die Umweltauswirkungen ihres Medienkonsumverhaltens und die Förderung nachhaltiger Nutzungsmuster können einen signifikanten Beitrag für nachhaltiges und energieeffizientes Streaming leisten.
- 4. Entwicklung eines digitalen grünen Zwillings:** Ein digitales Modell der gesamten Streaming-Wirkkette, das zur Simulation und Optimierung der Streaming-Prozesse verwendet wird. Dieser digitale Zwilling ermöglicht es, verschiedene Szenarien zu testen und die effizientesten und umweltfreundlichsten Lösungen zu identifizieren.
- 5. Entwicklung eines Bilanzierungstools für Video-Streaming:** Ein CO₂-Bilanzierungstool, welches auf den wissenschaftlichen Ergebnissen des Projektes aufbaut, erleichtert Streaming-Anbietern die Erstellung von Nachhaltigkeitsberichten und informiert Zuschauende über die Auswirkungen ihres Medienkonsums.
- 6. Zusammenarbeit von Industrie und Forschung:** Das Projekt strebt eine enge Kooperation zwischen Inhaltenanbietern, Plattformbetreibern, Endgeräteherstellern, Forschungseinrichtungen und politischen Entscheidungsträgern an. Insbesondere sind hier die Deutsche TV-Plattform, Bitkom, ZVEI, Greening of Streaming, Ecoflow und das DIMPACT Forum zu nennen.

Einflussfaktoren

- Nutzungsszenarien beeinflussen den Stromverbrauch von Streaming maßgeblich.
- Bei Live-Streaming ist die Produktionsinfrastruktur zu berücksichtigen.
- Allokation des Stromverbrauchs für einzelne Wirkketten-Komponenten ist notwendig, Ungenauigkeiten durch das Attributionsproblem sind enthalten.
- Nutzungsszenarien ermöglichen die Abschätzung von minimalen und maximalen Stromverbräuchen.

3. Die Streaming-Wirkkette

Für eine ganzheitliche Betrachtung des Energiebedarfs von Video-Streaming ist ein Verständnis der Teilkomponenten und ihrer anteiligen Wirkung auf die gesamte Streaming-Wirkkette erforderlich.

3.1 Definition der Streaming-Wirkkette

Die Streaming-Wirkkette umfasst alle Schritte und Komponenten, die notwendig sind, um Videoinhalte von der Quelle bis zum Endverbraucher zu übertragen. Sie besteht aus dem Ingest-Prozess, dem Encoding, dem Content-Delivery-Netzwerk (CDN), dem Kern- und Zugriffsnetzwerk sowie den Endgeräten (Abbildung 1). Jeder dieser Schritte trägt zum Gesamtstromverbrauch bei und wird in der Analyse detailliert betrachtet. Dieses Kapitel beleuchtet die verschiedenen Einflussgrößen auf den Stromverbrauch innerhalb dieser Kette und definiert die Abgrenzungen für die Analyse.

Ingest und Encoding

Der Ingest-Prozess umfasst das Bereitstellen von Video-Inhalten auf den Servern der Streaming-Dienste. Das Encoding ist der Prozess der Umwandlung dieser Inhalte in verschiedene Formate und Auflösungen, um sie für verschiedene Endgeräte und Bandbreiten verfügbar zu machen.

Content Delivery Networks (CDNs)

CDNs sind spezialisierte Netzwerke, die Inhalte effizient an Endnutzer verteilen. Sie verringern die Latenz, verbessern die Ladegeschwindigkeit und reduzieren den Datenverkehr im Kernnetzwerk, indem sie Inhalte auf Servern ablegen, die geografisch näher an den Nutzern liegen. Der Stromverbrauch von CDNs hängt u. a. von der Anzahl der Server und deren geografischer Verteilung ab.

Kernnetzwerk

Das Kernnetzwerk bildet das Rückgrat der Datenübertragung und besteht aus Komponenten wie Routern, Switches und Data Centern, die eine effiziente und zuverlässige Weiterleitung der Streams ermöglichen.

Zugangnetzwerk (Access Network)

Beim Zugangnetzwerk wird grundsätzlich zwischen Breitband- und Broadcastnetzwerken unterschieden. OTT-Video-Streaming erfolgt über Breitbandtechnologien im Festnetz (DSL, VDSL, Kabel, Glasfaser) und Mobilfunknetz (LTE, 5G). Broadcast wird terrestrisch (DTT – Digital Terrestrial Television), Kabelnetze oder Satellit übertragen. Die vom Kunden genutzten CPEs (Customer Premises Equipment) wie Router und Modems werden hier dem Zugangnetzwerk zugeordnet.

Endgeräte

Endgeräte wie SmartTVs, Computer, Tablets und Smartphones sind die letzten Glieder der Wirkkette. Der Stromverbrauch dieser Geräte hängt direkt vom Nutzungsverhalten bzw. der Nutzungsdauer ab. Sie kommen millionenfach zur Nutzung von Streaming-Inhalten zum Einsatz und haben einen maßgeblichen Anteil am Gesamtenergiebedarf von Video-Streaming.

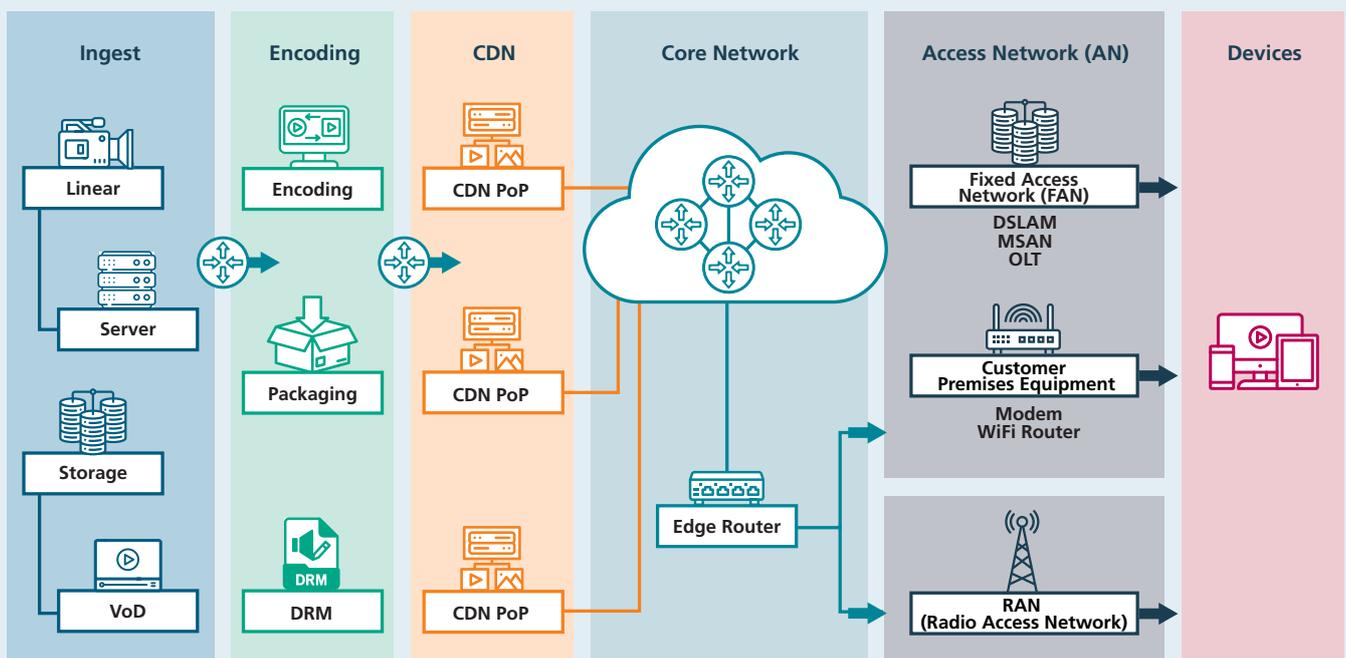


3.2 Abgrenzung der Analyse

Die Analyse konzentriert sich ausschließlich auf den Stromverbrauch der oben genannten Komponenten und schließt andere Faktoren wie Standby-Energie oder die Mehrfachnutzung von Geräten aus. Ziel ist es, ein klares Bild der Energieverteilung innerhalb der Wirkkette zu zeichnen und potenzielle Einsparungen zu identifizieren.

Durch die Betrachtung der gesamten Prozesskette, von der Inhaltserstellung über das Encoding und die Verteilung bis hin zu den Endgeräten, können gezielte Maßnahmen zur Reduzierung der CO₂-Emissionen entwickelt werden. Die Integration einer umfassenden Messinfrastruktur ermöglicht es, die tatsächlichen Energieverbräuche und Emissionen genau zu erfassen und nachhaltige Lösungen zu identifizieren.

Abbildung 1: Streaming-Wirkkette



4. Ergebnisse

Nutzungsszenarien und die Anzahl der Zuschauenden beeinflussen die Bewertung von Energiebedarf und CO₂ Emissionen von Video-Streaming.

Die Erarbeitung und Diskussion der Ergebnisse erfolgt zunächst anhand der maßgeblichen Teilkomponenten der Streaming-Wirkkette. Anschließend findet eine Ende-zu-Ende Betrachtung unter Zuhilfenahme von ausgewählten Nutzungsszenarien statt. Auf deren Grundlage werden Energiebedarfe ermittelt und CO₂-Emissionen abgeleitet.

4.1 Produktionsinfrastruktur

Zur Analyse von Live-Produktionen differenzieren wir zwischen der konventionellen Studioproduktion, der Ü-Wagen-Produktion, der Remote-Produktion sowie der Cloud-Produktion (Abbildung 2). Ziel der Messungen ist ein Vergleich des Energiebedarfs und der Emissionen der einzelnen Produktionsarten, um abschätzen zu können, ob und in welchem Umfang durch die Wahl der Produktionsart der Energiebedarf reduziert, bzw. CO₂ eingespart werden kann. Die Remote-Produktion ist ein Ansatz zur Durchführung von Live-Übertragungen, bei der die Erfassung von Video- und Audiosignalen am Ort der Veranstaltung erfolgt, während die Verarbeitung und Produktion an einem zentralen, entfernten Ort, beispielsweise in einem Sendezentrum, stattfindet. Im Rahmen eines Proof-of-Concept für eine Live-Produktion, angelehnt an ein Fußballspiel der 2. Bundesliga, wurden Messungen zur Erhebung des Energiebedarfs durchgeführt. Das Setup wurde unter Verwendung von sieben Kameras vor Ort sowie einer SMPTE ST 2110-konformen Regie und eines Zentralen Geräteraums (ZGR) am Remote-Standort realisiert. Dies entspricht einer regulären TV-Produktionseinrichtung unter Gewährleistung von Broadcast-Qualität.

Die technische Ausstattung am Veranstaltungsort umfasste neben der Kameratechnik lediglich ein kompaktes Flight-Case-Rack (»Stagebox«) mit 12 Rack-Höheneinheiten, welches

SDI-ST 2110-Gateways, JPEG-XS-Server und PTP-synchronisierte Switches beinhaltet. Der Signalaustausch zwischen den beiden Standorten erfolgte über ein Glasfaser-Netzwerk.

Messungen wurden an beiden Standorten für Einzelgeräte, Gerätegruppen sowie dem gesamten Setup über einen Zeitraum von zwei Produktionstagen (à 8 Stunden) durchgeführt. Der energetische Gesamtbedarf für einen Produktionstag wurde mit 71 kWh gemessen, was einer Leistung von ca. 8,9 kW pro Stunde aktiver Produktion entspricht. Abbildung 3 zeigt die Verteilung auf die einzelnen Produktionsschritte. Dabei entfielen 4,5 kW auf den ZGR, was bedeutet, dass die Komponenten zur Verarbeitung der Audio- und Videosignale für die Hälfte des Energiebedarfs verantwortlich waren. Weitere 2,2 kW fielen in der Regie an, 1,2 kW an den Kameras und 1 kW für die Stagebox am Veranstaltungsort.

Zu beachten ist, dass der Bedarf der Gebäudetechnik wie Klimaanlage, Heizung etc. nicht gemessen wurde und somit nicht im hier aufgeführten Gesamtbedarf enthalten ist. Außerdem wurde ein Großteil des Equipments im ZGR 24/7 betrieben. Im Vergleich dazu stehen klassische Ü-Wagen-Produktionen mit sechs bis acht Kameras. Von uns durchgeführte Messungen haben ergeben, dass für eine vergleichbare Produktion eine Leistung von ca. 6-9 kW anfällt, inklusive der im Ü-Wagen verbauten Technik wie Klimaanlage und Heizung. Somit lässt sich aus den Messungen ableiten, dass durch eine Remote-Produktion der Stromverbrauch nicht signifikant reduziert werden kann.

Eine Remote-Produktion bietet den entscheidenden Vorteil, dass ein Großteil des Produktionsteams (beispielsweise in der Regie) von einem zentralen, festen Standort aus arbeiten kann. Dies führt zu einer signifikanten Reduktion der am Veranstaltungsort benötigten Mitarbeitenden, was die CO₂-Emissionen

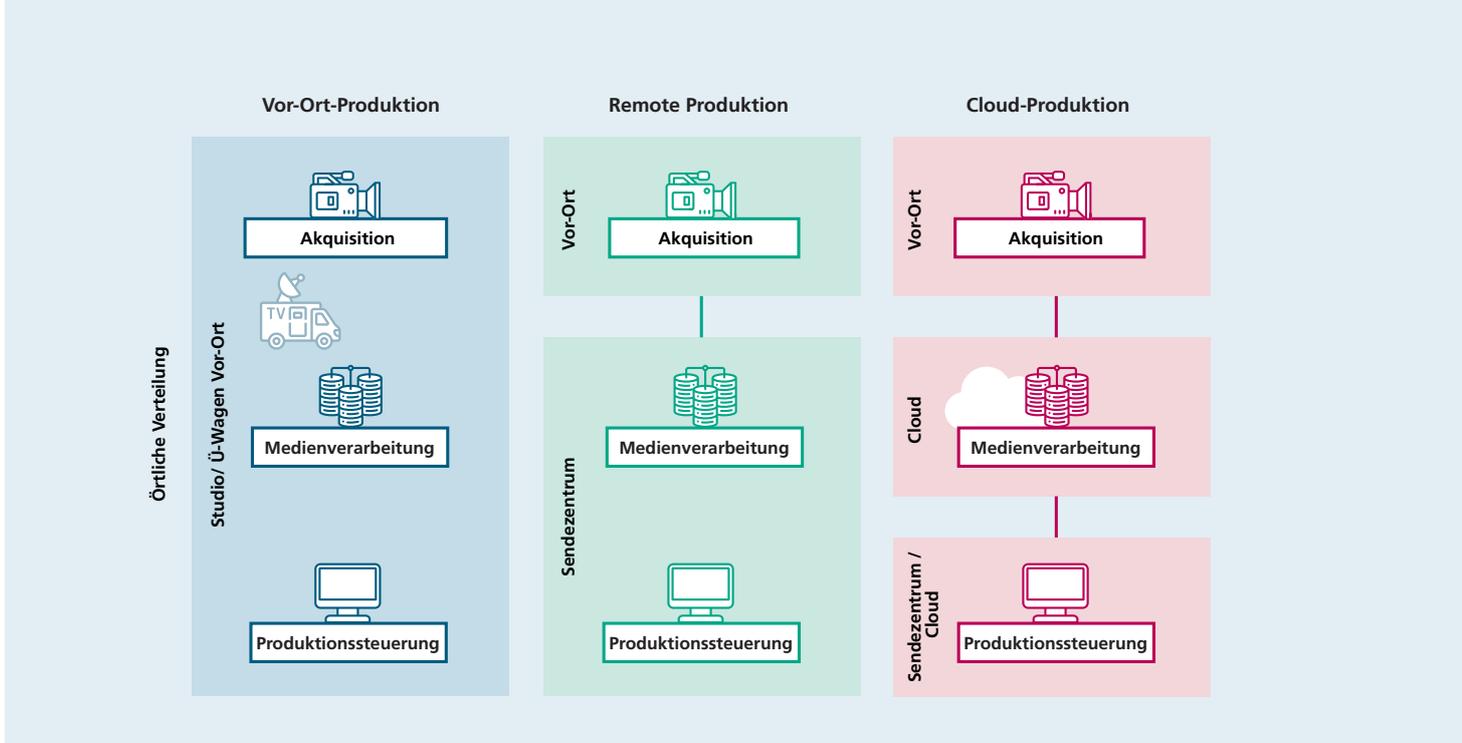
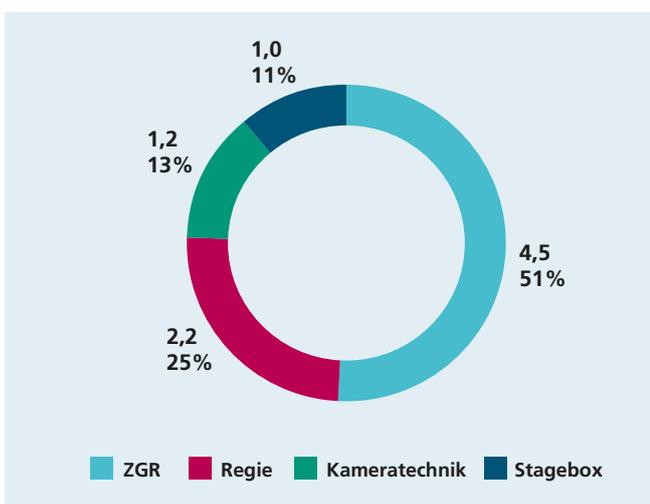


Abbildung 2: Produktionsarten

bei der Anreise und der Unterbringung reduziert. In der Konsequenz ist es einem einzelnen Produktionsteam zusätzlich möglich, an einem Tag mehrere Produktionen zu realisieren, wenn es sonst durch die Abhängigkeit von Standort und Verfügbarkeit des Ü-Wagens nur eine hätte realisieren können. Nur die Anwesenheit essenziellen Personals, wie beispielsweise Kameramann und Licht- und Tontechnikerinnen, am Veranstaltungsort ist nach wie vor erforderlich. Die Remote-Produktion birgt folglich ein beträchtliches Potenzial zur Reduktion der durch Reisen und Transport verursachten Emissionen, zur effizienteren Nutzung von Ressourcen, sowie zur Minimierung des Bedarfs an Unterkünften und Verpflegung für das Personal. Im Gesamtkontext betrachtet fallen diese Emissionen je Produktion einmalig an und skalieren nicht mit der Anzahl an Zuschauenden [7].

Abbildung 3: Durchschnittlicher Bedarf in kW



4.2 Ingest und Encoding

Video-Encoding ist ein essenzieller und zentraler Verarbeitungsschritt für die Verbreitung von Video-Inhalten über das Internet. Die Datenmenge von Video-Inhalten wird durch die Verwendung von Video-Kompressionsverfahren, auch Video-Codecs genannt, reduziert. Das Resultat ist ein Kompromiss aus der zu erhaltenden Videoqualität und der Datenmenge für den vorgesehenen Anwendungsfall. So werden am Anfang der Wirkkette Kamerasignale zunächst schwach komprimiert (Kontributionssignal) um eine weitere Verarbeitung in hoher Qualität zu ermöglichen, während am Ende der Streaming-Wirkkette eine stärkere Kompression für verschiedene Endgeräte und Nutzungsszenarien Anwendung findet. Das gilt sowohl für klassische Streaming- und TV-Angebote wie auch für die Millionen an Videos, die täglich über Social-Media Plattformen verteilt werden. Effiziente und ressourcenschonende Encoding-Lösungen werden damit immer wichtiger.

Je nach Anwendungsfall kommen hierfür verschiedene Ansätze und Architekturen zum Einsatz. Zu den am weitesten verbreiteten zählen Adaptive-Bitrate-Encoding und Content-Aware-Encoding die wiederum in Hardware oder Software und On-Premise oder in der Cloud realisiert werden können. Sie sind auch ein Beispiel dafür, dass Verfahren miteinander kombiniert werden, so findet Content-Aware-Encoding in Adaptive-Bitrate-Encoding Anwendung und umgekehrt.

Bei Erhaltung der Videoqualität und gleichzeitiger Reduktion der Datenmenge durch die Evolution von Video-Codecs, steigt auch deren Komplexität und damit der Rechenaufwand, der sich ebenfalls in einem erhöhten Energiebedarf der Video-Encoder manifestiert. Dabei ist wichtig zu verstehen, dass Video-Encoding bzw. die dabei zum Einsatz kommenden

Encoding – „The process of converting raw video into a compressed digital format for efficient delivery across the internet“

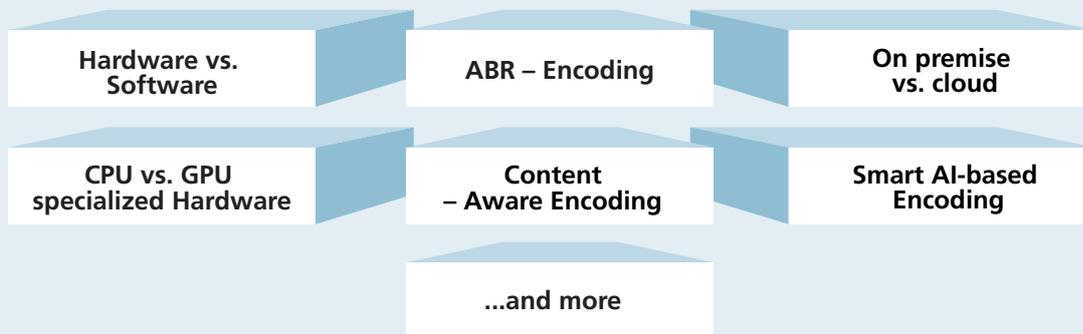


Abbildung 4: Encodingstrategien und Verfahren

Kompressionsverfahren aus sehr spezifischen Rechenaufgaben bestehen und damit von spezialisierter Hardware deutlich effizienter und ressourcenschonender verarbeitet werden können als von klassischen, vielseitigen CPUs. GPUs, also Grafikprozessoren sind ein typisches Beispiel hierfür. Seit Kurzem finden VPUs (Video Processing Units) Einzug in den Markt. Sie nutzen hochspezialisierte Chips, sogenannte ASICs (Application-Specific Integrated Circuits) oder FPGA (Field Programmable Gate Arrays), die für das Encoding mit konkreten Video-Codern optimiert sind. Sie erreichen dadurch im Vergleich zu CPU-Encoding einen bis zu 50-fachen Datendurchsatz, Energieeinsparungen von bis zu 90 Prozent [8] und übertreffen damit auch GPUs hinsichtlich ihrer Effizienz.

Die aufgeführten Beispiele zeigen eindrucksvoll, dass die richtige Wahl der zum Einsatz kommenden Encodier-Lösung einen relevanten Beitrag zur Energieeinsparung leisten kann. Dabei existiert keine »one fits all« Lösung. Die jeweils optimale Lösung ist abhängig vom Streaming-Workflow, dem zu adressierenden Endgerät und Nutzungsszenario (Live-Event, Video on Demand, Social-Media, etc.). All diese Faktoren haben einen Einfluss auf den resultierenden Beitrag des Encodings auf die Gesamtenergiebilanz von Video-Streaming infolge von Skalierungseffekten.

4.3 Content Delivery Network

Content Delivery Networks (CDNs) setzen auf energieeffiziente Hardware und Software, um den Stromverbrauch zu minimieren. Server-Virtualisierung und dynamische Lastverteilung tragen zur Reduktion des Energiebedarfs bei. Ein CDN muss sicherstellen, dass hohe Datenmengen schnell und effizient

übertragen werden können. Die Größe der CDNs und damit die erforderliche Anzahl von Server-Nodes, wird nach dem Peak Time Bedarf geplant, der maximalen Verkehrsspitze, die für alle innerhalb eines CDNs übertragenen Dienste zu erwarten ist.

CDN-Server werden 24/7 betrieben. In den Abendstunden ist durch die starke Nutzung von Videodiensten (VoD, Live) die größte Last im CDN zu bewältigen. Abbildung 5 zeigt exemplarisch den wöchentlichen Stromverlauf eines CDN-Servers, der im Projekt vermessen wurde. Auffällig ist der hohe Grundstromverbrauch des Servers in Höhe von ca. 450 W. Die Spitzen zeigen eine Erhöhung des Stromverbrauchs in den Abendstunden um ca. 50 W. Im weiteren Projektverlauf erfolgt hierzu eine umfassende Analyse des Stromverbrauchs eines CDNs auf Basis realer Logdaten.

4.4 Distribution

Telekommunikationsnetze sind für Spitzenlasten ausgelegt. Dies führt zu ineffizienten Überkapazitäten in Phasen geringer Auslastung. Der größte Teil des Energiebedarfs der Netze wird im Leerlauf und in Zeiten geringer Auslastung benötigt. Laut dem Netzwerkausrüster Nokia sind dies ungefähr 70 Prozent [9].

Im Gegensatz zu Endgeräten, die schnell in Energiesparzustände wechseln können, erfordert ein lastadaptiver Betrieb bei Rechenzentren und Telekommunikationstechnik einen sehr hohen technischen Aufwand. Insbesondere die verzögerungsfreie Bereitstellung von Rechenleistung und Netzwerkkapazität stellt dabei eine große Herausforderung für ein automatisiertes Energiemanagement dar.

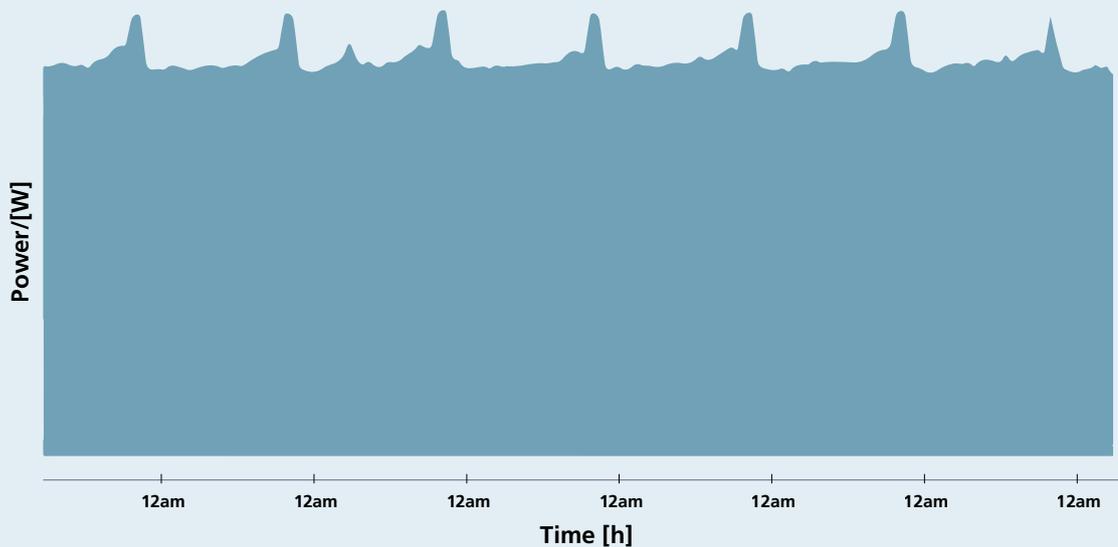


Abbildung 5 : Typische Stromverlaufskurve eines CDN-Servers

Auf Grund der Vielzahl an Hardware-Komponenten und der Komplexität eines Telekommunikationsnetzes ist eine Berechnung des anteiligen Energiebedarfs für Video-Streaming eine große Herausforderung. Für die Modellierung des Energiebedarfs existieren zwei grundlegende Methoden, die in 2.2 definiert wurden.

Das **Energy Intensity Model** (EI-Model) basiert auf der durch das Netzwerk transportierten Datenmenge. Der Energiebedarf wird in kWh/GB oder kWh/TB angegeben und als Energieeffizienzwert in den ESG-Berichten vieler Telekommunikationsanbieter als KPI angegeben. Dieser Wert gibt einen Anhaltspunkt über den Energiebedarf des Netzes, und bietet eine Möglichkeit zur Allokation von entstandenen Emissionen nach der verbrauchten Datenmenge. Diese Methode eignet sich hingegen nicht für eine detaillierte Analyse, da sie den Eindruck vermittelt, dass höhere Datenmengen unmittelbar zu einem höheren Energiebedarf im Netzwerk führen. Dies ist aber nicht der Fall. Eine gute Abschätzung des Energiebedarfs nach dem EI-Model für Kern-, Fest- und Mobilfunknetz ist in [3] enthalten.

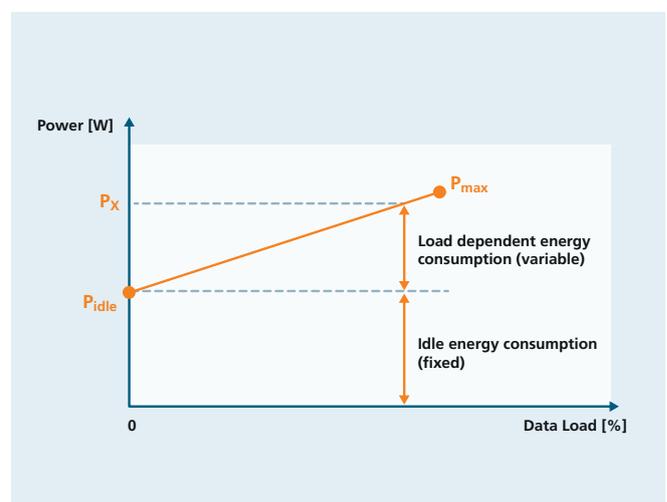
- Kernnetzwerk = 0,02 kWh/GB
- Festnetz = 0,07 kWh/GB
- Mobilfunknetz (RAN) = 0,2 kWh/GB

Das **Power Model** [PM] berücksichtigt dagegen auch die zeitliche Abhängigkeit des Energiebedarfs. Die Grundannahme ist, dass Distributionsnetze auch dann einen relativ hohen Energiebedarf aufweisen, wenn keine Daten transportiert werden (»Idle« Modus oder »Baseload«). Beim Transport von Daten steigt der Energiebedarf proportional zur Datenmenge. Der Gesamtenergiebedarf setzt sich aus einem festen Wert (»Idle« Energiebedarf) und einem variablen Energiebedarf zusammen.

Das Power Model ermöglicht eine Betrachtung von kurzzeitigen Effekten auf den Energiebedarf bei der Übertragung von Inhalten zum Endkunden, da es sehr gut die gegenwärtigen realen Verhältnisse hinsichtlich der vorhandenen Grundlast (Baseload) abbildet. Es berücksichtigt die Komplexität und Charakteristik aller Komponenten des Netzwerks.

Die beiden Modelle unterscheiden sich dadurch, wie sie den Energiebedarf von Netzen den Nutzenden zuteilen, allein nach transportierter Datenmenge oder vornehmlich nach der Zeit. Das EI-Model sollte nur für eine rückwärtige Betrachtung bei bekannter Datentransferrate und bekanntem Gesamtenergiebedarf angewendet werden und dient z. B. zur Betrachtung der jährlichen Effizienzanalyse. Es ist nicht geeignet für die

Abbildung 6: Modellierung des Energiebedarfs im Power Model nach Malmudin [4]



Berechnung von gegenwärtigen Energiebedarfen von einzelnen Applikationen und Diensten im Netzwerk, wie z. B. Video-Streaming.

Keines der beiden Modelle erlaubt Aussagen zu zukünftigen Stromverbräuchen durch ein verändertes Nutzungsverhalten, da in der Zukunft die Änderungen am Netzwerk selbst, wie zum Beispiel der Ausbau oder die Transformation zur Glasfaser, eine größere Rolle spielen. Das macht es erforderlich neue Modellierungen zu definieren, die den technologischen Fortschritt und das dadurch resultierende Nutzerverhalten berücksichtigen. Im Folgenden wird auf Basis vorhandener Messungen und Analysen der Stromverbrauch verschiedener Distributionsnetze berechnet und diskutiert.

4.4.1 Kernnetzwerk

In der Literatur sind verschiedene Abschätzungen des Energiebedarfs für die beiden gebräuchlichen Modellierungen (EI-Model, PM-Model) zu finden. Beim EI-Model wird sich auf eine zusammenfassende Studie von Coroama [3] bezogen. Beim PM-Model auf die Werte von Malmodin [4].

4.4.2 Zugangsnetzwerk (Access Netzwerk)

Für das Access-Netzwerk ist die Abschätzung für den Stromverbrauch aus den o. g. Quellen in Tabelle 2 dargestellt.

4.4.3 Broadcast

Obwohl sich Video-Streaming-Inhalte seit Jahren wachsender Beliebtheit erfreuen, erfolgten 2023 ca. 95 Prozent des TV-Konsums in Deutschland über die Broadcasttechnologien Kabel, Satellit, Antenne und IPTV [10].

Eine eingehende Untersuchung der Situation in Deutschland [11] zeigt, dass die Energiebedarfe der einzelnen Broadcasttechnologien in einer ähnlichen Größenordnung liegen. Die terrestrische Antennenübertragung (DVB-T2) hat in Deutschland von allen vier Plattformen den höchsten Stromverbrauch mit 10 Wh/h. Das ist auf die energieintensive Infrastruktur aus über 150 Sendeanlagen zurückzuführen, die im Vergleich zu anderen Ländern wenig genutzt wird. Der Anteil des terrestrischen Rundfunks betrug 2023 in Deutschland nur 6 Prozent [10]. Die Satellitenübertragung ist hingegen sehr effizient, da die in Deutschland genutzten Satelliten hunderte Millionen Haushalte in ganz Europa erreichen und der Uplink der Signale kaum ins Gewicht fällt. Der Stromverbrauch für die Übertragung ist somit fast vernachlässigbar (0,15 Wh/h). Für Kabelempfang sind in der Studie 4-6 Wh/h und für IPTV 3 Wh/h angegeben.

4.4.4 Vergleich verschiedener Technologien

Mit Hilfe zahlreicher Quellen wurden für die unterschiedlichen Zugangstechnologien die in Abbildung 7 enthaltenen Energiebedarfswerte berechnet. Der Vergleich von Broadcast mit Streaming ist dabei ungeeignet, da die Technologien DVB-T2 und Satellit unidirektionale Verteilmechanismen eines Dienstes sind und nicht ein breit gefächertes volles Serviceangebot liefern können.

| Kernnetzwerk (Core) | | | |
|------------------------|--|-----------------------|-----------------------|
| Energy Intensity Model | | Power Model | |
| | | Festnetz | Mobilfunk (LTE) |
| 0,02 kWh/GB | | 1,5 W + 0,03 W/Mbit/s | 0,2 W + 0,03 W/Mbit/s |

Tabelle 1: Berechnung Stromverbrauch im Kernnetzwerk

| Zugangsnetzwerk (Access) | | | |
|--------------------------|-----------------|---------------------|----------------------|
| Energy Intensity Model | | Power Model | |
| Festnetz | Mobilfunk (LTE) | Festnetz | Mobilfunk (LTE) |
| 0,07 kWh/GB | 0,2 kWh/GB | 5 W + 0,02 W/Mbit/s | 1,0 W + 1,5 W/Mbit/s |

Tabelle 2: Berechnung Stromverbrauch im Zugangsnetzwerk

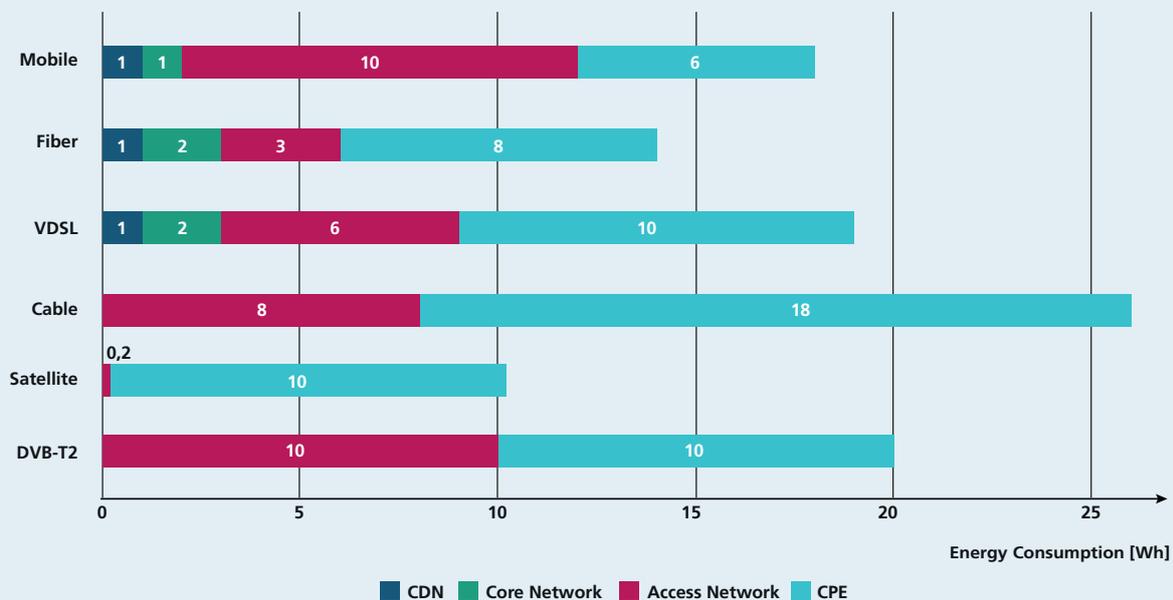


Abbildung 7: Stromverbrauch unterschiedlicher Verteiltechnologien

Bei der Berechnung wurden folgende Annahmen zugrunde gelegt:

- Der jeweilige Energiebedarf ist für eine Stunde Video-Streaming für einen Full-HD-Stream mit 6 Mbit/s angegeben. Über Broadcast (DVB-T2, Satellit und Kabel) wird vergleichbar zum Streaming ein HD-TV-Kanal mit 6 Mbit/s angenommen.
- Der Energiebedarf wird pro Anschluss (Line) betrachtet. Das bedeutet, das angegebene Gesamtstromverbräuche für das Netz (z. B. DVB-T2) auf die Anzahl der Kunden/Haushalte bezogen sind. Der Wert für DVB-T2 gilt deshalb nur für Deutschland [11].
- Betrachtet wird der Stromverbrauch von der Einspeisung ins Netz bis zum Empfangsgerät (Tuner, Router, Modem etc.). Alle Endgeräte zur Bilddarstellung (Smart-TV, Smartphone, PC etc.) werden nicht betrachtet.
- Die Stromverbräuche für Festnetz und Mobilfunk beruhen auf dem Power Model nach Malmodin [4].
- Werte für die CPEs beruhen teilweise auf Messungen im Projekt, Herstellerangaben und auf Werten aus dem JRC-Report [12]. Die CPEs inkludieren notwendige Verstärker, wie sie beispielsweise für den Satellitenempfang notwendig sind.
- Für den Mobilempfang wird ebenfalls eine CPE (LTE oder 5G Router) aufgeführt, die das Signal über WLAN weiterverbreitet. Dieses Empfangsszenario ist auch als Hybridempfang (Kombination aus LTE/5G und DSL) bekannt und dient der Vergleichbarkeit zwischen den verschiedenen Anschlussoptionen. In der Regel erfolgt der Empfang direkt an einem mobilen Endgerät.

Aus Abbildung 7 ist ersichtlich, dass die Unterschiede im Stromverbrauch der Netzwerke und CPEs für Video-Streaming nicht gravierend sind. Die energieeffizientesten Technologien sind Satellit für Broadcasting und Glasfaser für OTT-Streaming. Der geringe Energiebedarf für den Satellit erklärt sich daraus, dass dieser nur für den Uplink anfällt. Der Satellit versorgt sich im Orbit selbst mit Energie aus Solarmodulen.

4.5 Endgeräte

Endgeräte sind für den Großteil des bei Video-Streaming anfallenden Energiebedarfs verantwortlich. Bereits kleinere Einsparpotenziale summieren sich durch die oftmals millionenfache Nutzung auf relevante Größen. Entsprechend wichtig ist ein genaues Verständnis der den Energiebedarf von Video-Streaming-Endgeräten beeinflussenden Faktoren und deren Anteil am Gesamtenergiebedarf.

Unser Ziel ist es, möglichst präzise Daten durch Messungen von Stromverbräuchen von Video-Streaming-Endgeräten zu erheben, diese mit Metriken aus den Video-Playern zu kombinieren und darauf aufbauend Analysen zu erstellen. Zur Validierung der Messungen und zur Belegbarkeit der Ergebnisse sind Messungen wiederholt und in einem klar definierten Testverfahren durchzuführen. Hierzu hat Green Streaming ein Messframework erarbeitet, das unter Zuhilfenahme der Fraunhofer FOKUS FAMIUM Streaming Media Test Suite [14] die Automatisierung von Messungen auf Video-Streaming-Endgeräten ermöglicht und diese zusammen mit parallel erfassten Metriken der Video-Player über das Tool FAMIUM Stream Analytics [15] in eine gemeinsame und zuverlässige Datenbasis überführt.

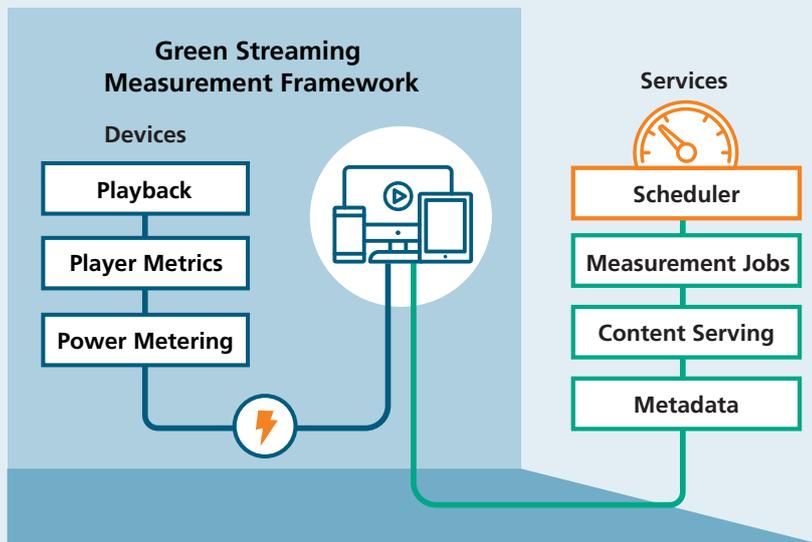


Abbildung 8: Messansatz für Green Streaming

In einer Vielzahl an Messungen wurden unterschiedlichste Testinhalte auf verschiedenen Streaming-Endgeräten abgespielt und dabei ihre Leistungsaufnahme sowie ihr Energiebedarf gemessen. Dazu wurden Smart-TVs mit unterschiedlichen Displaytechnologien aus den Kategorien OLED, QLED, Direct-LED und Edge-LED ausgewählt, mit dem Ziel die Energiesignaturen der verschiedenen Technologien für die gewählten Testinhalte zu untersuchen. Zusätzlich zu den direkten Messungen auf den Smart-TVs, kam ein Streaming-Stick zum Einsatz, der als Zuspeler für die Smart-TVs via HDMI diente und dabei separat zum jeweiligen Smart-TV gemessen wurde. Damit sollen die Smart-TVs für weitere Untersuchungen auf ihre Basisfunktion als Display reduziert werden und somit der mögliche Einfluss von weiteren Verarbeitungsschritten für Empfang und Decoding des Inhalts aus der Betrachtung ausgeklammert werden. Gleichzeitig geben die Messwerte des Streaming-Sticks, der ohne Display nahezu ausschließlich für den Empfang und das Decoding des Inhalts zuständig ist, einen Richtwert für den Energiebedarf genau dieser signalverarbeitenden Prozesse. Sie wären am Smart-TV nur eingeschränkt messbar.

Als Ergebnis zeigen sich verschiedene Energiesignaturen, die maßgeblich durch die Display-Technologie bestimmt sind. So zeigen OLED-Displays eine direkte und nachvollziehbare Korrelation zwischen Energiebedarf und Helligkeit des darzustellenden Inhaltes, während insbesondere bei Direct-LED und Edge-LED-Displays die Leistungsaufnahme nahezu konstant bleibt. Aus dem Verhalten der OLED-Displays lassen sich Verfahren für energiesparendes Video-Streaming auf Endgeräten ableiten. Fraunhofer FOKUS hat mit FAMIUM GreenView [16] eine solche Lösung entwickelt. Diese ermittelt individuell für den abzuspielenden Inhalt auf dem jeweiligen Endgerät die optimalen Parameter und reduziert die darzustellende

Helligkeit so, dass bei möglichst gleichbleibender visuell wahrnehmbarer Qualität Energie eingespart wird.

In weiteren Messungen konnte nachgewiesen werden, dass insbesondere die Videobitrate keinen signifikanten Einfluss auf den Energiebedarf von Endgeräten beim Video-Streaming hat. Auch die Unterschiede zwischen unterschiedlichen Auflösungen in SD, HD und UHD mit Bitraten von 5 Mbit/s bis zu 25 Mbit/s sind marginal. Sie bieten im Vergleich zur Helligkeit und Displayeinstellung kein signifikantes Potenzial zur Energieeinsparung am Endgerät.

Die Ergebnisse zeigen auch, dass Energiesparmodi an Smart-TVs (Eco Modes) ein im Vergleich zur Optimierung von Streaming-Parametern sehr effizientes Mittel zur Einsparung von Energie auf Endgeräten sind. Hier wäre es zielführend, die Zuschauenden über deren derzeit gewählte Bildschirmstellungen zu informieren und ihnen energiesparende Einstellungen aus der Streaming App oder dem laufenden TV-Programm vorzuschlagen. Die dafür benötigten APIs sind bislang nicht bzw. nur sehr eingeschränkt auf heutigen Smart-TVs verfügbar. Mit ihrer Hilfe könnten Streaming- & TV-Anbieter direkt die entsprechenden Einstellungen des Smart-TVs anpassen oder den Zuschauenden entsprechende Optionen interaktiv aufzeigen. Ein konstruktiver Austausch zwischen Forschung, Streaming- und TV-Anbietern sowie den Geräteherstellern ist hierzu wünschenswert.

Abbildung 9: Korrelation von Helligkeit und Stromverbrauch verschiedener Smart-TV Display-Technologien

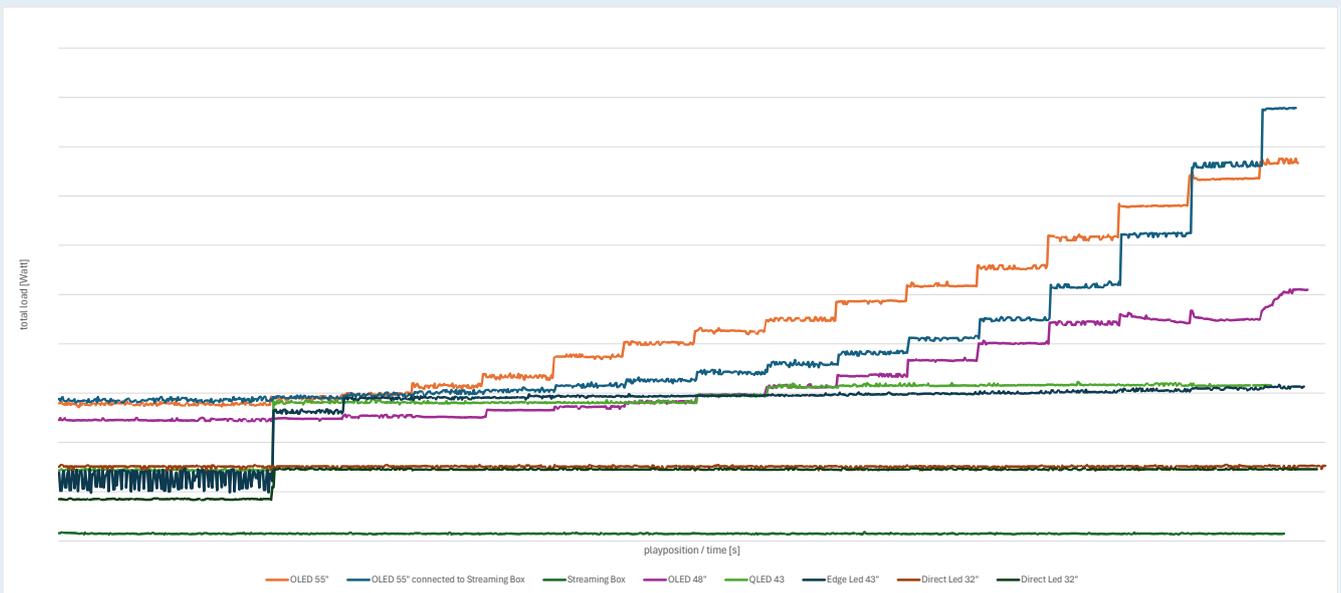
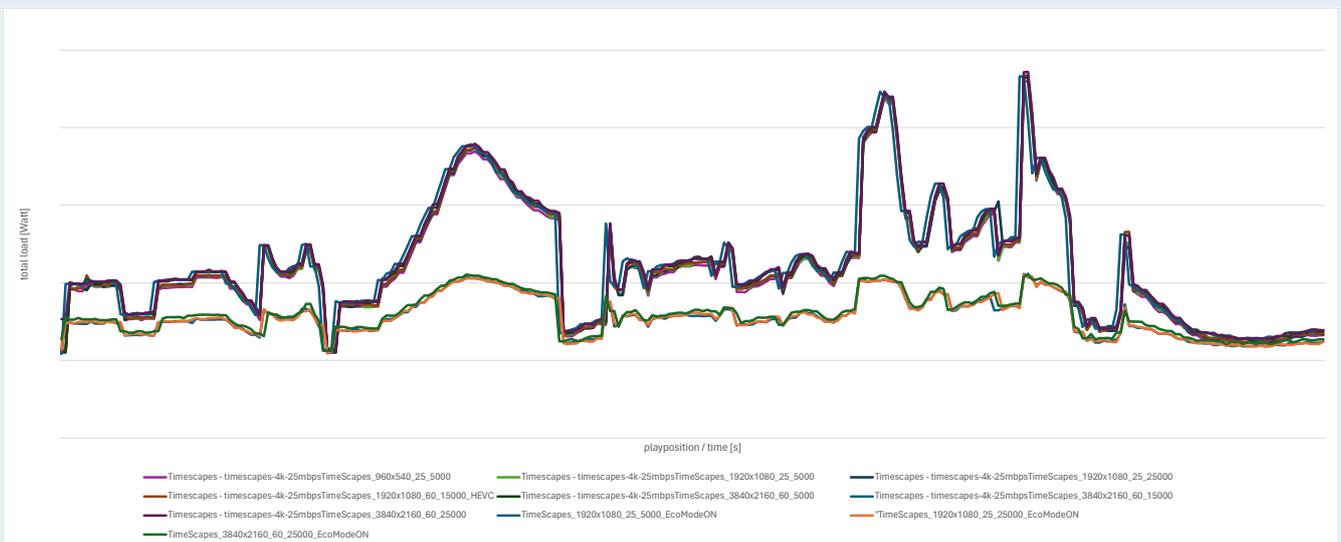


Abbildung 10: Stromverbrauch OLED-TV bei Wiedergabe eines Inhaltes in verschiedenen Bitraten und Auflösungen (mit und ohne Eco-Mode)



5. Auf dem Weg zu einer CO₂-Bilanz von Video-Streaming

Herausforderungen der Emissionszuordnung im Video-Streaming und Ansätze zur Allokation und Bewertung

Bei der Erstellung einer CO₂-Bilanz eines Unternehmens oder Produktes sind die Dimensionen Relevanz, Kontrolle und Beeinflussbarkeit der Emissionen, Vermeidungspotenziale sowie verhältnismäßige Datenerhebungs- und Transaktionskosten zu beachten. Das Projekt »Green Streaming« strebt ein bestmögliches Verständnis der CO₂-Bilanz von Streaming-Anwendungen an und orientiert sich an den genannten Dimensionen. Da bisher nicht für alle Komponenten der Streaming-Wirkkette detaillierte Daten verfügbar sind, werden hier die Stromverbräuche auf Basis von Modellen berechnet, um die relevantesten Bereiche zu identifizieren. Die sogenannten Embodied Emissions, also Emissionen im Zusammenhang mit der Herstellung, dem Transport und der Entsorgung der Produkte, werden hierbei ebenfalls berücksichtigt. Dabei werden Literaturwerte und Herstellerangaben verwendet.

5.1 Relevanz der Nutzungsszenarien

Video-Streaming bedient sich einer geteilten Infrastruktur und bei jedem Problem dieser Art liegt das fundamentale Attributionsproblem zugrunde – die individuelle Zuordnung der Emissionen. Dies ist ein gesellschaftspolitisches und volkswirtschaftliches Problem und wird im Rahmen des Forschungsprojektes nicht weiter betrachtet. Hierbei beschränken wir uns auf die komplexe Allokation der Emissionen nach Zuschauenden.

Die Anzahl der Zuschauenden ist ein wesentlicher Faktor zur Allokation der Emissionen entlang der Streaming-Wirkkette. Es werden mehrere idealisierte Nutzungsszenarien betrachtet, um den Energiebedarf und die CO₂-Emissionen für eine Stunde Video-Streaming an einem Endgerät abzuschätzen und den Einfluss verschiedener Parameter zu bestimmen. Die Szenarien unterscheiden sich in der Anzahl der Zuschauenden, den

verwendeten Endgeräten, der verwendeten Datenrate und in der Übertragungsart (Mobilfunk oder Festnetz). Hierbei wird angenommen, dass sich alle Zuschauenden hinsichtlich der Datenrate und des Endgerätes gleich verhalten. Details zu den Annahmen finden sich im Anhang. Diese Idealisierung erlaubt es, den Einfluss einzelner Parameter zu untersuchen und den maximalen und den minimalen Energiebedarf abzuschätzen. Hierbei zeigt sich, dass der Energiebedarf einzelner Komponenten unterschiedlich stark auf Änderungen der Nutzungszahlen oder des Nutzungsverhaltens reagiert.

5.2 Von Stromverbrauch und Energiebedarf zu Emissionen

Der Stromverbrauch und Energiebedarf der verschiedenen Komponenten der Streaming-Wirkkette wird in CO₂e-Emissionen umgerechnet. Dies erfolgt durch die Anwendung von Emissionsfaktoren, die den CO₂e-Ausstoß pro verbrauchter Kilowattstunde Strom eines bestimmten Energieträgers angeben. Die Emissionsfaktoren berücksichtigen auch die sogenannte Vorkette, also die indirekt entstandenen Emissionen, etwa im Zusammenhang mit dem Ausbau der Stromnetze, mit der Förderung von fossilen Energieträgern oder mit der Herstellung von z. B. Solarpanels. Diese Faktoren variieren je nach Energiequelle und geografischer Region. Die Umrechnung ermöglicht eine bessere Bewertung der Auswirkungen des Streaming-Verhaltens auf unser Klima und die Nachhaltigkeit im Allgemeinen.



5.3 Energieaufwand zur Herstellung und Entsorgung der Hardware

Eine vollständige Emissionsbilanz berücksichtigt nicht nur die Emissionen während der Nutzungsphase, sondern auch die Emissionen während der Herstellung, des Transports und der Entsorgung der Hardware. Die sogenannten Embodied Emissions von Smartphones und Smart-TVs sind bekannt und können aus Herstellerangaben übernommen oder abgeschätzt werden. Die Daten für die Herstellungsemissionen im ersten Teil der Streaming-Wirkkette, z. B. von Übertragungswagen oder eingesetzten Kameras, sind hingegen oft unbekannt. Hier greifen wir, soweit möglich, auf Schätzungen zurück, etwa bei der Bewertung von Servern, die wir nicht nach konkreter Konfiguration unterscheiden, oder schließen die Embodied Emissions nach einer groben Relevanzanalyse aus der Bilanz aus, etwa für die Herstellungsemissionen des Netzwerkes.

5.4 Strombedarf und Emissionen im jeweiligen Nutzungsszenario

Der Energiebedarf für eine Stunde Video-Streaming an einem Endgerät hängt maßgeblich vom Nutzungsszenario ab. Hier untersuchen wir den Einfluss verschiedener Parameter auf den Energiebedarf und somit auch die Emissionen von einer Stunde Video-Streaming. Um aus dem Stromverbrauch Emissionen zu erhalten, legen wir den Emissionsfaktor für den Bundesdeutschen Strommix zugrunde, wobei die indirekten Emissionen der Vorkette des Stroms im Zusammenhang mit der Produktion und dem Transport des Stroms berücksichtigt werden. Bei der Ermittlung der Embodied Emissions werden Annahmen über die durchschnittliche tägliche Nutzungsdauer sowie über die Lebensdauer der Geräte getroffen. Die Emissionen aus dem Ausbau der Infrastruktur sind hier nicht betrachtet. Weitere Details dazu befinden sich im Anhang.

Tabelle 3: Einfluss der Anzahl Zuschauer auf den Energiebedarf und die Emissionen von einer Stunde Video-Streaming an einem Endgerät

| | Szenario | Energiebedarf gesamt (Wh) | | CO ₂ e-Emissionen (g CO ₂ e) | | Embodied Emissions (g CO ₂ e) |
|--|------------------|---------------------------|----------|--|----------|--|
| | | Power Model | EI Model | Power Model | EI Model | |
| Smart-TV  | Fußball EM | 170 | 431 | 76 | 192 | 115 |
| | Lokalnachrichten | 173 | 434 | 77 | 193 | 116 |
| Smartphone  | Lokalnachrichten | 18 | 666 | 8 | 297 | 5 |
| | Fußball EM | 15 | 663 | 7 | 295 | 5 |



5.4.1 Der Einfluss der Anzahl Zuschauer

Die Anzahl der Zuschauer hat durch die oben erwähnten Skaleneffekte einen maßgeblichen Einfluss auf die Gesamtemissionen, die einer Sendung oder einem Streaming-Anbieter zugerechnet werden können – je mehr Zuschauer, desto höher die Emissionen. Betrachtet man allerdings die funktionelle Einheit »eine Stunde Streaming an einem Endgerät«, so werden die Emissionen, die in den geteilten Infrastrukturen zu Beginn der Streaming-Wirkkette anfallen, auf die Zuschauer verteilt.

Wir nehmen an, dass die Sendung in HD gestreamt wird. Zudem nehmen wir an, dass die Zuschauer am Smart-TV durch eine CPE mit dem Festnetz verbunden sind, die Zuschauer am Smartphone jedoch direkt über Mobilfunk streamen. Die beiden hier betrachteten Szenarien sind einerseits die Fußball-EM, mit 10 Millionen Zuschauern und andererseits

eine lokale Nachrichtensendung mit 50 Zuschauern. Der Energiebedarf für eine Stunde Video-Streaming an einem Endgerät unterscheidet sich kaum zwischen den beiden Szenarien (einmal am Smart-TV und einmal am Smartphone betrachtet). Dies bedeutet, dass der absolute Energiebedarf fast linear mit der Anzahl der Zuschauer steigt.

5.4.2 Der Einfluss des Endgeräts

Der Einfluss des Endgeräts wird anhand der drei Fälle Smartphone, Smart-TV und Smart-TV mit HDR, untersucht. Erste Messungen deuten darauf hin, dass Smart-TVs mit HDR deutlich mehr Strom verbrauchen. Im Rahmen dieser Untersuchung gehen wir vereinfacht von einem Mehrverbrauch von 50 Prozent aus. Für die Vergleichbarkeit wird angenommen, dass alle Szenarien in UHD gestreamt werden und die Datenübertragung über das Festnetz erfolgt.

Tabelle 4: Einfluss von Endgeräten auf den Energiebedarf und die Emissionen von einer Stunde Video-Streaming an einem Endgerät

| Szenario | Energiebedarf gesamt (Wh) | | CO ₂ e-Emissionen (g CO ₂ e) | | Embodied Emissions (g CO ₂ e) | |
|--|---------------------------|----------|--|----------|--|-----|
| | Power Model | EI Model | Power Model | EI Model | | |
| Smart-TV  | UHD | 169 | 791 | 75 | 352 | 115 |
| | UHD HDR | 243 | 866 | 109 | 385 | 115 |
| Smartphone  | UHD | 21 | 643 | 10 | 286 | 6 |

Es zeigt sich, dass die Wahl des Endgeräts einen wesentlichen Einfluss auf den Energiebedarf und die Emissionen hat. Insbesondere in der Allokation der Netzwerkverbräuche nach dem Power Model ist der Einfluss der Endgeräte ausschlaggebend. In dieser Betrachtungsweise hat der Smart-TV mit HDR einen 20-Mal größeren Energiebedarf als das Smartphone. Aufgrund der Skaleneffekte ist der Energiebedarf beim Endgerät ausschlaggebend für die Gesamtemissionen.

5.4.3 Der Einfluss der Datenrate

Hier wird Video-Streaming in HD und UHD verglichen, jeweils auf verschiedenen Endgeräten: einerseits auf einem Smart-TV, wobei die Datenübertragung über Festnetz erfolgt, und andererseits auf einem Smartphone, wobei die Datenübertragung über Mobilfunk erfolgt. Zur besseren Veranschaulichung betrachten wir hier die Datenrate und nehmen vereinfacht an, dass die Datenrate proportional zur Auflösung ist. Der Einfluss der gewählten Auflösung hängt im Wesentlichen davon ab, mit welchem Modell man den Energiebedarf der Netzwerkübertragung allokiert.

Wählt man das Power Model, so ist der Unterschied zwischen den Streams in HD und UHD gering. Für die beiden Szenarien auf einem Smart-TV, der an das Festnetz angeschlossen ist, ist der Unterschied zwischen HD und UHD nicht messbar. Auf einem Smartphone und bei einer Datenübertragung über Mobilfunk beobachtet man selbst mit dem Power Model eine Verdopplung des Energiebedarfs von 14 Wh auf 28 Wh, und dementsprechend eine Verdoppelung der Emissionen von 6 g auf 12 g CO₂e.

Eine andere Interpretation liefert das Energy Intensity Model. Mit diesem Modell wird der Energiebedarf in jedem Szenario deutlich höher eingeschätzt. Insbesondere sieht man eine deutliche Steigerung des Energiebedarfs mit höherer

Auflösung. Der Energiebedarf erhöht sich um 80 Prozent im Falle des Smart-TVs und auf mehr als das Doppelte im Falle des Smartphones.

Beim Vergleich der beiden Modelle lässt sich in diesem Rahmen nicht der Schluss ziehen, dass die geringere Auflösung immer mit deutlichen Energieeinsparungen einher geht. Die momentan vom Netzwerk benötigte Energie ändert sich wenig mit der Nutzlast. Für die Zuschauenden, die ihre durch Video-Streaming anfallenden Emissionen verstehen wollen, ist die Betrachtungsweise nach dem Power Model geeigneter. Für Streaming-Anbieter, die im Rahmen der Nachhaltigkeitsberichtserstattung ihren Anteil an den jährlichen Emissionen des Netzwerkes berechnen wollen, ist das Energy Intensity Model hingegen die korrekte Betrachtungsweise.

Tabelle 5: Einfluss der Datenrate auf den Energiebedarf und die Emissionen von einer Stunde Video-Streaming an einem Endgerät

| Szenario | | | Energiebedarf gesamt (Wh) | | CO ₂ e-Emissionen (g CO ₂ e) | | Embodied Emissions (g CO ₂ e) |
|--|-----|-----|---------------------------|----------|--|----------|--|
| | | | Power Model | EI Model | Power Model | EI Model | |
| Smart-TV  | HD | 169 | 431 | 75 | 192 | 115 | |
| | UHD | 169 | 791 | 75 | 352 | 115 | |
| Smartphone  | HD | 14 | 663 | 6 | 295 | 5 | |
| | UHD | 28 | 1543 | 12 | 687 | 5 | |

6. Schlussfolgerungen und Ausblick

Gemeinsam für ein nachhaltiges Video-Streaming: Industrie und Zuschauer in der Verantwortung

Das Whitepaper untersucht die Kernkomponenten der Streaming-Wirkkette hinsichtlich ihres Energiebedarfs und setzt diesen in Relation zum Gesamtenergiebedarf von Video-Streaming. Dabei zeigt sich, dass Endgeräte abhängig von Skaleneffekten, die durch millionenfache Abrufe von Inhalten zustande kommen, den größten Anteil am Gesamtenergiebedarf aufweisen. Der nächstgrößte Energiebedarf in der Streaming-Wirkkette ist den Netzwerken zuzuordnen. Live-Produktionsinfrastruktur, Encoding und Packaging von Inhalten spielen eine untergeordnete Rolle. Da diese Prozesse keinen Skaleneffekten unterliegen, sind ihre Energiebedarfe vergleichsweise gering.

Der Vergleich der Werte für eine Stunde Video-Streaming zeigt deutlich, dass das EI-Modell für eine zeitliche Betrachtung von einer Stunde ungeeignet ist. Dieses Modell ist sinnvoll, wenn es um das Reporting des Energiebedarfs für längere Zeiträume, wie beispielsweise den Jahresenergiebedarf geht. Das Power Model ist sinnvoll, wenn es um den Vergleich verschiedenster Einflussparameter wie Datenrate, Netzwerk und Endgerät geht.

Erkenntnisse

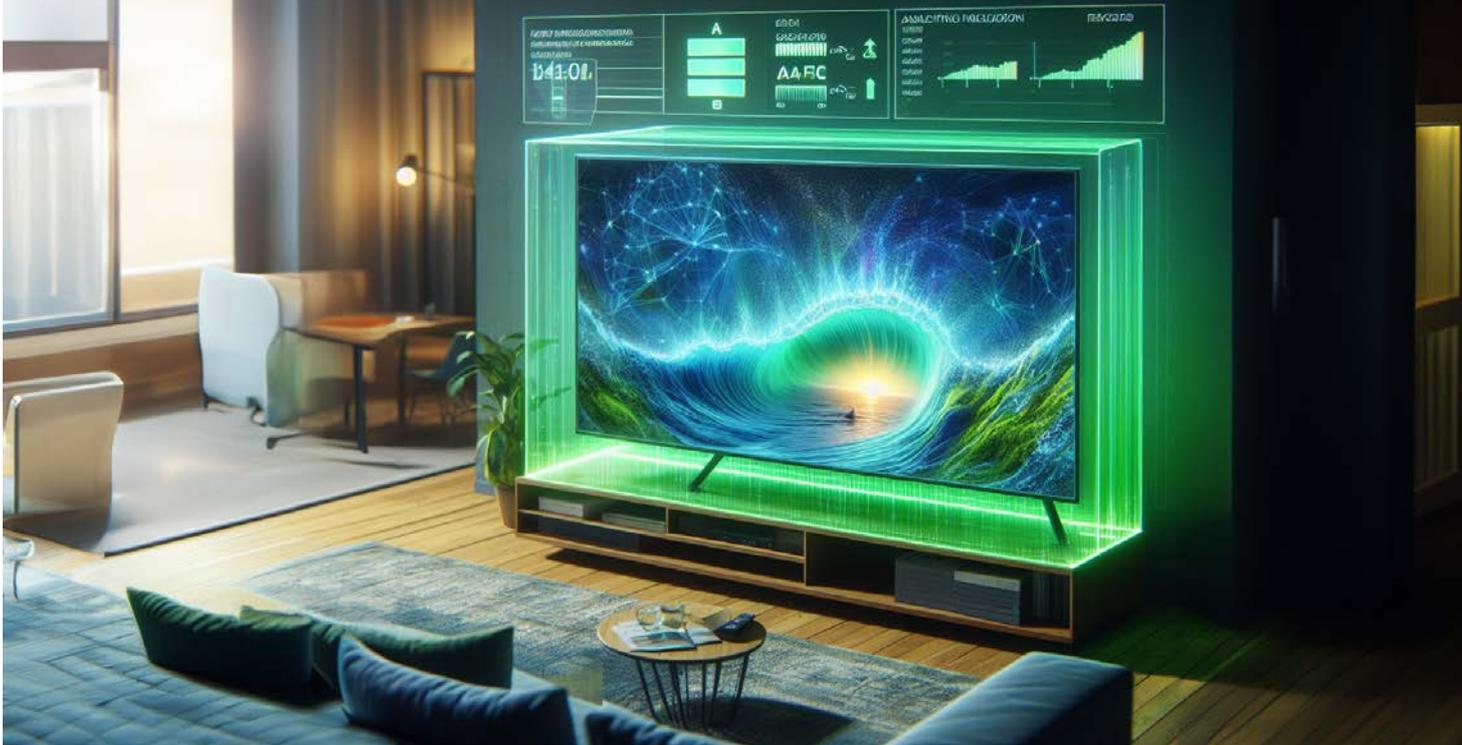
- **Eine Reduktion der Datenrate** durch effiziente Encodier-Verfahren führt zu keiner signifikanten Verringerung des Energieverbrauchs von **Endgeräten** wie Streaming-Sticks, OTT Set-Top Boxen und Smart-TVs.
- **Die Anzahl der Zuschauenden** beeinflusst die Allokation der Emissionen in geteilten Infrastrukturen der Wirkkette, wie Produktion, Storage, Ingest und Encoding.
- **Der errechnete Energiebedarf** variiert je nach Betrachtungsweise des Netzwerkes. Bei der anteiligen Berechnung

des Energiebedarfs für Video-Streaming in der Distribution (Kern und Access Netzwerk) muss berücksichtigt werden, dass ein Großteil des Energiebedarfs auftritt, wenn keine Daten übertragen werden (»idle Mode«). Dies berücksichtigt das Power Model.

- **Die Umrechnung des Stromverbrauchs in CO₂-Emissionen** erfolgt durch Emissionsfaktoren, welche die indirekten Emissionen berücksichtigen.
- **Der Energiebedarf zur Herstellung und Entsorgung der Hardware** wird durch Embodied Emissions in der Emissionsbilanz berücksichtigt.
- **Geeignete Hardware-Lösungen und Encoding-Strategien** können den Energiebedarf für den Encoding-Prozess sowie die nachgelagerte Speicherung und Verteilung von Inhalten reduzieren.
- **Die Display-Technologie hat Einfluss auf den Stromverbrauch** der Endgeräte und bietet mögliche Ansätze zur Senkung des Energiebedarfs.
- **Die Reduktion der Helligkeit oder die Deaktivierung von HDR** verringert den Stromverbrauch des Endgerätes signifikant.

Potentiale zur Emissionsreduktion

- **Das Nutzungsverhalten der Zuschauenden lässt sich durch Aufklärung verändern und trägt dadurch maßgeblich zur Emissionsreduktion bei.** Individuelle Einstellungen wie Bildschirmhelligkeit, Darstellungsmodus, das Aktivieren von vorhandenen Energiesparmodi oder die Anpassung der Umgebungsbeleuchtung können den Energieverbrauch beeinflussen. Durch die Wahl des



energiesparsamsten oder der jeweiligen Nutzung angemessensten Endgerätes kann jeder einzelne Zuschauende einen Beitrag leisten.

- **Ein Offener Diskurs zwischen Marktteilnehmern, Forschung und Endgeräteherstellern ist notwendig**, um über Geräte-APIs den Zuschauenden optimale Geräteeinstellungen zu empfehlen.

Ausblick

Das weitere Vorgehen im Projekt konzentriert sich auf die Automatisierung und Reproduzierbarkeit von Messungen, die Validierung der vorgeschlagenen Methoden und eine transparente Bewertung der Ergebnisse. Dies sind die Voraussetzungen zur Schaffung einer belegbaren Datenbasis. Sie ist die Grundlage zur Entwicklung geeigneter Tools (CO₂-Rechner für Video-Streaming) für die Bilanzierung und das verpflichtende Emissions-Reporting gemäß Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD [17]) inklusive der sogenannten Scope-3 Emissionen. Mit dem CO₂-Rechner für Video-Streaming erarbeitet Green Streaming ein solches Tool, dass die beteiligten Akteure der Medien- und Streaming-Industrie in dieser zukünftig immer wichtigeren Aufgabe unterstützen kann.

Die aktuellen Verteilnetze verhalten sich statisch und passen sich nicht an die gegebenen Anforderungen des Netzes an. Das hat zur Folge, dass bei der Netzplanung mit Spitzenlasten geplant wird. Die Konsequenz der Erweiterung, gemessen an der Spitzenlast, zieht eine Erhöhung des Energiebedarfs im Leerlauf nach sich. Gleichzeitig zeigen Messungen, dass die Spitzenlast, zumindest unter Berücksichtigung des normalen

Tagesverlaufs unter Vernachlässigung von Ereignissen wie großen Sport-Events, planbar ist. In den Verteilnetzen, die auf 5G Technologien basieren, tritt außerdem der sogenannte Rebound-Effekt in Erscheinung. 5G Technologien versprechen energieeffizienter zu sein als 4G Lösungen, dies wird jedoch durch den mengenmäßig erhöhten Einsatz konterkariert.

Eine dynamischere Gestaltung der Verteilnetze könnte somit Energie einsparen. Wie eine solche dynamischere Gestaltung realisiert werden kann, ist nicht Teil unserer Betrachtungen, würde aber den Aufwand für weitere Untersuchungen rechtfertigen.

7. Literaturverzeichnis

- [1] Carbon Trust, »Carbon impact of video streaming,« June 2021. [Online]. Available: <https://ctprodstorageaccountp.blob.core.windows.net/prod-drupal-files/documents/resource/public/Carbon-impact-of-video-streaming.pdf>. [Zugriff am 01 August 2024].
- [2] RTL Technology GmbH, »Carbon Footprint Analysis of the RTL+ Video Streaming Service,« [Online]. Available: https://www.cbc-service.de/download/publikationen/Carbon_Footprint_Analysis-of_the_RTL_plus_Video_Streaming_Service.pdf. [Zugriff am 01 August 2024].
- [3] V. Coroama, »Investigating the Inconsistencies among Energy and Energy Intensity Estimates of the Internet Metrics and harmonising values,« 2021.
- [4] J. E. R. Malmodin, »The power consumption of mobile and fixed network data services – the case of streaming video and downloading large files,« www.electronicsgoesgreen.org, 2020.
- [5] G. Kamiya, »The carbon footprint of streaming video: fact-checking the headlines,« 2020.
- [6] S. Breide, S. Helleberg, J. Schindler und A. Waßmuth, »Energy consumption of telecommunication access networks,« <https://www.prysmian.com/staticres/energy-consumption-whitepaper/index.html>.
- [7] M. Gouttefarde und P. Gassmann, »Greening the European Audiovisual Industry: The Best Strategies and Their Costs,« European Commission, European Audiovisual Observatory, Strasbourg, 2021.
- [8] NetInt, »Argos dispels common myths about encoding ASICs,« 01 2023. [Online]. Available: <https://netint.com/argos-dispels-common-myths-about-encoding-asics/>. [Zugriff am 20.09.2024].
- [9] Nokia, »<https://www.nokia.com/networks/bss-oss/ava/energy-efficiency/>«.
- [10] D. Medienanstalten, »Video Trends 2023,« <https://www.die-medienanstalten.de/forschung/video-trends/video-trends-2023/>.
- [11] J. Janßen, »Die Treihausgasbilanz des linearen Fernsehens im Vergleich zu Video-Streaming,« unveröffentlichte Masterarbeit, Audiovisuelle Medien- Hochschule der Medien, Stuttgart , 2023.
- [12] P. Bertoldi, »Code of Conduct on energy consumption for broadband equipment,« 2021.

- [13] LoCat, »Quantitative study of the GHG emissions of delivering TV content,« https://thelocat-project.org/wp-content/uploads/2021/11/LoCaT-Final_Report-v1.2-Annex-B.pdf, 2021.
- [14] Fraunhofer FOKUS, »FAMIUM Streaming Media Test Suite,« 2024. [Online]. Available: https://www.fokus.fraunhofer.de/en/fame/solutions/famium_streaming_media_test_suite. [Zugriff am 20.09.2024].
- [15] Fraunhofer FOKUS, »FAMIUM Streaming Analytics,« 2024. [Online]. Available: <https://www.fokus.fraunhofer.de/en/fame/sand>. [Zugriff am 20.09.2024].
- [16] Fraunhofer FOKUS, »FAMIUM GreenView,« 2024. [Online]. Available: <https://www.fokus.fraunhofer.de/en/fame/solutions/greenview>. [Zugriff am 20.09.2024].
- [17] »European Commission - Corporate Sustainability Reporting,« 2024. [Online]. Available: https://finance.ec.europa.eu/capital-markets-union-and-financial-markets/company-reporting-and-auditing/company-reporting/corporate-sustainability-reporting_en. [Zugriff am 20.09.2024].
- [18] D. Lundin, J. Malmodin, P. Bergmark und N. Lövehagen, »Electricity Consumption and Operational Carbon Emissions of European Telecom Network Operators,« 2022.
- [19] GSMA, »The next generation of operator sustainability: greener Edge and open RAN,« 2023.
- [20] D. Medienanstalten, »Video Trends 2023,« 2023.

8. Anhang

8.1 Nutzungsszenarien

Die hier betrachteten Nutzungsszenarien unterscheiden sich hinsichtlich mehrerer Parameter, die im Folgenden strukturiert erläutert werden. Zudem wird immer genannt, in welchen Szenarien der jeweilige Parameter verwendet wird und welche Annahmen getroffen wurden.

- **Zuschauerzahl** bestimmt die Gesamtemissionen von Video-Streaming. Bei der Betrachtung von Emissionen pro Stunde Video-Streaming an einem Endgerät bestimmt die Zuschauerzahl die Allokation von Emissionen am Anfang der Streaming-Wirkkette, insbesondere Ingest und Encoding.
 - Minimaler Wert: 50
 - Durchschnittswert: 100 Tausend
 - Maximaler Wert: 10 Millionen
- **Auflösung** bestimmt die Datenmenge und die Datenrate, die beim Video-Streaming übertragen werden und beeinflusst somit die Emissionen im Netzwerk. Wir unterscheiden nach
 - HD-Auflösung: Datenrate 7 Mbit/s, Datenmenge 3 GB
 - UHD-Auflösung: Datenrate 16 Mbit/s, Datenmenge 7 GB
- **Festnetz vs. Mobilfunk** bestimmt den Energiebedarf des Netzwerks auf der letzten Meile. Die Datenübertragung über Mobilfunk ist grundsätzlich energieintensiver als Datenübertragung über Festnetz. In den meisten Nutzungsszenarien nehmen wir an, dass das Smartphone über Mobilfunk verbunden ist, während der Smart-TV über Festnetz angeschlossen ist. Es werden die Werte aus Kapitel 4.4 verwendet.
- **CDN:** Für die Relevanzanalyse schätzen wir den Energiebedarf im CDN pauschal mit 0,5 W pro Zuschauenden.
- **Endgerät** bestimmt den Strombedarf beim Zuschauenden
 - Minimaler Wert: Smartphone, Strombedarf: 2 W
 - Maximaler Wert: Smart-TV, Strombedarf: 150 W
- **HDR** wirkt sich auf den Strombedarf des Smart-TVs aus. Wir nehmen vereinfacht an, dass die HDR-Einstellung den Strombedarf um 50 Prozent erhöht.
- **Live-Übertragung** liegt grundsätzlich außerhalb der Systemgrenze. Dennoch weisen wir für bestimmte Szenarien den Energiebedarf für die Live-Übertragung aus.
 - Minimaler Wert: 7 W für 1 Stunde Live-Übertragung vom Smartphone aus
 - Maximaler Wert: 80 kW für 1 Stunde Live-Übertragung mit 4 Ü-Wägen

8.2 Annahmen für Embodied Emissions

| Gerät | Nutzungsdauer (h/d) | Lebensdauer (Jahre) | Herstellungsemissionen (kg CO ₂ e) | Herstellungsemissionen pro h (g CO ₂ e) | Quelle |
|------------------------|---------------------|---------------------|---|--|--|
| Desktop-PC mit Monitor | 8 | 5 | 435 | 30 | Gröger et al. Green Cloud Computing |
| Laptop | 8 | 5 | 311 | 21 | Gröger et al. Green Cloud Computing |
| Computermonitor | 8 | 5 | 88 | 6 | Gröger et al. Green Cloud Computing |
| Fernseher | 4 | 6 | 1000 | 114 | Gröger et al. Green Cloud Computing |
| Tablet | 1 | 4 | 200 | 137 | Gröger et al. Green Cloud Computing |
| Smartphone | 24 | 2.5 | 100 | 5 | Gröger et al. Green Cloud Computing |
| Router | 24 | 7 | 77 | 1 | Gröger et al. Green Cloud Computing |
| Server | 24 | 7 | 6700 | 109 | Gröger et al. Green Cloud Computing |
| Projektor | 1 | 8 | 145 | 50 | ADEME: https://base-emprein-te.ademe.fr/donnees/jeu-donnees, Video-projecteur |
| Decoder | ? | ? | 60.9 | | ADEME: https://base-emprein-te.ademe.fr/donnees/jeu-donnees, Décodeur |
| Modem | 24 | 7 | 82.9 | 1 | ADEME: https://base-emprein-te.ademe.fr/donnees/jeu-donnees, Modem/fibre |
| Server | ? | ? | 600 | | ADEME: https://base-emprein-te.ademe.fr/donnees/jeu-donnees, Serveur |
| Server | 24 | 5 | 732 | 17 | ADEME/NegaOctet: https://base-emprein-te.ademe.fr/documentation/base-impact?idDocument=167 |

Tabelle 6: Annahmen über Nutzungszeit, Lebensdauer und Herstellungsemissionen verschiedener Hardware zur Ermittlung der Embodied Emissions pro Stunde Nutzungsdauer

Impressum

**Fraunhofer-Institut für Offene Kommunikationssysteme
Kaiserin-Augusta-Allee 31
10589 Berlin**

Herausgeber:

Fraunhofer-Institut für
Offene Kommunikationssysteme FOKUS
Kaiserin-Augusta-Allee 31
10589 Berlin

www.fokus.fraunhofer.de
www.green-streaming.de

Autorinnen und Autoren

Robert Seeliger (Fraunhofer FOKUS)
Dr. Christoph Kuhr (LOGIC media solutions GmbH)
Peter Pogrzeba (Deutsche Telekom)
Dr. Maria Zeitz (KlimAktiv gGmbH)

Gestaltung

Ivy Kunze (Fraunhofer FOKUS)

Illustration

Simone Geppert-Dahlhorst (Fraunhofer FOKUS)

Abbildungsverzeichnis:

Abbildung 1-10: Fraunhofer FOKUS

Bildnachweise:

Titel- und Rückseite: AI-generated / Fraunhofer FOKUS
S. 4: istock / FreshSplash
S. 7: iStock / Rainer Puster | Montage: Fraunhofer FOKUS
S. 8: Philipp Plum / Fraunhofer FOKUS
S. 11: AI-generated / adobe stock/dobok
S. 21: picture alliance / M.i.S. | Bernd Feil
S. 22: picture alliance / PIC ONE | Ben Kriemann
S. 25: AI-generated / Fraunhofer FOKUS

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

© Fraunhofer FOKUS,
Berlin 2024

Kontakt

Robert Seeliger
Video Sustainability Lead
Geschäftsbereich Future Applications and Media
Tel. +49 30 3463-7262
robert.seeliger@fokus.fraunhofer.de

Fraunhofer FOKUS
Kaiserin-Augusta-Allee 31
10589 Berlin

www.fokus.fraunhofer.de
www.green-streaming.de



Wir
vernetzen
alles

