

Rachel Carson Center for Environment and Society

Material Matters

Degrowth, Sufficiency, and Sustainability in Urban Environments

Seminar in collaboration with LMU & TUM

# **Sustainability & Materiality of the Internet**

WiSe23/24

Under the direction of Prof. Dr. -Ing. Sonja Dämpelmann

submitted by

Felix Keilhack

12077260

Eschenriederstrasse 29, 81249 München

E-Mail: [f.keilhack@campus.lmu.de](mailto:f.keilhack@campus.lmu.de), tel.: +4915223955580

# Sustainability & Materiality of the Internet

## Contents

Introduction.....	3
Rebound Effect.....	3
Die drei materiellen Säulen des Internets .....	5
Das Internet .....	6
(1) Die IKT-Endgeräte .....	7
(2) Die IKT-Infrastrukturen.....	8
(3) Die Rechenzentren.....	8
Prognosen .....	9
Ökologische Nachhaltigkeitsfaktoren .....	11
(A) Verlängerung der Lebenszyklen von IKT .....	11
(B) Verwendung von erneuerbaren Energien .....	12
(C) Erhöhung der Effizienz.....	13
Conclusion.....	15
Literature .....	16

## Introduction

Das Internet und die Informations- sowie Kommunikationstechnologien genießen in westlichen Gesellschaften meist ein sauberes Image: die virtuelle Welt wird als „liberating, friendly, not-polluting“ wahrgenommen, ja, als Alternative zur Mobilität und als Werkzeuge zum Überwinden der ökologischen Krisen, „tools in the service of the environment“, „green technologies“ (Carré 2018). Mit dem Internet verbinden wir Demokratiebewegungen, Freiheit, Emanzipierung, Austausch, Produktivität und vieles mehr (Carré 2018). Hat denn „Hyperconnectivity“ (Carré 2018) und der infinite Regress nach Schnelligkeit (Carruth 2014) keine ökologischen Konsequenzen?

Der Wunsch nach Eskapismus – die Sehnsucht nach der Flucht von Körper und Materialität – manifestiert sich durch die traditionelle Ontologie in der Trennung zwischen Geist und Körper, Kultur und Natur, Subjekt und Objekt, Individuum und Gesellschaft. Die Metapher der Cloud für das Internet suggeriert eine Transzendenz jenseits von Ort und Zeit, jenseits von materiellen und ökologischen Problemen. Carruth interrompiert die Voreingenommenheit und Vorstellung einer unsichtbaren sowie gänzlich immateriellen Cloud mit dem Bild von Gewitterwolken oder der Pilzwolke einer Atombombe (Carruth 2014). „Wäre das Internet ein Land hätte es den weltweit dritthöchsten Stromverbrauch“, errechnen Gröger und Herterich (Höfner und Frick 2019). Mills behauptet, „the Cloud begins with Coal“ (Mills 2013). Die Cloud als Emissionswolke. Ist die Metapher der „Cloud“ eigentlich Greenwashing, weil sie im Umweltdiskurs unsichtbar wirkt (Carruth 2014)? Das virtuelle Ökosystem bedarf einer Rematerialisierung (Carré 2018).

Diese Hausarbeit geht innerhalb des Themas Materiality aufgrund der Voreingenommenheit des immateriellen Internets, der Fragestellung nach, was ökologische Nachhaltigkeit im Kontext der Informations- sowie Kommunikationstechnologien bedeutet. Nach einer Erläuterung des Rebound Effekts, untersuche ich die Bestandteile der drei materiellen Säulen des Internets zur globalen Interkonnektivität und schließe mit drei ökologischen Nachhaltigkeitsfaktoren. Das Ziel der Arbeit sei die Rematerialisierung des Internets voranzutreiben.

## Rebound Effect

Der sogenannte Rebound Effekt, auch bekannt als Jevons Paradoxon, ist der korrelative Zusammenhang, dass eine wachsende Energieeffizienz als Reduktion des Verbrauchs einer Ressource durch den technologischen Fortschritt zu einem erhöhten Gesamtkonsum der Ressource führt (Carré 2018). Der Namensträger des Phänomens, William Stanley Jevons, beobachtete in der industriellen Revolution, dass die höhere Effizienz der Dampfmaschine von James Watt insgesamt zu einer Erhöhung des Koh-

leverbrauchs führte, nicht zuletzt, weil sie neue Anwendungsmöglichkeiten fand (Deutscher Naturschutzring 2024).

Der Rebound Effekt lässt sich auch bei der Entwicklung der Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) beobachten: Tendenziell gibt es eine Möglichkeit den allgemeinen Ressourcenverbrauch durch die Digitalisierung zu senken, indem Distanz sowie Verfügbarkeit von Dienstleistungsangeboten durch IKT überwunden werden können, doch Langkau und Hilbig sehen faktisch keine Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Ressourcenverbrauch (Höfner und Frick 2019). So sei zum Beispiel die Ökobilanz für das Konsumieren audiovisueller Inhalte auf Streaming-Plattformen wesentlich niedriger als eine Autofahrt zu einer Videothek; jedoch erhöht sich der insgesamt Konsum von Inhalten und damit auch der Energiebedarf aufgrund der Niedrigschwelligkeit der Digitalen Dienste und aufgrund des einfachen Zugangs für mehr Konsument:innen (Shehabi, Walker, und Masanet 2014). Vorteile der IKT seien zum Beispiel die Reduzierung des Verkehrs von Pendler:innen durch Homeoffice, Effizienzsteigerungen in Produktionsprozessen durch das Outsourcen von rechenintensiven Computerarbeiten oder die Integration geographisch-marginalisierter Gesellschaftsgruppen (Baischew u. a. 2022).

Die Digitalisierung ist nicht nur eine energieeffiziente Alternative, Distanzen zu überwinden, sondern schafft auch andere qualitative Angebote sowie neue Bedürfnisse. Vergleichen wir eine Brieftaube mit einer WhatsApp-Nachricht, ist der Ressourcenverbrauch der Informationsvermittlung nicht nur geringer geworden, sondern erhöhte sich auch die Vermittlungsgeschwindigkeit, die Zuverlässigkeit und nicht zuletzt die Funktionalität. Nichtsdestotrotz wurden IKT sowie ihr Beitrag zur Interkonnektivität mitsamt ihren Dienstleistungen global ein fester Bestandteil des kulturellen Lebensstils, dessen ständige Erreichbarkeit sowie Nutzung der IKT zu einem erhöhten Energiekonsum anregen. Obwohl zwei Informationsvermittlungswerkzeuge, wie Taube und Messenger-Service, in einer Retrospektive auf ihre Energieeffizienz vergleichbar sind, so lassen sich technische Innovationen nicht immer auf die Ursache zurückführen, Ressourcen sparsamer zu benutzen.

Für die Abschwächung des Rebound-Effekts schlagen Lange, Santarius und Zahrnt das Konzept der digitalen Suffizienz vor, das eine sinnvolle Anzahl digitaler Geräte in Haushalten und einen moderaten Konsum befördert ohne auf die Vorteile der IKT zu verzichten (Höfner und Frick 2019). Suffizienz sei hier nur kurz erwähnt. Obwohl Suffizienz eine Schnittmenge mit Nachhaltigkeit besitzt, zielt das erste Konzept auf eine normative Weise des Umgangs mit IKT, die einer realistischen Prognose widerspricht. In dieser Hausarbeit ist der Anstieg des digitalen Konsums der Ausgangspunkt für die Herausforderung, Faktoren einer ökologischen Nachhaltigkeit zu finden.

## Die drei materiellen Säulen des Internets

Für dieses Kapitel beziehe ich unterschiedlichste quantitative Daten insbesondere aus Berichten vom Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (Grünwald und Caviezel 2022) und Kamiya (Kamiya 2020), der wiederum Daten aus Berichten der International Energy Agency (IEA) von 2019 und 2020 verwendet. Aufgrund der dynamischen Entwicklungen sind aktuelle Quellen wichtig bei der Analyse komplexer Sachverhalte wie z.B. Datenzirkulation (Datenvolumen pro Zeit), des Energieverbrauchs sowie der Effizienz, und der CO<sub>2</sub>-Emissionen unter Beachtung des lokalen Strom-Mix.

2013 verbrauchte das digitale Ökosystem 10% der gesamten Elektrizität weltweit; das entspricht 1.500 TWh/a (Mills 2013). Die Schätzung des Elektrizitätsbedarfs des Internets auf 10% (Renzenbrink 2013) wird als konsensualer Richtwert verwendet (vgl. Höfner und Frick 2019). Die digitale Welt steht dabei auf drei materiellen Säulen. Um das Internet zu ermöglichen, bestehen die materiellen Voraussetzungen aus (1) Informations- sowie Kommunikationstechnologien (IKT), (2) der IKT-Infrastruktur und (3) der Rechenzentren. Das Internet besteht aus einer Vielzahl an Dienstleistungen, wie Cloud-Services, Streaming-Plattformen, Social Media usw. (1) Zu den IKT zähle ich alle Endgeräte der Konsument:innen, wie Smartphones, Computer, Fernseher usw., mit denen sie einen Zugang zum Internet haben. (2) Unter der IKT-Infrastruktur verstehe ich alle Netzwerk-Technologien, darunter das Zugangsnetz (mobil/fest) zur Anbindung der IKT zum Internet, wie das Festnetz, Mobilfunknetz, TV-Kabelnetz usw., aber auch das Kernnetz zur Verbindung bestimmter Server, wie das Internet-Backbone oder Unterseekabel usw. (Grünwald und Caviezel 2022) (3) Unter der Kategorie der Rechenzentren zähle ich alle Server, wie Datenspeicher, Edge-Computer, Fog-Computer, Netzwerkknotenpunkte (Internet Exchange Point IXP) usw.

Für das Streamen von Videos ist der anteilige Stromverbrauch der IKT mit 72% wesentlich höher, als der der IKT-Infrastruktur (23%) und der von Rechenzentren (5%) bei durchschnittlicher Betrachtung der Konsumgewohnheiten (Kamiya 2020). Carré und Geneviève beziehen sich auf Daten der Agentur für Umwelt- und Energie in Frankreich (ADEME); nach ihren Angaben produzieren Rechenzentren 25%, die IKT-Infrastruktur 28% und die IKT 47% der Treibhausgasemissionen im Hinblick auf Frankreichs Strom-Mix (Carré 2018). Der Betrieb der IKT sowie deren Infrastruktur in Deutschland produziert 33 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> Emissionen im Jahr und ist nach Langkau und Hilbig mit dem Emissionsvolumen innerdeutschen Flugverkehrs vergleichbar (Höfner und Frick 2019).

## Das Internet

Aufgrund der hohen Komplexität ist die Erstellung eines genauen ökologischen Fußabdrucks von Internetdienstleistungen ohne detaillierte Modellannahmen, die über den Rahmen dieser Arbeit hinausgehen würden, unmöglich, zumal Transparenz sowie eine kritische Auseinandersetzung mit IKT-Infrastrukturen sowie Servern in den Wissenschaften weitgehend fehlt (Carruth 2014). Eine Abschätzung ist dennoch möglich, wenn auch auf unsicherer Datenlage. Dabei sei es sehr wichtig, die aktuelle Studienlage zu verwenden. Carruth zitiert zum Beispiel Robert Marzec, der den Energieverbrauch konkret herunterbricht: "Viewing a simple webpage generates approximately .02 grams of CO<sub>2</sub> per second; ten times this is required to view a complex website with multiple images; a running PC generates 40 to 80 grams of CO<sub>2</sub> per hour; a fifteen-minute Google search, 7–10 grams. All of this activity adds up"(Carruth 2014). Dieses Zitat lässt sich leider nicht auf seine Richtigkeit überprüfen, da die Quelle inzwischen nicht mehr abrufbar ist. Ein Bericht von ADEME, die Agentur für Umwelt- und Energie in Frankreich, gibt an, dass das Senden von 33 Emails mit je 1 Mb pro Tag an zwei Personen jährlich CO<sub>2</sub>-Emissionen in Höhe von 180 kg verursacht, äquivalent zu einer 1000 km langen Autofahrt (ADEME 2011). Nach Kamiya sei die Rechnung veraltet: eine E-Mail verursacht nicht mehr 1g CO<sub>2</sub> (Kamiya 2020). Es ist zu beachten, dass die ITK-Infrastruktur sowie die Rechenzentren wesentlich effizienter geworden sind, doch die Emissionsmenge für Webseitenaufrufe gilt als umstritten (Nast 2021). Während eine Stunde Streaming in 2011 um die 420 g CO<sub>2</sub> emittierte, waren es nur noch 36 g CO<sub>2</sub> in 2019 (Kamiya 2020).

2017 bedurfte Streaming alleine 60% des globalen Datenverkehrs, Tendenz steigend (Doleski u. a. 2021). Von 100 Gigabyte pro Sekunde (GB/s) in 2002 wuchs der globale Datendurchsatz auf 106.000 GB/s in 2021, mit Streaming als der wichtigste Faktor für das rasante Wachstum (Höfner und Frick 2019). Alle 20 Monate geht man von einer Verdopplung der globalen Datenmenge aus, d.h. alle 8 Jahre wächst das Datenvolumen um den Faktor 10 (Höfner und Frick 2019), wie im Rebound-Effekt beschrieben. Der Kauf einer Flatrate regt tendenziell zu Mehrkonsum an (Höfner und Frick 2019). Kamiya sagt: „One hour of streaming video typically uses around 0.08 kWh, but actual consumption depends on the device, network connection, and resolution“ (Kamiya 2020). Ein 50inch LED Fernseher verbraucht 100 Mal mehr Strom als ein Smartphone und 5 Mal mehr Strom als ein Laptop (Kamiya 2020). Da Smartphones sehr effizient sind, verbraucht die Datenübertragung über die IKT-Infrastruktur 80% der gesamten Energie beim Streamen (Kamiya 2020). Der ökologische Fußabdruck von Internetdiensten hängt auch von der Art des Strom Mix ab (Kamiya 2020). 2019 verursachte das Streaming auf Netflix pro Stunde 0,054 kg CO<sub>2</sub>e in Australien, 0,018 kg CO<sub>2</sub>e in UK, 0,004 kg CO<sub>2</sub>e in Frankreich, und insgesamt durchschnittlich 0,036 kg CO<sub>2</sub>e (Kamiya 2020). Kamiya berechnet, dass eine halbe Stunde Netflix Stream etwa

100 m Autofahren entspricht (Kamiya 2020). ADEME weist daraufhin, dass das Benutzen einer Suchmaschine einen vier Mal so viel Treibhausgase produziert gegenüber einer normalen Webanfrage (ADEME 2011).

Die sogenannten Cloud-Dienste nehmen an Bedeutung zu: Cloud-Dienste sind Subscription-based oder pay-per-use Dienstleistungen, die einen Zugang zu mehr Speicher- sowie Rechenkapazitäten auf Servern des Anbieters in Echtzeit anbieten, in Form von Software as a Service (SaaS), Infrastructure as a Service (IaaS) oder Platform as a Service (PaaS) (Dibbern 2010; Carruth 2014). Insbesondere in der COVID-Pandemie stieg der Datenverkehr sowie die Nachfrage nach Cloud-Dienstleistungen um 15 bis 20% im Frühjahr 2020, doch ließ sich im Anschluss auch eine Sättigungstendenz beobachten (Grünwald und Caviezel 2022). Vorteile des Outsourcen von Speicher- sowie Rechenkapazitäten sei nicht nur der Bequemlichkeit wegen, sondern auch das geringe Investitionskapital der Unternehmen in IT sowie Personal und die flexiblere Skalierung der IT-Möglichkeiten (Dibbern 2010). Cloud-Dienste bedürfen jedoch einer guten Netzinfrastruktur mit schneller sowie zuverlässigen Internetverbindung (Dibbern 2010). Carré weist darauf hin, dass Cloud-Dienste doppelt so viel Energie für erweiterte Speicherkapazitäten verbrauchen als Daten lokal auf den Endgeräten zu speichern (Carré 2018), doch wie wir sehen werden, haben Cloud-Dienste das Potential eine ressourcenschonende Alternative zur Herstellung neuer IKT-Endgeräte zu bilden.

### **(1) Die IKT-Endgeräte**

In Summe verbrauchen IKT-Endgeräte mehr Strom als die IKT-Infrastruktur und die Rechenzentren: Der Verbrauch von 1,6 Milliarden Computer und Notebooks (je 70 bis 200 kWh/a), 6 Milliarden Smartphones (je 2 kWh/a), Tablets (12 kWh/a) usw. summiert sich (Renzenbrink 2013). Mills errechnet einen globalen Gesamtverbrauch von 460 bis 550 TWh/a für den Wohn- sowie kommerziellen Sektor (Mills 2013). Für 2018 verbrauchten die Endgeräte in Deutschland 15,1 TWh (Grünwald und Caviezel 2022). Angesichts der Nachhaltigkeit ist es wichtig den Lebenszyklus der Endgeräte zu beachten: während die Herstellung von Smartphones 80% der CO<sub>2</sub>-Emission im Lebenszyklus ausmacht, so ist sie beim Fernseher mit 33% wesentlich geringer (Kamiya 2020). Smartphones sind zwar wesentlich effizienter als Fernseher, doch sie werden auch öfters ausgewechselt, was Produktionsemissionen sowie Elektroschrott erhöht. Coroama und Mattern zitieren: „Jährlich produzieren wir das Gewicht von etwa 4500 Eiffeltürmen an Elektroschrott. Tendenz: steigend“ (Höfner und Frick 2019). Die Ursprungsquelle ließ sich nicht finden, doch dient das Beispiel zur Visualisierung. Mit 53,6 Mio. Tonnen Elektroschrott pro Jahr (Forti u. a. 2020) waren es bereits 5307 Eiffeltürme in 2019.

## **(2) Die IKT-Infrastrukturen**

Die Odyssee einer E-Mail vom Sender bis zum Rezipienten besteht aus folgenden Stationen: Nach dem Verfassen und Senden der E-Mail durch den Absender, der sie über seinen E-Mail-Client an den SMTP-Server sendet, durchläuft die E-Mail eine Übertragung zwischen Servern, wobei DNS-Server die Domainnamen auflösen und den Weg zu Ziel-SMTP-Servern festlegen. Der Empfänger-SMTP-Server leitet die E-Mail an das Postfach des Rezipienten weiter. Eine Information durchläuft also auf dem Weg vom Sender bis zum Rezipienten Festnetze und/oder Mobilfunknetze, IXP-Server und/oder Rechenzentren, eventuell sogar Unterseekabel (webtechnologien.com, o. J.).

Der gesamte Stromverbrauch der IKT-Infrastruktur in Deutschland liegt bei 22 TWh/a (Grünwald und Caviezel 2022). Eine realistische Zukunftsprognose für 2030 sei 30,6 TWh/a; das Worst-Case-Szenario sei 58,5 TWh/a (Grünwald und Caviezel 2022). Davon verbrauchen Telekommunikationsnetzwerke, also Fest-, Mobilfunk-, Breitbandkabelnetze, 7,3 TWh/a, Tendenz steigend (Grünwald und Caviezel 2022). Für 2018 sank der Energiebedarf der IKT-Endgeräte, doch aufgrund des zunehmenden Grads der Vernetzung sowie des wachsenden Konsums von Streaming-Angeboten stieg der Energiebedarf der IKT-Infrastruktur (Grünwald und Caviezel 2022). Kamiya prognostiziert ein Wachstum des Video-Streaming-Konsums von 55% pro Jahr über mobile Netzwerke.

Der Jahresbericht von Nokia identifiziert im Lebenszyklus der IKT-Netzinfrastruktur den Betrieb der IKT-Netzinfrastruktur als den wesentlichen Treiber für Treibhausgasemissionen, im Gegensatz zur Herstellung sowie Transportation der Netzwerk-Komponenten (Nokia 2020).

## **(3) Die Rechenzentren**

2018 lag der Elektrizitätsbedarf von Rechenzentren bei 205 TWh; dies entspricht etwa 1% des globalen Bedarfs (Masanet u. a. 2020; Renzenbrink 2013). In den USA verursachten Rechenzentren  $31,5 \times 10^6$  Tonnen CO<sub>2</sub> Emissionen; dies entspricht 0,5% aller Treibhausgas-Emissionen in den USA (Siddik, Shehabi, und Marston 2021). Rechenzentren hatten in Deutschland 2019 einen Stromverbrauch von 14,9 TWh und 2020 16,0 TWh, Tendenz steigend (Grünwald und Caviezel 2022). Zu den Rechenzentren zählen einerseits zentrale Rechner und andererseits dezentrale (Nano)Server, Edge-Computing oder Fog-Computing genannt (Baischew u. a. 2022). Edge-Computing ist ein Ansatz im Bereich der verteilten Datenverarbeitung, bei dem Rechenleistungen am Rand des Netzwerks und gleichzeitig näher an Endgeräten angeboten werden, um den Ressourcenverbrauch in der Übertragung von Daten über IKT-



Netzinfrastrukturen zu minimieren (Baischew u. a. 2022). Fog-Computing sei eine erweiterte Form des Edge-Computing und zielt auf eine flexibleren Positionierung der Ressourcen (Baischew u. a. 2022). Bei Fog-Computern sei der Energieverbrauch allerdings höher im Vergleich zu zentralen Servern, wenn die Anzahl der Aufrufe gering bleibt (Baischew u. a. 2022).

Rechenzentren haben auch einen direkten sowie indirekten Wasser-Fußabdruck: Während der direkte Wasserkonsum sich auf die Kühlung der Server bezieht, besteht der indirekte Wasserkonsum darin, unter anderem (erneuerbaren) Strom zu generieren, andere Stromkraftwerke zu betreiben und Abwasser zu klären (Siddik, Shehabi, und Marston 2021). In den USA verbrauchten Rechenzentren 2018 etwa  $513 \times 10^6 \text{ m}^3$  Wasser, davon  $130 \times 10^6 \text{ m}^3$  direkt (Siddik, Shehabi, und Marston 2021). Aufgrund der Unmengen an Wasser für die Betreuung von Servern, bedarf es einer vorausschauenden Auswahl eines Ortes für die Errichtung eines Daten Zentrums (Siddik, Shehabi, und Marston 2021).

## Prognosen

Zukünftige Errungenschaften des technologischen Fortschritts lassen sich mit generell akzeptierten und verwendeten „Daumenregeln“ vorhersagen: (a) Das Mooresche Gesetz besagt, dass sich die Rechenleistung von Computern alle zwei Jahre verdoppelt (Grünwald und Caviezel 2022; Höfner und Frick 2019). Nachdem das Mooresche Gesetz sich ab dem Beginn des 21. Jahrhunderts verlangsamte, wird das Koomey's Law verwendet, um die Effizienzsteigerungen von Rechenzentren abzubilden (Koomey u. a. 2011). Die Energieeffizienz soll sich ab 2000 alle 2,7 Jahre verdoppelt haben (Koomey und Naffziger 2015) und der Stromverbrauch halbiere sich alle 2 Jahre (Aslan u. a. 2018). Obwohl die Workloads der Rechenzentren sich seit 2015 verdreifacht haben, so verbrauchen sie weiterhin konstant 1% des globalen Stroms (Kamiya 2020). Zwischen 2010 und 2018 erhöhte sich der Computer Workload von Rechenzentren um 550%, wobei sich der Elektrizitätskonsum gleichzeitig nur um 6% erhöhte (Siddik, Shehabi, und Marston 2021). Obwohl Carré beobachtet, dass Webseiten und Softwares tendenziell immer ineffizienter programmiert werden und darum einen größeren ökologischen Fußabdruck haben müssten (Carré 2018), so wird in Summe weniger Energie pro Abruf aufgrund zunehmender Effizienz in Rechenzentren verbraucht.

(b) Wirth's Law besagt: „Software wird schneller langsam, als Hardware schneller wird“ (Wirth 1995; Höfner und Frick 2019). Damit ist gemeint, dass aufgrund zusätzlicher Software-Erweiterungen die Rechenintensität zunimmt und die Software auf denselben IKT-Endgeräten ineffizienter sowie langsamer funktioniert; gleichzeitig impliziert die These, dass der technologische Fortschritt für Hardware nicht mit den

Software-Anforderungen mithalten kann. Nichtsdestotrotz ist ein infinites Progress der Software nicht zu erwarten, weil Innovativität eben nur im Zusammenspiel aus Software und Hardware besteht. Wirth's Law beschreibt die Tendenz, dass Software ein treibender Faktor für Hardware-Entwicklungen und das Auswechseln der IKT-Endgeräte sei.

(c) Das bereits beschriebene Jevons Paradoxon (Rebound Effekt) besagt einen höheren Ressourcenverbrauch, aufgrund von Effizienzgewinnen (Carré 2018). Kamiya stellt zuletzt die richtige Frage: „[...] [C]an efficiency keep pace with exponential growth in demand?“ (Kamiya 2020).

Folgende Trends lassen sich beobachten: Ob über iCloud, Dropbox, Facebook oder Google Drive – das Outsourcen von Speicherkapazitäten nimmt bei den Konsument:innen zu (Carruth 2014). Darüber hinaus nimmt der Konsum von Inhalten produziert durch Multimodale KI-Systemen zu, wie zum Beispiel durch ChatGPT oder Dal-E (Albrecht 2023; Potrimba 2023). Durch diese interaktiven KI-Systeme lassen sich nun individualisierte Inhalte spezialisiert für Konsument:innen erstellen. KI-Modelle haben einen sehr hohen aber einmaligen Energieverbrauch in ihrer Trainingsphase, allerdings ist die Lebensdauer einer Modellvariante nicht hoch und bedarf einer ständigen Anpassung (Albrecht 2023). Neue technologische Gadgets wie Virtual Reality (VR) oder Augmented Reality (AR) (Kamiya 2020), wie die Apple Vision Pro Brille (Apple 2023), eröffnen neue virtuelle Möglichkeiten des Arbeitens sowie des Konsums, die zumindest kurzfristig und auch insgesamt den Energieverbrauch erhöhen. Da das Internet kommerzieller Natur ist, stehen unterschiedliche Cloud-Dienste in Konkurrenz zueinander um die Aufmerksamkeit der Nutzer:innen (Bronner 2022), um Werbung schalten zu können oder KI-Systeme durch Interaktionen zu verbessern. Das Internet zielt darauf, benutzt zu werden.

Ein Trend sei, dass große Cloud und Rechenzentren aus Effizienzgründen gebaut werden, statt viele kleine dezentrale Server, um den ökologischen Fußabdruck zu reduzieren (Siddik, Shehabi, und Marston 2021). Dies hat zur Folge, dass die Orte dieser Rechenzentren einer sehr fokussierten Umweltbelastung unterliegen (Siddik, Shehabi, und Marston 2021).

Im Wertpapier-Trading-Sektor gewinnen High-frequency traders an Bedeutung, also Computer Algorithmen (algo traders), die rapide Transaktionen durchführen, um Cent-Beträge zu erwirtschaften; sie sind unter anderem die Treiber der Geschwindigkeitszunahme des Informationsaustauschs (Carruth 2014). Des Weiteren nimmt die Zahl an Energie-intensiven Blockchain-Anwendungen zu: Insbesondere Kryptowährungen wie Bitcoin verbrauchen durch das sogenannte Bitcoin-Schürfen 10 bis 20% des weltweiten Strombedarfs in Rechenzentren (Grünwald und Caviezel 2022). Während das Bitcoin-Schürfen 2019 bei 120 Mio. Transaktionen 41 bis 64 TWh ver-

brauchte – das entspricht 340 bis 530 kWh je Transaktion – so waren es 2022 um die 100 TWh (Grünwald und Caviezel 2022; Stoll, Klaaßen, und Gellersdörfer 2019) – Das entspricht dem Energieverbrauch der Staaten Jordan und Sri Lanka (Stoll, Klaaßen, und Gellersdörfer 2019). Crypto-Mining verbrauche sogar pro 1 US Dollar mehr Energie als der Bergbau für 1 US Dollar Gold, Kupfer, Platin oder andere Seltenerdoxide (Krause und Tolaymat 2018). Im Zeitraum zwischen Januar 2016 bis Juni 2018 schätzen Krause und Tolaymat die Emissionen der vier Crypto-Währungen Bitcoin, Ethereum, Litecoin sowie Monero auf 3 bis 15 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>e (Krause und Tolaymat 2018).

## Ökologische Nachhaltigkeitsfaktoren

Was heißt in diesem Kontext Nachhaltigkeit? „Nachhaltigkeit oder nachhaltige Entwicklung bedeutet, die Bedürfnisse der Gegenwart so zu befriedigen, dass die Möglichkeiten zukünftiger Generationen nicht eingeschränkt werden. Dabei ist es wichtig, die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit – wirtschaftlich effizient, sozial gerecht, ökologisch tragfähig – gleichberechtigt zu betrachten.“ („Nachhaltigkeit (nachhaltige Entwicklung)“, o. J.). Sozial gerechte Nachhaltigkeit beschäftigt sich im Kontext des Internets unter anderem mit den Themen einer fairen Globalisierung, dem Umgang mit Elektroschrott, den Arbeitsbedingungen, der Diffusion von Content, aber auch mit der Quasi-Monopolstellung und der Hegemonie der USA in Bezug auf die globale Verteilung von Rechenzentren (Carré 2018). Etwa 30% aller Rechenzentren sind in den USA stationiert (Siddik, Shehabi, und Marston 2021). Albrecht weist auf das Outsourcen großer Mengen niedrig-bezahlter Arbeit hin, wie das Kodieren von Daten, zum Trainieren von KI-Systemen (Albrecht 2023). Soziale Nachhaltigkeit ist ein weites Feld, das Strukturen und Entwicklungen unter die Lupe nimmt und kritisch hinterfragt; in dieser Arbeit werde ich nicht weiter darauf eingehen. Obwohl die ökonomische und ökologische Nachhaltigkeit Überschneidungspunkte besitzen, werde ich nur auf letzteres eingehen.

Im Kontext des Internets sei eine „richtige Weichenstellung in Richtung Nachhaltigkeit“ wichtig für die zukünftige Entwicklung (Baischew u. a. 2022). Im Folgenden fokussiere ich mich auf ökologische Nachhaltigkeitsfaktoren; dabei identifiziere ich (A) die Verlängerung der Lebenszyklen von IKT, (B) die Verwendung von erneuerbaren Energien und (C) die Erhöhung der Effizienz.

### (A) Verlängerung der Lebenszyklen von IKT

Der Lebenszyklus einer IKT umfasst die Extraktion von Rohstoffen, die Herstellung sowohl der Hardware, als auch der Software, inklusive Promotion & Verkauf, die Benutzung bis hin zur Entsorgung des Elektroschrotts oder Recycling (Carré 2018;

Höfner und Frick 2019). Der Lebenszyklus schließt auch die ökologischen Konsequenzen mit ein, wie Gesundheit, Toxizität, Grundwasserverschmutzung und ferner die Zerstörung der Biodiversität usw. (Carré 2018). Gröger und Hertrich erklären, die Verlängerung der Nutzungsdauer der IKT sei der wichtigste Hebel für die Reduktion des ökologischen Fußabdrucks der Konsument:innen, um die emissionsintensiven Neuproduktionen der IKT zu drosseln (Höfner und Frick 2019).

Gröger und Hertrich meinen, auch die Softwareentwickler:innen haben eine Verantwortung Nachhaltigkeit bei der Softwareentwicklung umzusetzen (Höfner und Frick 2019). Software trägt zur Obsoleszenz der Hardware bei: dadurch dass Software im Hinblick auf den neusten technologischen Hardware-Stand programmiert wird, sorgt Software für den wachsenden Bedarf alte Hardware gegen neuere auszutauschen und induziert indirekt Umweltbelastung (Höfner und Frick 2019). Der sogenannte Feature Creep beschreibt in der Programmierung die Tendenz, dass zusätzliche Anforderungen sowie Funktionalitäten in Nachfolgeversionen der Software hinzugefügt werden, sodass die Software ineffizient läuft und auf ein Hardware-Upgrade angewiesen ist (Höfner und Frick 2019). Um einen ressourceneffizienten Umgang und eine langfristige Nutzbarkeit von Hardware zu ermöglichen, schlagen Gröger und Hertrich die Möglichkeit vor, ausgewählte Kernmodule einer Software bei Updates eines Softwaresystems isoliert installieren zu können (Höfner und Frick 2019). Diese Abwärtskompatibilität und Langlebigkeit könne man mit Gütesiegeln propagieren (Höfner und Frick 2019).

## **(B) Verwendung von erneuerbaren Energien**

Ein ökologischer Nachhaltigkeitsfaktor ist die Verwendung von erneuerbaren Energien unter anderem zur Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen. Das Klimaschutzgesetzes (KSG) in Deutschland fixiert zwar die Jahresemissionsmenge, aber adressierte den Informations- sowie Telekommunikationssektor nicht explizit (Baischew u. a. 2022). Digitale Infrastruktur- und Cloud-Service-Anbieter scheinen auf eigene Initiative Klimaneutralität anzuvisieren (Grünwald und Caviezel 2022). Dabei investieren sie zunehmend in erneuerbare Energien, wie Solar- und Windenergie (Doleski), und verkleinern dadurch ihren ökologischen Fußabdruck (Siddik, Shehabi, und Marston 2021; Carruth 2014). Der Ökologische Fußabdruck ist jeweils abhängig vom geographischen Ort und dem lokalen Mix des Stroms (Siddik). Die Zuverlässigkeit und ausfallsichere Bereitstellung von Leistung ist einer der höchsten Prioritäten von Rechenzentren, weshalb eine Vollversorgung durch erneuerbare Energien eine Herausforderung bleibt (Grünwald und Caviezel 2022).

IKT-Infrastrukturen sowie Rechenzentren bilden nur einen Teil des Energiekonsums des Internets; der größte Verbrauch geschieht über die IKT selbst. Auch hier ist eine

grüne Energiewende, regenerativ erzeugten Strom Haushalten und Unternehmen zur Verfügung zu stellen, im Hinblick auf Nachhaltigkeit essenziell.

### **(C) Erhöhung der Effizienz**

Das Mooresches Gesetz oder Kooney's Law wurden für die Vorhersage des technischen Fortschritts sowie der Effizienzsteigerung bereits erwähnt. Kamiya merkt an, dass Rechenzentren nur 1% des globalen Stroms verbrauchen, obwohl sich der Workload seit 2015 verdreifacht habe (Kamiya 2020). Die Erhöhung von Effizienz lässt sich durch mehrere Möglichkeiten bei den unterschiedlichen Säulen des Internets umsetzen. Doleski schlägt eine digitale Dekarbonisierungsmethode vor, bei der tatsächlich mehr Rechenleistung zu Gunsten einer Verkleinerung des ökologischen Fußabdrucks verwendet werden können (Doleski u. a. 2021).

Eine Möglichkeit besteht darin Smarthome-, Smartbuilding-, Smart Grids oder Smart-City-Konzepte zu benutzen, um Strom einzusparen und Heizungen zu optimieren (Grünwald und Caviezel 2022; Doleski u. a. 2021). Doleski plädiert dabei für eine Elektrifizierung des Wärme- sowie Verkehrssektors (Doleski u. a. 2021). Für die IKT-Infrastrukturen können kupferbasierte Digital-Subscriber-Line-Technologien (DSL) durch Glasfasertechnologien (FTTB, FTTH) ausgetauscht werden, welche weniger als halb so viel Strom benötigen würden (Grünwald und Caviezel 2022; Baischew u. a. 2022). Nichtsdestotrotz würden Kupfer- sowie Glasfasernetze in der Übergangsphase beide parallel genutzt werden, was den Energiekonsum erstmal erhöht (Grünwald und Caviezel 2022; Baischew u. a. 2022).

In der IKT-Infrastruktur wird die 5G-Technologie für ihre Energieeffizienz gelobt, da sie Treibhausgasemissionen um 85% gegenüber der 4G-Mobilfunktechnologie einsparen würde (Grünwald und Caviezel 2022; Baischew u. a. 2022). Das 5G-Netz habe eine höhere Energieelastizität und könne außerhalb der Spitzenzeiten heruntergefahren werden (Baischew u. a. 2022). Das 5G-Netzwerk gilt jedoch als umstritten, weil der Energiebedarf insgesamt ansteigen würde, weil die Reichweite der Funkverbindung geringer ist und mehr Senderantennen bedarf (Grünwald und Caviezel 2022; Baischew u. a. 2022).

Effizienz im Kontext der Software bedeutet, sie möglichst ressourcensparend zu programmieren - „Klima-freundliche Webseiten“ (Nast 2021). Nach Gröger und Hertelich bedarf Windows 10 im Vergleich zu Windows 95 vierzigmal so viel Prozessorleistung, 250-Mal so viel Arbeitsspeicherkapazität und 320-Mal so viel Festplattenkapazität (Höfner und Frick 2019). Trotz der gleichen Funktionalität bestimmter Software gibt es einen unterschiedlichen Energieverbrauch, wie zum Beispiel bei Internetbrowsern sowie Content-Management-Systemen (CMS) (Höfner und Frick 2019). Weil zum Beispiel bei Textverarbeitungssystemen die Vielfalt an Formatierungsmög-

lichkeiten nur im professionellen Bereich benötigt werden, besteht eine Möglichkeit darin, nur erforderliche Anwendungen in den Arbeitsspeicher zu laden (Höfner und Frick 2019).

Rechenzentren produzieren viel Abwärme. Viele Server werden durch Luftkühlungen gekühlt; eine Flüssigkeitskühlung, wie zum Beispiel mit Wasser, ist jedoch wesentlich leistungsfähiger und effizienter, und bedarf bis zu 80% weniger Energie (Grünwald und Caviezel 2022). Im Hinblick auf Nachhaltigkeit ist es möglich diese Abwärme auch in Wärmenetze einzuspeisen (Baischew u. a. 2022) und somit um die 4 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> Emissionen jährlich einzusparen (Grünwald und Caviezel 2022). Doch die Umbaukosten zu Fernwärmenetzen sei bei bestehenden niedrigen Erdgaspreisen leider nicht lukrativ und bedürfen langfristigeren Investitionen (Grünwald und Caviezel 2022). Bei einer Exkursion in die Fernkälte-Anlage der Stadtwerke München im Rahmen des Seminars „Materiality“ unter der Leitung von Sonja Dümpelelmann erfuhr ich, dass das Verlegen der Kühlwasserleitungen einen hohen Kostenfaktor darstellt. Auch ist der Wasserkreislauf der SWM für die Fernkälte geschlossen, sodass das warme Wasser beim Rückfluss nicht für das Fernwärmenetz verwendet werden kann (GmbH und Stadtwerke München GmbH 2022). Eine effizientere Kühlung hängt darüber hinaus auch von der strategischen Berücksichtigung der partikularen Geographien ab, in denen ein Rechenzentrum errichtet wird: unter Beachtung der Klimazone, der Verfügbarkeit von Wasser, der Energiestandards des Gebäudes und der lokalen, regulatorischen Gesetzesrahmen lässt sich Energie sparen (Doleski u. a. 2021; Siddik, Shehabi, und Marston 2021).

Ein weiteres Einsparpotential von etwa 4 bis 10% gibt es bei Rechenzentren, indem die Server auf die Verwendung von Gleichstrom umgebaut werden (Grünwald und Caviezel 2022). Das Stromnetz liefert zwar Wechselstrom, der jedoch für Akkumulatoren zweifach umgewandelt werden muss, die mit Gleichstrom funktionieren (Grünwald und Caviezel 2022). Beim Umwandlungsprozess von Wechselstrom zu Gleichstrom und wieder zurück zu Wechselstrom kommt es zu vermeidbaren Verlusten (Grünwald und Caviezel 2022).

Nicht zuletzt geht es um das Finden eines Effizienz-Optimums in der Verteilung von Rechen- sowie Speicherkapazitäten auf verschiedene Umgebungen. Einerseits gibt es die Möglichkeit Rechen- sowie Speicherkapazitäten zu dezentralisieren: Durch die Errichtung von lokalen Edge- sowie Fog-Computern können lange Distanzen über relativ energie-intensive IKT-Infrastrukturen vermieden werden (Baischew). Da Smartphones so energie-effizient funktionieren, könnten Rechen- sowie Speicherkapazitäten auf Endgeräten umgesetzt werden. Neben den qualitativen Vorteilen von bequemen Cloud-Diensten, sind die Grenzen eines Gerätes im Hinblick auf die vorschreitenden Software-Möglichkeiten limitiert. Andererseits gibt es Möglichkeiten

Rechen- sowie Speicherkapazitäten zu zentralisieren: Green-IT besteht zum Beispiel darin, Server durch Cloud-Computing zu virtualisieren, also den Workload auf große Rechenzentren outzusourcen; dadurch „kann deren Auslastung im Vergleich zu herkömmlichen Servern um bis zu 60% gesteigert werden, und das bei etwa gleichem Energieverbrauch wie unter Vollast.“ (Albrecht 2023). Grünwald bestätigt, dass größere Rechenzentren vergleichsweise energieeffizienter funktionieren (Grünwald). Bei zentralisierten Rechenzentren ließe sich die Abwärme synergetisch nutzen.

Es ist wichtig ein ausgeglichenes Verhältnis zwischen Zentralisierung und Dezentralisierung herzustellen für ein optimiertes Lastenmanagement (Doleski). Durch Vorhersage- sowie Optimierungsdienste könnte die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien intelligent integriert werden (Doleski u. a. 2021). Eine Idee besteht darin den Workload durch intelligente Schwarmplattform räumlich zu koordinieren, dass Rechenzentren bevorzugt werden, in denen regenerativ-erzeugter Strom zur Verfügung steht (Grünwald).

## Conclusion

Das Internet entzieht sich oft dem ökologischen Diskurs in den Umweltwissenschaften, obwohl es auf den drei materiellen Säulen aus IKT, IKT-Infrastrukturen sowie Rechenzentren und auf einem energieintensiven Ressourcenverbrauch basiert. Wenn das gesamte digitale Ökosystem 10% aller durch den Menschen verwendeter Elektrizität verbraucht, müssen wir es allerdings in Kontext zu unserem sozialen Lebensstil setzen. Dafür, dass das Internet mitsamt seinen Cloud-Diensten mit hohem Stellenwert ein fundamentaler Bestandteil unserer Konsumkultur bildet, verbraucht es (noch) verhältnismäßig wenig Energie. Im Hinblick auf technologischen Fortschritt und den Rebound Effekt als Antwort auf die Effizienzgewinne und angesichts der rechenintensiven Individualisierung des Entertainment-Angebots durch Multimodale KI-Systeme, wird der digitale Konsum und Energieverbrauch kontinuierlich wachsen. Dies veranlasst die Frage, wie schnell Effizienz noch mit der Nachfrage mithalten kann. Nichtsdestotrotz gibt es Raum nach oben für nachhaltige Entwicklungen, die den ökologischen Fußabdruck verkleinern bei gleichzeitigem Anstieg des Datenvolumens. Daraufhin identifiziere ich drei ökologische Nachhaltigkeitsfaktoren: Die Verlängerung der Lebenszyklen von IKT, die Investition sowie Verwendung von erneuerbaren Energien und die Erhöhung der Effizienz bilden den längsten Hebel für eine nachhaltige Zukunft. Im Vordergrund stand das Ziel ein Bewusstsein zu schaffen über die Materialität des Internets; Aspekte der sozialen Nachhaltigkeit bedürfen einer intensiveren Auseinandersetzung, die den Rahmen für diese Arbeit gesprengt hätten.

## Literature

- ADEME. 2011. „Analyse comparée des impacts environnementaux de la communication par voie électronique. Présentation des résultats“. Bio Intelligence Service. [https://presse.ademe.fr/files/acv\\_ntic\\_synthese\\_resultats.pdf](https://presse.ademe.fr/files/acv_ntic_synthese_resultats.pdf).
- Albrecht, Steffen. 2023. „ChatGPT und andere Computermodelle zur Sprachverarbeitung – Grundlagen, Anwendungspotenziale und mögliche Auswirkungen“. 2023. <https://doi.org/10.5445/IR/1000158070>.
- Apple. 2023. „Apple Vision Pro – Apples erster räumlicher Computer“. 2023. <https://www.apple.com/de/newsroom/2023/06/introducing-apple-vision-pro/>.
- Aslan, Joshua, Kieren Mayers, Jonathan G. Koomey, und Chris France. 2018. „Electricity Intensity of Internet Data Transmission: Untangling the Estimates“. *Journal of Industrial Ecology* 22 (4): 785–98. <https://doi.org/10.1111/jiec.12630>.
- Baischew, Dajan, Lisa Schrade-Grytsenko, Bernd Sörries, Marcus Stronzik, und Matthias Wissner. 2022. „Ausgewählte Informations- und Kommunikationstechnologien und ihre Auswirkungen auf umweltpolitische Ziele“. Working Paper. WIK Diskussionsbeitrag. <https://www.econstor.eu/handle/10419/267677>.
- Bronner, Gérald. 2022. *Kognitive Apokalypse: eine Pathologie der digitalen Gesellschaft*. München: C.H. Beck.
- Carré, Dominique. 2018. *Hyperconnectivity: Economical, Social and Environmental Challenges*. 1st edition. London: ISTE Ltd.
- Carruth, Allison. 2014. „The Digital Cloud and the Micropolitics of Energy“. *Public Culture* 26 (2): 339–64. <https://doi.org/10.1215/08992363-2392093>.
- Deutscher Naturschutzring. 2024. „Rebound-Effekt“. Deutscher Naturschutzring: Dachverband der deutschen Natur-, Tier- und Umweltschutzorganisationen. 2024. <https://www.dnr.de/themen/glossar/rebound-effekt>.
- Dibbern, Jens. 2010. „Situation und Potenziale aus Sicht IKT“. Institut für Wirtschaftsinformatik Abteilung Information Engineering, Universität Bern.
- Doleski, Oliver D., Thomas Kaiser, Michael Metzger, Stefan Niessen, und Sebastian Thiem. 2021. „Digitale Dekarbonisierung für dekarbonisierte Digitalisierung“. *Wirtschaftsinformatik & Management* 13 (3): 236–43. <https://doi.org/10.1365/s35764-021-00332-z>.
- Forti, Vanessa, Cornelis Peter Baldé, Ruediger Kuehr, und Garam Bel. 2020. „The Global E-waste Monitor 2020. Quantities, flows, and the circular economy potential“. Bonn/Geneva/Rotterdam: United Nations University (UNU)/United Nations Institute for Training and Research (UNITAR) – co-hosted SCYCLE Programme, International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA). [https://www.researchgate.net/profile/Vanessa-Forti/publication/342783104\\_The\\_Global\\_E-waste\\_Monitor\\_2020\\_Quantities\\_flows\\_and\\_the\\_circular\\_economy\\_potential/link](https://www.researchgate.net/profile/Vanessa-Forti/publication/342783104_The_Global_E-waste_Monitor_2020_Quantities_flows_and_the_circular_economy_potential/link)



- s/5f05e6c0458515505094a3ac/The-Global-E-waste-Monitor-2020-Quantities-flows-and-the-circular-economy-potential.pdf.
- GmbH, Stadtwerke München und Stadtwerke München GmbH. 2022. „Fernkälte: Klimatisierungssystem der Zukunft“. 2022. <https://www.swm.de/magazin/energie/fernkaelte>.
- Grünwald, Reinhard, und Claudio Caviezel. 2022. „Energieverbrauch der IKT-Infrastruktur. Endbericht zum TA-Projekt“. 2022. <https://doi.org/10.5445/IR/1000151164>.
- Höfner, Anja, und Vivian Frick. 2019. *Was Bits und Bäume verbindet: Digitalisierung nachhaltig gestalten*. oekom verlag.
- Kamiya, George. 2020. „The carbon footprint of streaming video: fact-checking the headlines – Analysis“. 2020. <https://www.iea.org/commentaries/the-carbon-footprint-of-streaming-video-fact-checking-the-headlines>.
- Koomey, J., S. Berard, M. Sanchez, und H. Wong. 2011. „Implications of Historical Trends in the Electrical Efficiency of Computing“. *IEEE Annals of the History of Computing* 33 (3): 46–54.
- Koomey, J., und S. Naffziger. 2015. „Moore’s Law Might Be Slowing Down, But Not Energy Efficiency“. 2015. <https://spectrum.ieee.org/moores-law-might-be-slowing-down-but-not-energy-efficiency>.
- Krause, Max J., und Thabet Tolaymat. 2018. „Quantification of Energy and Carbon Costs for Mining Cryptocurrencies“. *Nature Sustainability* 1 (11): 711–18. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0152-7>.
- Masnet, Eric, Arman Shehabi, Nuoa Lei, Sarah Smith, und Jonathan Koomey. 2020. „Recalibrating global data center energy-use estimates“. *Science* 367 (6481): 984–86. <https://doi.org/10.1126/science.aba3758>.
- Mills, Mark P. 2013. „The Cloud Begins With Coal. Big Data, Big Networks, Big Infrastructure, and Big Power. An Overview of the Electricity used by the Global Digital Ecosystem.“ [https://www.tech-pundit.com/wp-content/uploads/2013/07/Cloud\\_Begins\\_With\\_Coal.pdf](https://www.tech-pundit.com/wp-content/uploads/2013/07/Cloud_Begins_With_Coal.pdf).
- „Nachhaltigkeit (nachhaltige Entwicklung)“. o. J. Zugegriffen 31. Januar 2024. <https://www.bmz.de/de/service/lexikon/nachhaltigkeit-nachhaltige-entwicklung-14700>.
- Nast, Condé. 2021. „Your Website Is Killing the Planet“. *Wired UK*, 2021. <https://www.wired.co.uk/article/internet-carbon-footprint>.
- Nokia. 2020. „Nokia People and Planet Report“. [https://www.nokia.com/sites/default/files/2021-04/Nokia\\_People\\_and\\_Planet\\_Report\\_2020.pdf](https://www.nokia.com/sites/default/files/2021-04/Nokia_People_and_Planet_Report_2020.pdf).
- Potrimba, Petru. 2023. „Multimodal Models and Computer Vision: A Deep Dive“. Roboflow Blog. 2023. <https://blog.roboflow.com/multimodal-models/>.
- Renzenbrink, Tessel. 2013. „How Much Electricity Does the Internet Use?“ 13. Juni 2013. <https://www.elektormagazine.com/articles/how-much-electricity-does-the-internet-use>.

- Shehabi, Arman, Ben Walker, und Eric Masanet. 2014. „The Energy and Greenhouse-Gas Implications of Internet Video Streaming in the United States“. *Environmental Research Letters* 9 (5): 1–11. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/5/054007>.
- Siddik, Md Abu Bakar, Arman Shehabi, und Landon Marston. 2021. „The Environmental Footprint of Data Centers in the United States“. *Environmental Research Letters* 16 (6): 64017-. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abfba1>.
- Stoll, Christian, Lena Klaaßen, und Ulrich Gallersdörfer. 2019. „The Carbon Footprint of Bitcoin“. *Joule* 3 (7): 1647–61. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.05.012>.
- webtechnologien.com. o. J. „Die Infrastruktur des Internets“. Zugegriffen 11. Januar 2024. <http://www.webtechnologien.com/wissen/das-internet/die-infrastruktur-des-internets/>.
- Wirth, N. 1995. „A plea for lean software“. *Computer*, Februar 1995.