

Hintergrund und Ziel dieses Diskussionspapiers

Das „Forum Bits & Bäume“ bietet einen Ort für die Vernetzung von Politik, angewandter Wissenschaft und Zivilgesellschaft aus der Tech- und Nachhaltigkeits-Community und möchte Handlungsvorschläge erarbeiten, wie die Digitalisierung zukunftsfähig gestaltet werden kann. Es wird von der Forschungsgruppe „Digitalisierung und sozial-ökologische Transformation“ am Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW) und der Technischen Universität Berlin ausgerichtet und in Kooperation mit dem Einstein Center Digital Future und weiteren wechselnden Partnern veranstaltet. Das Projekt wird durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Förderschwerpunkt Sozial-ökologische Forschung (SÖF) gefördert.

Dieses **Diskussionspapier** entstand im Rahmen der 3. Veranstaltung des Forum Bits & Bäume zum Thema „**Gestaltungsoptionen für nachhaltige Hard- und Software**“. Die Autor*innen möchten damit einen Vorschlag für die inhaltliche Zuspitzung und Strukturierung des Themas vorlegen. Die Formulierung politischer Gestaltungsansätze für nachhaltige Hard- und Software sind ein wesentliches Ergebnis der Diskussionen auf dem Forum Bits & Bäume und können eine Grundlage für die Erarbeitung eines politischen Gestaltungsrahmens für nachhaltige Hard- und Software schaffen.

Das Diskussionspapier wurde am 26.07.2020 unter dem Titel „Missing Link: Nachhaltige Hard- und Software - für eine bessere (IT-)Welt“ auf [heise.de](https://www.heise.de) veröffentlicht.

Langlebig, ressourcensparsam und offen. Gestaltungsoptionen für nachhaltige Hard- und Software

von Johanna Pohl, Anja Höfner, Erik Albers, Friederike Rohde

Die Herstellung und Nutzung digitaler Technologien und Dienste ist mit ökologisch und sozial problematischen Entwicklungen verbunden. Diesen hängen sowohl mit der Art und Weise der Herstellung, Nutzung und Entsorgung von IKT-Geräten als auch mit der Gestaltung und Nutzung der Software und dem damit verbundenen Ausmaß des Datenverkehrs zusammen. In diesem Diskussionspapier wollen wir aufzeigen, wie vielfältig diese Einflussfaktoren miteinander verflochten sind und welche grundlegenden Ansatzpunkte für eine nachhaltige Gestaltung von Hardware und Software bei den politischen Weichenstellungen berücksichtigt werden müssen.

Der Einsatz IKT-basierter Technologien und Dienste macht derzeit etwa 4 bis 7 Prozent des weltweiten Strombedarfs aus und bis 2030 wird mit einem Anstieg auf bis zu 15 Prozent gerechnet (Andrae 2019; Malmodin et al. work in progress). Entsprechend sieht es mit den CO₂-Emissionen dieses Sektors aus, die sich im Jahr 2018 auf 2,5 bis 3 Prozent der globalen Treibhausgasemissionen beliefen und bis 2030 sogar auf einen Anteil von bis zu 8 Prozent anwachsen können (Belkhir and Elmeligi 2018). Der Energie- und Ressourcenverbrauch sowohl für die Produktion von Endgeräten, als auch den Betrieb von Geräten, Netzen und Rechenzentren ist also erheblich. Jährlich steigt die Anzahl an Geräten weltweit um durchschnittlich 10 Prozent, wobei insbesondere das Wachstum an vernetzten Geräten des Inter-

net der Dinge besonders stark zunimmt (Cisco 2016; Cisco 2019). Doch nicht nur Produktion und Betrieb von Hardware sondern auch die Gestaltung und der Betrieb von Software haben bedeutende Auswirkungen auf den Gesamtenergieverbrauch von IKT (erste Untersuchungen siehe z.B. Duboc et al. 2019; Kern et al. 2015; Naumann et al. 2011).

Der Energie- und Ressourcenverbrauch von digitalen Geräten und Anwendungen ergibt sich in einem vielschichtigen Zusammenwirken zwischen der Ausgestaltung, dem Einsatz und den Nutzungsmustern von Hardware und Software. Deshalb müssen die materielle (Energie und Ressourcen zur Produktion, Betrieb und Entsorgung von Hardware) und die immaterielle Basis (z.B. Software, Informationen, Wissen etc.) der Digitalisierung stärker zusammengedacht werden, wenn wir eine nachhaltige Digitalisierung erreichen wollen. Bei der nachhaltigen Erzeugung und Nutzung von Hardware spielen Aspekte wie Langlebigkeit, Reparierbarkeit und der schonende Einsatz von Ressourcen eine entscheidende Rolle. Bei der nachhaltigen Gestaltung und Anwendung von Software geht es neben der Energiesparbarkeit auch um die Langlebigkeit und Verfügbarkeit der Ressource. Offene Standards und Lizenzen können hier wichtige Grundlagen für eine nachhaltige Nutzung von Software und Hardware schaffen. Diese und weitere wesentliche Elemente nachhaltiger Hard- und Softwaregestaltung werden in diesem Arbeitspapier vorgestellt und wurden im Rahmen des 3. Forum Bits & Bäume vertieft mit Expert*innen aus Wissenschaft, Politik und Zivilgesellschaft diskutiert. Die politischen Gestaltungsansätze sind ein wesentliches Ergebnis dieser Diskussionen und können eine Grundlage für die Formulierung eines politischen Gestaltungsrahmens für nachhaltige Hard- und Software schaffen.

1. Langlebigkeit von Hard- und Software

Ein Großteil der Umweltwirkungen von Hardware (z.B. in den Wirkungskategorien Globale Erwärmung, Versauerung, Süßwasser-Eutrophierung oder Humantoxizität) entstehen während dessen Produktion. Insbesondere die Herstellung der Elektronikkomponenten ist sehr umweltintensiv (Hischier et al. 2015) und findet häufig an Standorten mit hohen Kohlestromanteilen im Strommix statt (Manhart et al. 2016). Gleichzeitig steigt die absolute Anzahl der digital vernetzten Geräte weltweit bei stets kürzeren Verwertungszyklen dieser Geräte. Aus ökologischer Perspektive ist die Weiterverwendung bestehender Hardware der Neuanschaffung eines Notebooks oder Smartphones stets vorzuziehen. Insbesondere die Bereitstellung eines neuen Gerätes zieht einen hohen Ressourcenverbrauch nach sich, teilweise benötigen neuere Modelle aufgrund gesteigerter Rechenleistung mehr Energie in der Nutzungsphase (Prakash et al. 2017). Eine zentrale Stellschraube für die ökologisch nachhaltige Gestaltung von Hardware ist die Verlängerung der Lebensdauer der Geräte. Dies kann Hardware-seitig beispielsweise durch modulare Gestaltung und möglichst vollständige Reparierbarkeit unterstützt werden. Ein "[Recht auf Reparatur](#)" wird seit langem gefordert und umfasst Aspekte wie reparaturfreundliches Produktdesign, den Zugang zu Ersatzteilen und den Erhalt der Garantie auch bei Reparatur. Auch die Recyclingfähigkeit muss bereits beim Design der Geräte mitgedacht werden, um z.B. Metalle beim Recycling extrahieren zu können. Die Verwendung von Open Hardware unterstützt ebenfalls die Reparierbarkeit von Geräten, u.a. da jederzeit Baupläne einsehbar sind und einzelne Ersatzteile nachgebaut werden können.

Die Verwendung von Hardware geschieht zudem immer im Zusammenspiel mit Software, beide bedingen sich gegenseitig. Ohne passende Software kann eine Hardware oft nicht länger genutzt werden und umgekehrt. Aktuelle Betriebssysteme beispielsweise werden auf aktuelle Hardware-Konfigurationen ausgerichtet. In dem Moment, in dem der Hersteller jedoch den Support für dieses Betriebssystem einstellt, kann dieses nicht länger sicher benutzt werden. Damit steht auch die zu Grunde liegende Hardware zunächst ohne sicheres Betriebssystem da. Ein danach neu veröffentlichtes Betriebssystem hingegen kann eventuell auf der alten Hardware nicht zum Laufen gebracht werden. So wird

durch mangelnde Interoperabilität von Software und (älterer) Hardware im Zusammenspiel mit dem frühzeitigen Supportende von Software eigentlich noch funktionsfähige Hardware vermehrt vor Ablauf der Produktlebensdauer ersetzt (Manhart et al. 2016). Die Langlebigkeit von Software und ihre Verfügbarkeit in der Zukunft hat damit auch direkten Einfluss auf die Verwendbarkeit heutiger Hardware in der Zukunft.

Dies betrifft auch die nachhaltige Verfügbarkeit der 'Ressource Software' selbst. Heutzutage können bereits viele Dokumente aus vergangenen Jahrzehnten nicht mehr geöffnet oder die zugehörige Software nicht mehr zum Laufen gebracht werden, obwohl die Hardware gleichzeitig immer leistungsfähiger wird. Dies ist meist die Folge einer künstlich erzwungenen Verkürzung der Lebensdauer unserer IKT-Systeme durch proprietäre Lizenzen und Herstellerbindung. Eine nachhaltige Lösung ist die Verwendung von Software unter Freier Lizenz, auch Freie und Open-Source-Software ([FOSS](#)) genannt. Freie Lizenzen gewähren jedem Menschen die uneingeschränkte und zeitlich unbegrenzte Verwendung der Software sowie den Zugang zu ihrem Quellcode. So kann keine Entität ein „Ende des Supports“ für eine FOSS-lizenzierte Software erzwingen oder deren Verfügbarkeit oder Archivierung für die Zukunft unterbinden. Mit offenen Schnittstellen wird zudem Interoperabilität gewährleistet. Inner- und außerhalb des FOSS-Ökosystems ermöglicht die freie Lizenzierung eine vollständige oder modulare Einbindung spezifischer Software-Lösungen im Zusammenspiel mit anderen Systemen. Weiterhin wird die technisch und juristisch einwandfreie Archivierung und Wiederverwendung digitaler Ressourcen im Sinne der digitalen Generationengerechtigkeit gewährleistet.

Um die Langlebigkeit der digitalen Infrastruktur zu unterstützen gilt es von Seiten der Politik sicherzustellen, dass mit öffentlichen Geldern entwickelte Software und Hardware unter einer freien und Open-Source-Lizenz veröffentlicht wird („Public Money Public Code“ bzw. "Public Money Public Hardware"). Die Veröffentlichung von Source Code unter freier Lizenz nach dem Supportende einer Software oder eines Elektrogerätes („Upcycling von Software“) würde einen Meilenstein gegen erzwungene Software-Obsoleszenz darstellen.

2. Energie- und ressourcensparsame Hard- und Software

Geräte und Anwendungen werden relativ immer effizienter, z.B. durch LED-Bildschirmbeleuchtung, sinkende Energieintensität pro Rechenleistung und verbesserte Strommanagementsoftware (Kooimey et al. 2011; Prakash et al. 2017). In der EU Ökodesign-Richtlinie sind dazu gesetzliche Mindestanforderungen formuliert. Labels wie Energy Star oder Blauer Engel bewerten elektronische Geräte nach ihrer Energieeffizienzklasse und bieten somit auch Verbraucher*innen transparente Entscheidungshilfen. Gleichzeitig ist zu beobachten, dass Geräte der Unterhaltungselektronik immer größer werden, Leistung und Bildschirmauflösungen steigen, was absolut betrachtet zu steigenden Energie- und Ressourcenverbräuchen führt (Prakash et al. 2017). Parallel kann auch die absolute Zunahme an Geräten und steigende Energieverbräuche zum Beispiel im Internet der Dinge aufgrund der immer effizienter und damit günstiger werdender Elektronikkomponenten konstatiert werden - ein klassischer Rebound-Effekt. Energie- und ressourcensparsame Hardware zeichnet sich also nicht nur durch relative Ressourcensparsamkeit aus, sondern auch durch ein absolutes Sinken von Energie- und Ressourcenverbräuchen. Es ist also geboten, Effizienzmaßnahmen durch Konsistenz- und Suffizienzstrategien zu flankieren. Für Rechenzentren steht die Bewertung in Effizienzklassen noch ganz am Anfang. Bei der Beurteilung der Energieeffizienz von Rechenzentren sind Faktoren wie Abwärmenutzung, Art der Kühltechnik oder die Serverauslastung entscheidend (Hintemann and Hinterholzer 2018). Es liegen hier erste Methoden zur Energieeffizienzberechnung von Rechenzentren vor (Schödwel et al. 2018).

Die Umweltrelevanz von Software entsteht durch die Beanspruchung von Hardware- und Übertragungskapazitäten (Rechenleistung, Arbeitsspeicher, Netze) bei deren Entwicklung, Nutzung und Deinstallation (Gröger et al. 2018). Auch wenn eine absolute Bezifferung der Relevanz von Software auf den Gesamtenergieverbrauch von IKT noch am Anfang steht, so ergaben Untersuchungen, dass unterschiedliche Softwareprodukte, die die gleichen funktionellen Anforderungen erfüllen, sich signifikant in ihrem Stromverbrauch unterscheiden können (Gröger et al. 2018; Naumann et al. 2011). Im Sinne energie- und ressourcensparmer Software gilt es also, diese so zu gestalten, dass der Strom- und Ressourcenbedarf in der Nutzungsphase minimiert wird. Software-Designprinzipien sollten dies gleich zu Beginn des Software-Lebenszyklus berücksichtigen. Das Umweltbundesamt hat hierzu bereits erste Kriterien für die nachhaltige Gestaltung von Software vorgelegt (Gröger et al. 2018). Kriterien wie die Nutzungsautonomie - darunter die FOSS-Lizenzierung, Offlinefähigkeit und Werbefreiheit - sind wichtige Ansatzpunkte, bei deren Nutzung Verbraucher*innen und Industrie heute bereits mit wenig Aufwand viel erreichen können.

Die Politik sollte dabei unterstützend tätig werden, indem sie Verbraucher*innen mit verpflichtenden Infolabels beim bewussten Konsum hilft und die Industrie bei der gemeinsamen Gestaltung offener Standards unterstützt.

3. Transparente und faire Produktkreisläufe

Endgeräte, Server und Netzwerke bestehen aus einer Vielzahl von endlichen Ressourcen (Hischier et al. 2015; Wäger et al. 2015). Bei steigender Gesamtanzahl der Geräte erhöht sich der Bedarf an Ressourcen für deren Herstellung. Digitale Geräte bestehen neben Plastik, Glas und Keramik aus diversen Metallen, die als Konfliktrohstoffe (INKOTA-netzwerk e.V. 2016) bzw. besorgniserregend eingestuft sind. Geschürft werden Tantal, Wolfram, Gold, Zinn oder Kobalt vor allem in Ländern des Globalen Südens, u.a. im Kongo, in Süd-Afrika, Ruanda, Peru oder Chile oft unter gesundheitsgefährdenden Arbeitsbedingungen, mangelnder Schutzkleidung, massiven Arbeitsrechtsverletzungen, sowie teilweise unter dem Einsatz von Kinderarbeit. Zudem kommt es zu erheblichen Umweltbelastungen durch die Verseuchung von Flüssen, Abholzung und Luftverschmutzungen (Pilgrim et al. 2017). Auch bei der Produktion von digitalen Geräten sind massive Verletzungen von Arbeits- und Menschenrechten, z.B. in chinesischen Fabriken bekannt (Chan 2019). Wie begonnen, so endet auch der Produktlebenszyklus vieler Geräte im Globalen Süden, z.B. in Agbogbloshie in Ghana auf der größten Müllhalde auf dem afrikanischen Kontinent. Auch dort leben und arbeiten Menschen unter menschenunwürdigen Bedingungen und gesundheitlicher Gefährdung, um wiederverwertbare Rohstoffe aus dem Elektroschrott zu gewinnen (Höfner and Frick 2019). Der Produktionsprozess ist zudem von großer Intransparenz geprägt und es ist vielfach nicht nachvollziehbar, welche Bestandteile wo und unter welchen Bedingungen hergestellt wurden oder entsorgt werden.

Auch die Herstellung und Programmierung von Software ist häufig von großer Intransparenz geprägt. Proprietäre Software-Entwicklung liefert fertig kompilierten und verschlossenen Code an Nutzer*innen. Nutzer*innen haben keine Möglichkeit zu überprüfen, ob die Software das tut, was sie vorgibt zu tun. Das Wissen über die Software wird von Unternehmen geheim gehalten, damit können neue Versionen veröffentlicht und alte Versionen für ungültig erklärt werden. Daraus entstehen Abhängigkeiten, die nicht nur die Autonomie der Nutzer*innen beeinträchtigt, sondern auch Einfluss auf die Lebensdauer von Hardware haben kann, wie oben beschrieben. Durch diese Wissensmonopole könnte der Bankrott eines privatwirtschaftlichen Akteurs nicht nur einen enormen Wissensverlust bedeuten, sondern sogar zum Ausfall ganzer Infrastrukturen führen.

Für die Gewährleistung von Nachhaltigkeit in allen Dimensionen braucht es deswegen bei Hardware und Software Transparenz im gesamten Herstellungsprozess. Für Hardware bedeutet das transparente Lieferketten sowie menschenwürdige Arbeitsbedingungen und faire Löhne über die gesamte Lieferkette. Die Verantwortung hierfür kann nicht auf die Nutzer*innen abgewälzt werden, sondern Unternehmen sollten verpflichtet werden, Transparenz in den Lieferketten zu gewährleisten, wie es derzeit verschiedene zivilgesellschaftliche Organisationen in der [Initiative Lieferkettengesetz](#) fordern. Für anfallenden Elektroschrott, z.B. durch defekte Teile, braucht es ein funktionierendes Recyclingsystem, um die wertvollen Inhaltsstoffe in den digitalen Geräten weiterzuverwenden. Elektroschrott darf nicht, wie derzeit, auf unklare Weise entsorgt werden und im Zweifelsfall wieder in die Länder des globalen Südens exportiert werden.

Eine transparente Entwicklung von Software bedeutet, dass der ursprüngliche Quellcode mit allen späteren Änderungen öffentlich nachvollzogen werden kann. Eine freie Lizenzierung des Quellcodes ermöglicht die Verwendung für alle, auch für geschäftliche Zwecke. Damit wird der Monopolisierung von Wissen, sowie gleichzeitig der Monopolstellung einzelner (privatwirtschaftlicher) Akteure vorgebeugt. Freie Lizenzen ermöglichen eine Archivierung und Wiederverwendung von Wissen. Wie im Modell einer Kreislaufwirtschaft können bereits entwickelte Programme oder Versionen wiederbelebt oder weiterentwickelt werden. Transparente Produktionskreisläufe, in denen jeder einzelne Code-Beitrag nachvollziehbar ist, sorgen zudem für mündige und unabhängige Nutzer*innen.

4. Politische Gestaltungsoptionen für nachhaltige Hard- und Software

Die Umweltwirkungen und sozialen Implikationen, die mit Produktion, Betrieb und Entsorgung von Hardware und Software verbunden sind, ergeben sich somit in einem vielschichtigen Zusammenspiel verschiedener Einflussgrößen. Die politische Gestaltung sollten diese zielgerichtet in den Blick nehmen:

- **„Right to Repair“:** Das Recht auf Reparatur muss gesetzlich verankert werden und umfasst die verpflichtende Veröffentlichung aller für die Reparatur relevanten Informationen sowie ein diskriminierungsfreier und dauerhafter Zugang für alle (gewerblichen) Werkstätten und Endnutzer*innen zu allen für die Reparatur relevanten Mitteln und Werkzeugen. Vollständige Nutzungsrechte sowie Gewährleistung müssen erhalten bleiben - auch wenn die Reparatur durch freie zertifizierte Reparaturbetriebe erfolgt und dabei alternative Software oder Betriebssysteme zum Einsatz kommen.
- **„Lizenzierung von Hard- und Software“:** Die Nutzungs- bzw. Eigentumsrechte für Bauanleitungen und Ersatzteile sollen nach Produktionsende für die Allgemeinheit zugänglich unter Freier Lizenz veröffentlicht werden, damit Nutzer*innen und Werkstätten Ersatzteile selber nachbauen können. Um zugehörige Software-Obsoleszenz zu vermeiden gilt es zudem, eine verpflichtende Veröffentlichung von Source Code unter Freier Lizenz nach Supportende einer Software oder eines Elektrogerätes einzuführen sowie das ungehinderte Aufspielen alternativer Software und Betriebssysteme zu ermöglichen.
- **"Transparente und geschlossene Produktkreisläufe":** Für Herstellung von Hardware braucht es transparente Lieferketten sowie menschenwürdige Arbeitsbedingungen und faire Löhne über den gesamten Herstellungsprozess. Unternehmen sollten gesetzlich verpflichtet werden, Transparenz in den Lieferketten zu gewährleisten und menschenrechtliche sowie umweltbezogene Sorgfalt walten zu lassen. Es braucht ein funktionierendes Recyclingsystem, um die

wertvollen Inhaltsstoffe der digitalen Geräte weiterzuverwenden. Für eine transparente Entwicklung von Software soll die Versionsgeschichte des ursprünglichen Quellcodes mit allen Änderungen öffentlich nachvollzogen werden können. Eine freie Lizenzierung von Quellcode ermöglicht eine Verwendung für alle (auch für geschäftliche) Zwecke.

- **"Energie- und Ressourcensparsamkeit"**: Effizienzmaßnahmen digitaler Technik müssen durch Konsistenz- und Suffizienzstrategien flankiert werden, um Rebound-Effekten vorzubeugen. Es müssen verpflichtende Vorgaben eingeführt werden, energie- und ressourcensparsame Software so zu gestalten, dass der Strom- und Ressourcenbedarf in der Nutzungsphase minimiert wird. Ansatzpunkte dafür sind bereits im Blauen Engel für Software vorgelegt worden. Modularisierung und Standardisierung von Hardware trägt zur Vermeidung von Elektroschrott und zur Ressourcensparsamkeit bei. Dies kann auf EU-Ebene durch verpflichtende Vorgaben zur Standardisierung von Elektronikzubehör (u.a. Ladekabel) und Elektronikbestandteilen erreicht werden.
- **"Public Money - Public Code"**: Um öffentliche und nachhaltige digitale Infrastrukturen zu fördern braucht es eine rechtliche Verpflichtung, dass mit öffentlichen Geldern entwickelte Software unter einer Freie-Software- und Open-Source Lizenz veröffentlicht werden. Von der Allgemeinheit bezahlte Anwendungen sollten allen zur Verfügung stehen. Der offene Code ermöglicht sowohl die nachhaltige Gestaltung und lange Nutzung von Software als auch der verwendeten Hardware.
- **"Security by transparency"**: Ausschreibungs- und Beschaffungskriterien für die öffentliche Hand sollen so gestaltet werden, dass sowohl Freie und Open-Source-Software als auch Geräte bevorzugt werden, die offene Schnittstellen und modulare Designs bereitstellen. Die Verwendung offener Standards muss in allen öffentlichen Dienstleistungen verpflichtend werden und noch ausstehende Regulierungen und Standardisierungsprozesse von öffentlicher Hand unterstützt werden. Gerade auch im Bereich der kritischen Infrastruktur gilt es einen Paradigmenwechsel hin zu Freier und Open-Source-Software anzustreben.

Quellenverzeichnis

- Andrae, Anders S G (2019): Projecting the chiaroscuro of the electricity use of communication and computing from 2018 to 2030. *Preprint*: 1–23.
- Belkhir, Lotfi and Ahmed Elmeligi (2018): Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations. *Journal of Cleaner Production* 177 (March): 448–463.
- Chan, Jenny (2019): Biss in den sauren Apfel: Zu den Arbeitsbedingungen vom Apple-Lieferanten Foxconn in China. In: *Was Bits und Bäume verbindet: Digitalisierung nachhaltig gestalten*, ed. Anja Höfner and Vivian Frick, S. 19–22. München: oekom.
- Cisco (2016): Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2015–2020.
- Cisco (2019): Cisco Visual Networking Index: Forecast and Trends, 2017–2022.
- Duboc, Leticia, Stefanie Betz, Birgit Penzenstadler, Sedef Akinli Kocak, Ruzanna Chitchyan, Ola Leifler, Jari Porras, Norbert Seyff and Colin C. Venters (2019): Do we Really Know What we are Building? Raising Awareness of Potential Sustainability Effects of Software Systems in Requirements Engineering. In: *2019 IEEE 27th International Requirements Engineering Conference (RE)*, S. 6–16. Event: 2019 IEEE 27th International Requirements Engineering Conference (RE), September, Jeju Island, Korea (South). <https://ieeexplore.ieee.org/document/8920518/>.
- Gröger, Jens, Andreas Köhler, Stefan Naumann, Andreas Filler, Achim Guldner, Eva Kern, Lorenz M Hilty and Yuliy Maksimov (2018): Entwicklung und Anwendung von Bewertungsgrundlagen für ressourceneffiziente Software unter Berücksichtigung bestehender Methodik. Dessau-Roßlau: UBA.
- Hintemann, Ralph and Simon Hinterholzer (2018): Technology radars for energy-efficient data centers: A transdisciplinary approach to technology identification, analysis and evaluation. In: *World Congress on Sustainable Technologies, Cambridge: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*. Event: World Congress on Sustainable Technologies, Cambridge.
- Hischier, Roland, Vlad C. Coroama, Daniel Schien and Mohammad Ahmadi Achachlouei (2015): Grey Energy and Environmental Impacts of ICT Hardware. In: *ICT Innovations for Sustainability*, ed. Lorenz M. Hilty and Bernard Aebischer, 310: S. 171–189. Cham: Springer International Publishing.
- Höfner, Anja and Vivian Frick, eds. (2019): *Was Bits und Bäume verbindet. Digitalisierung nachhaltig gestalten. Dokumentation der Konferenz "Bits & Bäume"*. München: oekom.
- INKOTA-netzwerk e.V. (2016): Infoblätter Ressourcengerechtigkeit. Nr. 2 "Konfliktrohstoffe." Berlin: INKOTA-netzwerk e.V.
- Kern, Eva, Markus Dick, Stefan Naumann and Tim Hiller (2015): Impacts of software and its engineering on the carbon footprint of ICT. *Environmental Impact Assessment Review* 52 (April): 53–61.
- Koomey, Jonathan, Stephen Berard, Marla Sanchez and Henry Wong (2011): Implications of historical trends in the electrical efficiency of computing. *IEEE Annals of the History of Computing* 33, Nr. 3: 46–54.
- Malmodin, Jens, Dag Lunden and Nina Lövehagen (work in progress): ICT energy and carbon footprint 2015-2018, an update to the study "The energy and carbon footprint of the global ICT and E&M sectors 2010 - 2015".
- Manhart, Andreas, Markus Blepp, Corinna Fischer, Kathrin Graulich, Siddharth Prakash, Rasmus Priess, Tobias Schleicher and Maria Tür (2016): Resource Efficiency in the ICT Sector. Final Report. Hamburg: Greenpeace.
- Naumann, Stefan, Markus Dick, Eva Kern and Timo Johann (2011): The GREENSOFT Model: A reference model for green and sustainable software and its engineering. *Sustainable Computing: Informatics and Systems* 1, Nr. 4 (1. December): 294–304.
- Pilgrim, Hannah, Merle Groneweg and Michael Reckordt (2017): Ressourcenfluch 4.0: Die sozialen und ökologischen Auswirkungen von Industrie 4.0 auf den Rohstoffsektor. Berlin: PowerShift.
- Prakash, Siddharth, Jens Gröger, Tamina Hipp, Ingo Rodem, Silke Borgstedt, Alexander Schlösser, Lutz Stobbe, Marina Proske, Hannes Riedel, Perrine Chancerel, et al. (2017): Ermittlung und Erschließung des Energie- und Ressourceneffizienzpotenzials von Geräten der Unterhaltungselektronik. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- Schödwell, Björn, Dr Rüdiger Zarnekow, Ran Liu, Jens Gröger and Marc Wilkens (2018): Kennzahlen und Indikatoren für die Beurteilung der Ressourceneffizienz von Rechenzentren und Prüfung der praktischen Anwendbarkeit. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- Wäger, Patrick A., Roland Hischier and Rolf Widmer (2015): The Material Basis of ICT. In: *ICT Innovations for Sustainability*, ed. Lorenz M. Hilty and Bernard Aebischer, 310: S. 209–221. Cham: Springer International Publishing.

Zitieren als:

Pohl, Johanna, Anja Höfner, Erik Albers und Friederike Rohde (2020): Langlebig, ressourcensparsam und offen. Gestaltungsoptionen für nachhaltige Hard- und Software. Forum Bits & Bäume Diskussionspapier, Berlin.



www.nachhaltige-digitalisierung.de