

## Rechenzentren 2018

### Wachstumsschub durch Cloud Computing

# Effizienzgewinne reichen nicht aus: Energiebedarf der Rechenzentren steigt weiter deutlich an

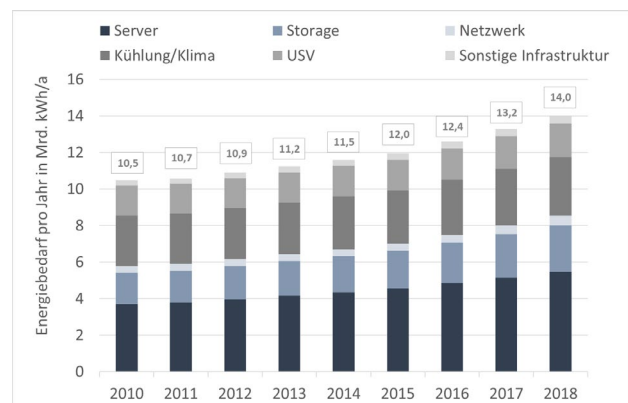
Dr. Ralph Hintemann

Auch im Jahr 2018 ist der Strombedarf der Rechenzentren in Deutschland wieder deutlich angestiegen. Im Vergleich zum Vorjahr erhöhte sich der Bedarf an elektrischer Energie durch Server und Rechenzentren um 6% auf 14 Mrd. kWh. Für dieses Wachstum ist vor allem der starke Ausbau von Cloud Computing Kapazitäten in Deutschland verantwortlich. Insbesondere im Großraum Frankfurt, aber auch an anderen Standorten in Deutschland, wurden erhebliche neue Rechenzentrumskapazitäten aufgebaut. Auch für die Zukunft ist damit zu rechnen, dass sich diese Entwicklung fortsetzt. Trends wie Edge Computing und Künstliche Intelligenz werden voraussichtlich zu einem deutlichen Ausbau der Rechenzentrumsinfrastrukturen in Deutschland, Europa und auch weltweit führen. Wenn es nicht gelingt, die vorhandenen Effizienzpotenziale zu realisieren, wird der Energiebedarf der Rechenzentren weiter deutlich ansteigen.

Zu diesen Ergebnissen kommt die aktuelle Untersuchung des Borderstep Instituts zur Entwicklung des Energiebedarfs der Rechenzentren in Deutschland.

Zwar gab es in den vergangenen Jahren sehr deutliche Verbesserungen bei der Energieeffizienz der Rechenzentren, der stark steigende Bedarf an zentraler Rechenleistung hat aber dazu geführt, dass der Energiebedarf in den Rechenzentren in Deutschland weiterhin angestiegen ist (**Abbildung 1**). Insbesondere die IT-Komponenten (Server, Storage und Netzwerk) benötigen mit 8,5 Mrd. kWh im Jahr 2018 deutlich mehr elektrische Energie als im Jahr 2010 (5,8 Mrd. kWh). Der durchschnittliche PUE-Wert<sup>1</sup>

der Rechenzentren in Deutschland sank zwischen 2010 und 2018 von 1,98 auf 1,70<sup>2</sup>. Damit steigerte sich die Effizienz der Rechenzentrumsinfrastruktur im Durchschnitt um 16%.



**Abbildung 1:** Energiebedarf der Server und Rechenzentren in Deutschland in den Jahren 2010 bis 2018 (Quelle: Borderstep)

Setzen sich die Trends der Vergangenheit fort, ist damit zu rechnen, dass der Energiebedarf von Rechenzentren in Deutschland weiter ansteigt und sich bis zum Jahr 2030 um 50% im Vergleich zum Jahr 2018 erhöht. Diese Entwicklung muss aber nicht zwangsläufig so eintreten. Im Rahmen des Projektes TEMPRO wurden mehr als 60 neue energie- und ressourcensparende Technologien analysiert und bewertet (Hintemann & Hinterholzer, 2018). Ei-

<sup>1</sup> Der Wert der Power Usage Effectiveness (PUE-Wert) gibt das Verhältnis des Jahresenergiebedarfs des gesamten Rechenzentrums zum Jahresenergiebedarf der IT des Rechenzentrums an.

<sup>2</sup> Bei diesen Werten sind die Stand-Alone-Server, die im Normalfall ohne eigene Klimatisierung betrieben werden, nicht in die Berechnung einbezogen. Unter Berücksichtigung der Stand-Alone-Server hat sich der durchschnittliche PUE-Wert in Deutschland von 1,82 im Jahr 2010 auf 1,63 im Jahr 2018 verbessert.

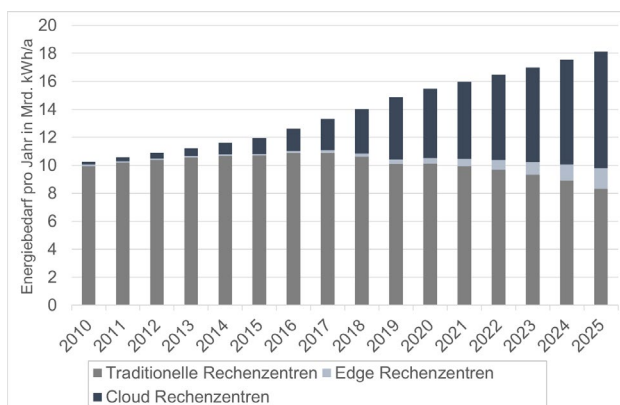
nige besonders erfolgversprechende Technologien wurden von den Projektpartnern bereits prototypisch umgesetzt.

Gelingt es, die vorhandenen technischen Effizienzpotenziale zu nutzen, so könnte der Energiebedarf der Rechenzentren in Deutschland trotz des starken Ausbaus der Rechenzentrumsinfrastrukturen bis zum Jahr 2030 sogar um 25% gesenkt werden, wie im Rahmen des TEMPRO-Projektes ermittelt wurde.

### Cloud und Edge Computing, Künstliche Intelligenz: Energiebedarf der Rechenzentren wird voraussichtlich weiter ansteigen

Die zunehmende Digitalisierung, und damit einhergehende neue Anwendungen wie z.B. im Bereich der Künstlichen Intelligenz (KI), aber auch die deutliche Zunahme der Kapazitäten für Cloud und Edge Computing werden zu einem steigenden Bedarf an Rechenzentrumsinfrastrukturen führen.

Das Wachstum im Rechenzentrumsmarkt wird vor allem durch die stark zunehmende Nutzung von Cloud Services getrieben. Insbesondere internationale Cloud-Computing-Anbieter bauen ihre Rechenzentrumskapazitäten aktuell in Deutschland sehr stark aus. Aufgrund von Größenvorteilen, besonders effizienter Rechenzentrumsinfrastruktur und einer typischerweise hohen Serverauslastung sind Cloud-Computing-Rechenzentren oft deutlich effizienter als traditionelle Rechenzentren (Bizo, 2019; Shehabi, Smith, Masanet & Koomey, 2018). Bisher werden Cloud Rechenzentren in Deutschland zusätzlich zu den bestehenden traditionellen Rechenzentren aufgebaut. Der Abbau traditioneller on-premises-Rechenzentren<sup>3</sup> ist kaum festzustellen. Dies führt dazu, dass trotz der höheren Effizienz von Cloud-Computing-Lösungen der Energiebedarf der Rechenzentren in Summe weiter ansteigt (**Abbildung 2**).



**Abbildung 2:** Entwicklung der IT-Fläche der Rechenzentren in Deutschland mit Anteil Cloud-Rechenzentren in den Jahren 2010 bis 2018 und Prognose bis 2025 (Quelle: Borderstep)

Regional profitiert insbesondere der Großraum Frankfurt vom Wachstum im Bereich Cloud Computing. Aufgrund

der guten Netzwerkanbindung durch den DE-CIX und der räumlichen Nähe zu den dort bereits vorhandenen Cloud-Kapazitäten ist Frankfurt oft erste Wahl bei Neubauten von Rechenzentren. Dies bestätigen auch die Analysten des Immobiliendienstleisters CBRE, die aktuell den Raum Frankfurt als am stärksten wachsenden Markt in Europa sehen. In Frankfurt sollen in den nächsten zwei Jahren die meisten zusätzlichen Rechenzentrumskapazitäten in Europa aufgebaut werden (CBRE, 2020).

Künftig werden auch Edge-Rechenzentren einen zunehmenden Anteil am Energiebedarf haben. Im Jahr 2025 werden die Edge-Rechenzentren in Deutschland voraussichtlich 1,5 Mrd. kWh an elektrischer Energie benötigen. Mit dem weiteren Ausbau von 5G-Mobilfunknetzen und Edge-Computing-Anwendungen in Bereichen wie Industrie 4.0-Anwendungen, Autonomes Fahren und Smart City ist damit zu rechnen, dass der Energiebedarf von Edge Rechenzentren bis zum Jahr 2030 auf etwa 4,5 Mrd. kWh/a ansteigt. Das wären über 20% des Energiebedarfs der Rechenzentren im Jahr 2030. In einem Szenario mit verstärktem Ausbau von Edge Computing wäre nach Berechnungen im Projekt TEMPRO sogar ein Anteil von 30% am Energiebedarf der Rechenzentren möglich.

Auch neue Anwendungen insbesondere im Bereich der Künstlichen Intelligenz können zu einem zunehmenden Energiebedarf der Rechenzentren führen. KI durchdringt immer mehr den Lebensraum des Menschen (Reinsel, Gantz & Rydning, 2018; Schneider & Ziyal, 2019; Walsh, 2018). KI-Lösungen finden sich überall, vom Wohnzimmer mit Spracherkennungslösungen über Cloud-Lösungen für Deep-Learning-Anwendungen bis hin zum Einsatz in kritischen Infrastrukturen (z. B. in effizienten und nachhaltigen Energienetzmanagement-Systemen). Diese Entwicklung hat vielfältige Umweltwirkungen. Zum einen bietet KI vielfältige Chancen unsere Lebens- und Arbeitswelt nachhaltiger zu gestalten. Es existieren vielversprechende Anwendungsfelder insbesondere zum besseren Systemverständnis von Erde, Klima und Umwelt, sowie in den Bereichen Landwirtschaft, Energie und Mobilität (Jetzke, Richter, Ferdinand & Schaat, 2019). Mit den wachsenden Erfolgen und dem Erschließen immer neuer Anwendungsgebiete steigt aber auch der Ressourcenbedarf von KI-Lösungen. Vor allem Deep-Learning-Anwendungen, Simulationen und Prognosen haben teilweise enorme Anforderungen an Rechenleistungen und benötigen große Mengen an Energie und Ressourcen. Forscher am MIT haben errechnet, dass das Training einer einzelnen KI-Anwendung zur Spracherkennung fünfmal so viel CO<sub>2</sub> erzeugt wie ein Auto während seiner gesamten Lebensdauer (Hao, 2019; Strubell, Ganesh & McCallum, 2019).

Gerade wegen der großen Potenziale von KI und der Möglichkeit des Zugriffs auf KI-Anwendungen von jedem Smartphone, oder anderen intelligenten Geräten wird davon ausgegangen, dass die Nutzung von KI-Technologien

<sup>3</sup> On Premises: in den eigenen Räumlichkeiten, vor Ort oder lokal

auch in Zukunft extrem zunimmt (Hintemann & Hinterholzer, 2019). Allein im Zeitraum von 2016 bis 2021 sollen sich die Workloads für den Bereich „Database/Analytics/IOT“ in den Rechenzentren weltweit um den Faktor 2,5 erhöhen (Cisco, 2018).

### Internationale Entwicklung: Studien geben ein unterschiedliches Bild ab

Analysiert man die international verfügbaren Studien und Publikationen zum Energiebedarf der Rechenzentren, so ergibt sich kein einheitliches Bild. Einige Forscher gehen weltweit von einem enorm ansteigenden Energiebedarf aus. Dieser könnte sich von 200 Mrd. kWh im Jahr 2010 auf 2.000 bis 3.000 Mrd. kWh bis zum Jahr 2030 erhöhen (Andrae, 2019; Andrae & Edler, 2015; Belkhir & Elmeligi, 2018; The Shift Project, 2019). In anderen Studien wurde dagegen ein nahezu konstanter Energiebedarf der Rechenzentren in den vergangenen Jahren berechnet (IEA, 2017; Masanet, Shehabi, Lei, Smith & Koomey, 2020; Shehabi et al., 2018). Für das Jahr 2020 reichen die Berechnungen bspw. von 200 Mrd. kWh bis zu 900 Mrd. kWh.

Die große Bandbreite der Berechnungsergebnisse zeigt insbesondere, dass auf dem Gebiet des Energiebedarfs von Rechenzentren noch eine großer Forschungs- und Informationsbedarf besteht. Aus Sicht von Borderstep sind weder die pessimistischen Berechnungen mit sehr hohen Energiebedarfen noch die optimistischen Berechnungen mit einem seit Jahren fast konstanten Energiebedarf plausibel. Die pessimistischen Berechnungen lassen sich nicht mit den bekannten Zahlen zu Hardwareverkäufen und -ausstattungen in Rechenzentren belegen. Gegen einen fast konstanten Energiebedarf der Rechenzentren sprechen insbesondere folgende Sachverhalte:

- In einer Vielzahl unabhängiger Studien (CBEI, 2019; Digiconomist, 2019; Kamiya, 2019; Rauchs et al., 2018) wurde berechnet, dass allein für Bitcoin Mining im Jahr 2019 etwa 60 bis 70 Mrd. kWh elektrische Energie benötigt wurde. Werden hierzu noch weitere Kryptowährungen gezählt, so kann angenommen werden, dass aktuell für das Mining von Krypto-Währungen 70 bis 90 Mrd. kWh/a elektrische Energie benötigt wird.
- Weltweit werden - insbesondere von Hyperscale Cloud Anbietern - sehr viele große und mittelgroße neue Rechenzentren gebaut. Seit Jahren werden nach Angaben von Analysten Rekorde für den Neubau von Rechenzentren aufgestellt. Allein an den vier Rechenzentrumsstandorten London, Frankfurt, Paris und Amsterdam haben sich die Rechenzentrumskapazitäten seit 2010 etwa vervierfacht (CBRE, 2020; CBRE Global Corporate Services, 2017).
- Bisher wurden in Deutschland und Europa kaum Kapazitäten an On-Premises-Rechenzentren ab-

gebaut. Aktuell wird sogar mit vermehrter Nutzung von Hybrid-Cloud-Lösungen ein Trend ausgemacht, dass Daten aus der Cloud zurück in das eigene Rechenzentrum migriert werden (Alffen, 2019; VansonBourne, 2019).

- Seit 2010 hat sich die Zahl der Server weltweit um etwa 50% erhöht. Die Zahl der weltweiten Serververkäufe ist insbesondere in den Jahren 2018 und 2019 sehr deutlich angestiegen (Gartner, 2019, 2020; IDC, 2020).
- Insbesondere im asiatischen Markt wachsen die Kapazitäten der Rechenzentren besonders stark. Ein aktueller Report gibt allein für China einen Energiebedarf der Rechenzentren von 161 Mrd. kWh im Jahr 2018 an (Greenpeace & North China Electric Power University, 2019).
- Auch der europäische Rechenzentrumsmarkt wächst sehr deutlich. Verschiedene wissenschaftliche Untersuchungen gehen davon aus, dass der Energiebedarf der Rechenzentren in Europa deutlich angestiegen ist (Bio by Deloitte & Fraunhofer IZM, 2016; Hintemann, 2019; Prakash, Baron, Ran, Proske & Schlösser, 2014). Die Studien deuten darauf hin, dass im Jahr 2020 der Energiebedarf der Rechenzentren in Europa um etwa 30% über dem Energiebedarf im Jahr 2010 liegt.

Nach Abschätzungen des Borderstep Instituts lag der Energiebedarf der Rechenzentren weltweit im Jahr 2018 bei etwa 400 Mrd. kWh.

### Methodik der Untersuchung

Die vorliegende Untersuchung entstand im Rahmen des Projektes TEMPRO - „Total Energy Management for Professional Data Centers“.

Als Rechenzentren gelten nach der zugrundeliegenden Systematik alle abgeschlossenen räumlichen Einheiten wie Serverschränke, Serverräume, Gebäudeteile oder ganze Gebäude, in denen mindestens drei physikalische Server installiert sind. Die Entwicklung der Rechenzentrumskapazitäten wird insbesondere auf Basis der Serverausstattung in den Rechenzentren berechnet. Hierbei werden auch die unterschiedlichen Leistungsklassen von Servern berücksichtigt.

Die Berechnungen erfolgen mit Hilfe eines umfangreichen Strukturmodells der Rechenzentrumslandschaft in Deutschland, das am Borderstep Institut entwickelt wurde und jährlich aktualisiert wird (Fichter & Hintemann, 2014; Hintemann, 2017a; Hintemann, Fichter & Stobbe, 2010; Hintemann & Hinterholzer, 2019; Stobbe et al., 2015). In dem Modell sind die Rechenzentren in Deutschland in unterschiedlichen Größenklassen in ihrer Ausstattung mit verschiedenen Servertypen, Speichersystemen und Netzwerkinfrastrukturen beschrieben. Dabei

werden auch die Altersstruktur der Server und die Energiebedarfe der verschiedenen Servertypen in unterschiedlichen Betriebszuständen berücksichtigt. Außerdem sind die Rechenzentrumsinfrastrukturen wie Klimatisierung, Stromversorgung, USV, etc. für unterschiedliche Größen- und Redundanzklassen modelliert.

Für die Berechnungen wurden insbesondere folgende Quellen genutzt:

- Studie „Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs in Deutschland“ - Studie von Fraunhofer IZM und Borderstep im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (Stobbe et al., 2015).
- Aktuelle Ergebnisse von Untersuchungen zur Entwicklung des Rechenzentrumsmarktes (CBRE, 2018, 2020; CBRE Global Corporate Services, 2017; Cisco, 2015, 2016; Gartner, 2020; Hintemann, 2014, 2017b; Hintemann & Clausen, 2018a, 2018b; Hintemann, Fichter & Schlitt, 2014; Howard-Healy, 2018)
- Daten des Marktforschungsinstituts Techconsult zur Marktentwicklung bei Server, Storage und Netzwerkkomponenten (eanalyzer) (Techconsult, 2014, 2015, 2016)
- Daten der Marktforschungsinstitute IDC und EITO zur Marktentwicklung bei Servern in Deutschland und Europa (EITO, 2014; IDC, 2018)
- Wissenschaftliche Literatur und Herstellerinformationen zur Entwicklung des Energieverbrauchs von Servern, Speicher- und Netzwerkprodukten und bei weiteren Effizienztechnologien für Rechenzentren

## Quellen:

- Alffen, G. (2019, Mai 20). Cloud-Repatriation - Warum migrieren Unternehmen aus der Public Cloud zurück? *silicon.de*. Zugriff am 19.3.2020. Verfügbar unter: <https://www.silicon.de/experten-tipp/cloud-repatriation-warum-migrieren-unternehmen-aus-der-public-cloud-zurueck>
- Andrae, A. S. G. (2019). Projecting the chiaroscuro of the electricity use of communication and computing from 2018 to 2030.
- Andrae, A. S. G. & Edler, T. (2015). On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030. *Challenges*, 6(1), 117–157. <https://doi.org/10.3390/challe6010117>
- Belkhir, L. & Elmelig, A. (2018). Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations. *Journal of Cleaner Production*, 177, 448–463.
- Bio by Deloitte & Fraunhofer IZM. (2016). *Ecodesign Preparatory Study on Enterprise Servers and Data Equipment*. Brussels. Zugriff am 22.1.2018. Verfügbar unter: <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/6ec8bbe6-b8f7-11e5-8d3c-01aa75ed71a1>
- Bizo, D. (2019). *The Carbon Reduction Opportunity of Moving to Amazon Web Services*. Zugriff am 20.12.2019. Verfügbar unter: <https://d39w7f4ix9f5s9.cloudfront.net/e3/79/42bf75c94c279c67d777f002051f/carbon-reduction-opportunity-of-moving-to-aws.pdf>
- CBECI. (2019). Methodology - Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index (CBECI). Zugriff am 31.10.2019. Verfügbar unter: <https://www.cbeci.org/methodology/>
- CBRE. (2018, März 21). Nachfrage Leistung europäischer Rechenzentren übersteigt erneut 100 MW-Wert. *Nachgefragte Leistung europäischer Rechenzentren übersteigt erneut 100 MW-Wert*. Zugriff am 4.4.2018. Verfügbar unter: <http://news.cbre.de/nachgefragte-leistung-europaischer-rechenzentren-ubersteigt-erneut-100-mw-wert>
- CBRE. (2020). *Europe Data Centres Q4 2019*. Zugriff am 19.3.2020. Verfügbar unter: <https://www.cbre.de/en/global/research-and-reports/featured-reports-global/featured-reports-emea>
- CBRE Global Corporate Services. (2017). *European Data Centres Market Review. Q4 2016*. London. Zugriff am 10.6.2017. Verfügbar unter: <https://www.cbre.de/de-de/research/European-Data-Centres-Market-View-Q4-2016>
- Cisco. (2015). *Cisco Global Cloud Index: Forecast and Methodology 2014-2019*. Verfügbar unter: [http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/global-cloud-index-gci/Cloud\\_Index\\_White\\_Paper.pdf](http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/global-cloud-index-gci/Cloud_Index_White_Paper.pdf)
- Cisco. (2016). *Cisco Global Cloud Index: Forecast and Methodology 2015-2020*. Zugriff am 10.10.2017. Verfügbar unter: <https://www.cisco.com/c/dam/en/us/solutions/collateral/service-provider/global-cloud-index-gci/white-paper-c11-738085.pdf>
- Cisco. (2018). *Cisco Global Cloud Index: Forecast and Methodology 2016-2021*. Zugriff am 7.2.2018. Verfügbar unter: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/global-cloud-index-gci/white-paper-c11-738085.pdf>
- Digiconomist. (2019). Bitcoin Energy Consumption Index. *Digiconomist*. Zugriff am 12.4.2019. Verfügbar unter: <https://digiconomist.net/bitcoin-energy-consumption>
- EITO. (2014). *EITO Costumized Report for Borderstep*. Berlin: EITO.
- Fichter, K. & Hintemann, R. (2014). Beyond Energy: Material Stocks in Data Centers, Taking Resource Efficiency into account in Green IT Strategies for Data Centers. *Journal of Industrial Ecology*, (im Erscheinen). <https://doi.org/DOI: 10.1111/jiec.12155>
- Gartner. (2019, März 18). Gartner Says Worldwide Server Revenue Grew 17.8 Percent in the Fourth Quarter of 2018, While Shipments Increased 8.5 Percent. *Gartner*. Zugriff am 19.3.2020. Verfügbar unter: <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2019-03-18-gartner-says-worldwide-server-revenue-grew-17-8-per-c>
- Gartner. (2020, März 19). Gartner Says Worldwide Server Revenue Grew 5.1% in the Fourth Quarter of 2019, While Shipments Increased 11.7%. *Gartner*. Zugriff am 19.3.2020. Verfügbar unter: <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2020-03-19-gartner-says-worldwide-server-revenue-grew-5-percent-in-the-fourth-quarter-of-2019-while-shipments-increased-11-percent>
- Greenpeace & North China Electric Power University. (2019). *Powering the Cloud: How China's Internet Industry Can Shift to Renewable Energy (Summary)*. Zugriff am 29.2.2020. Verfügbar unter: [https://secured-static.greenpeace.org/eastasia/PageFiles/299371/Powering%20the%20Cloud%20\\_%20English%20Briefing.pdf?\\_ga=2.134490865.1643020916.1584627591-1230699852.1584179778](https://secured-static.greenpeace.org/eastasia/PageFiles/299371/Powering%20the%20Cloud%20_%20English%20Briefing.pdf?_ga=2.134490865.1643020916.1584627591-1230699852.1584179778)
- Hao, K. (2019, Juni 6). Training a single AI model can emit as much carbon as five cars in their lifetimes - MIT Technology Review. Zugriff am 24.9.2019. Verfügbar unter: <https://www.technologyreview.com/s/613630/training-a-single-ai-model-can-emit-as-much-carbon-as-five-cars-in-their-lifetimes/>
- Hintemann, R. (2014). Consolidation, Colocation, Virtualization, and Cloud Computing – The Impact of the Changing Structure of Data Centers on Total Electricity Demand. In L.M. Hilty & B. Aebischer (Hrsg.), *ICT Innovations for Sustainability. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Hintemann, R. (2017a). *Trotz verbesserter Energieeffizienz steigt der Energiebedarf der deutschen Rechenzentren im Jahr 2016*. Berlin: Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit. Verfügbar unter: [https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2017/03/Borderstep\\_Rechenzentren\\_2016.pdf](https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2017/03/Borderstep_Rechenzentren_2016.pdf)
- Hintemann, R. (2017b). *Energieeffizienz und Rechenzentren in Deutschland – weltweit führend oder längst abgehängt? - Präsentation*. Berlin: Netzwerk energieeffiziente Rechenzentren - NeRZ. Zugriff am 25.10.2017. Verfügbar unter: <https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2017/07/NeRZ-Studie-Rechenzentrumsmarkt-30-06-2017.pdf>
- Hintemann, R. (2019, September 10). Energy demand of cloud computing, development and trends: Data center energy demand. Gehalten auf der Workshop on research and technological development (R&TD) of energy efficiency in cloud computing. Zugriff am 5.11.2010. Verfügbar unter: <https://www.cloudefficiency.eu/workshop1>
- Hintemann, R. & Clausen, J. (2018a). *Bedeutung digitaler Infrastrukturen in Deutschland. Sozioökonomische Chancen und Herausforderungen für Rechenzentren im internationalen Wettbewerb*. Berlin. Verfügbar unter: [https://www.eco.de/wp-content/uploads/dlm\\_uploads/2018/06/DI\\_Studie.pdf](https://www.eco.de/wp-content/uploads/dlm_uploads/2018/06/DI_Studie.pdf)

- Hintemann, R. & Clausen, J. (2018b). *Potenzial von Energieeffizienztechnologien bei Colocation Rechenzentren in Hessen*. Berlin: Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit. Zugriff am 26.4.2018. Verfügbar unter: <https://www.digitalstrategie-hessen.de/rechenzentren>
- Hintemann, R., Fichter, K. & Schlitt, D. (2014). Adaptive computing and server virtualization in German data centers - Potentials for increasing energy efficiency today and in 2020. In Marx Gómez, Sonnenschein, Vogel, Winter, Rapp & Giesen (Hrsg.), *Proceedings of the 28th Conference on Environmental Informatics - Informatics for Environmental Protection, Sustainable Development and Risk Management* (S. 477–484). Gehalten auf der EnviroInfo 2014 - ICT for Energy Efficiency, Oldenburg: BIS. Zugriff am 25.1.2015. Verfügbar unter: <http://enviroinfo.eu/sites/default/files/pdfs/vol8514/0477.pdf>
- Hintemann, R., Fichter, K. & Stobbe, L. (2010). Materialbestand der Rechenzentren in Deutschland-Eine Bestandsaufnahme zur Ermittlung von Ressourcen- und Energieeinsatz. *Studie im Rahmen des UFO-Plan-Vorhabens "Produktbezogene Ansätze in der Informations- und Kommunikationstechnik "(Förderkennzeichen 370 893 302), Beauftragt vom Umweltbundesamt.*
- Hintemann, R. & Hinterholzer, S. (2018). Technology radars for energy-efficient data centers: A transdisciplinary approach to technology identification, analysis and evaluation. *Sustainable Technologies. World Congress. 2018. (WCST 2018)*. Gehalten auf der World Congress on Sustainable Technologies, Cambridge: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Zugriff am 24.1.2019. Verfügbar unter: [https://www.researchgate.net/publication/330359801\\_Technology\\_radars\\_for\\_energy-efficient\\_data\\_centers\\_A\\_transdisciplinary\\_approach\\_to\\_technology\\_identification\\_analysis\\_and\\_evaluation](https://www.researchgate.net/publication/330359801_Technology_radars_for_energy-efficient_data_centers_A_transdisciplinary_approach_to_technology_identification_analysis_and_evaluation)
- Hintemann, R. & Hinterholzer, S. (2019). Energy Consumption of Data Centers Worldwide - How will the Internet become Green? Gehalten auf der ICT4S, Lappeenranta, Finland. Zugriff am 8.8.2019. Verfügbar unter: [http://ceur-ws.org/Vol-2382/ICT4S2019\\_paper\\_16.pdf](http://ceur-ws.org/Vol-2382/ICT4S2019_paper_16.pdf)
- Howard-Healy, M. (2018). *Co-location Market Quarterly (CMQ) brief - Vortrag auf dem BroadGroup's Knowledge Brunch in Frankfurt*. Broadgroup.
- IDC. (2018). *Server Market and Enterprise Storage Systems By Country 2014-2017*.
- IDC. (2020, März 12). Worldwide Server Market Revenue Grew 7.5% Year Over Year in the Fourth Quarter of 2019, According to IDC. *IDC: The premier global market intelligence company*. Zugriff am 19.3.2020. Verfügbar unter: <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS46132420>
- IEA. (2017). *Digitalization & Energy*. Zugriff am 20.1.2019. Verfügbar unter: <https://www.iea.org/reports/digitalisation-and-energy>
- Jetzke, T., Richter, S., Ferdinand, J.-P. & Schaat, S. (2019). *Künstliche Intelligenz im Umweltbereich: Anwendungsbeispiele und Zukunftsperspektiven im Sinne der Nachhaltigkeit*. No. 56/2019. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/kuenstliche-intelligenz-im-umweltbereich>
- Kamiya, G. (2019, Juli 5). Bitcoin energy use: mined the gap. Zugriff am 25.10.2019. Verfügbar unter: <https://www.iea.org/news-room/news/2019/july/bitcoin-energy-use-mined-the-gap.html>
- Masanet, E., Shehabi, A., Lei, N., Smith, S. & Koomey, J. (2020, Februar 28). Recalibrating global data center energy-use estimates | *Science*. Zugriff am 4.3.2020. Verfügbar unter: <https://science.sciencemag.org/content/367/6481/984>
- Prakash, S., Baron, Y., Ran, L., Proske, M. & Schlösser, A. (2014). *Study on the practical application of the new framework methodology for measuring the environmental impact of ICT - cost/benefit analysis*. Studie. (S. 373). Brussels: European Commission.
- Rauchs, M., Blandin, A., Klein, K., Pieters, G. C., Recanatini, M. & Zhang, B. Z. (2018). 2nd Global Cryptoasset Benchmarking Study. Available at SSRN 3306125.
- Reinsel, D., Gantz, J. & Rydning, J. (2018). *The Digitization of the World. From Edge to Core. IDC (An IDC White Paper, #US44413318)*.
- Schneider, J. & Ziyal, L. K. (2019). *We Need to Talk, AI*.
- Shehabi, A., Smith, S. J., Masanet, E. & Koomey, J. G. (2018). Data center growth in the United States: decoupling the demand for services from electricity use. *Environmental Research Letters*, 13(12).
- Stobbe, L., Hintemann, R., Proske, M., Clausen, J., Zedel, H. & Beucker, S. (2015). *Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs in Deutschland - Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie*. Berlin: Fraunhofer IZM und Borderstep Institut. Verfügbar unter: <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/E/entwicklung-des-ikt-bedingten-strombedarfs-in-deutschland-abschlussbericht,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>
- Strubell, E., Ganesh, A. & McCallum, A. (2019). Energy and Policy Considerations for Deep Learning in NLP.
- Techconsult. (2014). Daten des eanalyzers. Verfügbar unter: [www.eanalyzer.biz](http://www.eanalyzer.biz)
- Techconsult. (2015). Daten des eanalyzers. Verfügbar unter: [www.eanalyzer.biz](http://www.eanalyzer.biz)
- Techconsult. (2016). Daten des eanalyzers. Verfügbar unter: [www.eanalyzer.biz](http://www.eanalyzer.biz)
- The Shift Project. (2019). *LEAN ICT- Towards digital sobriety*. Zugriff am 18.4.2019. Verfügbar unter: <https://theshiftproject.org/en/article/lean-ict-our-new-report/>
- VansonBourne. (2019). *Nutanix Enterprise Cloud Index - Application requirements to drive hybrid cloud growth*. Zugriff am 12.3.2020. Verfügbar unter: [https://www.nutanix.com/enterprise-cloud-index?utm\\_source=sprout&utm\\_medium=social](https://www.nutanix.com/enterprise-cloud-index?utm_source=sprout&utm_medium=social)
- Walsh, T. (2018). *Machines that Think: The future of artificial intelligence*. Prometheus Books.

## Kontakt:

Dr. Ralph Hintemann  
 Gesellschafter und Senior Researcher  
 Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit gemeinnützige GmbH  
 Clayallee 323  
 D-14169 Berlin, Germany  
 Tel. +49.(0)30.306 45-1005  
 Fax +49.(0)30.306 45-1009  
 E-Mail: [hintemann@borderstep.de](mailto:hintemann@borderstep.de)  
[www.borderstep.de](http://www.borderstep.de)