

Softwarearchitektur für die Bewertung des Ressourcenbedarfes in Rechenzentren durch ganzheitliche Ressourceneffizienz

Fernando Penaherrera¹, Alexandra Pehlken², Ralph Hintemann³, Simon Hinterholzer⁴, und Björn Koch⁵


Abstract: Der steigende Energiebedarf der Rechenzentren stellt eine Herausforderung bei der Erreichung der Klimaschutzziele sowie der Realisierung der Energiewende dar. Auch die sogenannte graue Energie – also die Energie, die für Herstellung, Transport, Lagerung und Entsorgung der Komponenten benötigt wird – kann ganz erhebliche Anteile am Gesamtenergiebedarf ausmachen. Dieser Artikel stellt eine selbstentwickelte Modellstruktur vor, welche die graue Energie in Rechenzentren erstmalig berechnet.


Keywords: Softwarearchitektur; graue Energie; Life Cycle Assessment; Rechenzentrum; Materialeffizienz; Recycling

1 Einleitung

Rechenzentren sind aus dem Alltag nicht mehr wegzudenken. Streamingdienste, Automatisierung oder Echtzeitanalysen wie z.B. der Verkehrsdichte sind nur einige von vielen Themen, die wir heute selbstverständlich nutzen. Im Hintergrund laufen die Rechenzentren, die aufgrund der hohen Rechenleistung immer mehr mit ihrem Energiehunger zu kämpfen haben.

Wie eine Reihe von Studien ermittelt hat, sind die ca. 50.000 Rechenzentren [Hi17] mit mehr als 16 TWh für knapp 2,9% des Strombedarfs in Deutschland verantwortlich, obwohl die Effizienz der Rechenzentrumsinfrastrukturen um 21 % gestiegen ist [Hi20], [HH20], [BSB08]. Der steigende Energiebedarf von Rechenzentren wurde in zahlreichen Studien nicht nur für Deutschland, sondern auch für Europa, sowie weltweit dokumentiert [Hi14], [Pr14], [Co14]. Ein Grund hierfür ist insbesondere der stark steigende Bedarf,

¹ OFFIS – Institut für Informatik, Escherweg 2, 26121 Oldenburg, fernandoandres.penaherreravaca@offis.de,  <https://orcid.org/0000-0003-3726-0028>

² OFFIS – Institut für Informatik, Escherweg 2, 26121 Oldenburg, pehlken@offis.de,  <https://orcid.org/0000-0003-1798-8679>

³ Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit, Clayallee 323, D-14169 Berlin, hintemann@borderstep.de,

⁴ Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit, Clayallee 323, D-14169 Berlin, hinterholzer@borderstep.de,

⁵ COAST – Universität Oldenburg, Ammerländerheerstr. 114-118, 26129 Oldenburg, bjoern.koch@uol.de

große Datenmengen zu speichern und zu verarbeiten. Im Jahr 2020 betrug der Anteil des Energiebedarfs der Speichersysteme am Gesamtbedarf ca. 33% des Energiebedarfs der Server [Mo20]. Bei den im Konsortium von TEMPRO (Total Energy Management for Professional Data Centers), einem deutschen Projekt, beteiligten Rechenzentrumsbetreibern liegt der Energiebedarf der Speichersysteme aktuell bei ca. 30% des Gesamtstrombedarfs.

Der steigende Energiebedarf der Rechenzentren stellt eine Herausforderung bei der Erreichung der Klimaschutzziele sowie der Realisierung der Energiewende dar. Verstärkt wird diese Herausforderung noch durch zwei Aspekte. Zum einen ist insbesondere im Bereich der IKT-Produkte mit ihren sehr kurzen Lebenszyklen nicht nur der Energiebedarf in der Nutzungsphase relevant [Ga12]. Auch die sogenannte graue Energie – also die Energie, die für Herstellung, Transport, Lagerung und Entsorgung der Komponenten benötigt wird – kann ganz erhebliche Anteile am Gesamtenergiebedarf ausmachen [FH14]. Dieser Aspekt gewinnt zunehmend an Bedeutung, da die Materialintensität der Rechenzentren steigt. Verbunden mit einem deutlichen Trend zu größeren Rechenzentren ist ein erheblicher Zuwachs von IT-Infrastrukturen wie Server, Speicher und Netzwerkkomponenten zu verzeichnen. Allein die Zahl der Server hat zwischen 2010 und 2018 um 15% zugenommen und wird bis 2025 noch weiter ansteigen [Mo20]. Außerdem gibt es bei Rechenzentren vielfältige Möglichkeiten in die Energienetze der Zukunft integriert zu werden, wie z.B. Abwärmenutzung, Bereitstellung von Regelenergie durch Notstromaggregate, Demand Side Management, usw. Diese Möglichkeiten werden jedoch bis heute praktisch nicht genutzt.

Neben einem immer weiter ansteigenden Energieverbrauch rückt allerdings auch der Ressourcen hunger von Rechenzentren in den Vordergrund. Schon bevor ein Rechenzentrum eine kWh durch Datenverarbeitung oder Speicherung verbraucht hat, ist im Aufbau eines Rechenzentrums sehr viel graue Energie enthalten. Das Forschungsprojekt TEMPRO hat die graue Energie in Rechenzentrum zum ersten Mal empirisch ermittelt und analysiert [Pe20]. Dieser Beitrag baut auf den Erkenntnissen des Forschungsprojektes auf und stellt eine Software-Architektur vor, welche als Bewertungstool für die graue Energie in Rechenzentren dient.

Kapitel 2 zeigt eine Zusammenfassung der Zusammensetzung eines Rechenzentrums. Kapitel 3 beschreibt das vorgeschlagene Softwaretool zur Berechnung von Ressourcenbedarfen eines Rechenzentrums, basierend auf einer dreistufigen Architektur. Kapitel 4 zeigt Ergebnisse der durchgeführten Berechnungen. Kapitel 5 gibt einen Überblick über die Vorteile und Grenzen dieses Tools und stellt zukünftige Arbeiten vor.

2 Allgemeine Zusammensetzung von Rechenzentren

Zur Vergleichbarkeit der massenspezifischen rohstofflichen Zusammensetzung eines Rechenzentrums sollen zur Kategorisierung eines Rechenzentrums Faktoren der

physischen Größe angewendet werden. Die technische Betrachtung der Größe ist über die Zahl der Racks, Zahl der Server, Zahl der Prozessoren, des Stromverbrauchs, die Fläche, Rechenleistung, Speicherleistung oder der Art der Anwendung zu bestimmen [HFS10].

Die höchste Rohstoffrelevanz des Rechenzentrumsinventars liegt in den Geräten, die einen erhöhten Anteil kritischer Rohstoffe aufweisen. Der Anteil und die Vielfalt kritischer Rohstoffe sind vor allem im IKT-Equipment besonders hoch, dem funktionell bedeutendsten Bestandteil des Rechenzentrumsinventars. Dies ist vor allem auf den Anteil der verbauten elektronischen Schaltungen in Form von Leiterplatten zurückzuführen, der in Servern einen Anteil von etwa 15% ausmacht [Pe20]. Der Rohstoffeinsatz aus Computersteuerung und LCD-Bildschirmanzeigen in Geräten der Energieversorgung, Klimatisierung und weiterer Infrastruktur ist vernachlässigbar klein. Abb. 1 repräsentiert die Konfiguration der Komponenten eines Rechenzentrums.

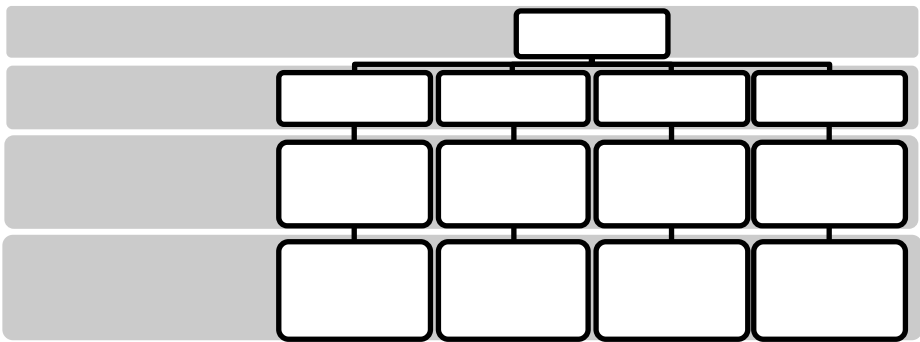


Abb. 1: Komponenten eines Professionellen Rechenzentrums für die Fallstudie.

Den größten Teil der Leiterplatten im IT-Equipment machen, mit einem Anteil von etwa 80 %, die Hauptplatinen (Mainboards) aus. Zudem werden in Servern Leiterplatten in Form von Adapterplatinen mit verschiedenen Anwendungen eingesetzt, die der Hauptplatinen zugeschaltet werden. Auf den Hauptplatinen der Server sind in der Regel Speichermodule und CPU(-Chips) angebracht. Server enthalten abhängig von ihrer Konfiguration weitere Geräte, die als Bauteile der Server betrachtet werden. Diese Geräte, Laufwerke und Netzteile enthalten ebenfalls Platinen, die eine hohe Konzentration an kritischen Materialien aufweisen [Pe20], [Sz18], [HFS10]. Zudem sind auch die Geräte der Netzwerktechnik, wie Switches mit Hauptplatinen ausgestattet. Die Zusammensetzung aller Platinen wird ausgehend von der Zusammensetzung von Hauptplatinen, wie sie in Stand-PCs (zumeist in Nutzung als Clients, seltener als Server) verbaut sind, festgelegt. Da die Platinen die Komponenten im Rechenzentrum darstellen, die die meisten kritischen Rohstoffe mit zum Teil hohen Energiebedarfen in der Gewinnung darstellen, liegt der Fokus dieses Ansatzes auf den Leiterplatten.

Mit Hilfe des Geräteclusters wird die anwendungsbezogene Zusammenstellung des Rechenzentrums-Equipments rohstofflich aufgeschlüsselt und so der Rohstoffbezug hergestellt. Zu beachten ist hierbei, dass die rohstoffliche Aufschlüsselung der Komponenten nur über das Recycling zu erfassen war, da keinerlei Herstellerdaten über

den Inhalt (also der Rohstoffe) verfügbar sind. Daher ist der Stand der Technik aus dem Recycling mit dem Stand der Rechenzentren von vor etwa 2-5 Jahren (je nach Lebensdauer der Komponenten) vergleichbar und schränkt das Modell etwas ein. Die Klimatisierung wurde lediglich über Luftkühlung betrachtet. Zur Differenzierung der individuellen Rechenzentren wird nach dem Hauptkriterium der Serveranzahl unterschieden. Das Cluster dient als Auswertungsgrundlage des Rohstoffpotenzials. Aus dem Untersuchungsmaterial geht das Gewicht der einzelnen Bauteilgruppen, Bauteile und Komponenten hervor. Aus der Datenanalyse geht der Rohstoffgehalt hervor und die damit einhergehenden Informationen über die Rohstofffakten dieser Teile.

3 Softwarearchitektur zur Ermittlung der grauen Energie in Rechenzentren

Ziel der Software-Architektur ist es ein Instrument zu erstellen, mit dessen Hilfe eine ganzheitliche Bewertung des gesamten Material- und Energiebedarfs für den Bau und Betrieb eines Rechenzentrums ermöglicht werden kann. Hierbei werden neben dem Energiebedarf in der Betriebsphase und dem Materialverbrauch sowie dem damit zusammenhängenden Primärenergieverbrauch für die Herstellung der Komponenten des Rechenzentrums ebenso die Einsparpotentiale durch gezieltes Recycling der Komponenten nach der Betriebsphase in die Berechnungen einbezogen. Um all diese Aspekte bewerten zu können, müssen zahlreiche Indikatoren berücksichtigt werden, die den gesamten Energie- und Materialbedarf widerspiegeln und die potenziellen Einsparungen aufgrund von Recycling angemessen darstellen können.

3.1 Methode Life Cycle Assessment und Datenverfügbarkeit

Lebenszyklusanalyse (LCA) ist eine wissenschaftliche Methode, um unter anderem die Erschöpfung natürlicher Ressourcen und ihre Auswirkungen auf das Ökosystem zu bewerten. Durch die Aufstellung der Komponenten werden Modelle erstellt, die Prozessketten von Produkten innerhalb eines Systems darstellen, welche von der Extraktion von Rohstoffen über die Herstellung, den Transport sowie den Betrieb und eine eventuelle Entsorgung reichen. Die Analyse der Flüsse in diesen Modellen ermöglicht die Beurteilung der Umweltauswirkungen [CWP11], [IS06].

In der Regel werden bei elektronischen Geräten selten eine Bill-of-Materials (BoM) vom Hersteller an den Nutzer übermittelt. Ebenso gibt es meistens eine sehr große Diskrepanz zwischen den Informationen, die aus dem BoM abgerufen oder vom Hersteller empfangen werden können. Daher erscheint eine präzise und belastbare LCA auf Grundlage dieser Daten in der Regel nicht möglich. Aus diesem Grund wurden bereits im Projekt TEMPRO eigene Materialanalyse von ausgewählten IKT-Produkten durch Demontage, Probenahme und Laboranalyse erstellt und in mehreren relationalen Datenbanken gesammelt [Pe20], [Sz18], [HFS10]. Diese Laborergebnisse ermöglichen die Beurteilung der

Materialzusammensetzung von Rechenzentrenkomponenten und sind einmalig in der Bewertung von Rechenzentren, da eigene Daten mit Hilfe eines professionellen und lizenzierten Recyclers generiert wurden. Zusätzlich wurden Informationen zu den einzelnen Rohstoffen, wie z.B. die Kritikalität, gesammelt und in getrennten Datenbanken gespeichert [Eu20]. Aktuelle Warenwirtschaftssysteme aus dem Betrieb haben keinen Bezug zum Rohstoffinhalt (z.B. Gramm Gold pro Leiterplatte) und haben auch keinen Bezug zur Kritikalität der Rohstoffe.

In dem vorgestellten Ansatz werden zusätzlich externe Datenbanken eingebunden, um noch bestehende Datenlücken zu schließen. So enthält z.B. dieecoinvent 3.4 Datenbank [We16] die benötigten Informationen zu bereits vorhandenen Prozessen, Komponenten, Energie- und Materialressourcen vorrangig aus dem Herstellungsprozess und der Nutzungsphase. Das Recycling von Serverhardware durch den Anbieter ist meist bereits in Ausschreibungen enthalten, und entfällt nicht zwingend auf den Endkunden. Deswegen wurde das Recycling der Komponenten über eine für diesen Fall spezialisierte Recyclinganlage betrachtet, die eine Monocharge Rechenzentrumschrott im Labor analysierte und uns die Daten bereitstellte. Diese Daten wurden in das Modell integriert. Das Recycling von sogenannten Elektroschrott ist derzeit auf europäischer Ebene gut dokumentiert (Stichwort WEEE) und in Kombination mit den Labordaten in das Modell eingeflossen.

Zur Berechnung der Umweltauswirkungen wurde die open-source Software openLCA ausgewählt, da der Zugriff und die Manipulation der verschiedenen Modellkomponenten über externe Skripts ermöglicht wird [Gr21]. Durch diese Möglichkeit über externe Skripte auf die einzelnen Modellkomponenten zugreifen zu können wird die Anpassung bestehender und die Erstellung neuer Modelle mit aktualisierten Informationen vereinfacht und somit eine schnellere Berechnung und Ergebnisdarstellung ermöglicht. Mit diesem Modell lassen sich zum Beispiel die bereits in der Gewinnung der Rohstoffe inklusive der Produktion der Bauteile emittierten CO₂-Emissionen anzeigen (graue Energie), bevor es überhaupt zum Betrieb kommt.

3.2 Vorgeschlagene Softwarearchitektur

Die vorgeschlagene Softwarearchitektur basiert auf einer klassischen dreistufigen Architektur (three-tier architecture), in der die drei Hauptebenen der Anwendung - die Präsentationsebene (der Benutzerschicht bzw. die GUI), die Anwendungslogik (Anwendungsschicht) und die persistente Speicherung von Daten (die Datenbankschicht) - voneinander getrennt werden, wie Abb. 2 zeigt. Diese Architektur bietet mehrere Vorteile: Zentraler Zugriff auf Datenbanken und Hardware, Zentralsicherheit und Zwischenspeicherung, reduzierter Netzwerkverkehr und Last auf Kundenkonsolen sowie Skalierbarkeit. In diesem Fall wird neben den bereits oben genannten Datenbanken in der Datenbankanwendung und in openLCA in der Anwendungsebene eine webbasierte Anwendung für die Eingabe von Inventarinformationen von Rechenzentren als Präsentationsebene implementiert. Abb. 2 schematisiert diesen Lösungsansatz.

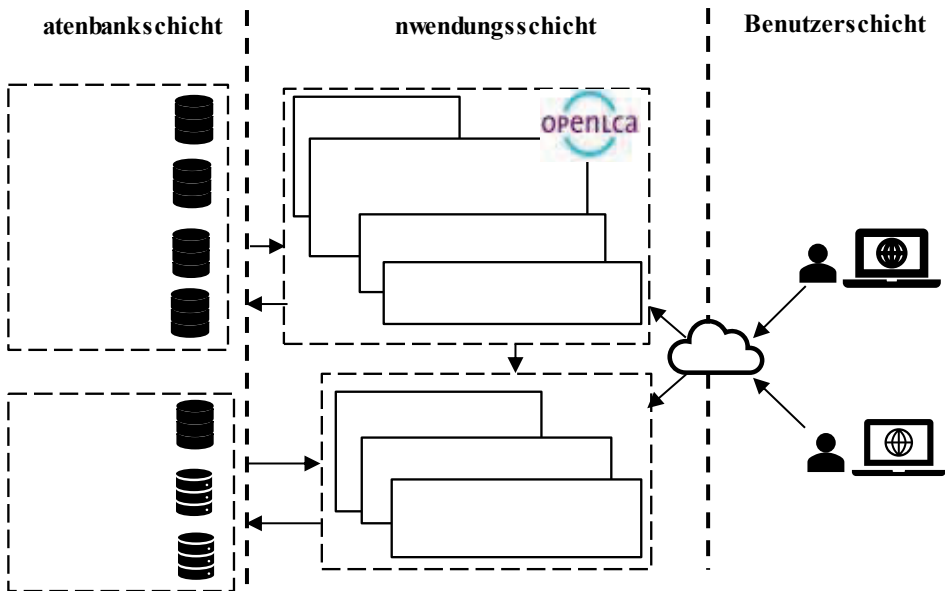


Abb. 2. Vorgeschlagene Softwarearchitektur.

In der Datenbankebene befinden sich verschiedene Datenbanken verteilt auf die für die Prozesse und deren Modellierung benötigte Daten, wie die BoMs der einzelnen Komponenten, die Inventarlisten einzelner Rechenzentren, Daten zu den Recyclingprozessen, generelle Rohstoffinformationen, die ecoinvent-Datenbank, Modelle aus dem TEMPRO Projekt und weitere Bewertungsmethoden.

Die Anwendungsebene besteht aus verschiedenen Modulen, die eine Modellerstellung, Berechnung und Speicherung von Ergebnissen ermöglichen, um die Berechnung von Umweltauswirkungen zur Bewertung von Bedarf von Material- und Energieressourcen durchzuführen. Die Modellierungsanwendungen greifen hierbei auf die verschiedenen Datenbanken in der Datenbankebene zu, um Produktsystemmodelle zu erstellen, welche dann mit Hilfe von openLCA analysiert werden sollen. Somit können die Umweltauswirkungen einzelner Produktsysteme unter Berücksichtigung verschiedener Berechnungsmethoden berechnet und auch analysiert werden. Es handelt sich hier nicht um eine herkömmliche LCA, da neue (eigene) Datenbanken eingebunden werden, die wesentlich auf die Rohstoffinhalte fokussieren. Gängige Rechenzentren verschiedener Größe lassen sich damit leichter über den modularen Aufbau abbilden,

Die Möglichkeit über ein Scripting dieser Modellierungsprozesse in openLCA ermöglicht eine Automatisierung der verschiedenen Schritte, so dass das gesamte Inventar eines Rechenzentrums für jede Komponente ohne manuelle Eingriffe analysiert werden kann. Elemente einer Datenbank (Flows, Prozesse, Produktsysteme, Berechnungsmethoden) werden als Objekte importiert und mit den Informationen in der Datenbankschicht

verknüpft. Dies ermöglicht die Manipulation von Objekten und Automatisierung der Erstellung von Modellen und Berechnungen.

Die Implementation der Präsentationsebene als Webanwendung ermöglicht dem Benutzer eine vereinfachte Interaktion mit dem System. So wird über eine grafische Ausgabe der Ergebnisse eine schnelle Bewertung des gesamtheitlichen Energie- und Ressourcenverbrauchs eines Rechenzentrums ermöglicht.

Generell ergibt sich die Möglichkeit, firmeneigene Inventarinformationen für benutzerspezifische Fallstudien einzuführen. Hierbei können Informationen verwendet

Bewertung der bekanntesten Indikatoren für Umweltauswirkungen wie Treibhausgasemissionen oder kumulativer Energieaufwand zur Verfügung stellen. Die häufigsten Key-Performance-Indikatoren für Rechenzentren, wie beispielsweise die Power-Usage-Effectiveness oder der Rechenzentren-Infrastruktureffizienz, können ebenfalls berücksichtigt werden, indem die Informationen aus vorhandenen Werkzeugen integriert werden.

4 Ergebnisse und Diskussion der Bewertung des Materialressourcenverbrauchs in Rechenzentren

Die in Abb. 2 beschriebene Architektur ermöglicht es, eine Analyse der Umweltauswirkungen von Rechenzentren und seiner Komponenten durchzuführen und stellt die Fallstudie dieser Veröffentlichung dar. Die Ergebnisse aus der in Kapitel 3 vorgestellten Softwarearchitektur wurden an einem realen laufenden professionellen Rechenzentrum mit Luftkühlung generiert, und mit einer maximalen Leistung von 100kW, in den entsprechenden Datenbanken berechnet und gespeichert.

Zusätzliche Berechnungsmethoden zum Einfluss der Materialkritikalität wurden integriert. [KPP19] präsentieren Methoden, um die Ressourcennutzung mit EU-Kritikalitätsaspekten zu bewerten [Eu20]. Diese Indikatoren zeigen die relative Bedeutung kritischer Rohstoffe auf den gesamten Verbrauch von Materialressourcen für verschiedene Komponenten. Diese Entwicklung zeigt die Skalierbarkeit der Architektur. Abb. 3 repräsentiert eine generelle Übersicht der Ergebnisse dieser Berechnungen aus der Fallstudie für Geräte in Rechenzentren.

Bei der Betrachtung der unterschiedlichen Teile eines Gerätes in einem Rechenzentrum muss der jeweilige Einfluss der verschiedenen Teile auf die Auswirkungen des Gesamtressourcenverbrauchs bewertet werden, um das Recyclingpotenzial zu bewerten. Die Integration von genaueren Recyclingmodellen für die Komponenten eines Rechenzentrums ermöglicht die Beurteilung der Vorteile des Recyclings. Das Recycling von vorrangig kritischen Rohstoffen kann den Druck auf die Lieferkette dieser Rohstoffe verringern und somit dann langfristig Lieferkettenprobleme vermeiden, da dort recycelt wird, wo die Komponenten anfallen und ebenso Bergbau der primären Rohstoffe vermieden werden kann.

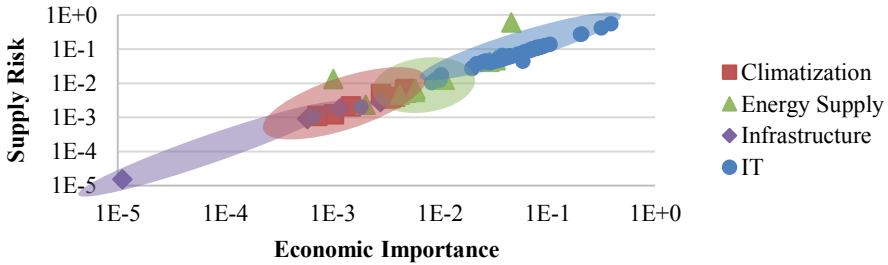


Abb. 3. Kritikalität gewichtete Erschöpfung für verschiedene Geräte eines Rechenzentrums. Zur Masse normiert.

Die resultierenden Berechnungen mit Hilfe der vorgestellten Architektur erlauben eine Abschätzung des Materialgehalts und des kumulierten Energiebedarfs für ein Rechenzentrum auf Basis der Bestandsinformationen. Abb. 4 zeigt daher die Komponenten eines Rechenzentrums auf, welche den meisten Energieaufwand generieren und kann daher Verbesserungspotentiale anzeigen.

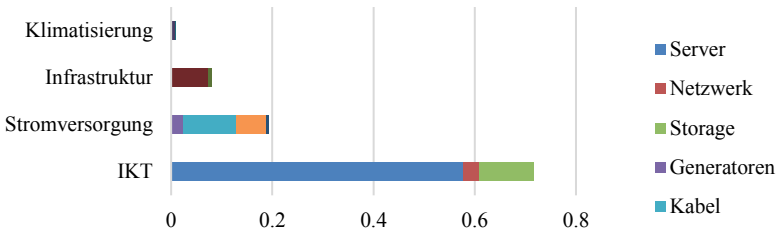


Abb. 4. Kumulierte Energieaufwand (MJ-eq) eins Rechenzentrums, normiert.

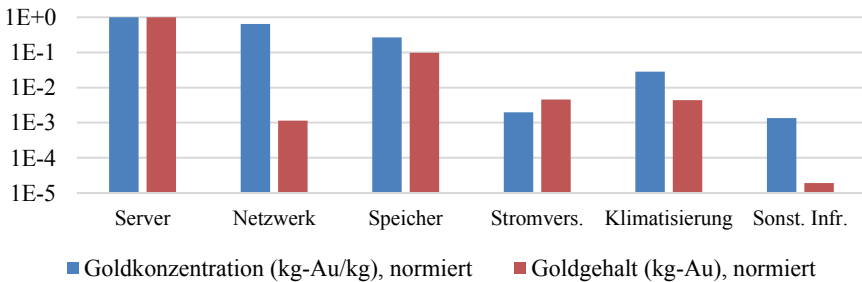


Abb. 5. Ergebnisse für Gehalt von Gold in einem Rechenzentrum.

Durch das Wissen über den spezifischen Goldgehalt in verschiedenen Produktgruppen wie in Abb. 5 gezeigt, kann man beim Recycling gezielt und strategisch die Komponenten für das Recycling aufkonzentrieren, die einen wertvollen Rohstoff (hier als Beispiel Gold) enthalten und unterstützen daher ein produktzentrisches Recycling. Durch die gute Datenbasis aus der eigenen Analyse der Rechenzentrenkomponenten aus der

Recyclinganlage sind hier alle Rohstoffe erfassbar, die derzeit in der Recyclingbranche
” “ ()
dieser Rohstoffe kann hierdurch sowohl absolut wie in Abb. 5 als auch quantitativ
dargestellt werden.

5 Ausblick

Mit dieser vorgeschlagenen selbstentwickelten Architektur ist es durch den modularen Aufbau möglich, Modelle für eine Vielzahl von Rechenzentrumskonfigurationen zu erstellen. Basierend auf den Ergebnissen aus der Analyse der Materialzusammensetzung von Geräten aus dem Projekt TEMPRO, können die unterschiedlichen Umweltauswirkungen eines Rechenzentrums schnell erfasst werden. In Zukunft können auch weitere Informationen zu verschiedenen Rechenzentrumskonfigurationen gesammelt und die vorhandenen Modelle in den Datenbanken verbessert werden. Ziel ist es, Rechenzentrumsbesitzern und politischen Entscheidungsträgern ein Entscheidungstool zur Verfügung zu stellen, welches den Energie- und Materialbedarf von Rechenzentrumskomponenten bewertet und Informationen über kritische Materialflüsse während der Lebensdauer dieser Komponenten liefert. Durch die Lebensdauerbetrachtung kann auch vorhergesagt werden, wieviel und welche Rohstoffe im Jahr x anfallen können. Somit wird der Rohstoffanteil aus Recyclingmaterialien vorhersagbarer, was sich positiv auf den Lieferkettendruck einzelner Rohstoffe auswirken kann.

Angesichts der kurzen Lebensdauer von IKT-Geräten in einem Rechenzentrum, welche in der Regel auf 2-5 Jahre ausgelegt ist, könnten die Informationen auf dem Gerät schnell veraltet sein. Die Einspeisung der Informationen in Datenbanken und der Entwicklung von Anwendungen für ein schnelles Update der Modelle, erleichtert die Aktualisierung von Informationen, sodass die Qualität der Ergebnisse verbessert wird.

Open-Source Software ermöglicht die Zugänglichkeit solcher Tools, allerdings ist eine ordnungsgemäße Dokumentation erforderlich, um den Strukturen der mit dieser Software entwickelten Modelle zu folgen. Es besteht die zusätzliche Notwendigkeit des Zugriffs auf einen Webserver zur Umsetzung der Ergebnisvisualisierung, und weitere Webdienste sind für die Interaktion mit den Benutzern erforderlich. Mit dem Stand 2021 ist dies noch nicht umgesetzt, aber es ist zu erwarten, dass ähnliche Ansätze in naher Zukunft folgen werden.

Diese Fallstudie kann derzeit noch nicht den Stand der Technik in der aktuellen Rechenzentrumsbranche darstellen, da das Recycling dem Stand der Technik aufgrund der Lebensdauer der Komponenten immer hinterherhinkt. Wünschenswert wäre eine Übergabe der Bill-of-Materials einzelner Komponenten direkt an den Recycler. Dies würde die Modelle erheblich verbessern, ist aber derzeit noch nicht gängige Praxis. Auch fokussiert die Klimatisierung derzeit nur die Luftkühlung und nicht die Wasserkühlung und schränkt das Modell somit noch weiter ein.

Weitere Arbeiten fokussieren sich auf die ordnungsgemäße Entwicklung einer Webanwendung, die mit den Benutzern und den Ergebnisdatenbanken ordnungsgemäß

interagiert, sodass die Informationen visualisiert werden können. Auch ein Reporting auf EU-Ebene kann mit diesem Modell in Zukunft ermöglicht werden.

6 Literaturverzeichnis

- [BSB08] Behrendt, F.; Schafer, M.; Belusa, T.: Konzeptstudie zur Energie- und Ressourceneffizienz im Betrieb von Rechenzentren. In IZE TU Berlin, Universitätsverlag, Berlin, 2008.
- [Co14] Cook, G. et al.: Clicking clean: how companies are creating the green internet. In Greenpeace Inc., Washington, DC, 2014; S. 19.
- [CWP11] Chomkhamtri, K.; Wolf, M.-A.; Pant, R.: International reference life cycle data system (ILCD) handbook: Review schemes for life cycle assessment. In Towards life cycle sustainability management, 2011; S. 107–117.
- [Eu20] European Commission: *Cloud Computing* 2020
- [FH14] Fichter, K.; Hintemann, R.: Beyond Energy: The Quantities of Materials Present in the Equipment of Data Centers. In Journal of Industrial Ecology, 2014, 18; S. 846–858.
- [Ga12] Garnier, C. et al.: Data centre life cycle assessment guidelines. In The Green Grid, white paper, 2012, 45; v2.
- [Gr21] GreenDelta: openLCA. GreenDelta, 2021.
- [HFS10] Hintemann, R.; Fichter, K.; Stobbe, L.: Materialbestand der Rechenzentren in Deutschland - Eine Bestandsaufnahme zur Ermittlung von Ressourcen- und Energieeinsatz, 2010.
- [HH20] Hintemann, R.; Hinterholzer, S.: Rechenzentren in Europa – Chancen für eine Nachhaltige Digitalisierung, Berlin, 2020.
- [Hi14] Hintemann, R.: The Future of Data Center Energy Demand The Impact of the Changing Structure of Data Centers. Unpublished, 2014.
- [Hi17] Hintemann, R.: 3 Internetgestützte Innovationsprozesse, 2017.
- [Hi20] Hintemann, R.: Energiebedarf der Rechenzentren steigt trotz Corona weiter an, 2020.
- [IS06] ISO: ISO 10668:2006 *Environmental management systems – Life cycle assessment – Requirements and Guidelines*, 2006.
- [KPP19] Koch, B.; Peñaherrera, F.; Pehlken, A.: Criticality and LCA – Building comparison values to show the impact of criticality on LCA. In European Journal of Sustainable Development, 2019, 8; S. 304.
- [Mo20] Montevercchi, F. et al.: Energy-efficient Cloud Computing Technologies and Policies for an Eco-friendly Cloud Market. Final Study Report, Vienna, 2020.
- [Pe20] Pehlken, A. et al.: Abschlussbericht Verbundprojekt TEMPRO, 2020.
- [Pr14] Prakash, S. et al.: Study on the practical application of the new framework methodology for measuring the environmental impact of ICT-cost/benefit analysis. In European Commission, Brussels, Studie, 2014.
- [Sz18] Szczepaniak, K.: Das Rohstoffpotenzial von Rechenzentren: Quantifizierung kritischer Rohstoffe im Rechenzentrumsinventar zur Ermittlung des Grauen-Energie-Verbrauchs. Masterarbeit TUHH, Hamburg, Germany, 2018.
- [Wel16] Wernet, G. et al.: The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. In The International Journal of Life Cycle Assessment, 2016, 21; S. 1218–1230.