

Entwicklung einer Energieeffizienz- kennzeichnung für Rechenzentren

Diskussionsbeitrag für mehr Transparenz in der Digitalwirtschaft

Jens Gröger, Felix Behrens, Öko-Institut e.V.



Entwicklung einer Energieeffizienzkennzeichnung für Rechenzentren

Diskussionsbeitrag für mehr Transparenz in der Digitalwirtschaft

Jens Gröger, Felix Behrens, Öko-Institut e.V.

Berlin, Juni 2023

Version 1.2

Dieses Dokument wurde im Rahmen des Forschungsprojektes Peer-DC im Auftrag des Umweltbundesamtes unter der Projektleitung der Universität Stuttgart erarbeitet, <https://peer-dc.de/>



Öko-Institut e.V. / Oeko-Institut e.V.

info@oeko.de

www.oeko.de

Geschäftsstelle Freiburg / Freiburg Head Office

Postfach / P.O. Box 17 71

79017 Freiburg. Deutschland / Germany

Tel.: +49 761 45295-0

Büro Darmstadt / Darmstadt Office

Rheinstraße 95

64295 Darmstadt. Deutschland / Germany

Tel.: +49 6151 8191-0

Büro Berlin / Berlin Office

Borkumstraße 2

13189 Berlin. Deutschland / Germany

Tel.: +49 30 405085-0



Dieses Werk bzw. Inhalt steht unter einer Creative Commons Namensnennung, Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 Lizenz. Öko-Institut e.V. 2023

This work is licensed under Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0.
Oeko-Institut e.V. 2023

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	4
1 Einleitung	5
2 Herangehensweise	5
3 Gebäudetechnik	7
3.1 PUE – Power Usage Effectiveness	8
3.2 CER – Cooling Efficiency Ratio	9
3.3 ERF – Energy Reuse Factor	10
3.4 Energieeffizienzindex für Gebäudetechnik	11
4 Informationstechnik	12
4.1 Zusammenhang zwischen Auslastung und Effizienz	12
4.2 Server	14
4.3 Speichersysteme	16
4.4 Netzwerkgeräte	17
4.5 Energieeffizienzindex für Informationstechnik	18
5 Energieeffizienzkennzeichnung	19
Literaturverzeichnis	21

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Energieeffizienzindex EEl_{PUE}	9
Abbildung 2:	Energieeffizienzindex EEl_{CER}	10
Abbildung 3:	Energieeffizienzindex EEl_{ERF}	11
Abbildung 4:	Servereffizienz abhängig von der CPU-Auslastung und Servergeneration	13
Abbildung 5:	Zusammenhang zwischen CPU-Auslastung und elektrischer Leistungsaufnahme von typischen und idealen Servern	14
Abbildung 6:	Zusammenhang zwischen CPU-Auslastung und Lastkorrelation (LC_{Server}) von typischen und idealen Servern	16
Abbildung 7:	Energieeffizienzkennzeichnung für Rechenzentren	19

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Zuordnung des Energieeffizienzindex EEl zur Effizienzklasse	19
------------	---	----

1 Einleitung

Energieeffizienz spielt bei der Auswahl von Produkten und Dienstleistungen eine zunehmende Rolle. In den Verbraucherbefragungen zum Umweltbewusstsein, die das deutsche Umweltbundesamt kontinuierlich durchführt, nennen mehr als Dreiviertel aller Konsument*innen bei der Frage nach dem persönlichen Verhalten zum Schutz der Umwelt, dass sie beim Kauf von Haushaltsgeräten „Geräte mit einer besonders guten Energieeffizienzklasse“ bevorzugen (Umweltbundesamt 2021). Was beim Kauf von Haushaltsgeräten zwischenzeitlich selbstverständlich ist, ist auch für PKWs mit der verpflichtenden Angaben zum Kraftstoffverbrauch pro 100 Kilometer oder bei Gebäuden mit dem Energieausweis, der den Primärenergiebedarf pro Quadratmeter anzeigt, ein wichtiges Auswahlkriterium.

Für Rechenzentren und IT-Dienstleistungen fehlt solch eine gut sichtbare Effizienzangabe jedoch bislang. Selbst wenn private oder professionelle Kunden gewillt sind, für umweltverträglichere Produkte mehr Geld auszugeben, so scheitert dieser Wunsch bislang an der fehlenden Transparenz der RZ-Branche.

Vor diesem Hintergrund hat sich das Projekt PeerDC („Public Energy Efficiency Register of Data Centres“, <https://peer-dc.de/>) im Auftrag des Umweltbundesamtes das Teilziel gesetzt, eine Energieeffizienzkennzeichnung für Rechenzentren zu entwickeln. Die Kennzeichnung baut auf Kennwerten auf, die innerhalb eines freiwilligen Rechenzentrumsregisters erfasst werden, das ebenfalls in dem Projekt entwickelt wird. Soweit möglich, sind dies Kennwerte aus der Normenreihe DIN EN 50600. Darüber hinaus werden weitere IT-spezifische Kennzahlen vorgeschlagen, für die es noch keine internationalen Normen gibt. Die Eingangsparameter der Kennzeichnung wurden so ausgewählt, dass sie vergleichsweise einfach zu erheben sind und keinen hohen zusätzlichen Messaufwand seitens der Rechenzentrumsbetreiber erfordern.

Die hier entwickelte Energieeffizienzkennzeichnung für Rechenzentren stellt einen Diskussionsbeitrag für mehr Transparenz dar, der durch weitere Praxiserfahrungen überprüft und weiterentwickelt werden muss.

2 Herangehensweise

Bei dem Betrieb eines Rechenzentrums sind zwei technische Bereiche voneinander zu unterscheiden:

- der Betrieb der Gebäudetechnik (Kälteanlagen, Stromversorgung, Sicherheitstechnik) und
- der Betrieb der Informationstechnik (Server, Speichersysteme, Netzwerktechnik).

Oft sind es sogar wirtschaftlich voneinander getrennte Unternehmen, mindestens aber unterschiedliche Abteilungen innerhalb eines Unternehmens, die diese beiden Bereiche verantworten. So stellt der Betreiber eines Co-Lokation-Rechenzentrums durch den Einsatz von Gebäudetechnik eine sichere räumliche Umgebung zur Verfügung, auf der dann ein Kunde seine mitgebrachte Informationstechnik aufstellt. Bei einem Unternehmensrechenzentrum ist die eine Abteilung für den ausfallsicheren Betrieb der Gebäudetechnik zuständig, während die andere Abteilung die IT-Komponenten aufstellt und für deren IT-Sicherheit zuständig ist. Die Effizienz des gesamten Rechenzentrums ist davon abhängig, dass jeder innerhalb seines Zuständigkeitsbereiches eine hohe Effizienz erreicht. Für beide Bereiche braucht es daher geeignete Performance-Kennzahlen, die Auskunft darüber geben, wie effizient der aktuelle Betrieb ist und welche Änderungen zu einer Optimierung beitragen. Für eine zu entwickelnde Rechenzentrumskennzeichnung müssen daher beide Bereiche zunächst getrennt adressiert werden, bevor sie für das gesamte Rechenzentrum gemeinsam dargestellt werden.

In dem Forschungsprojekt PeerDC wird ein Rechenzentrumsregister aufgebaut, in der die Betreiber von Rechenzentren und Betreiber von Informationstechnik alle wesentlichen Informationen eintragen, die für eine Bewertung der Energieeffizienz relevant sind, bspw. Informationen über die Energieverbräuche und Effizienzkennwerte. In solch einem Register können die Rechenzentren ihre Nachhaltigkeitsbemühungen öffentlich einsehbar dokumentieren und damit in einen Wettbewerb um die nachhaltigste RZ-Dienstleistung eintreten.

Folgende Kennzahlen, welche die **Effizienz der Gebäudetechnik** beschreiben, werden in dem freiwilligen Register erfasst:

- PUE – Power Usage Effectiveness (DIN EN 50600-4-2) bemisst die Effizienz der Gebäudetechnik als Quotient des Energieverbrauches des gesamte RZ und des Energieverbrauches der IT innerhalb eines Jahres.
- CER – Cooling Efficiency Ratio (DIN EN 50600-4-7) bemisst die Effizienz des Kühlsystems als Quotient der abgeführten und der für die Kühlung aufgewendeten Energie eines Jahres.
- ERF – Energy Reuse Factor (DIN EN 50600-4-6) bemisst den Anteil der abgeführten Energie, die einer sinnvollen Nachnutzung zugeführt wird, z.B. in Form von Abwärmenutzung.
- WUE – Water Usage Effectiveness (DIN EN 50600-4-9) bemisst die Effizienz der Wassernutzung als Quotient der Menge des Wasserverbrauchs und des Energieverbrauches der IT innerhalb eines Jahres.
- REF – Renewable Energy Factor (DIN EN 50600-4-3) bemisst den Anteil erneuerbarer Energien am Gesamtenergieverbrauch des RZ. Er beschreibt nicht die Effizienz der Stromerzeugung, sondern deren Konsistenz (Zusammensetzung).

Als Kennzahl für die **Effizienz der Informationstechnik** sieht das PeerDC-Register zunächst einzig die durchschnittliche CPU-Auslastung der Server als geeignete bereits genormte Kennzahl an:

- ITEU_{SV} – Information Technology Equipment Utilization for Servers (ISO/IEC 30134-5) bemisst die mittlere Auslastung aller aktiven Server eines Rechenzentrums über ein Jahr.

Weitere Kennzahlen, die die Effizienz der Informationstechnik eines kompletten Rechenzentrums beschreiben, werden bislang in der Praxis nur sehr selten angewandt und sind darüber hinaus nicht standardisiert. In dem Forschungsprojekt des Umweltbundesamtes KPI4DCE („Key Performance Indicators for Data Centre Efficiency“) hat die Forschungsgruppe (Schödwel et al. 2018) eine Metrik entwickelt, um die Leistung eines Rechenzentrums (Nutzenindikatoren: Rechenoperationen, Speicherplatz, Netzwerkverkehr) auf die dafür erforderlichen Umweltaufwendungen (Energiebedarf, Treibhausgasemissionen, Rohstoffbedarf, Wasserverbrauch) zu beziehen. Aus diesen 3 Nutzen und 4 Aufwendungen ergeben sich insgesamt 12 verschiedene Effizienzkennzahlen. Die Anwendung der KPI4DCE-Methodik erfordert jedoch einen vergleichsweise hohen Mess- und Auswertungsaufwand, weshalb die Methode zum jetzigen Zeitpunkt nicht als Grundlage für eine Rechenzentrums-kennzeichnung herangezogen werden kann. Einen Überblick über weitere international entwickelte Metriken gibt die Studie „Energy Efficiency Metrics for Data Centres“ (Maagøe 2022).

Eine höhere Verbreitung als Metriken, die auf die Effizienz von Rechenzentren abzielen, hat die Messung der Effizienz einzelner IT-Komponenten. Hier gibt es geeignete Performance Metriken, wie den SPECpower Benchmark¹ und das SPEC Server Efficiency Rating Tool (SERT) (Kistowski et al. 2021). Der SPEC SERT-Wert wird für Server, die in Europa verkauft werden, durch die Ökodesign-Verordnung für Server und Datenspeicherprodukte (Verordnung (EU) 424/2019) gesetzlich gefordert. Für Speichersysteme legt die gleiche Ökodesign-Verordnung ebenfalls einen verpflichtenden

¹ https://www.spec.org/power_ss/2008/

Effizienzkennwert fest, den von der Storage Networking Industry Association (SNIA) entwickelten SNIA Emerald².

Diesen Kennwerten gemeinsam ist es, dass sie bei einzelnen Server- und Speicherprodukten angewendet werden können. Die Messungen werden in der Regel durch die Hersteller der IT-Komponenten durchgeführt oder durch spezialisierte Prüflabors, in Form eines Testlaufs der jeweiligen Benchmark-Software auf dem Prüfstand. Die Ergebnisse dieser Tests beschreiben die jeweilige Hardware-Konfiguration und können als konstante Werte in die Produktdatenblätter übernommen werden.

Was diese Benchmarks nicht leisten, ist die Beschreibung der Effizienz der IT-Geräte im Realbetrieb, also beim tatsächlichen Einsatz im Rechenzentrum unter veränderlichen Rahmenbedingungen wie beispielsweise der schwankenden Auslastung. Außerdem beziehen sie sich nur auf einzelne Geräte und nicht auf die in einem Rechenzentrum zusammen operierenden Server, Speichersysteme und Netzwerk-Komponenten. Die Benchmarks können außerdem nicht live erhoben werden, also parallel zum produktiven Betrieb des Rechenzentrums.

Für eine Energieeffizienzkennzeichnung für Rechenzentren werden im Gegensatz zu den oben beschriebenen Performance-Benchmarks solche Effizienzkennwerte gesucht, die ohne großen Aufwand – auch im live-Betrieb – gemessen werden können, die durch die Betriebsführung optimiert werden können und die sich grundsätzlich dazu eignen, verschiedene Rechenzentren und IT-Architekturen miteinander zu vergleichen.

Die oben beschriebene Kennzahl $ITEU_{SV}$, die zunächst nur eine Aussage über die durchschnittliche Auslastung der Server eines Rechenzentrums macht, lässt sich grundsätzlich zu solch einer Effizienzkennzahl weiterentwickeln. Analog dazu können die Auslastungen der Speichersysteme und der Netzwerkkomponenten zu Effizienzkennzahlen weiterentwickelt werden.

In den folgenden beiden Kapiteln wird, getrennt für die beiden Bereiche Gebäudetechnik und Informationstechnik, jeweils dargestellt, welche Indikatoren dafür geeignet sind, die Energieeffizienz zu beschreiben, und wie diese in einen übergeordneten Energieeffizienzindex übersetzt werden können. Im letzten Kapitel werden diese Überlegungen dann zu einer gemeinsamen Energieeffizienzkennzeichnung zusammengeführt, die analog zu der Energieeffizienzkennzeichnung für Produkte oder dem Energieausweis für Gebäude durch potenzielle Kunden schnell erfasst und eingeordnet werden kann.

3 Gebäudetechnik

Die Gebäudetechnik eines Rechenzentrums sorgt insbesondere dafür, dass die IT dauerhaft und ausreichend gekühlt wird, dass kurzfristige Spannungsausfälle durch eine unterbrechungsfreie batteriebetriebene Stromversorgung überbrückt werden und dass die Technik auch bei längeren Stromausfällen mit einer (meist per Diesel betriebenen) Notstromversorgung versorgt wird.

Der größte Teil des Energieverbrauchs der Gebäudetechnik kann auf die Arbeit der Kälteanlage und die Energieverluste in der Stromversorgung zurückgeführt werden. Zusätzlich kann die Gebäudetechnik für eine sinnvolle Nachnutzung der Abwärme sorgen. Zur Beschreibung der Energieeffizienz der Gebäudetechnik werden daher die folgenden drei Effizienzkennzahlen als Eingangsparameter ausgewählt:

² https://www.snia.org/tech_activities/standards/curr_standards/emerald

- PUE – Power Usage Effectiveness
- CER – Cooling Efficiency Ratio
- ERF – Energy Reuse Factor

Die oben beschriebenen Kennzahlen WUE – Water Usage Effectiveness und REF – Renewable Energy Factor wurden dagegen nicht für die Energieeffizienzkennzeichnung berücksichtigt. Die Bewertung der WUE hängt stark vom Standort des Rechenzentrums ab, nämlich ob lokale Wasserknappheit besteht oder nicht. Wasser wird in Rechenzentren vor allem in der Verdunstungskühlung eingesetzt, um damit den Energieeinsatz zu reduzieren. Ob es umweltverträglich ist, für die Klimatisierung von Rechenzentren einen höheren Wasserbedarf zu akzeptieren, hängt daher vom Einzelfall ab. Es sollte darüber nachgedacht werden, den Wasserverbrauch, statt in einer Energieeffizienzkennzahl lieber gesondert als Absolutwert auszuweisen oder ihn mit einer Wasserknappheitszahl zu kombinieren. Der REF beschreibt den Anteil an erneuerbaren Energien am Energieverbrauch des Rechenzentrums. Auch dies ist kein Indikator für die Energieeffizienz, sondern eher ein Standortfaktor oder eine Frage der Vertragsgestaltung mit dem Energielieferanten. Beide Werte WUE und REF sind daher gut in einem Rechenzentrumsregister aufgehoben, nicht jedoch in einer Effizienzkennzahl.

Nachfolgend wird beschrieben, wie die Kennzahlen PUE, CER und ERF in ein einheitliches Punktesystem mit einem Wertebereich zwischen 0 und 100 Punkten übersetzt werden, damit sie zu einem gemeinsamen Energieeffizienzindex (EEI) für die Gebäudetechnik aggregiert werden können.

3.1 PUE – Power Usage Effectiveness

Die Power Usage Effectiveness (PUE) ist nach DIN EN 50600-4-2 definiert als:

$$PUE = \frac{E_{RZ}}{E_{IT}} \quad (1)$$

Mit:

- E_{RZ} der Gesamtenergieverbrauch des Rechenzentrums (jährlich) in kWh,
- E_{IT} der Energieverbrauch der IT-Ausstattung (jährlich) in kWh.

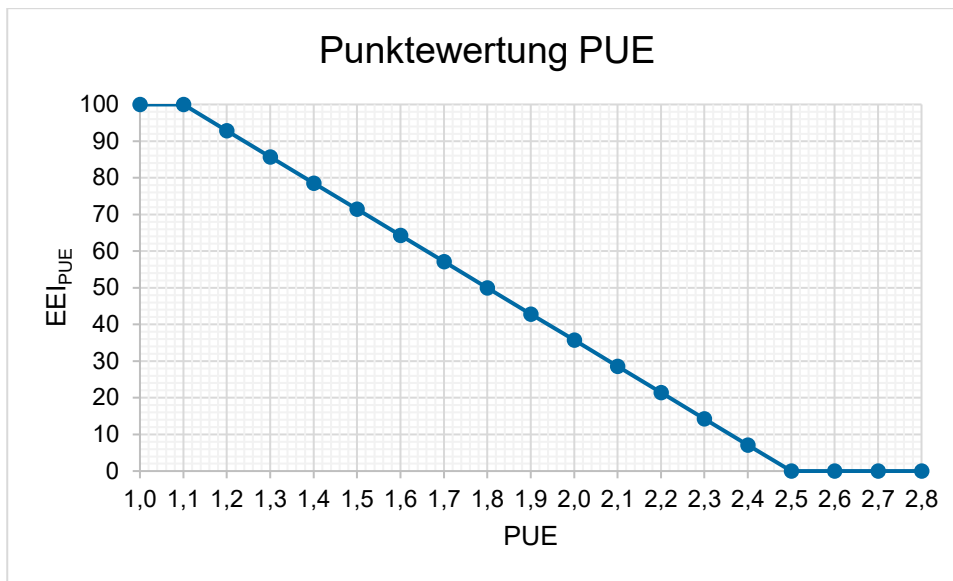
Der theoretische Wertebereich des PUE ist $[1; \infty]$. Typische PUE-Werte liegen laut einer Umfrage von GDA und pwc (2020), die unter „namhaften Data Center-Betreibern“ durchgeführt wurde, zwischen 1,05 und 2,20 mit einem Mittelwert von 1,38. In der regelmäßig durch das Uptime Institute durchgeführten Umfrage unter mehr als 500 internationalen Rechenzentrumsbetreibern (Uptime Institute 2021) liegt der Durchschnittswert für den PUE im Jahr 2021 bei 1,57, während er im Jahr 2007 noch bei 2,5 lag. Für einen Energieeffizienzindex werden die beiden Extremwerte 1,1 für die beste verfügbare Technik und 2,5 für das ineffizienteste Rechenzentrum gewählt.

Diese typischen PUE-Werte werden durch die nachfolgend beschriebene Formel in einen Energieeffizienzindex (EEI) zwischen 0 Punkte (schlechtester Wert) und 100 Punkte (bester Wert) umgerechnet:

$$EEI_{PUE} = \frac{500}{7} \cdot (2,5 - PUE) \quad (2)$$

- $PUE > 2,5$ wird auf 0 Punkte, $PUE < 1,1$ wird auf 100 Punkte gesetzt.

Der Zusammenhang zwischen PUE und der entsprechenden EEI-Punktzahl ist in Abbildung 1 graphisch dargestellt.

Abbildung 1: Energieeffizienzindex EEl_{PUE} 

Quelle: Öko-Institut e.V.

3.2 CER – Cooling Efficiency Ratio

Die Cooling Efficiency Ratio (CER) ist nach DIN EN 50600-4-7 definiert als:

$$CER = \frac{Q_{abgeführt}}{E_{Kühlung}} \quad (3)$$

Mit:

- $Q_{abgeführt}$ als die gesamte aus dem Rechenzentrum abgeführte (jährliche) Wärmemenge in kWh,
- $E_{Kühlung}$ als der (jährliche) Energieverbrauch der Kühlsysteme in kWh.

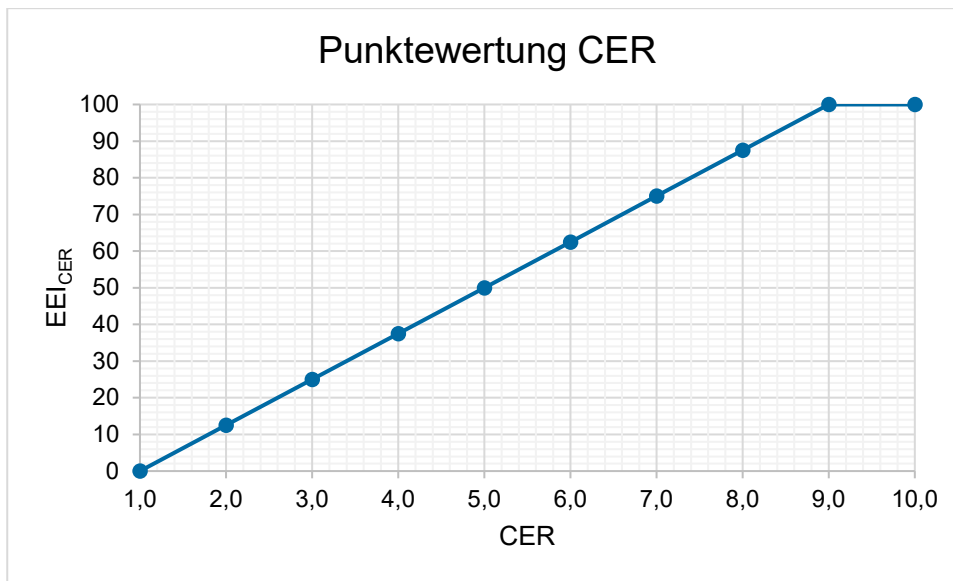
Der theoretische Wertebereich des CER ist $[1; \infty]$. Das Umweltzeichen Blauer Engel DE-UZ 228 (2023), welches die beste verfügbare Technik beschreibt, fordert für neue Rechenzentren, die ab dem Jahr 2024 in Betrieb genommen werden, einen Wert von $CER > 9$. Der Wertebereich des CER wird daher für den Energieeffizienzindex linear von $[1; 9]$ auf $[0; 100]$ abgebildet:

$$EEl_{CER} = 12,5 \cdot (CER - 1) \quad (4)$$

- $CER \leq 1$ wird auf 0 Punkte, $CER > 9$ wird auf 100 Punkte gesetzt.

Der Zusammenhang zwischen CER und der entsprechenden EEI-Punktzahl ist in Abbildung 2 graphisch dargestellt.

Abbildung 2: Energieeffizienzindex EEl_{CER}



Quelle: Öko-Institut e.V.

3.3 ERF – Energy Reuse Factor

Der Energy Reuse Factor (ERF) ist nach DIN EN 50600-4-6 definiert als:

$$ERF = \frac{E_{Reuse}}{E_{RZ}} \quad (5)$$

Mit:

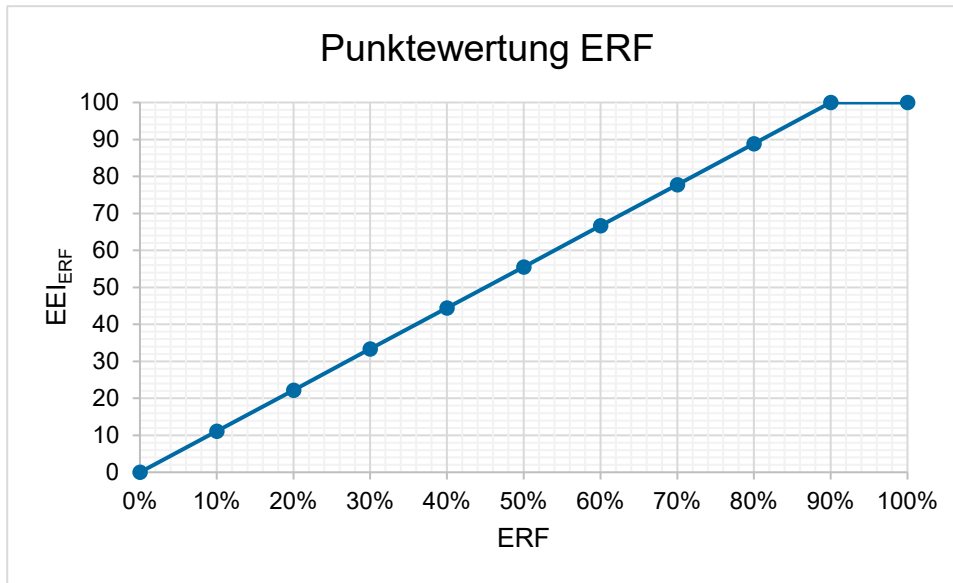
- E_{Reuse} als (jährliche) Energie aus dem Rechenzentrum in kWh, die außerhalb des Rechenzentrums genutzt wird und dort Energie ganz oder teilweise ersetzt,
- E_{RZ} als der (jährliche) Gesamtenergieverbrauch des Rechenzentrums in kWh.

Der theoretische Wertebereich des ERF liegt zwischen 0 und 100% [0;1]. Welche dieser Werte in der Praxis vorkommen, wurde noch nicht systematisch erfasst. Zumindest für den Standort Deutschland ist derzeit davon auszugehen, dass die meisten Rechenzentren ihre Abwärme ungenutzt an die Umgebung abgeben, also einen CER = 0 aufweisen. Eine Untersuchung der Deutschen Unternehmensinitiative Energieeffizienz e.V. (Mira Weber und Benjamin Ott 2023) zeigt das Potenzial zur Abwärmenutzung anhand von insgesamt 99 Praxisbeispielen auf. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass hohe CER-Kennzahlen in der Praxis erreichbar sind. Aus physikalischen Gründen ist eine 100-prozentige Nachnutzung nicht möglich, denn es gibt bei jeder Wärmeübertragung Verluste. Deshalb wird das Maximum auf CER = 90% gesetzt. Der CER wird wie folgt für den Energieeffizienzindex von 0 bis 100 Punkten umgerechnet:

$$EEl_{ERF} = ERF \cdot \frac{1000}{9} \quad (6)$$

- $ERF > 0,9$ wird auf 100 Punkte gesetzt.

Der Zusammenhang zwischen CER und der entsprechenden EEl-Punktzahl ist in Abbildung 3 graphisch dargestellt.

Abbildung 3: Energieeffizienzindex EEl_{ERF} 

Quelle: Öko-Institut e.V.

3.4 Energieeffizienzindex für Gebäudetechnik

Die drei einzelnen Energieeffizienzindizes EEl_{PUE} , EEl_{CER} und EEl_{ERF} sollen nun zu einer einzelnen Kennzahl, einem Energieeffizienzindex für Gebäudetechnik EEl_{BT} , zusammengefasst werden, wobei BT für *Building Technology* steht.

Da PUE und CER nicht unabhängig voneinander sind, wäre es falsch, einen einfachen Mittelwert über alle drei Werte zu bilden. Der CER wirkt sich auf den PUE aus, aber nicht andersrum, weshalb erstere mit einem geringeren Gewichtungsfaktor eingehen sollte, um diesen nicht doppelt zu zählen. Die Nachnutzung der Energie ERF ist aus Gründen der Dekarbonisierung der Wärmeversorgung ein wichtiges Thema, das jedoch nicht vollständig in der Hand des Rechenzentrumsbetreibers liegt. Denn für die sinnvolle Nachnutzung muss es auch in der Nachbarschaft des Rechenzentrums entsprechende Wärmeabnehmer geben.

Wir schlagen deshalb folgende Gewichtungsfaktoren vor:

- EEl_{PUE} : 40%,
- EEl_{CER} : 20%,
- EEl_{ERF} : 40%.

Dadurch ergibt sich die Effizienzkennzahl für die Gebäudetechnik des Rechenzentrums:

$$EEl_{BT} = 0,4 \cdot EEl_{PUE} + 0,2 \cdot EEl_{CER} + 0,4 \cdot EEl_{ERF} \quad (7)$$

Mit:

- EEl_{BT} als Energieeffizienzindex für Gebäudetechnik mit Werten von 0 bis 100 Punkten.

Oder nach Einsetzen der Formeln (2), (4) und (6):

$$EEl_{BT} = \frac{200}{7} \cdot (2,5 - PUE) + \frac{5}{2} \cdot (CER - 1) + \frac{400}{9} \cdot ERF \quad (8)$$

4 Informationstechnik

Die Informationstechnik eines Rechenzentrums stellt den eigentlichen Nutzen des Rechenzentrums dar. Denn die Gebäudetechnik wird nur dazu betrieben, damit die richtigen Umgebungsbedingungen für die Informationstechnik bereitgestellt werden. Zusätzlich zum Energieeffizienzindex für Gebäudetechnik werden daher auch geeignete Kennzahlen für die IT benötigt.

Bei der Entwicklung eines Energieeffizienzindex für Informationstechnik wurde darauf geachtet, dass bereits vorhandene Daten verwendet werden oder zumindest solche Daten, die ohne großen Aufwand erhoben werden können. Bei der IT sind dies in der Regel entweder statische Daten, die aus den technischen Datenblättern abgelesen werden können oder gemessene Daten über aktuelle Betriebszustände, die ohnehin durch vorhandene Monitoring-Tools überwacht werden, allein schon deshalb, um einen ausfallsicheren Betrieb zu gewährleisten.

Ausgangspunkt für die Entwicklung einer Energieeffizienzkennzahl sind daher die gemessenen Auslastungen, wie die CPU-Auslastung für Server, die Auslastung von Speichersystemen und die Auslastung von Netzwerkkomponenten kombiniert mit weiteren einfach zu erhebenden Daten. In der Praxis gibt es eine direkte Korrelation zwischen der Auslastung und der Energieeffizienz von IT-Komponenten. Denn IT benötigt auch dann Energie, wenn sie nicht genutzt wird, die sogenannten Leerlaufverluste. Je höher die Auslastung der IT, desto geringer fallen diese Leerlaufverluste ins Gewicht.

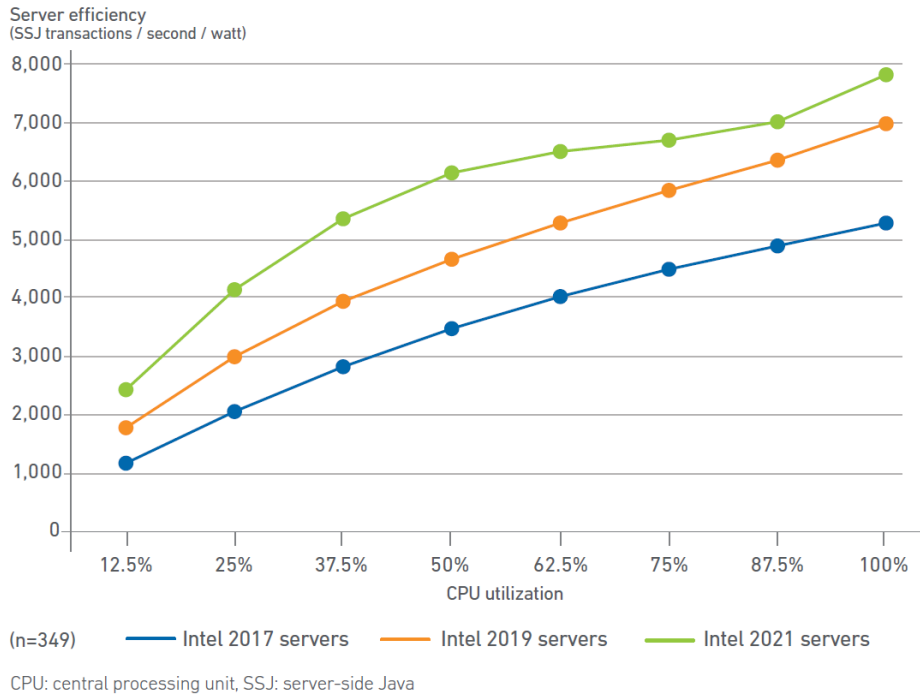
In den nachfolgenden Kapiteln wird zunächst der Zusammenhang zwischen Auslastung und Energieverbrauch von Servern untersucht, um anschließend für alle drei maßgeblichen Komponenten der Informationstechnik, Server, Speichersysteme und Netzwerkgeräte, eine entsprechende Energieeffizienzkennzahl zu entwickeln.

4.1 Zusammenhang zwischen Auslastung und Effizienz

Mit Effizienz-Metriken für Server, wie dem SPECpower Benchmark (SPECpower Committee 2014), der die ausführbaren Rechenoperationen pro eingesetzter elektrischer Leistung misst, kann man sehr deutlich aufzeigen, dass es einen direkten Zusammenhang zwischen der CPU-Auslastung und der Energieeffizienz gibt. Dies ist insofern auch logisch, weil ein hoher Anteil des Energieverbrauchs, oft bis zu 50%, auf den Leerlaufmodus entfällt, der keine sinnvolle Arbeit erbringt.

Die Effizienz nimmt durch den technischen Fortschritt bei jeder Servergeneration zu. Der Zusammenhang zwischen Auslastung und Effizienz bleibt jedoch bestehen. Dies zeigt auch eine aktuelle Auswertung der Green-Grid Datenbank mit 429 Server-Plattformen (The Green Grid's Server Efficiency Rating Tool (SERT) database) durch das Uptime Institute (Tomas Rahkonen und Jay Dietrich 2023). In der nachfolgenden Abbildung 4 werden diese Ergebnisse dargestellt. Die geringsten Server-Effizienzen, gemessen als Rechenoperationen pro Sekunde und Watt, werden jeweils bei der geringsten gemessenen Auslastung von 12,5% erreicht, die höchsten bei 100%.

Aus dieser Abbildung wird auch ersichtlich, dass ältere Server von 2017 sehr wohl die gleiche Effizienz wie Server von 2021 erreichen können, wenn sie ihrerseits höher ausgelastet sind. Der Ersatz eines alten Servers durch einen deutlich leistungsstärkeren und effizienteren Server führt nur dann zu einer Energieeinsparung, wenn der neue Server tatsächlich auch hoch ausgelastet ist und nicht im unteren Teillastbereich arbeitet.

Abbildung 4: Servereffizienz abhängig von der CPU-Auslastung und Servergeneration

Quelle: Abbildung direkt entnommen aus Uptime Institute (Tomas Rahkonen und Jay Dietrich 2023)

Um die Problematik der schlecht ausgelasteten Server und Serverfarmen mit einer Metrik zu erfassen, hat Harryvan (2021) die Kennzahlen *Server Idle Coefficient (SIC)* für einzelne Server und den *Data Center Idle Coefficient (DCIC)* für gesamte Rechenzentren entwickelt. Der SIC wird berechnet durch das Verhältnis des Energieverbrauchs für den Leerlauf-Modus (E_{idle}) zum Energieverbrauch des Servers (E_{Server}):

$$SIC = \frac{E_{idle}}{E_{Server}} \quad (9)$$

Der DCIC wird analog für die gesamten Leerlaufverluste und Server-Energieverbräuche des gesamten Rechenzentrums berechnet.

Setzt man für die Energieverbräuche jeweils die Leistungsaufnahme im Leerlaufmodus (P_{idle}) und Leistungsaufnahme im Betriebszustand (P) in die Formel ein, so wird deutlich, dass es auch hier einen direkten Zusammenhang zwischen dem SIC-Wert und der CPU-Auslastung gibt:

$$SIC = \frac{P_{idle} \cdot \sum_{n=1}^N (1 - CPU(n)) \cdot t(n)}{\sum_{n=1}^N P(n) \cdot t(n)} \quad (10)$$

Dabei gilt:

- n ist die Nummer des Messintervalls,
- $CPU(n)$ ist die zum Zeitpunkt n gemessene CPU-Auslastung,
- P_{idle} ist die elektrische Leistungsaufnahme im Idle-Zustand,
- $P(n)$ ist die zum Zeitpunkt n gemessene Leistungsaufnahme des Servers,
- $t(n)$ ist die Länge des Messintervalls,
- N ist die Anzahl an Messungen.

Mit der SIC-Kennzahl gelingt es daher, die beiden Größen CPU-Auslastung und Idle-Stromverbrauch zusammenzubringen und in einer gemeinsamen Kennzahl darzustellen. Genau genommen handelt es sich bei dieser Kennzahl nicht um eine Effizienzkennzahl, sondern um eine Ineffektivitätskennzahl, da der Minimalwert das Optimum darstellt (keine Verluste, geringste Ineffektivität) und der Maximalwert den schlechtesten Fall abbildet (ausschließlich Leerlaufverluste, 100% ineffektiv).

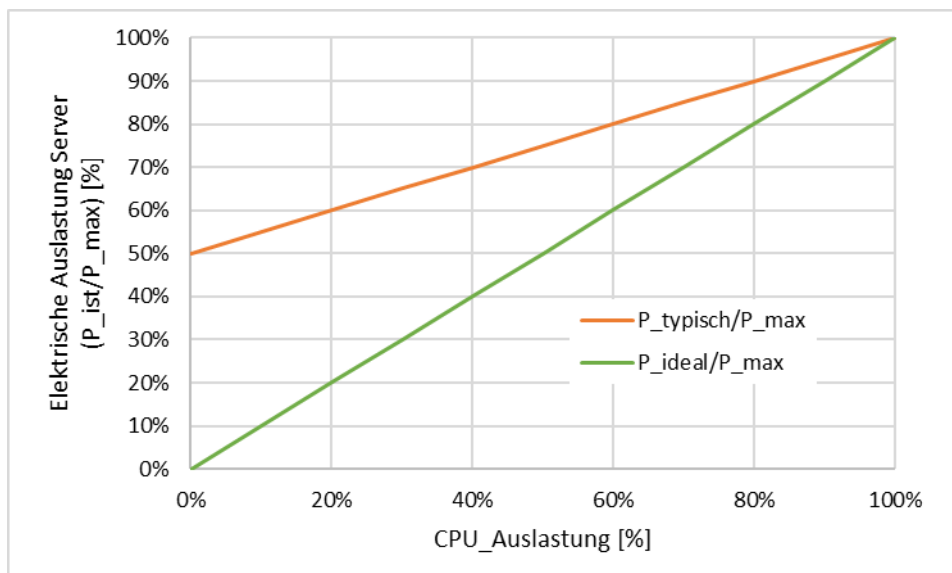
Ausgehend von den Überlegungen von Harryvan (2021) werden nachfolgend Effizienzkennzahlen für Server, Speichersysteme und Netzwerkgeräte entwickelt, die das Prinzip im Sinne einer Effizienzkennzahl umdrehen und beschreiben, wie viel Auslastung durch die IT-Geräte erreicht wird und wie diese mit dem Anteil am Energieverbrauch korreliert. Die Kennzahlen werden als *Lastkorrelationen* bezeichnet, da sie ausdrücken, wie gut es den Geräten gelingt, die tatsächliche Auslastung (nützliche Arbeit) mit dem Energieverbrauch (Aufwand) in Einklang zu bringen. Das Optimum ist dann erreicht, wenn die Auslastung und der Anteil am maximalen Energieverbrauch gerade übereinstimmen.

4.2 Server

Für Server gilt, wie oben dargestellt, dass eine möglichst hohe Auslastung erreicht werden soll, um eine hohe Effizienz zu ermöglichen. Zusätzlich ist es erstrebenswert, dass Leerlaufverluste möglichst gering sind und die Server nur so viel Energie verbrauchen, wie sie aktuell an CPU-Leistung erbringen.

In der nachfolgenden Abbildung 5 wird der Zusammenhang zwischen CPU-Auslastung und elektrischer Leistungsaufnahme von Servern für einen typischen Server und einen idealen Server dargestellt.

Abbildung 5: Zusammenhang zwischen CPU-Auslastung und elektrischer Leistungsaufnahme von typischen und idealen Servern



Quelle: Öko-Institut e.V.

Ein Server benötigt in der Praxis auch dann Energie, wenn er sich im Leerlaufmodus (Idle) befindet, also wenn seine CPU-Auslastung bei 0% liegt. Bei typischen Servern machen diese Leerlaufverluste bis zu 50% der maximalen Leistungsaufnahme ($P_{\text{Server_max}}$) aus. Ist dieser Server zu 50% ausgelastet, so benötigt er 75% der maximalen Leistungsaufnahme. Ist der gleiche Server voll ausgelastet

(CPU-Auslastung 100%), so liegt seine Leistungsaufnahme bei 100% der maximalen Leistungsaufnahme (Vollastmodus) und die gesamte benötigte Energie kann der nützlichen Arbeit des Servers zugeordnet werden. Dieser Zusammenhang eines typischen Servers wird oben durch die orangene Linie dargestellt. Die einzige Möglichkeit, solch einen Server optimal zu betreiben, ist, ihn möglichst hoch (nahe an der 100%) auszulasten. Ein idealer Server, oben dargestellt mit der grünen Linie, weist dagegen keine Leerlaufverluste auf und reduziert seine Leistungsaufnahme gerade im gleichen Umfang wie die beanspruchte CPU-Auslastung. Eine CPU-Auslastung von 0% führt demnach zu einem Stromverbrauch von 0, eine CPU-Auslastung von 50% zu einem Stromverbrauch von 50% der maximalen Leistungsaufnahme und im Vollastfall liegen CPU-Auslastung und Leistungsaufnahme gleichermaßen bei 100%. Für einen idealen Server ist es daher unter dem Aspekt der Energieeffizienz gleichgültig, wie stark er ausgelastet ist.

Die Kennzahl, die hier entwickelt wird, berücksichtigt beide Einflussfaktoren: die CPU-Auslastung und die Fähigkeit des Servers, seinen Stromverbrauch bei sinkender CPU-Auslastung zu reduzieren. Statt der Leistungsaufnahme im Leerlaufmodus (P_{idle}), der beim SIC-Wert verwendet wird, wird hier die maximal mögliche Leistungsaufnahme des Servers im Vollastmodus (P_{Server_max}) als Bezugsgröße herangezogen. Dieser Wert ist ein fester elektrischer Leistungswert pro Server, der gemäß der Ökodesign-Verordnung für Server und Speichersysteme (Verordnung (EU) 424/2019) seit dem 1. März 2020 in technischen Datenblättern und auf der Webseite des Herstellers angegeben werden muss. Alternativ kann dieser Wert auch selbst gemessen werden, indem die Server maximal belastet werden (unter Linux beispielsweise mit dem `stress` Befehl).

Die neue Kennzahl wird im Folgenden Lastkorrelation (LC – load correlation) genannt, da sie beschreibt, wie gut die IT-Auslastung mit der Energie-Auslastung korreliert. Die bereits etablierte Kennzahl IT Equipment Utilisation of Servers ($ITEU_{SV}$) wird als Wert für die jährliche mittlere CPU-Auslastung aller Server herangezogen. Es wird definiert:

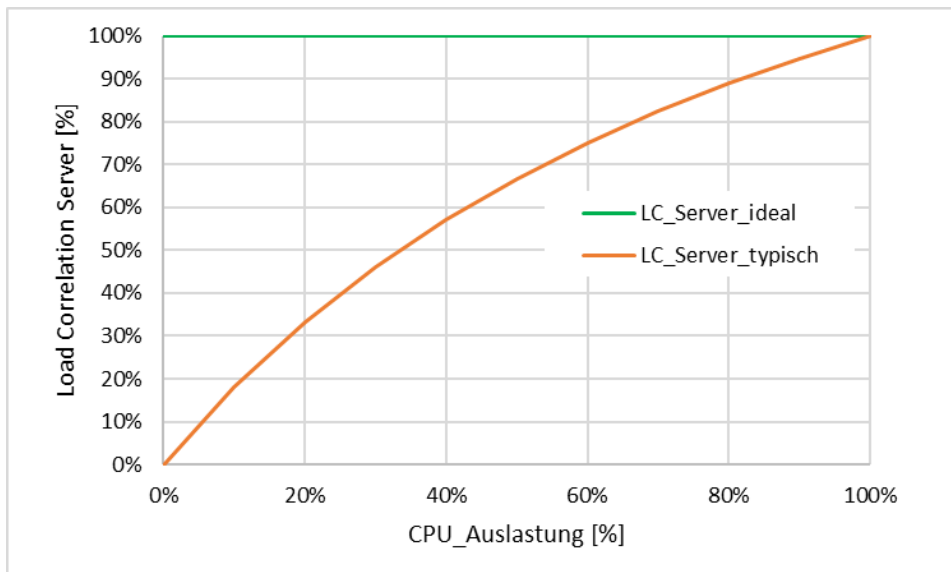
$$LC_{Server} = \frac{ITEU_{SV}}{\left(\frac{E_{Server}}{P_{Server_max} \cdot t}\right)} \quad (11)$$

Mit:

- LC_{Server} als dimensionslose Lastkorrelation der Server (0 bis 100%),
- $ITEU_{SV}$ als mittlere (jährliche) CPU-Auslastung der Server (0 bis 100%),
- E_{Server} als (jährlicher) Energieverbrauch aller Server in kWh,
- P_{Server_max} als Summe der maximalen Leistungsaufnahme aller Server im Vollastmodus in kW,
- t als Messzeitraum in Stunden, für einen Jahreswert entspricht dies 8760h.

Berechnet man die Lastkorrelation für die in Abbildung 5 dargestellten Server für einen typischen Server (orange) und für einen idealen Server (grün), so erhält man abhängig von der CPU-Auslastung die Kurvenverläufe, die in der nachfolgenden Abbildung 6 dargestellt sind. Der typische Server (orange) zeigt einen steigenden Wert für die Lastkorrelation, der bei $LC_{Server} = 0\%$ für die CPU-Auslastung von 0% beginnt und sein Maximum von $LC_{Server} = 100\%$ erreicht, wenn die CPU-Auslastung bei 100% liegt. Der ideale Server weist dagegen über den gesamten Wertebereich der CPU-Auslastung eine Lastkorrelation von $LC_{Server} = 100\%$ auf, arbeitet also zu jedem Auslastungszustand optimal.

Abbildung 6: Zusammenhang zwischen CPU-Auslastung und Lastkorrelation (LC_{Server}) von typischen und idealen Servern



Quelle: Öko-Institut e.V.

4.3 Speichersysteme

Die oben für Server dargestellte Herangehensweise zur Berechnung der Lastkorrelation kann gleichermaßen auf Speichersysteme übertragen werden. Hier besteht die nützliche Arbeit des Speichersystems in der Regel in der Speicherplatzbelegung. Analog zu oben wird daher definiert, dass die Lastkorrelation für Speichersysteme ($LC_{Storage}$) das Verhältnis zwischen prozentualer Speicherauslastung und anteiligem Energieverbrauch des Speichers an seinem maximalen Energieverbrauch ist:

$$LC_{Storage} = \frac{Storage_Utilisation}{\left(\frac{E_{Storage}}{P_{Storage_max} \cdot t}\right)} \quad (12)$$

Mit:

- $LC_{Storage}$ als dimensionslose Lastkorrelation der Speichersysteme (0 bis 100%),
- $Storage_Utilisation$ als mittlere (jährliche) Speicherplatzbelegung (0 bis 100%),
- $E_{Storage}$ als (jährlicher) Energieverbrauch aller Speichersysteme in kWh,
- $P_{Storage_max}$ als Summe der maximalen Leistungsaufnahme aller voll belegten Speichersysteme in kW,
- t als Messzeitraum in Stunden, für einen Jahreswert entspricht dies 8760h.

Für Speichersysteme lässt sich argumentieren, dass deren Energieverbrauch nicht mit der Speicherplatzbelegung korreliert, sondern eher mit dem Datendurchsatz bei Lese- und Schreibaktivitäten. Nimmt man daher die Speicherplatzbelegung als Nutzeneinheit, so bleibt der Energieverbrauch konstant. Vereinfachend können daher beide Energieverbräuche $E_{Storage}$ und $(P_{Storage_max} \cdot t)$ gleichgesetzt werden, was zu einem Nenner von 1 führt, und folgende Vereinfachung der Berechnungsvorschrift zulässt:

$$LC_{Storage} \approx Storage_Utilisation \quad (13)$$

Die Effektivität des Speichersystems ist demnach mit der prozentualen (jährlichen) Speicherplatzbelegung gleichzusetzen. Dies ist insofern auch logisch, da ein nicht belegter Speicher nur unnötig Energie verbraucht, während ein voll belegter Speicher das System maximal nutzt.

4.4 Netzwerkgeräte

Netzwerk-Switches (Multiport-Bridge-Geräte) sind die wichtigsten Komponenten der Netzwerkinfrastruktur in einem Rechenzentrum. Sie werden hier daher herangezogen, um eine Aussage über die prozentuale Auslastung der Netzwerkinfrastruktur zu machen.

Ursprüngliche Überlegungen, die übertragenen Datenmengen im Verhältnis zur maximalen Datenübertragung als Nutzen der Switches zu verwenden, wurden verworfen, da Monitoringdaten zu intern und extern übertragenen Datenmengen in Rechenzentren nur unzureichend erhoben werden, und, weil es darüber hinaus keinen unmittelbaren Zusammenhang zum Energieverbrauch von Netzwerk-Switches und deren übertragene Datenmengen gibt.

Im Gegensatz zu der übertragenen Datenmenge korreliert jedoch der Anteil angeschlossener physischer Ports mit der Energieaufnahme von Netzwerkkomponenten, da nicht angeschlossene Ports in den Stand-by-Modus versetzt werden können (vgl. „Energy-Efficient Ethernet Standard“ IEEE 802.3az³).

Es gilt für die Netzwerk-Auslastung (Network Utilisation):

$$Network_Utilisation = \frac{Ports_{connected}}{Ports_{available}} \quad (14)$$

Ports bezeichnet hier die Anzahl physischer Ports an allen Multiport-Bridge-Geräten. Für die Lastkorrelation für Netzwerkgeräte ($LC_{Network}$) wird als Netzwerk-Auslastung der Quotient aus der Anzahl angeschlossener Ports mit der Anzahl verfügbarer Ports definiert, für den Anteil am Energieverbrauch der Quotient aus gemessenem Energieverbrauch zum maximalen Energieverbrauch bei voller Port-Belegung:

$$LC_{Network} = \frac{Network_Utilisation}{\left(\frac{E_{Network}}{P_{Network_max} \cdot t} \right)} \quad (15)$$

Mit:

- $LC_{Network}$ als dimensionslose Lastkorrelation des Netzwerks (0 bis 100%),
- *Network_Utilisation* als mittlere (jährliche) Belegung physischer Ports (0 bis 100%),
- $E_{Network}$ als (jährlicher) Energieverbrauch aller Netzwerkgeräte in kWh,
- $P_{Network_max}$ als Summe der maximalen Leistungsaufnahme aller Netzwerkgeräte mit voll belegten Ports in kW,
- t als Messzeitraum in Stunden, für einen Jahreswert entspricht dies 8760h.

³ <https://standards.ieee.org/ieee/802.3az/4270/>

4.5 Energieeffizienzindex für Informationstechnik

Der Vorschlag zur Berechnung eines Energieeffizienzindex für Informationstechnik setzt sich aus den obigen drei Werten der Lastkorrelationen (LC) zusammen. Es wird ein gewichteter Mittelwert gebildet, der entsprechend dem Anteil am Gesamtstromverbrauch der jeweiligen Teilbereiche Server, Speichersysteme und Netzwerkgeräte am Gesamtenergieverbrauch der Informationstechnik gewichtet wird. Dadurch wird der Energieeffizienzindex der Situation gerecht, dass in manchen Rechenzentren Server die größten Energieverbraucher darstellen, in anderen dagegen Speichersysteme oder Netzwerkgeräte. Es ist sogar möglich, dass damit ausschließlich Netzwerk-Rechenzentren bewertet werden, beispielsweise Rechenzentren vom Unternehmen für Kommunikationsdienstleistungen. Der Ansatz wird daher allen Geschäftsmodellen der IT-Betreiber gerecht:

$$EEI_{IT} = 100 \cdot (LC_{Server} \cdot \frac{E_{Server}}{E_{IT}} + LC_{Storage} \cdot \frac{E_{Storage}}{E_{IT}} + LC_{Network} \cdot \frac{E_{Network}}{E_{IT}}) \quad (16)$$

Wobei für den Energieverbrauch der Informationstechnik (E_{IT}) gilt:

$$E_{IT} = E_{Server} + E_{Storage} + E_{Network} \quad (17)$$

Obiger Term wird durch Einsetzen der Definitionen der Lastkorrelationen aus (11), (12) und (15) zu:

$$\begin{aligned} EEI_{IT} = \frac{100}{E_{IT}} \cdot (ITEU_{SV} \cdot P_{Server_max} \cdot t \\ + Storage_Utilisation \cdot E_{Storage} \\ + Network_Utilisation \cdot P_{Network_max} \cdot t) \end{aligned} \quad (18)$$

Mit:

- EEI_{IT} als Energieeffizienzindex für Informationstechnik mit Werten von 0 bis 100 Punkten,
- $ITEU_{SV}$ als mittlere (jährliche) CPU-Auslastung (0 bis 100%),
- P_{Server_max} als Summe der maximalen Leistungsaufnahme aller Server im Volllastmodus in kW,
- $Storage_Utilisation$ als mittlere (jährliche) Speicherplatzbelegung (0 bis 100%),
- $E_{Storage}$ als (jährlicher) Energieverbrauch aller Speichersysteme in kWh,
- $Network_Utilisation$ als mittlere (jährliche) Belegung physischer Ports (0 bis 100%),
- $P_{Network_max}$ als Summe der maximalen Leistungsaufnahme aller Netzwerkgeräte mit voll belegten Ports in kW,
- t als Messzeitraum in Stunden, für einen Jahreswert entspricht dies 8760h.

Falls der IT-Betreiber selbst keine Netzwerkkomponenten betreibt, weil er beispielsweise Kunde innerhalb eines Co-Lokation-Rechenzentrum ist und die Netzwerkkomponenten des RZ-Betreibers nutzt, kann der Energieverbrauch des Netzwerkes $E_{Network}$ vereinfachend auf Null gesetzt werden. Dies ist insbesondere auch dann zulässig, wenn davon ausgegangen werden kann, dass die Netzwerkkomponenten nur einen vernachlässigbar kleinen Anteil am Gesamtstromverbrauch ausmachen.

5 Energieeffizienzkennzeichnung

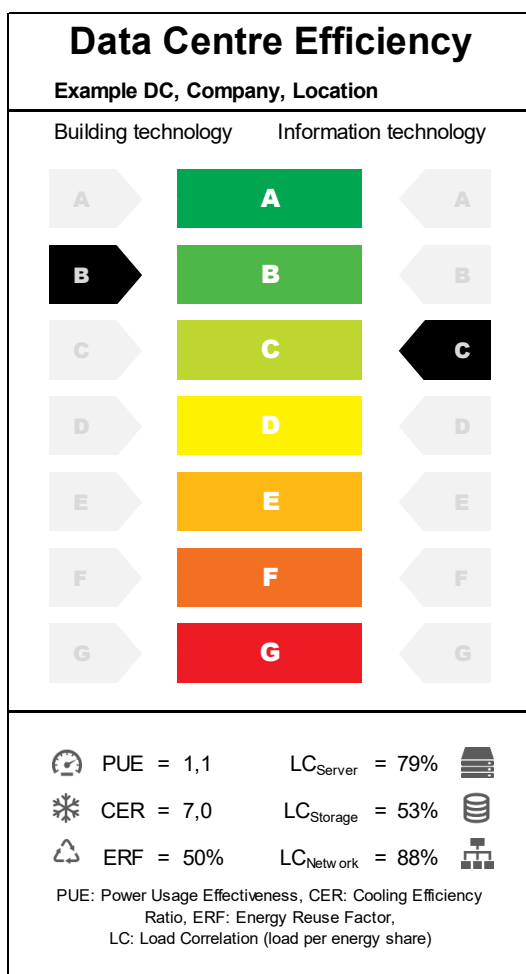
Im letzten Schritt werden die beiden Energieeffizienzindizes für die Gebäudetechnik (EEL_{BT}) und die Informationstechnik (EEL_{IT}) nun jeweils in eine Effizienzklasse übersetzt, wie sie uns von der EU-Energieeffizienzkennzeichnung vertraut ist. Der Wertebereich von 0 bis 100 Punkten wird in die alphanummerische Skala von „A“ bis „G“ übersetzt. „A“ stellt dabei die beste Effizienzklasse dar, „G“ die schlechteste. Die Zuordnung erfolgt wie in nachfolgender Tabelle 1 dargestellt:

Tabelle 1: Zuordnung des Energieeffizienzindex EEI zur Effizienzklasse

EEI	Effizienzklasse
≥ 90	A
≥ 75 bis < 90	B
≥ 60 bis < 75	C
≥ 45 bis < 60	D
≥ 30 bis < 45	E
≥ 15 bis < 30	F
< 15	G

Quelle: Öko-Institut e.V.

Abbildung 7: Energieeffizienzkennzeichnung für Rechenzentren



Quelle: Öko-Institut e.V.

In Abbildung 7 wird beispielhaft dargestellt, wie eine Energieeffizienzkennzeichnung für Rechenzentren grafisch gestaltet werden könnte.

Innerhalb der Kennzeichnung werden die Energieeffizienzindizes für die Gebäudetechnik (EEl_{BT}) und die Informationstechnik (EEl_{IT}) bewusst nicht miteinander verrechnet, sondern getrennt voneinander in eine Effizienzklasse A bis G umgerechnet und nebeneinander dargestellt. Auf der linken Seite wird die Effizienzklasse für die Gebäudetechnik dargestellt, auf der rechten Seite die Effizienzklasse für die Informationstechnik. So bleiben die Informationen erhalten, wie effizient der jeweilige Bereich des Rechenzentrums arbeitet. Anbieter von Co-Lokation-Rechenzentren haben dadurch die Möglichkeit, nur die Effizienz der Gebäudetechnik auszuweisen, die Betreiber von IT können ihre IT-bedingte Effizienzklasse ergänzen.

Die Energieeffizienzkennzeichnung bietet außerdem Platz für weitergehende Informationen, wie die ursprünglichen Werte des PUE, CER oder ERF, die Werte der Lastkorrelationen und bei Bedarf ggf. noch Werte zum Anteil erneuerbarer Energien (REF) oder der Wassernutzungszahlen (WUE oder absoluter Wasserverbrauch).

Mit der vorgelegten Berechnungsvorschrift und den Vorschlägen zu deren Visualisierung soll ein Beitrag dazu geleistet werden, dass Rechenzentren ihre Energieeffizienz mit einheitlichen Maßstäben sichtbar machen. Damit wird ein Anstoß für einen fairen Wettbewerb um die effizientesten Rechenzentrumsdienstleistungen gegeben.

Literaturverzeichnis

- Blauer Engel DE-UZ 228 (2023): Vergabekriterien Blauer Engel DE-UZ 228. Rechenzentren. Ausgabe Januar 2023 Version 1. Hg. v. RAL gGmbH. Online verfügbar unter <https://produktinfo.blauer-engel.de/uploads/criteriafile/de/DE-UZ%20228-202301-de-Kriterien-V1.pdf>, zuletzt geprüft am 08.06.2023.
- GDA; pwc (2020): Data Center Outlook 2021. Big data = big business? Volume 1. Unter Mitarbeit von Thomas Veith und Jens Peter Müller. Hg. v. German Datacenter Association e.V.
- Harryvan, D. H. (2021): The idle coefficients. KPIs to assess energy wasted in servers and data centres. Hg. v. IEA 4E Technology Collaboration Programme. Online verfügbar unter <https://www.iea-4e.org/wp-content/uploads/2021/10/Server-Idle-Coefficients-FINAL-1.pdf>.
- Kistowski, Jóakim von; Lange, Klaus-Dieter; Arnold, Jeremy A.; Block, Hansfried; Greg, Darnel; Beckett, John; Tricker, Mike (2021): The SERT® 2 Metric and the Impact of Server Configuration. Hg. v. Standard Performance Evaluation Corporation (SPEC®). Online verfügbar unter <https://www.spec.org/sert2/SERT-metric.pdf>.
- Maagøe, Viegand (2022): Energy Efficiency Metrics for Data Centres. Report Prepared for IEA 4E EDNA by Viegand Maagøe. Online verfügbar unter <https://www.iea-4e.org/wp-content/uploads/2022/10/EDNA-Studies-Metrics-for-data-centre-efficiency-Final.pdf>, zuletzt geprüft am 31.05.2023.
- Mira Weber; Benjamin Ott (2023): Best-Practice- Übersicht. Von inspirierenden Projekten zur Abwärmenutzung aus Rechenzentren lernen. Hg. v. Deutsche Unternehmensinitiative Energieeffizienz e.V. Universität Stuttgart, IER. Online verfügbar unter <https://deneff.org/wp-content/uploads/2023/05/Best-Practice-Uebersicht-Bytes2Heat.pdf>, zuletzt geprüft am 09.06.2023.
- Schödwel, Björn; Zarnekow, Rüdiger; Gröger, Jens; Lui, Ran; Wilkens, Marc (2018): Kennzahlen und Indikatoren für die Beurteilung der Ressourceneffizienz von Rechenzentren und Prüfung der praktischen Anwendbarkeit. Hg. v. Umweltbundesamt.
- SPECpower Committee (2014): Power and Performance Benchmark Methodology V2.2. Online verfügbar unter https://www.spec.org/power/docs/SPEC-Power_and_Performance_Methodology.pdf, zuletzt geprüft am 31.05.2023.
- Tomas Rahkonen; Jay Dietrich (2023): Server energy efficiency: five key insights. Briefing Report. Hg. v. Uptime Institute. Online verfügbar unter <https://uptimeinstitute.com/resources/research-and-reports/server-energy-efficiency-five-key-insights>, zuletzt geprüft am 09.06.2023.
- Umweltbundesamt (Hg.) (2021): 25 Jahre Umweltbewusstseinsforschung im Umweltressort. Langfristige Entwicklungen und aktuelle Ergebnisse. Unter Mitarbeit von Angelika Gellrich, Andreas Burger, Kerstin Tews, Clara Simon und Silke Seider. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021_hgp_umweltbewusstseinsstudie_bf.pdf, zuletzt geprüft am 05.06.2023.
- Uptime Institute (2021): Uptime Institute Global Data Center Survey 2021. Unter Mitarbeit von Daniel Bizo, Rhonda Ascierio, Andy Lawrence und Jacqueline Davis. Online verfügbar unter <https://uptimeinstitute.com/2021-data-center-industry-survey-results>, zuletzt geprüft am 26.12.2022.
- Verordnung (EU) 424/2019: VERORDNUNG (EU) 2019/ 424 DER KOMMISSION - vom 15. März 2019 - zur Festlegung von Ökodesign-Anforderungen an Server und Datenspeicherprodukte gemäß der Richtlinie 2009/ 125/ EG des Europäischen Parlaments und des Rates und zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 617/ 2013 der Kommission. Ökodesign Verordnung. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R0424&from=EN>, zuletzt geprüft am 22.05.2019.