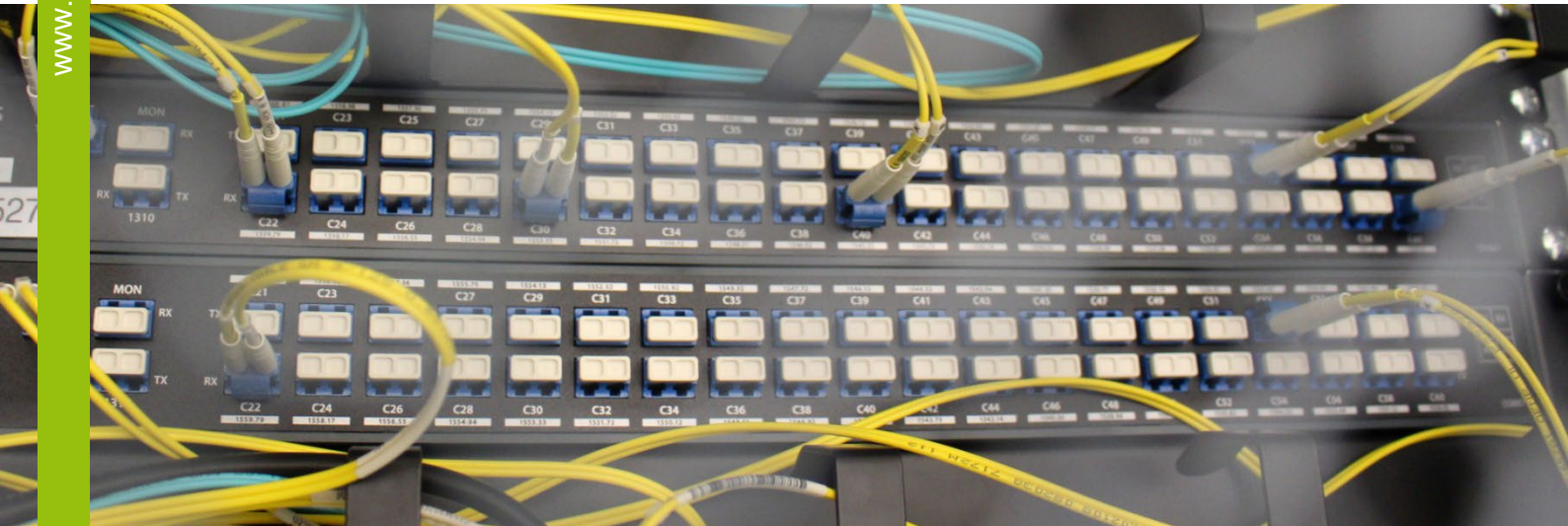




Ökobilanz digitaler Dienstleistungen

Methodik zur Bestimmung der Umweltwirkungen von Software, Cloud-Services und anderen digitalen Diensten in verteilten IT-Infrastrukturen

// Jens Gröger | Felix Behrens | Ran Liu | Dirk Bunke

Die nachfolgende Methodenskizze entstand in dem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Forschungsprojekt **eco:digit**, das sich schwerpunktmäßig mit den Umweltwirkungen von Software befasst. In dem Projekt wird durch die Projektbeteiligten eine Simulationsumgebung entwickelt, mit der Software auf unterschiedlichen virtualisierten Hardware-Plattformen getestet werden kann. Aus den Messergebnissen lassen sich Strategien für die Optimierung der Software und der Hardware-Infrastruktur ableiten. Die hier vorgestellte Methodik zur Bestimmung der Umweltwirkungen von digitalen Dienstleistungen bildet hierfür die methodische Grundlage.

Inhalt	
Digitale Lieferkette	2
Digitale Basisressourcen	3
Ökobilanz	6
Zusammenführung von Ökobilanz, DBR und digitaler Lieferkette	13
Datenerhebung	19
Literatur	26

Als *digitale Dienstleistung* wird im Rahmen dieser Methodik jede durch den Einsatz von Digitaltechnik bereit gestellte Maschinenarbeit verstanden. Also beispielsweise die Darstellung eines Inhalts auf dem Computer-Bildschirm, das Verarbeiten von Daten, die Übertragung über ein Netzwerk, das Speichern von Daten in einem Cloud-Speicher oder konkreter die Bereitstellung einer Webseite, die Beantwortung einer Suchanfrage oder das Ausliefern eines Video-Streams. Eine digitale Dienstleistung erbringt dabei einen quantifizierbaren Nutzen.

Die Ökobilanz digitaler Dienstleistungen unterscheidet sich von der klassischen Ökobilanz (*life-cycle-assessment*) dadurch, dass im Fokus nicht ein einzelnes physisches Produkt steht, sondern eine Vielzahl unterschiedlicher Hardware-Plattformen (z.B. Endgeräte, Netzwerk, Server). Diese Plattformen werden von dem Dienst nicht vollständig für sich beansprucht, sondern nur zeitlich begrenzt und mit anteiliger Auslastung. Dadurch erhöht sich die Komplexität der Ökobilanz, da einerseits viele verschiedene Produkte bewertet werden müssen und andererseits eine Zuordnung (*Allokation*) erfolgen muss, zu welchen Anteilen die jeweiligen Produkte an den gesamten Umweltwirkungen der digitalen Dienstleistung beteiligt sind.

Als weiterer Begriff wird im Rahmen dieser Methodenskizze daher die *digitale Lieferkette* eingeführt. Die digitale Lieferkette setzt sich zusammen aus allen bei der Auslieferung der digitalen Dienstleistung beteiligten Hardware-Plattformen. Zur Erstellung der Ökobilanz müssen alle Glieder der digitalen Lieferkette bewertet und geeignet zugeordnet werden.

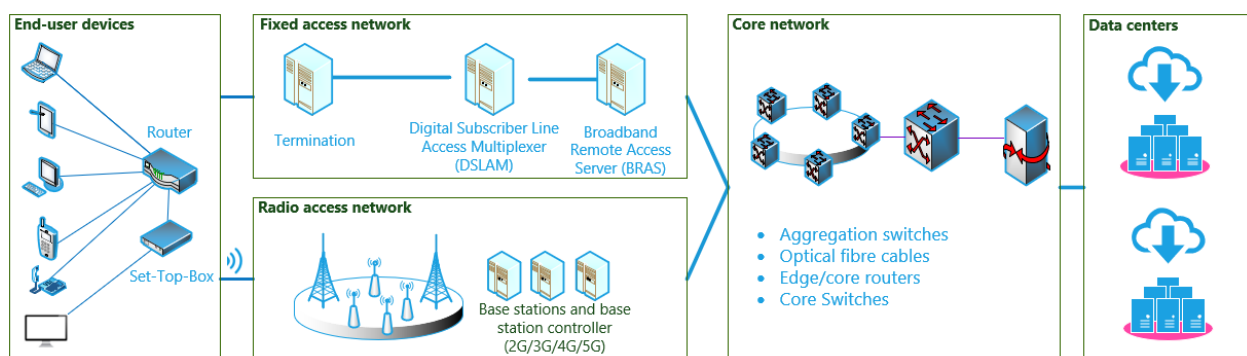
Digitale Lieferkette

Die digitale Lieferkette beschreibt die Summe aller Einzelgeräte und Infrastrukturelemente, die zur Erbringung und Inanspruchnahme einer digitalen Dienstleistung erforderlich sind. Im einfachsten Fall besteht sie aus einem einzelnen „Kettenglied“, beispielsweise einem einzelnen Endgerät, das ohne externe Abhängigkeit seinen Dienst verrichtet (z.B. ein Offline-Computer). Der häufigere Fall ist jedoch, dass eine Internet-Anbindung besteht und eine Vielzahl an unterschiedlichen Hardware-Plattformen an der Dienstleistung beteiligt sind.

Besucht ein*e Nutzer*in beispielsweise eine Website, so sind dafür mindestens ein Endgerät, ein Netzwerkzugangspunkt, verschiedene Netzknoten entlang des Übertragungsweges und im Rechenzentrum ein Server mit Speichersystem erforderlich.

In der nachfolgenden Abbildung wird die digitale Lieferkette schematisch dargestellt, wobei zwischen *End-user-devices*, *Access network* (getrennt in *fixed* und *mobile*), *Core network* und *Data centres* unterschieden wird.

Abbildung 1: Digitale Lieferkette



Quelle: Öko-Institut

Um die Umweltwirkungen einer digitalen Dienstleistung zu bilanzieren, müssen die Umweltwirkungen entlang der gesamten digitalen Lieferkette ermittelt und der jeweiligen Dienstleistung anteilig zugeordnet werden.

Die vorangehende Darstellung vom Endgerät zum Rechenzentrum zeigt die digitale Lieferkette von digitalen Diensten in der Nutzungsphase. Die „Herstellung“ der Software ist darin nicht enthalten. Wenn die Programmierung der Software mit einem hohen Einsatz von digitaler Infrastruktur verbunden ist, wie es beispielsweise für das maschinelle Trainieren von Modellen der Künstlichen Intelligenz (KI) erforderlich ist, muss die digitale Lieferkette noch um die Produktionsseite der Software ergänzt werden. Dies können beispielsweise Hochleistungsrechenzentren oder spezielle Server-Kapazitäten mit Grafikprozessoren sein. Die Zuordnung zu den später in Anspruch genommenen digitalen Diensten muss dann entsprechend den jeweiligen Service-Einheiten erfolgen.

Digitale Basisressourcen

Digitale Dienstleistungen bestehen ganz grundsätzlich darin, dass Daten verarbeitet, temporär oder dauerhaft gespeichert sowie übertragen werden. Solche grundlegenden Leistungen digitaler Infrastrukturen werden hier als *digitale Basisressourcen* (DBR) bezeichnet.

Digitalen Basisressourcen (DBR) sind:

- Rechenleistung (compute)
- Arbeitsspeicherleistung (memorize)
- Speicherleistung (store)
- Datenübertragung (transfer)

Diese digitalen Dienstleistungen werden grundsätzlich von Komponenten der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) bereitgestellt. Alle weiteren technischen Geräte und Infrastrukturkomponenten wie Stromverteilung, ausfallsichere Energieversorgung, gekühlte Räume, Gebäude, Sicherheitstechnik und administrativer Aufwand werden ausschließlich dazu betrieben, die Digitaldienstleistung zur Verfügung zu stellen. Deren Aufwände können daher ebenfalls den digitalen Basisressourcen in Form eines „Overheads“ anteilig zugeordnet werden. Dies trifft ebenso auf I/O-Geräte zu, z.B. Mäuse, Tastaturen, Monitore, Anzeigetafeln etc.

Jede Software benötigt eine zählbare Menge an digitalen Basisressourcen. Und jedes IKT-Gerät stellt eine bestimmte Menge davon zur Verfügung. Durch die Einführung dieser Abstraktionsebene wird es möglich, den Zusammenhang zwischen dem Bedarf (Software) und dem Angebot (Hardware) herzustellen.

Das Konzept der digitalen Basisressourcen wird in dem Whitepaper SDIA (2022) detaillierter vorgestellt.

Hardware stellt digitale Basisressourcen zur Verfügung

Für jedes Digitalgerät, nachfolgend auch *Plattform* genannt, kann bestimmt werden, welche digitalen Basisressourcen es maximal zur Verfügung stellen kann. Die Rechenleistung (compute) wird dabei durch die Leistungsfähigkeit der CPU und GPU bestimmt, Arbeitsspeicherleistung (memorize) durch die Menge an installiertem RAM und die Speicherleistung (store) durch SSD und HDD-Kapazitäten. Die maximale Menge an Datenübertragung (transfer) ist von der Geschwindigkeit der jeweiligen Netzwerkschnittstelle abhängig.

Mit dieser Systematik können nicht nur rechnende und speichernde Systeme beschrieben werden, sondern auch Netzwerkgeräte. Diese stellen dann ggf. ausschließlich Datenübertragung (transfer) als digitale Basisressourcen zur Verfügung.

Neben den Maximalmengen an digitalen Basisressourcen (DBR), die eine Plattform theoretisch bereitstellen kann, ist der tatsächliche Betrieb der Hardware für die Effizienz maßgeblich. Eine Plattform, die beispielsweise nur zur Hälfte ausgelastet ist, stellt auch nur die Hälfte ihrer verfügbaren digitalen Leistung zur Verfügung. Pro Gerät müssen daher die jeweiligen Auslastungen (Load) erfasst werden, die die Hardwarekomponenten bezogen auf ihre Lebensdauer durchschnittlich aufweisen. Dies sind die CPU- und GPU-Auslastung, durchschnittlich belegter Arbeitsspeicher, prozentuale Belegung der Festplatten und durchschnittliche Übertragungsraten. Daraus ergeben sich die durchschnittlich bereitgestellten digitalen Basisressourcen ($DBR_{average}$).

In Tabelle 1 werden maximale DBR und $DBR_{average}$ beispielhaft dargestellt.

Tabelle 1: Beispielhafte digitale Basisressourcen einer Plattform

Hardware-komponente	Kurzbezeichnung	Digitale Basisressource der Plattform (DBR)	Beispiel	Einheit	Durchschnittliche Auslastung oder Belegung ($Load_{average}$)	Durchschnittlich bereitgestellte digitale Basisressource ($DBR_{average}$)
CPU	co (compute)	CPU-Frequenz * Busbreite	128	GHz*bit	20%	25,6 GHz*bit
RAM	me (memorize)	Arbeitsspeicherplatz	8	Gigabyte	10%	0,8 Gigabyte
Storage	st (store)	Festplattenspeicherplatz	4.000	Gigabyte	50%	2.000 Gigabyte
Network	tr (transfer)	maximale Datenübertragung	100	Megabit/s	2%	2 Megabit/s

Quelle: Öko-Institut

Als Performance-Kennzahl für die digitale Basisressource *compute* wurde in der Tabelle der Einfachheit halber *CPU-Frequenz * Busbreite* gewählt. Denkbar wären auch andere Performance-Kennzahlen wie *Floating Operations per Second* (FLOPS), *Server-side Java Operations per Second* (SSJOPS) oder die Nutzung anderer CPU- bzw. GPU-Benchmarks, die plattformübergreifend erhoben werden können. Die Benchmarks müssen sich über die Auslastung linear skalieren lassen.

Sind die digitalen Basisressourcen (*DBR*) einer Plattform und deren durchschnittliche Auslastung ($Load_{average}$) bekannt, kann daraus die digitale Arbeit (*DW*), die während der gesamten technischen Lebensdauer (*Lifetime*) der Plattform bereitgestellt wird, berechnet werden.

Digitale Arbeit (*DW*) über die Lebensdauer einer Plattform:

$$DW_{co} = DBR_{CPU} \cdot Load_{average,CPU} \cdot Lifetime \quad [\text{z.B. GHz*bit*s} = \text{Gbit}]$$

$$DW_{me} = DBR_{RAM} \cdot Load_{average,RAM} \cdot Lifetime \quad [\text{GByte*s}]$$

$$DW_{st} = DBR_{storage} \cdot Load_{average,storage} \cdot Lifetime \quad [\text{GByte*s}]$$

$$DW_{tr} = DBR_{network} \cdot Load_{average,network} \cdot Lifetime \quad [\text{Mbit/s*s} = \text{Mbit}]$$

Während die digitalen Basisressourcen (*DBR*) Leistungswerte sind, die zu einem einzelnen Zeitpunkt bereitstehen, ist in der digitalen Arbeit (*DW*) die Dauer der Inanspruchnahme enthalten. Die Einheit *Sekunden* kürzt sich dabei im Fall von *co* und *tr* bei den gewählten Einheiten heraus.

Exkurs: Durchschnittliche Auslastung

Zur Bestimmung der Umweltwirkungen einer Software, ist es erforderlich, den Herstellungsaufwand der Hardware und den Energieverbrauch in der Nutzungsphase anteilig der Software zuzuordnen. Dafür wird in dieser Methodik mit einer durchschnittlichen Auslastung der Hardware gerechnet. Nur dann, wenn die Hardware tatsächlich ausgelastet ist, erbringt sie eine digitale Arbeit, z.B. Rechenoperationen, Speicherarbeit oder Datenübertragung. Leerlaufzustände werden in diesem Konzept als nicht nützlich definiert, auch wenn sie in der Praxis als Reserve für mögliche Lastspitzen vorgehalten werden.

Die durchschnittliche Auslastung ergibt sich als der **Mittelwert aller Auslastungszustände über die gesamte technische Lebensdauer** einer Hardware. Bei einer Hardware, die dauerhaft in Betrieb ist, beispielsweise in einem Rechenzentrum, entspricht dies den Mittelwerten aus den Log-Files der

Systemüberwachung. Da diese Werte in der Regel nicht für die gesamte technische Lebensdauer vorliegen, kann die durchschnittliche Auslastung auch anhand eines kürzeren Zeitintervalls abgeschätzt werden.

Komplizierter wird die Bestimmung der durchschnittlichen Auslastung bei Hardware, die nur temporär läuft, beispielsweise bei einem Desktop-Computer, der nur 8 Stunden pro Tag in Betrieb ist. Der Aus-Zustand geht dann in die Mittelwertberechnung für den **Herstellungsaufwand** mit Auslastungen der jeweiligen Hardware-Komponenten von Null ein. Während dieser Zeit erbringt der Computer keinen Nutzen, die Hardware musste aber dennoch hergestellt werden.

Beim **Energieverbrauch während der Nutzung** des Computers, der in dieser Methodenbeschreibung weiter unten dargestellt wird, geht jedoch die elektrische Leistungsaufnahme während der durchschnittlichen Nutzung und die Dauer der tatsächlichen Inanspruchnahme in die Berechnung ein. Beim Energieverbrauch wird daher mit der durchschnittlichen Auslastung während des eingeschalteten Zustandes gerechnet und der Aus-Zustand ignoriert. Sollte der Aus-Zustand mit relevanten Energieverbräuchen verbunden sein (z.B. Standby-Verluste), so müssen diese Verluste dem eigentlichen Betriebszustand als Overhead zugeordnet werden. Dieser Spezialfall wird in der Methodenbeschreibung jedoch nicht weiter ausgeführt.

Software nutzt digitale Basisressourcen

Wird eine Software ausgeführt, so beansprucht sie lokale Rechenkapazitäten, Arbeits- und Permanentspeicher und sie verursacht einen Datenverkehr, der die physischen Grenzen der jeweiligen Plattform verlässt und an die nächste Plattform der digitalen Lieferkette weitergegeben wird. Auf jeder einzelnen Plattform kann daher gemessen werden, wie viele digitale Basisressourcen punktuell in Anspruch genommen werden und zu wie viel digitaler Arbeit sich diese Inanspruchnahme addiert.

Zur Bestimmung der Umweltwirkungen einer digitalen Dienstleistung muss zunächst eine geeignete Nutzungseinheit (*service unit*) definiert werden, auf die die Messergebnisse bezogen werden sollen. Dies kann für einen kontinuierlichen Dienst (z.B. Audio- oder Videostreaming) eine Zeiteinheit sein (Nutzung über den Zeitraum einer Stunde), für einen task-basierten Dienst die jeweilige Aufgabe (z.B. Beantwortung einer Suchanfrage, Verarbeitung eines Textes mit 1000 Zeichen, Abwicklung eines Bezahlprozesses) und für quantifizierbare Dienste die jeweilige Anzahl zusammen mit einer Zeiteinheit (z.B. Nutzung von 128 virtuellen CPUs über 24 Stunden, 1000 Gigabyte Cloud-Speicher über 1 Jahr, 1 TB Datenmenge an ausgeliefertem Content über den Zeitraum 1 Stunde).

Die Messung auf der jeweiligen Hardware-Plattform erfolgt dann, indem die digitale Dienstleistung über einen längeren Zeitraum oder mehrfach in Anspruch genommen wird und dabei durch geeignete Logging-Tools erhoben wird, wie viele Nutzungseinheiten abgerufen wurden und welche digitale Arbeit dabei geleistet wurde.

In Tabelle 2 sind die Messwerte aufgeführt, die bei der Messung eines Software-Produktes oder einer digitalen Dienstleistung erhoben werden müssen:

Tabelle 2: **Messung der genutzten digitalen Arbeit eines Software-Produktes**

- Service units: Anzahl an Nutzungseinheiten im Messzeitraum [Anz]
- DW_{co} : CPU- oder GPU-Arbeit berechnet aus Volllast-Sekunden [Gbit/s*s]
- DW_{me} : RAM-Speicherarbeit [GByte-Sekunden]

- DW_{st} : Permanentspeicherarbeit [GByte-Sekunden]
- DW_{tr} : Datenübertragungsarbeit [Mbit/s*s]

Quelle: Öko-Institut, Hinweis: für CPU- oder GPU-Arbeit kann bei Bedarf auch eine andere Messgröße gewählt werden

Bei Anwendung der Methode muss die Nutzungseinheit jeweils kontextabhängig definiert werden. Dies können zum Beispiel Nutzungsstunden, Anzahl an Aufrufen oder Ausführungen eines Nutzungsszenarios, bediente Kund*innen oder Datenmengen sein. Die Messergebnisse werden anschließend durch die Anzahl an Nutzungseinheiten geteilt, damit die digitale Arbeit pro Nutzungseinheit ausgewiesen werden kann.

Ökobilanz

Die Methodik der produktbezogenen Ökobilanz ist in der ISO-Norm 14040/14044 ausführlich beschrieben. Wesentliches Merkmal der Ökobilanz (engl.: *life cycle assessment*) ist es, dass ein Produkt und die Materialien, aus denen es besteht, entlang ihrer gesamten Lebenswege untersucht werden. Vom Rohstoffabbau über deren Transport, Verarbeitung zu Zwischenprodukten, Produktion und Zusammenbau, Transport zum Einsatzort, Nutzung und schließlich Entsorgung oder ggf. Recycling. Entlang des gesamten Lebensweges wird untersucht, welche Ressourcen aus der Umwelt entnommen werden und welche schädlichen Einträge zurück in die Umwelt stattfinden. Dabei kann es sich auch um Emissionen beteiligter Prozesse handeln, beispielsweise die Emissionen an Verbrennungsabgasen aus der Stromherstellung, die ihrerseits den Strom für die Herstellungs- und Nutzungsphase liefert.

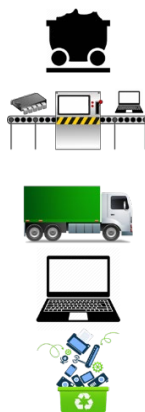
Abbildung 2: Entnahmen und Einträge entlang der Lebensphasen

Entnahme aus der Umwelt

- Energieträger (fossil, nuklear, erneuerbar)
- Erze und andere Mineralien (z. B. Eisen, Aluminium, Silizium)
- Wasser
- Organische Ressourcen
- Boden
- ...

Lebensphasen

- Gewinnung von Rohmaterialien
- Produktion und Zusammenbau
- Transport
- Nutzungsphase
- Entsorgung



Einträge in die Umwelt

- Emissionen in die Luft (z. B. Treibhausgasemissionen)
- Feste Abfälle aus der Verbrennung
- Abwärme
- Verschmutztes Wasser
- Verschlechterung der Bodenqualität
- Elektronikschrott
- Flächenverbrauch für Mülldeponien
- Schadstoffe
- ...

Quelle: Öko-Institut

Die Einträge in die Umwelt werden in der Ökobilanz mit sogenannten *Umweltwirkungskategorien* bewertet. Damit ist es möglich, unterschiedliche Schadstoffe (oder allgemein Wirkungen) mit einheitlichen Maßstäben zu bewerten und zusammen zu fassen. Gibt es beispielsweise Emissionen an Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4) und Kältemittel R134a ($C_2H_2F_4$) so können diese entsprechend ihrem spezifischen Treibhauspotenzial (CO_2 : 1; CH_4 : 28; $C_2H_2F_4$: 1.503 kg CO_2e/kg) gewichtet und zusammengezählt werden. Die Einheit für die Umweltwirkung Treibhauspotenzial ist dann Kilogramm Kohlendioxid-Äquivalente (kg CO_2e).

Durch die hohe Relevanz des Klimaschutzes werden Ökobilanzen häufig auf deren Treibhauspotenzial verkürzt. So sieht der Product-Carbon-Footprint (PCF) nach ISO 14067

beispielsweise ausschließlich die Ausweisung von CO₂-Äquivalenten eines Produktes vor. Im Rahmen des Projektes eco:digit werden für digitale Dienstleistungen bewusst weitere relevante Umweltwirkungskategorien bilanziert. Damit ist es möglich, weitere Umweltwirkungen, wie beispielsweise den Ressourcenverbrauch und die Schadstoffemissionen von Software und IT-Infrastruktur sichtbar zu machen.

Folgende Umweltwirkungskategorien (*environmental impact categories* – EI) werden in eco:digit mit einem vereinfachten ökobilanziellen Ansatz bilanziert:

- CED: Cumulated Energy Demand – Kumulierter Energieaufwand [J] ist der Primärenergiebedarf, der zur Bereitstellung einer Energieform oder für einen Prozess aufgewendet wurde.
- GWP: Global Warming Potential [kg CO₂e] ist ein Maß für Treibhausgasäquivalente, welches die Umweltwirkung Klimawandel quantifiziert.
- ADP: Abiotischer Ressourcenverbrauch [kg Antimon-Äquivalent] bemisst den mineralischen und metallischen Rohstoffbedarf, gewichtet nach ihrer Verfügbarkeit im Verhältnis zu Antimon.
- Water: ist eine Volumenangabe, die den Wasserverbrauch (unter Berücksichtigung der Verfügbarkeit) bewertet [m³ world eq].

Zusätzlich werden noch folgende Indikatoren auf Produktebene und auf der Ebene der Prozesschemikalien bewertet:

- WEEE: Waste of Electrical and Electronic Equipment [kg] misst Elektronikschrottmengen, die bei der Entsorgung der Geräte auftreten.
- TOX: kennzeichnet die Menge an problematischen Stoffen, die in der Produktion oder bei der Nutzung der Hardware eingesetzt wurden oder im Produkt enthalten sind, gemessen in Kilogramm Monoethylenglykol-Äquivalenten [kg MEG eq] (Bunke et al. 2024, Bunke und Graulich 2003, Liu et al. 2024).
- SVHC-Score [1...5]: beschreibt die Informationsverfügbarkeit zu besonders besorgniserregenden Stoffen (SVHC, substances of very high concern) in einem Produkt (Bunke et al. 2024, Liu et al. 2024). Dabei gilt:
 - 1: SVHC Gehalt spezifiziert (Name, Konzentration, Bauteil) oder keine enthalten,
 - 2: SVHC identifiziert (Namen der SVHC),
 - 3: Information erhalten,
 - 4: Information angefragt,
 - 5: Keine Information, keine Aktivität.

Herstellungsaufwand

Im Rahmen der vorliegenden Methode wird der **Herstellungsaufwand** von Hardware (oft auch als *embedded emissions* oder *embedded environmental impacts* bezeichnet) mit den Methoden der Ökobilanz ermittelt. Die **Transportemissionen** werden, sofern diese bekannt sind, den Herstellungsemissionen zugeordnet. Es wird für die Bilanzierung von Elektronikprodukten jedoch davon ausgegangen, dass die Transportemissionen nur unwesentlich zum Gesamtergebnis beitragen, da der eigentliche Herstellungsaufwand sehr hoch ist.

Eine Besonderheit bei der Ökobilanz innerhalb von eco:digit ist es, dass die Umweltwirkungen eines Produktes differenziert nach den elektronischen Komponenten Prozessoren,

Arbeitsspeicher, Permanentspeicher und Netzwerkkomponenten berechnet werden. Bei diesen Komponenten handelt es sich um die Elektronik, die die digitalen Basisressourcen (siehe oben) im Wesentlichen zur Verfügung stellen. Zum einen erleichtert dieser Ansatz die spätere Zuordnung von in Anspruch genommenen digitalen Basisressourcen zu deren Umweltwirkung zum anderen erlaubt er, unterschiedliche Konfigurationen von Geräten präziser abzubilden, wenn die Herstellerdaten nur auf eine bestimmte Konfiguration zutreffen. Die gemeinsamen Komponenten, die keiner Basisressource zugeordnet werden können (z.B. Netzteile, Gehäuse, Leiterplatten), werden als Overhead den einzelnen Hauptkomponenten anteilig zugeordnet. Dadurch entsteht eine differenzierte Ergebnisdarstellung nach dem Schema in Tabelle 3:

Tabelle 3: Aufteilung der Umweltwirkungen nach Hardware-Komponenten

Hardware-Komponente (hw)	Netto EI _{hw} (Beispielwerte)	Zuordnungsfaktor für Overhead z _{hw}	Zugeordneter Overhead	Brutto EI _{hw}	Zuordnung zur digitalen Basis- ressource
CPU/GPU	a = 150	a/(a+b+c+d) = 48%	24	A = 174	co (compute)
RAM	b = 100	b/(a+b+c+d) = 32%	16	B = 116	me (memorize)
SSD/HDD	c = 50	c/(a+b+c+d) = 16%	8	C = 58	st (store)
Netzwerkkomponente	d = 10	d/(a+b+c+d) = 3%	2	D = 12	tr (transfer)
Sonstige Komponenten (Overhead)	e = 50	-	-	-	-
Summe	Σ = 360	Σ = 100%	Σ = 50	Σ = 360	

Quelle: Öko-Institut

Legende : EI = Umweltwirkungskategorie (CED, GWP, ADP, Water, WEEE, TOX)

$$z_{hw} = \frac{\text{Netto EI}_{hw}}{\sum \text{Netto EI}_{hw} \text{ ohne Overhead}}$$

$$\text{Brutto EI}_{hw} = \text{Netto EI}_{hw} + z_{hw} \cdot \text{Netto EI Overhead} = z_{hw} \cdot \sum \text{Netto EI}_{hw}$$

mit hw = {CPU, GPU, RAM, ...}

Im Rahmen des Projektes eco:digit wird zusätzlich ein Berechnungswerkzeug zur überschlägigen Ökobilanzierung von Digitalprodukten entwickelt, das grobe Ergebnisse für die Herstellung von Hardware-Produkten mit den genannten Umweltwirkungskategorien (CED, GWP, ADP, Water) liefert. Eingangsparameter sind dort die technischen Daten der relevantesten elektronischen Bauteile (CPUs, GPUs, RAM, SSDs, HDDs), Netzteile, Gehäusematerialien und Leiterplattenfläche (siehe Tabelle 10). Sofern für die Hardware keine produktspezifischen Ökobilanzen durchgeführt wurden, kann dieses Werkzeug behelfsweise genutzt werden.

Liegen vom jeweiligen Digitalprodukt bereits Ökobilanzen oder Environmental Product Declarations (EPDs) vor, so können zumindest die Herstellungsemissionen (Herstellung und Transport) und die Elektronikschrottmengen aus diesen übernommen werden. Für den Energieverbrauch in der Nutzungsphase sollte eine einheitliche Berechnung für alle Digitalprodukte erfolgen, die unter Stromverbrauch der Hardware vorgestellt wird.

Nutzungsphase

Innerhalb der **Nutzungsphase** digitaler Geräte entstehen in der Regel keine direkten Emissionen durch die Geräte selbst, dafür aber indirekte Umweltwirkungen durch den Stromverbrauch (z.B. Treibhausgasemissionen, Primärenergiebedarf) und durch die Rechenzentrumsinfrastruktur (Wasserverbrauch durch Verdunstungskühlung, Emissionen an Kältemitteln). Der Schwerpunkt hier liegt daher in der Erfassung des Energieverbrauchs während der Nutzungsphase.

Stromverbrauch der Hardware

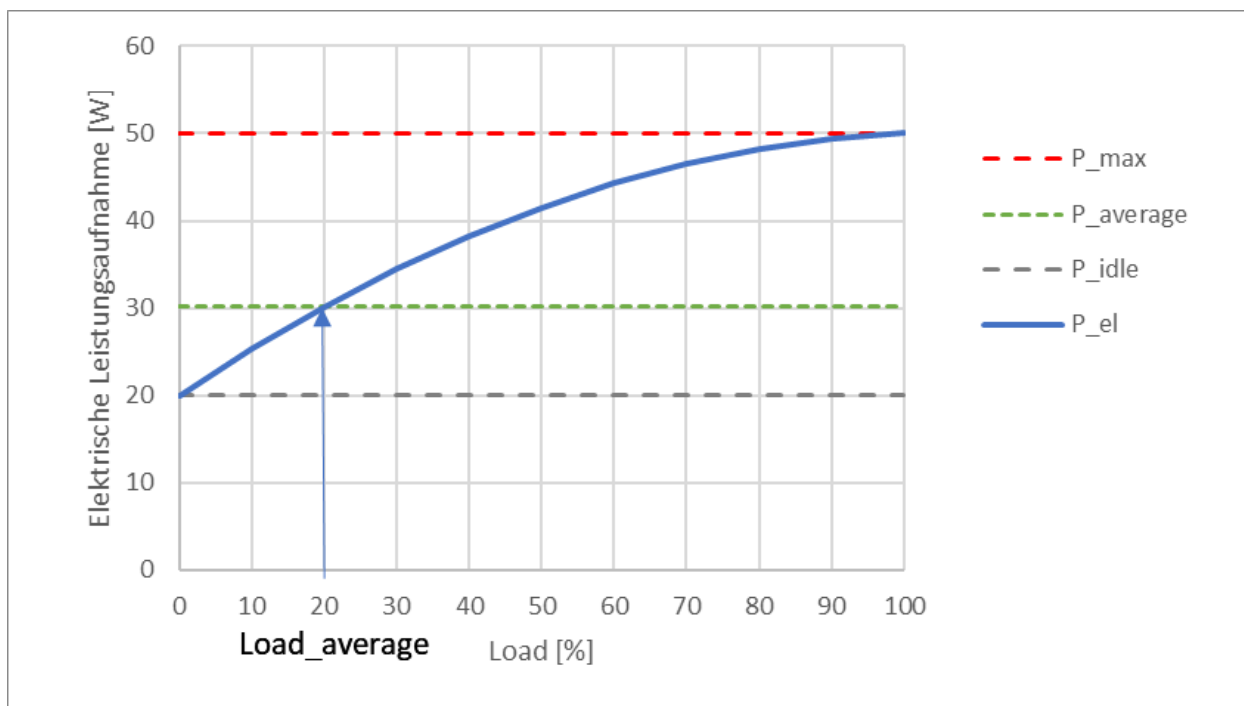
Analog zum Vorgehen bei der Berechnung des Herstellungsaufwands erfolgt auch die Messung des Energieverbrauchs der Hardware separat nach den einzelnen beteiligten Hardware-Komponenten. Anders als beim fixen Herstellungsaufwand steigt jedoch der Energieverbrauch der Hardware abhängig von der Nutzungsintensität und Nutzungsdauer.

Die elektrische Leistungsaufnahme jeder einzelnen Komponente kann prinzipiell durch einen fixen Basisanteil (P_{idle}) und einen variablen von der Auslastung abhängigen Anteil ($P_{variable}$) beschrieben werden.

$$P_{el} = P_{idle} + P_{variable}$$

In Abbildung 3 wird der Zusammenhang zwischen Auslastung (*Load*) und elektrischer Leistungsaufnahme einer beliebigen Hardware-Komponente graphisch dargestellt.

Abbildung 3: Elektrische Leistungsaufnahme einer Hardware-Komponente in Abhängigkeit ihrer Auslastung



Quelle: Öko-Institut

Der Verlauf der elektrischen Leistungsaufnahme (P_{el}) in Abbildung 3 beginnt bei einem Basiswert (P_{idle}) von 20 Watt und steigt dann bei steigender Auslastung (*Load*) auf einen Maximalwert von 50 Watt (P_{max}) an. Die durchschnittliche Auslastung (*Load_average*), die hier mit 20 % eingezeichnet ist, führt zu einer durchschnittlichen Leistungsaufnahme ($P_{average}$) von 30 Watt. Die Darstellung ist nur ein Beispiel. Der tatsächliche Verlauf muss durch Messungen an der jeweiligen Hardware-Komponente ermittelt werden.

In erster Näherung kann der Verlauf der Leistungsaufnahme als linearer Verlauf zwischen P_{idle} (*Load* = 0) und P_{max} (*Load* = 100%) beschrieben werden, der dann als lineare Formel wie folgt darstellbar ist:

$$P_{el}(Load) = P_{idle} + Load \cdot (P_{max} - P_{idle})$$

Realistischere Ergebnisse erhält man, wenn die Hardware in unterschiedlichen Lastzuständen durchgemessen und der Kurvenverlauf mit einer quadratischen Formel in dieser Form angenähert wird:

$$P_{el}(Load) = P_{idle} + a \cdot Load + b \cdot Load^2$$

Im Rechenmodell von Boavizta (2024) wird als Näherungsformel für die Leistungsaufnahme von CPUs eine logarithmische Formel mit 4 zu ermittelnden Parametern verwendet (siehe <https://doc.api.boavizta.org/Explanations/components/cpu/>):

$$P_{el}(Load) = a \cdot \ln(b \cdot (Load + c)) + d$$

Unabhängig davon, mit welcher Genauigkeit der Kurvenverlauf der Leistungsaufnahme beschrieben wird, sollte für jede Hardware-Komponente, die eine digitale Basisressource zur Verfügung stellt, eine geeignete Formel gefunden werden. Diese Formel $P_{el}(Load)$ muss den Zusammenhang zwischen der Auslastung (gleichbedeutend mit dem Anteil an der maximal lieferbaren digitalen Basisressource) und der elektrischen Leistungsaufnahme dieser Komponente herstellen.

Die nachfolgende Tabelle 4 zeigt (anhand von willkürlich gesetzten Beispielwerten), wie die Ergebnisse einer Messung der Hardware-Komponenten aussehen könnten. Angegeben werden die Leistungsaufnahmen im Leerlaufzustand (P_{idle}), die maximale Leistungsaufnahme der jeweiligen Komponente (P_{max}) sowie die durchschnittliche Auslastung der jeweiligen Hardware-Komponente ($Load_{average}$).

Tabelle 4: Aufteilung der Leistungsaufnahme nach Hardware-Komponenten

Hardware-Komponente (h)	P_{idle}	P_{max}	Durchschnittliche Auslastung ($Load_{average}$)	Netto $P_{average}$	Zuordnungsfaktor für Overhead Z_{hw}	Brutto $P_{average}$	Zuordnung DBR
CPU	50 W	150 W	20%	70 W	47%	81,7 W	co
GPU	20 W	100 W	5%	24 W	16%	28,0 W	co
RAM	20 W	20 W	10%	20 W	13%	23,4 W	me
SSD	10 W	10 W	50%	10 W	7%	11,7 W	st
HDD	20 W	20 W	50%	20 W	13%	23,4 W	st
NW (Netzwerk-komponente)	5 W	5 W	2%	5 W	3%	5,8 W	tr
Sonstige Komponenten (=Overhead)	25 W	25 W	100%	25 W	-	-	-
Summe	$\Sigma = P_{idle} = 150 \text{ W}$	$\Sigma = P_{max} = 330 \text{ W}$		$\Sigma = \text{Netto } P_{average} = 174 \text{ W}$	$\Sigma = 100\%$	$\Sigma = \text{Brutto } P_{average} = 174 \text{ W}$	

Quelle: Öko-Institut

Einige der Komponenten ändern ihre elektrische Leistungsaufnahme nicht, unabhängig davon, wie stark sie ausgelastet sind. So ändert sich beispielsweise die elektrische Leistungsaufnahme einer Festplatte (HDD) nicht mit der darauf belegten Speicherkapazität. Die Leerlaufleistung ist immer gleich der maximalen Leistungsaufnahme. Für die spezifische Leistungsaufnahme pro Speicherkapazität macht die tatsächliche Belegung jedoch einen Unterschied, da die Festplatte bei gleichbleibendem Energieverbrauch nur so viel nützliche IT-Arbeit erbringt, wie sie an

Speicherplatz aktiv zur Verfügung stellt. Dies zu verifizieren und mit konkreten Zahlen zu belegen, wird Teil der durchzuführenden Messungen sein.

Die durchschnittliche Auslastung ist auch hier wieder (wie bei der Berechnung der zur Verfügung stehenden DBR) ein wesentlicher Parameter, um die durchschnittliche Leistungsaufnahme ($P_{average}$) zu berechnen.

Zu der durchschnittlichen Netto-Leistungsaufnahme wird ein Anteil der Leistungsaufnahme der sonstigen Komponenten (Overhead), die keiner digitalen Basisressource zugeordnet sind, hinzugerechnet. Die Berechnung der durchschnittlichen Brutto-Leistungsaufnahme erfolgt über den *Zuordnungsfaktor für Overhead* (z_{hw}):

$$z_{hw} = \frac{Netto P_{average_{hw}}}{Netto P_{average\ ohne\ overhead}} \text{ mit } hw = \{CPU, GPU, RAM, SSD, HDD, NW\}$$

Wobei für den Nenner $Netto P_{average\ ohne\ overhead}$ gilt:

$$Netto P_{average\ ohne\ overhead} = \sum Netto P_{average_{hw}} \text{ mit } hw = \{CPU, GPU, RAM, SSD, HDD, NW\}$$

Die Berechnung der Brutto-Leistungsaufnahme der DBR-Komponenten berechnet sich dann mit:

$$\begin{aligned} Brutto P_{average_{hw}} &= Netto P_{average_{hw}} + z_{hw} \cdot Netto P_{average_{overhead}} = \\ &= z_{hw} \cdot Netto P_{average_{total}} \text{ mit } hw = \{CPU, GPU, RAM, SSD, HDD, NW\} \end{aligned}$$

Diese mittleren Leistungsaufnahmen werden dazu genutzt, den Energieverbrauch der jeweiligen Komponente bei der Ausführung einer Software zu berechnen. Dies geschieht über die Berechnung von Aufwandskennzahlen für die Nutzungsphase, die für jede der digitalen Basisressourcen (co, me, st, tr) gebildet wird. Mit diesen Aufwandskennzahlen wird eine mathematische Funktion aufgestellt, die den Energieverbrauch der jeweiligen Computer-Plattform in Abhängigkeit der benötigten IT-Arbeit (DW) berechnet:

$$E_{Software} = function(Platform, DW_{co}, DW_{me}, DW_{st}, DW_{tr}) \quad [kWh_{ei}]$$

In die Berechnung des Energieverbrauchs geht die Nutzungsdauer der Plattform durch die Software über die genutzte digitale Arbeit ($DW = DBR \cdot t$) ein (vgl. Tabelle 2). Während dieses Zeitraums ist die Computer-Plattform eingeschaltet und nicht im Aus-Zustand. Als mittlere Leistungsaufnahme wird daher die Leistungsaufnahme im eingeschalteten Zustand berechnet und nicht etwa der Mittelwert zusammen mit dem ausgeschalteten Zustand. Siehe dazu auch die Hinweise unter Exkurs: Durchschnittliche Auslastung.

Umrechnung Stromverbrauch in Umweltwirkungen

Für die Ökobilanz müssen die Umweltwirkungen in der Nutzungsphase ermittelt werden. Dies erfolgt durch eine Umrechnung des elektrischen Energieverbrauchs ($E_{Software}$) in die untersuchten Umweltwirkungskategorien (EI_{ei}) durch Multiplikation mit einem Emissionsfaktor (EF_{ei}):

$$EI_{ei, usephase} = EF_{ei} \cdot E_{Software} \text{ mit } ei = \{CED, GWP, ADP, \dots\}$$

Da sich der Stromverbrauch der Software ($E_{Software}$) als Addition des Stromverbrauchs der einzelnen Hardware-Komponenten ergibt, kann die Berechnung der Umweltwirkungen auch komponentenweise und die Summenbildung der Umweltwirkungen auch nachträglich erfolgen.

Dadurch ist es möglich, den Einfluss der einzelnen Hardware-Komponenten besser sichtbar zu machen.

Die nachfolgende Tabelle 5 zeigt die Emissionsfaktoren (EF) der unterschiedlichen Umweltwirkungskategorien (EI) für elektrische Energie aus dem deutschen Strommix mit Niedervoltspannung aus dem Jahr 2020.

Tabelle 5: Emissionsfaktoren für elektrische Energie

Umweltwirkungskategorie (EI)	Emissionsfaktor (EF)	Beispielwert (Strommix, DE, 2020)	Einheit
CED	CED_{el}	8,37	[MJ/kWh _{el}]
GWP	GWP_{el}	0,421	[kg CO ₂ e/kWh _{el}]
ADP	ADP_{el}	5,24 E-6	[kg Sb eq/kWh _{el}]
Water	$Water_{el}$	0,239	[m ³ world eq/kWh _{el}]
WEEE	$WEEE_{el}$	n.a.	[kg _{WEEE} /kWh _{el}]
TOX	TOX_{el}	n.a.	[kg MEG eq/kWh _{el}]

Quelle: Öko-Institut (nach Ecoinvent 3.10)

Legende: n.a. = nicht anwendbar

Besonderheiten für Hardware in Rechenzentren

Wird eine Hardware in einem **Rechenzentrum** betrieben, so kommt zum Stromverbrauch der Hardware noch ein Overhead durch die Gebäudeinfrastruktur hinzu. Der tatsächliche Stromverbrauch der Geräte erhöht sich dann um den Faktor PUE (Power Usage Effectiveness).

Der PUE ist dabei gemäß der Norm EN 50600-4-2 definiert als:

$$PUE = \text{Stromverbrauch des Rechenzentrums} / \text{Stromverbrauch der Informationstechnik}$$

Die Umweltwirkungen der Software im Rechenzentrum erhöhen sich daher ebenfalls um den Faktor PUE und können vereinfacht wie folgt berechnet werden:

$$EI_{ei, usephase in DC} = EF_{ei} \cdot PUE \cdot E_{Software} \text{ mit } ei = \{CED, GWP, ADP, \dots\}$$

Neben dem Mehrverbrauch an Strom können im Rechenzentrum aber auch weitere direkte Emissionen aus den Ersatzstrom-Anlagen (Verbrennungsabgase), aus den Kälteanlagen (Verlust an Kältemitteln) oder den elektrischen Schaltanlagen (SF₆-Schutzgasemissionen) auftreten sowie ein direkter Wasserverbrauch (Verdunstungskühlung) und ein Aufkommen an zusätzlichem Elektro- und Elektronikschrott (z.B. Bleibatterien der unterbrechungsfreien Stromversorgung).

Solche weiteren Emissionen können wieder auf den Stromverbrauch des Rechenzentrums bezogen werden, sodass sich Korrekturwerte für die Emissionsfaktoren für elektrische Energie ($EF_{ei,addon}$) ergeben. Statt die reinen Emissionsfaktoren des nationalen Strommixes ($EF_{ei,grid}$) zu verwenden, wie sie in Tabelle 5 beispielhaft dargestellt sind, kann für den Stromverbrauch in Rechenzentren als Emissionsfaktor ($EF_{ei,DC}$) angesetzt werden:

$$EF_{ei,DC} = (EF_{ei,grid} + EF_{ei,addon}) \text{ mit } ei = \{CED, GWP, ADP, \dots\}$$

Weist das Rechenzentrum also beispielsweise eine jährliche Elektroschrott-Menge von 1 Tonne Bleibatterien auf, bei einem Gesamtstromverbrauch von 10 GWh/a, dann ergibt sich der Korrekturwert für den Emissionsfaktor für den Elektroschrott zu $EF_{WEEE,addon} = 0,1 \text{ g}_{WEEE}/\text{kWh}_{el}$.

Zusammen mit der oben dargestellten Berücksichtigung der Energieverluste der Gebäudetechnik über den PUE ergibt sich für die Umweltwirkungen der Software in Rechenzentren:

$$EI_{ei, usephase\ in\ DC} = (EF_{ei, grid} + EF_{ei, addon}) \cdot PUE \cdot E_{Software} \text{ mit } ei = \{CED, GWP, ADP, \dots\}$$

Entsorgungsphase

Bei der **Entsorgung** von informationstechnischen Geräten könnten Rohstoffe prinzipiell (teilweise) zurückgewonnen werden und bei einer Ökobilanz mit Gutschriften verrechnet werden. Auf solche Gutschriften wird hier verzichtet, nicht zuletzt, weil die konkreten Entsorgungspfade der Geräte nicht vorhersehbar sind. Stattdessen kann der Einsatz von Recyclingmaterialien innerhalb der oben genannten Herstellungsphase emissionsmindernd berücksichtigt werden.

Als Umweltwirkung der Entsorgung werden hier jedoch die **Elektronikschrottmengen** bilanziert, unabhängig vom jeweiligen Verbleib des Abfalls. Mit der Umweltwirkungskategorie WEEE (Waste of Electrical and Electronic Equipment) wird die Abfallmenge in Kilogramm erfasst, die wiederum den einzelnen Software-Anwendungen zugeordnet werden kann.

Zusammenführung von Ökobilanz, DBR und digitaler Lieferkette

Die drei oben beschriebenen Konzepte der digitalen Lieferkette, der digitalen Basisressourcen und der Ökobilanzierung werden nun zu einer gemeinsamen Berechnungsmethode zusammengeführt.

Zunächst werden die ersten beiden Konzepte Ökobilanz und DBR kombiniert. Während die Ökobilanz die Umweltwirkungen einer Hardware beschreibt, also den **Umweltaufwand**, so beschreibt das Konzept der digitalen Basisressourcen den **Nutzen** der jeweiligen digitalen Plattform. Aus Aufwand und Nutzen werden daher im nächsten methodischen Schritt Aufwandskennzahlen gebildet.

Grundsätzlich gilt:

$$EBR = \text{Aufwandskennzahl} = \frac{\text{Aufwand}}{\text{Nutzen}}$$

Als Abkürzung für die Aufwandskennzahl wird **EBR** (*Effort Benefit Ratio*) verwendet.

Aufwandskennzahlen für die Herstellung

Der Umweltaufwand für die Herstellung der Computer-Plattform wurde mit den oben beschriebenen Zuordnungsregeln (Herstellungsaufwand) auf die bereitgestellten digitalen Basisressourcen aufgeteilt (Brutto $EI_{d, embedded}$). Dieser Aufwand wird nun mit dem Nutzen der Computer-Plattform ins Verhältnis gesetzt.

Hierzu wird die digitale Arbeit (DW_{DBR}), die durchschnittlich erzeugt wird, wie oben beschrieben berechnet (Hardware stellt digitale Basisressourcen zur Verfügung). In diese Berechnung geht die durchschnittliche Auslastung über die gesamte Lebensdauer der Hardware ($Load_{average}$) und deren technische Lebensdauer (*Lifetime*) ein. Eine Hardware, die intensiver genutzt wird, stellt daher eine größere Menge an digitaler Arbeit zur Verfügung. Eine Hardware, die länger genutzt wird, erzeugt diese Arbeit mit einem geringeren Herstellungsaufwand pro Arbeitseinheit. Bei der Berechnung wird also bewusst nicht die maximal mögliche Arbeit einer Hardware angenommen, sondern die tatsächlich erbrachte. Dadurch hat auch der reale Betrieb der IT-Plattform einen Einfluss, und es macht z.B. einen Unterschied, ob der gleiche Server in einem niedrig ausgelasteten Serverraum oder einem hoch ausgelasteten Rechenzentrum betrieben wird.

Die Formel zur Berechnung der Aufwandskennzahlen (EBR_EI_{DBR}) ist:

$$EBR_ei_{dbr} = \frac{Brutto\ EI_{dbr,embedded}}{DW_{dbr}} = \frac{Brutto\ EI_{dbr,embedded}}{DBR_{dbr} \cdot Load_{average,dbr} \cdot Lifetime}$$

mit $ei=\{CED,GWP,ADP...\}$ und $dbr=\{co,me,st,tr\}$ [(Einheit des EI)/(Einheit der DBR*s)]

Durch die Differenzierung des Aufwands nach den Umweltwirkungskategorien ($EI = \{CED, GWP, ADP, Water, WEEE, TOX\}$) und dem Nutzen nach den digitalen Basisressourcen ($DBR = \{compute, memorize, store, transfer\}$) ergeben sich insgesamt 6 mal 4 verschiedene Aufwandskennzahlen:

Tabelle 6: Aufwandskennzahlen für die Herstellung EBR_EI_{DBR}

Umweltwirkungskategorie (EI)	compute	memorize	store	transfer
CED	EBR_CED_{co}	EBR_CED_{me}	EBR_CED_{st}	EBR_CED_{tr}
GWP	EBR_GWP_{co}	EBR_GWP_{me}	EBR_GWP_{st}	EBR_GWP_{tr}
ADP	EBR_ADP_{co}	EBR_ADP_{me}	EBR_ADP_{st}	EBR_ADP_{tr}
Water	EBR_Water_{co}	EBR_Water_{me}	EBR_Water_{st}	EBR_Water_{tr}
WEEE	EBR_WEEE_{co}	EBR_WEEE_{me}	EBR_WEEE_{st}	EBR_WEEE_{tr}
TOX	EBR_TOX_{co}	EBR_TOX_{me}	EBR_TOX_{st}	EBR_TOX_{tr}

Quelle: Öko-Institut

In Tabelle 7 sind die Aufwandskennzahlen für die Herstellung exemplarisch für ein fiktives Computer-System mit dem Herstellungsaufwand aus Tabelle 3 und den digitalen Basisressourcen aus Tabelle 1. Es wurde eine technische Lebensdauer (Lifetime) von 4 Jahren angesetzt.

Tabelle 7: Beispielhafte Berechnung der Aufwandskennzahlen EBR_EI_{DBR}

DBR-Kurzbezeichnung	Herstellungsaufwand Brutto $EI_{ei,embedded}$ (Bsp.: EI_{GWP})	Bei durchschnittlicher Auslastung ($Load_{average}$) über die Lebensdauer (Lifetime) bereitgestellte digitale Arbeit (DW_{DBR})	Aufwandskennzahl für Herstellung $EBR_EI_{DBR} = EI_{ei,embedded}/DW_{DBR}$ (Bsp.: EBR_GWP_{DBR})
co (compute)	174 kg CO ₂ e	53.821.440 Gbit	3,23 E-06 kg CO ₂ e/Gbit
me (memorize)	116 kg CO ₂ e	1.681.920 Gigabyte*s	6,90 E-05 kg CO ₂ e/(Gigabyte*s)
st (store)	58 kg CO ₂ e	4.204.800.000 Gigabyte*s	1,38 E-08 kg CO ₂ e/(Gigabyte*s)
tr (transfer)	12 kg CO ₂ e	4.204.800 Megabit	2,85 E-06 kg CO ₂ e/Megabit

Quelle: Öko-Institut

Die Aufwandskennzahlen (EBR_EI_{DBR}) beschreiben die jeweilige Hardware-Plattform und deren durchschnittliche Auslastung und sind das Ergebnis der nach Komponenten differenzierten Ökobilanz. Die Umweltwirkungen für die Inanspruchnahme einer Plattform durch eine Software können dann jeweils in Abhängigkeit der genutzten digitalen Arbeit (DW) berechnet werden:

$$EI_{ei,embedded} = function(Platform, DW_{co}, DW_{me}, DW_{st}, DW_{tr}) \text{ mit } ei = \{CED, GWP, ADP \dots\}$$

Die jeweiligen Formeln dahinter haben die nachfolgende Systematik, dargestellt am Beispiel der Umweltwirkungskategorie für den Primärenergiebedarf (CED):

$$EI_{CED,embedded} = DW_{co} \cdot EBR_CED_{co} + DW_{me} \cdot EBR_CED_{me}$$

$$+ DW_{st} \cdot EBR_CED_{st} + DW_{tr} \cdot EBR_CED_{tr}$$

Oder allgemein:

$$EI_{ei,embedded} = \sum_{dbr} DW_{dbr} \cdot EBR_{ei_{dbr}} \text{ mit } ei = \{CED, GWP, ADP \dots\} \text{ und } dbr = \{co, me, st, tr\}$$

Bei diesen Umweltwirkungen handelt es sich zunächst nur um den Herstellungsaufwand der Hardware („embedded environmental impacts“) und im Fall der Elektronikschrottmengen (WEEE) um eben diese. Noch nicht enthalten ist der Energieverbrauch und ggf. weitere Umweltwirkungen, die bei der Nutzung der Hardware auftreten.

Aufwandskennzahlen für die Nutzungsphase

In der Nutzungsphase einer Hardware entstehen Umweltwirkungen insbesondere durch die Nutzung von elektrischer Energie.

Die Aufwandskennzahlen werden daher zunächst für den elektrischen Energieverbrauch (E) berechnet, um erst anschließend in Umweltwirkungen ($EI_{usephase}$) umgerechnet zu werden. Prinzipiell ließen sich beide Schritte auch zusammenfassen, sodass die digitalen Basisressourcen direkt in Umweltwirkungen in der Nutzungsphase umgerechnet werden können. Da sich die Emissionsfaktoren der Stromproduktion jedoch tageszeitlich, saisonal und je nach geographischem Standort unterscheiden, ist es aber aus Gründen der Transparenz empfehlenswert, zunächst den Stromverbrauch zu berechnen und erst anschließend die damit zusammenhängenden Umweltwirkungen.

In Tabelle 8 erfolgt die Berechnung der Aufwandskennzahl für die Nutzungsphase anhand der mittleren Leistungsaufnahme im Betrieb, hier mit Beispielwerten aus Tabelle 4 und den durchschnittlich bereitgestellten digitalen Basisressourcen ($DBR_{average}$) aus Tabelle 1.

Tabelle 8: Aufwandskennzahlen Nutzungsphase (P_{el} im Verhältnis zu DBR)

DBR-Kurzbezeichnung	$P_{average}$ (brutto)	Durchschnittlich bereitgestellte digitale Basisressource ($DBR_{average}$)	$EBR_P = P_{average}/DBR_{average}$
co (compute)	81,7 W	25,6 GHz*bit	3,1932 W/(GHz*bit)
me (memorize)	23,4 W	0,8 Gigabyte	29,1946 W/Gigabyte
st (store)	11,7 W	2.000 Gigabyte	0,0058 W/Gigabyte
tr (transfer)	5,8 W	2 Megabit/s	2,9195 W/(Megabit/s)

Quelle: Öko-Institut

Das Produkt aus mittlerer Leistungsaufnahme [W] und technischer Lebensdauer [s] ergibt den Energieverbrauch [Ws] jeder Komponente. Wird dieser Energieverbrauch mit der von der Komponente über deren Lebensdauer gelieferten digitalen Arbeit (DW) ins Verhältnis gesetzt, so erhält man die energetische Aufwandskennzahl pro Komponente. Die technische Lebensdauer kürzt sich bei dieser Rechnung heraus. Zur Ermittlung der Aufwandskennzahl wurden daher in Tabelle 8 direkt die Leistungswerte (P und DBR) statt der Arbeitswerte (E und DW) miteinander ins Verhältnis gesetzt.

Es gilt allgemein:

$$EBR_P_{dbr} = \frac{P_{dbr,average}}{DBR_{dbr,average}} \text{ mit } dbr = \{co, me, st, tr\} \text{ [W/(Einheit der DBR)]}$$

Der Energieverbrauch der verschiedenen Hardware-Komponenten, die durch die Software in Anspruch genommen werden, inklusive dem zugeordneten Energie-Overhead aus den sonstigen Komponenten ergibt sich dann zu:

$$E_{dbr} = DW_{dbr} \cdot EBR_{P_{dbr}} \text{ mit } dbr = \{co, me, st, tr\} \quad [Ws_{el}]$$

Bzw. mit der Einheit Kilowattstunden:

$$E_{dbr} = \frac{DW_{dbr} \cdot EBR_{P_{dbr}}}{1000 \cdot 3600} \text{ mit } dbr = \{co, me, st, tr\} \quad [kWh_{el}]$$

Und für alle digitalen Basisressourcen, die zur Ausführung einer Software benötigt werden, gemeinsam:

$$E_{Software} = E_{co} + E_{me} + E_{st} + E_{tr} \quad [kWh_{el}]$$

Die Umrechnung der Energieverbräuche der Software ($E_{Software}$) in Umweltwirkungen während der Nutzungsphase ($EI_{usephase}$) erfolgt anschließend mit den Emissionsfaktoren (EF_{grid}) für jede der untersuchten Wirkungskategorien, wie in Tabelle 5 dargestellt:

$$EI_{ei,usephase} = EF_{ei} \cdot E_{Software} \text{ mit } ei = \{CED, GWP, ADP, \dots\}$$

Für den Sonderfall, dass die Software in einem Rechenzentrum betrieben wird und die Verluste und die zusätzlichen Emissionen der Gebäudetechnik berücksichtigt werden sollen (siehe Besonderheiten für Hardware in Rechenzentren), erfolgt die Berechnung der Umweltwirkungen wie folgt:

$$EI_{ei,usephase \text{ in } DC} = (EF_{ei,grid} + EF_{ei,addon}) \cdot PUE \cdot E_{Software} \text{ mit } ei = \{CED, GWP, ADP, \dots\}$$

Umweltwirkungen der Software durch Hardware-Herstellung und Nutzungsphase

Die gesamten Umweltwirkungen der Software auf einer einzelnen Plattform berechnen sich schließlich aus dem Anteil der Umweltwirkungen, der aus der Herstellung stammt ($EI_{embedded}$) und dem Anteil aus der Nutzungsphase ($EI_{usephase}$).

$$EI_{ei} = EI_{ei,embedded} + EI_{ei,usephase} \text{ mit } ei = \{CED, GWP, ADP, \dots\}$$

Damit die Umweltwirkungen verständlich und interpretierbar sind, sollte zusammen mit diesen Mengenangaben dokumentiert werden, auf welche Nutzungseinheit sie sich beziehen und für welche Computer-Plattform die Berechnung erfolgt ist. Die Angabe könnte daher beispielsweise sinngemäß lauten: „Ausführung eines Standard-Nutzungsszenarios einer Software X über den Zeitraum einer Stunde auf einem Desktop-Computer.“

Bilanzierung entlang der digitalen Lieferkette

Die Berechnung, die bis hierher für eine einzelne Computer-Plattform dargestellt wurde, muss für jede an der digitalen Dienstleistung beteiligten Plattform wiederholt werden. Daher kommt nun das Konzept der digitalen Lieferkette hinzu.

Dabei unterscheiden sich die Parameter (z.B. Herstellungsaufwand, Energieverbrauch, mittlere Auslastung, Rechenleistung usw.) der beteiligten Plattformen. Die Aufwandskennzahlen für Herstellung und Nutzung müssen für jede der Plattformen einzeln ermittelt werden. Außerdem muss für jede der Plattformen gemessen oder simuliert werden, wie hoch die jeweilige Inanspruchnahme der Hardware-Kapazitäten durch die digitale Dienstleistung ist, gemessen als genutzte digitale Arbeit (DW).

In Tabelle 9 wird dies exemplarisch gezeigt für eine digitale Dienstleistung, die eine Software auf einem *Desktop-Computer* ausführt, Daten über einen *Home-Router* ins *Übertragungsnetzwerk* sendet. Das Übertragungsnetzwerk ist hier als Summe der einzelnen Netzwerkknoten zusammengefasst. Die Daten erreichen einen *Netzwerk-Switch* im Rechenzentrum (DC), werden im Rechenzentrum weiter von einem *Server* verarbeitet und ein Teil der Daten wird in einem *Storage-System* abgelegt.

Tabelle 9: Digitale Arbeit entlang der digitalen Lieferkette

Digitale Arbeit	Desktop-Computer	Home-Router	Übertragungsnetz	DC-Netzwerk-Switch	DC-Server	DC-Storage	Einheit
DW_{co}	44.851	-	-	-	134.554	-	Gbit
DW_{me}	4.205	-	-	-	8.410	-	Gigabyte*s
DW_{st}	5.256.000	-	-	-	657.000	1.971.000	Gigabyte*s
DW_{tr}	21.024	21.024	21.024 *	21.024 *	31.536	10.512	Megabit

Quelle: Öko-Institut

* die Datenmengen im Übertragungsnetz und Rechenzentrum liegen voraussichtlich höher als die vom Nutzenden erzeugten Daten. Entsprechende Faktoren müssen noch erarbeitet bzw. gemessen werden.

Bei der Verteilung der digitalen Arbeit über die digitale Lieferkette in Tabelle 9 wird deutlich, dass nicht jedes „Kettenglied“ die gleiche Arbeit verrichtet. Alle in der Tabelle genannten Netzwerkkomponenten beschränken sich hier beispielsweise darauf, die digitale Arbeit *transfer* (DW_{tr}) zu verrichten. Bei der Bilanzierung hat dies den Nebeneffekt, dass alle Herstellungsemissionen und Energieverbräuche in der Nutzungsphase auf diese eine Kernaufgabe bezogen werden können und eine Aufteilung in die anderen digitalen Basisressourcen nicht notwendig ist (siehe Vereinfachungen für Netzwerk-Komponenten und Speichersysteme).

Außerdem wird der Unterschied zwischen Software und digitaler Dienstleistung deutlich. Die Software ist jeweils auf eine einzelne Plattform beschränkt, hier einerseits der Desktop-Computer und andererseits der DC-Server. Auf jeder dieser beiden Plattformen läuft ein anderer Software-Code, der dort eine eigene Last erzeugt und damit zu unterschiedlicher digitaler Arbeit führt. Die digitale Dienstleistung wird dagegen aus der Summe der beteiligten Plattformen erbracht.

Die Umweltwirkungen, für jede einzelne Plattform entlang der digitalen Lieferkette können anschließend addiert werden, sodass gilt:

$$EI_{ei} = \sum_p EI_{ei_p} \text{ mit } ei = \{CED, GWP, ADP, \dots\}$$

und $p = \{\text{platform 1, platform 2, platform 3, } \dots\}$

Auch hier sollte bei der Kommunikation der Umweltwirkungen genannt werden, um welche Nutzungseinheit es sich handelt und welche Plattformen an der Erbringung der digitalen Dienstleistung beteiligt waren. Die Angabe könnte daher beispielsweise sinngemäß lauten: „Auslieferung eines Videostreams über den Zeitraum einer Stunde aus einem Rechenzentrum in Deutschland über das Internet bis zu einem privaten DSL-Router und Wiedergabe auf einem Desktop-Computer.“

Vereinfachungen für Netzwerk-Komponenten und Speichersysteme

Innerhalb dieser Methodenbeschreibung wurde ein Schwerpunkt darauf gelegt, die von Hardware-Komponenten erbrachte digitale Arbeit in die unterschiedlichen digitalen Basisressourcen

(*compute, memorize, store, transfer*) aufzuteilen und die Umweltwirkungen nach diesen zu differenzieren (siehe Digitale Basisressourcen).

Einige der Systeme entlang der digitalen Lieferkette werden aber eigens dafür eingesetzt, ausschließlich eine einzelne digitale Basisressource zur Verfügung zu stellen. Dies gilt insbesondere für Netzwerk-Komponenten, wie beispielsweise Switches, Router, Netzzugangspunkte, Antennen oder Signalverstärker, die eigens dafür betrieben werden, um eine Datenübertragung (*transfer*) zur Verfügung zu stellen. Das gleiche gilt für Speichersysteme in Rechenzentren (*storage systems*) oder in lokalen Netzwerken (*network attached storages*), die ausschließlich zur Abspeicherung von Daten (*store*) betrieben werden. Selbst wenn in diesen Systemen auch Mikroprozessoren und Arbeitsspeicher an der Organisation der Daten beteiligt sind, so können diese ergänzenden Hardware-Ressourcen als Overhead verstanden werden, die dabei unterstützen, die eigentliche Kernaufgabe des Systems (Datenübertragung oder Datenspeicherung) zu erfüllen. Dieser Overhead kann vollständig der funktionsgebenden digitalen Basisressource zugeordnet werden.

Herstellungsaufwand monofunktionaler Systeme

Daraus ergeben sich erhebliche Vereinfachungen für solche monofunktionalen Systeme. Die Berechnung der **Aufwandskennzahlen für die Herstellung (EBR_EI_{DBR})** beschränkt sich auf eine einzelne digitale Basisressource, wie nachfolgend am Beispiel eines Netzwerk-Switches (*transfer*) gezeigt wird:

$$EBR_{ei_{tr}} = \frac{EI_{embedded}}{DW_{tr}} = \frac{EI_{embedded}}{DBR_{tr} \cdot Load_{average,tr} \cdot Lifetime}$$

mit $ei = \{CED, GWP, ADP \dots\}$ [(Einheit des EI)/Mbit]

Als Herstellungsemissionen ($EI_{embedded}$) wird hier der gesamte Herstellungsaufwand für den Netzwerk-Switch angesetzt, differenziert nach den untersuchten Umweltwirkungskategorien (CED, GWP, ADP usw.). Die digitale Arbeit (DW_{tr}) besteht aus der übertragenen Datenmenge während der technischen Lebensdauer des Switches. Die übrigen Aufwandskennzahlen für andere digitale Basisressourcen werden für diesen Switch zu Null gesetzt.

Die **Umweltwirkungen für die Herstellung** des Netzwerk-Switches, die durch die Übertragung einer bestimmten Datenmenge auftreten, berechnen sich dann vereinfacht als das Produkt aus Aufwandskennzahl ($EBR_{EI_{tr}}$) und der übertragenen Datenmenge (DW_{tr}):

$$EI_{ei,embedded} = DW_{tr} \cdot EBR_{ei_{tr}} \text{ mit } ei = \{CED, GWP, ADP \dots\} \quad \text{[(Einheit des EI)]}$$

Nutzungsphase monofunktionaler Systeme

Die gleichen Vereinfachungen erfolgen beim Energieverbrauch in der Nutzungsphase zur Berechnung der Umweltwirkungen in der Nutzungsphase ($EI_{usephase}$).

Zur Berechnung der **Aufwandskennzahlen in der Nutzungsphase (EBR_P_{DBR})** wird zur Berechnung des Energieverbrauchs die durchschnittliche elektrische Leistungsaufnahme des Netzwerk-Systems ($P_{average}$) eingesetzt. Als zur Verfügung gestellte digitale Basisressource (hier nur *transfer*) wird die durchschnittliche Datenübertragungsgeschwindigkeit (Bandbreite) des Systems während der technischen Lebensdauer gewählt:

$$EBR_{P_{tr}} = \frac{P_{average}}{DBR_{tr,average}} \quad [W/(Mbit/s)]$$

Die übrigen Kennzahlen ($EBR_{P_{co}}$, $EBR_{P_{me}}$, $EBR_{P_{st}}$) der nicht verwendeten digitalen Basisressourcen können auch hier zu Null gesetzt werden, da der gesamte Energieverbrauch bereits durch die Datenübertragung berücksichtigt wurde.

Die **Umweltwirkungen in der Nutzungsphase** ($EI_{ei,usephase}$) ergeben sich als Produkt aus Aufwandskennzahl ($EBR_{P_{tr}}$), der übertragenen Datenmenge (DW_{tr}) sowie dem jeweiligen Emissionsfaktor (EF_{ei}) der genutzten elektrischen Energie:

$$EI_{ei,usephase} = EBR_{P_{tr}} \cdot DW_{tr} \cdot EF_{ei} \text{ mit } ei = \{CED, GWP, ADP \dots\} \text{ [(Einheit des EI)]}$$

Sinngemäß gelten die gleichen Vereinfachungen auch für Speichersysteme (store) und prinzipiell auch für die anderen digitalen Basisressourcen (compute, memorize), wenn sie nur einzeln abgerufen werden und sich ihr Energieverbrauch und ihre Umweltauswirkungen isolieren lassen (z.B. einzelne RAM-Speicherbänke).

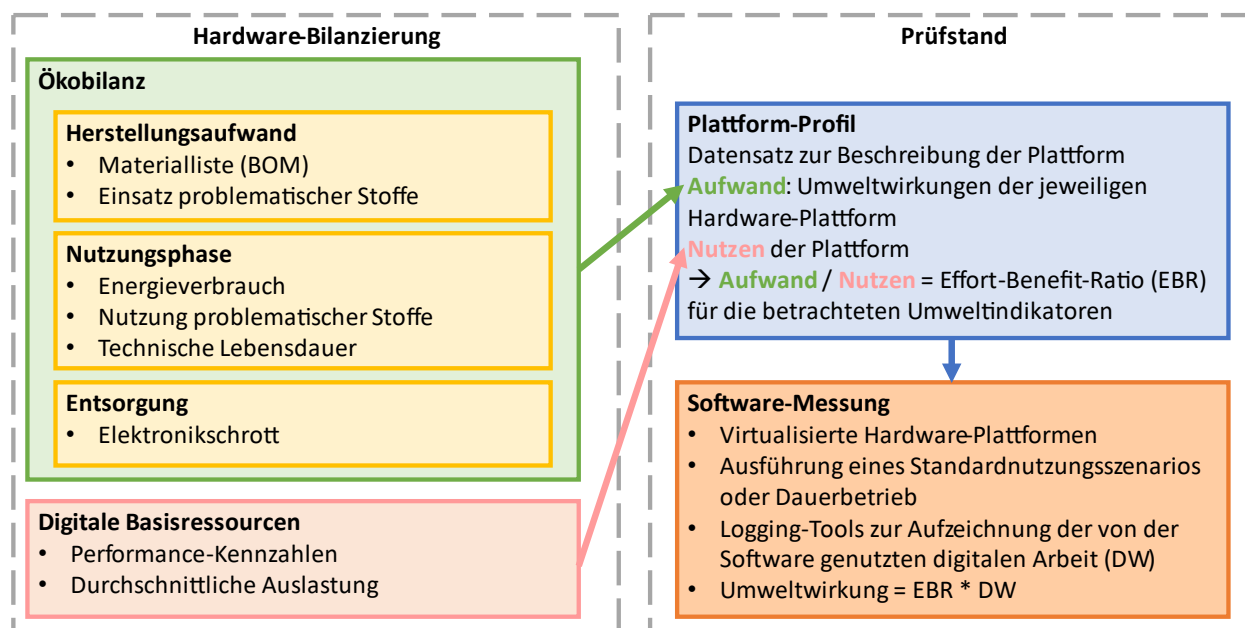
Datenerhebung

Um eine Ökobilanz von Software und digitalen Dienstleistungen durchzuführen, müssen sowohl Daten der beteiligten Hardware-Plattformen erhoben werden als auch Daten für die Ausführung der Software auf den jeweiligen Plattformen.

Nachfolgend wird skizziert, welche Daten dazu mindestens zu erfassen sind. Diese Liste ist nicht vollständig, gibt aber einen ersten Überblick darüber, welche Messungen und Bilanzierungen in dem Projekt eco:digit durch die Projektbeteiligten geleistet werden müssen. Alternativ zu einer überschlägigen Berechnung mit den unten genannten Input-Parametern können natürlich auch eigene Ökobilanzen oder *Product Environmental Footprints* als Datengrundlage verwendet werden.

Sind die Plattformen einmal durchgemessen, können die oben beschriebenen Aufwandskennzahlen berechnet und die Zahlen als *Plattform-Profil* abstrahiert werden. Jede Plattform geht dann in die Berechnung innerhalb des digitalen Prüfstands als parametrisierte Blackbox ein, mit der sich die Umweltwirkungen der Software ohne weitere Kenntnis der technischen Einzelheiten der Plattform berechnen lassen.

In Abbildung 4 wird die Datenerhebung schematisch dargestellt. In den nachfolgenden Abschnitten werden die einzelnen Erhebungsschritte weitergehend erläutert.

Abbildung 4: Schema der Datenerhebung

Quelle: Öko-Institut

Hardware-Ebene

Angaben zu Komponenten und Materialien

Um den Herstellungsaufwand eines Produktes zu berechnen, wird bei der Ökobilanzierung zunächst eine Bill-of-Materials (BOM) erstellt, die Komponenten und Materialien beschreibt, aus denen ein Produkt zusammengesetzt ist. Für Produkte der Informationstechnik zeigen bestehende Ökobilanzen, dass die wesentlichen Umweltwirkungen auf eine reduzierte Anzahl an elektronischen Bauteilen und Materialien zurückgeführt werden können.

Die nachfolgende Liste an Input-Parametern ist daher für eine Abschätzung des Herstellungsaufwands ausreichend. Die Daten zu Kabeln, Flammenschutzmitteln, Weichmachern und besonders besorgniserregenden Stoffen („SVHC“, substances of very high concern) werden für die Darstellung des Schadstoffgehaltes der Geräte und des Wissensstandes zum Vorkommen von SVHC benötigt (siehe Abschnitt Problematische Stoffe).

Tabelle 10: Angaben zu Komponenten und Materialien

Bezeichnung	Messgröße	Einheit	Erläuterung
Gesamtgerät			
Gerätename	Freitext	[text]	Datenblatt!
Überwiegende Funktion	Freitext	[text]	[nicht festgelegt, co, me, st, tr]
Technische Lebensdauer	Freitext	[Jahr]	Eigene Festlegung
Gehäuse			
Gewicht gesamtes Gerät ohne PSUs	Gewicht	[kg]	Wert Messen!
Stahl	Gewicht	[kg]	Wert Messen!
Aluminium	Gewicht	[kg]	Wert Messen!
Kupfer	Gewicht	[kg]	Wert Messen!
Kunststoffe	Gewicht	[kg]	Wert Messen!
Lüfter			
Anzahl Lüfter	Anzahl	[Anz]	Datenblatt! (optional)

Bezeichnung	Messgröße	Einheit	Erläuterung
Gewicht aller Lüfter	Gewicht	[kg]	Wert Messen!
Kabel			
Gewicht aller Kabel inkl. Stecker und Isolierung	Gewicht	[kg]	Datenblatt! (optional)
Leiterplatten			
Fläche der bestückten Leiterplatten	Fläche	[cm ²]	Alle Leiterplatten inkl. Mainboard, Powerboard, Grafikkarten, etc. ohne Netzwerk- und SSD-Karte
CPU			
Anzahl CPUs	Anzahl	[Anz]	Datenblatt!
Kerne pro CPU	Anzahl	[Anz]	Datenblatt!
Die-Size pro CPU	Fläche	[cm ²]	Datenblatt! (optional)
TDP (thermal design power) pro CPU	El. Leistung	[Watt]	Datenblatt!
Gewicht pro CPU-Kühlkörper	Gewicht	[kg]	Wert Messen! (optional)
GPU-Karte(n)			
Gesamt: Anzahl GPUs	Anzahl	[Anz]	Datenblatt!
Die-Size pro GPU	Fläche	[cm ²]	Datenblatt! (oder https://www.techpowerup.com/gpu-specs/)
RAM			
Anzahl der RAM-Module	Anzahl	[Anz]	Datenblatt!
Speicherplatz pro RAM	Anzahl	[GByte]	Datenblatt!
Die-Size pro RAM	Fläche	[cm ²]	Datenblatt! (optional)
SSD			
Anzahl	Anzahl	[Anz]	Datenblatt!
Speicherplatz pro SSD	Anzahl	[TByte]	Datenblatt!
Die-Size pro SSD	Fläche	[cm ²]	Datenblatt! (optional)
HDD			
Anzahl	Anzahl	[Anz]	Datenblatt!
Speicherplatz pro HDD	Anzahl	[TByte]	Wert für Performance Kennzahl
PSU			
Anzahl pro Device	Anzahl	[Anz]	Datenblatt!
Gewicht pro PSU	Gewicht	[kg]	Datenblatt!
Netzwerkarten			
Anzahl der Ports	Anzahl	[Anz]	Datenblatt!
Problematische Stoffe			
Halogenhaltige Kabel (z.B. PVC)	Gewicht	[kg]	Wert Messen!
Flammschutzmittel (Name, CAS-Nr.)	Gewicht	[kg]	Information des Herstellers
Weichmacher (Name, CAS-Nr.)	Gewicht	[kg]	Information des Herstellers
Kenntnisstand zu SVHC im Gesamtgerät	SVHC-Score	[1...5]	Information des Herstellers, Link auf ECHA-DB

Quelle: Öko-Institut

Zur Berechnung des Umweltaufwands von Servern und Storage-Systemen kann behelfsweise auch das KPI4DCE und GCC Berechnungstool (Gröger und Liu 2021) verwendet werden.

Energieverbrauch

Zur Berechnung des Energieverbrauchs in der Nutzungsphase (und anschließend die Umweltwirkungen bei der Nutzung einer Software) müssen die Hardware-Komponenten durchgemessen werden. Dabei sollte mindestens versucht werden, jeweils die fixen Basisanteile (P_{idle}) und die lastabhängigen Anteile ($P_{max} - P_{idle}$) getrennt für jede Hardware-Komponente zu bestimmen. Wenn dies gelingt, sollte eine Funktion für die Leistungsaufnahme der jeweiligen Hardware-Komponente in Abhängigkeit der Auslastung ($P = f(\text{Load})$) ermittelt werden.

Ein weiterer wichtiger Input-Parameter für die Berechnung der durchschnittlich erbrachten digitalen Arbeit (DW) stellt die mittlere Auslastung ($\text{Load}_{\text{average}}$) der jeweiligen Komponente dar.

Tabelle 11: Messung des Energieverbrauchs der Hardware-Komponenten

Bezeichnung	Messwert	Einheit
CPU (Summe der CPUs)		
P_{idle} und P_{max}	Leistung	[W]
alternativ: $P = f(\text{Load})$	Leistung	[W]
$\text{Load}_{\text{average}}$	Auslastung	[%]
P_{average} (ggf. berechnet)	Leistung	[W]
GPU (Summe der GPUs)		
P_{idle} und P_{max}	Leistung	[W]
alternativ: $P = f(\text{Load})$	Leistung	[W]
$\text{Load}_{\text{average}}$	Auslastung	[%]
P_{average} (ggf. berechnet)	Leistung	[W]
RAM (Summe der RAMs)		
P_{idle} und P_{max}	Leistung	[W]
alternativ: $P = f(\text{Load})$	Leistung	[W]
$\text{Load}_{\text{average}}$	Auslastung	[%]
P_{average} (ggf. berechnet)	Leistung	[W]
Permanentspeicher (Summe)		
P_{idle} und P_{max}	Leistung	[W]
alternativ: $P = f(\text{Load})$	Leistung	[W]
$\text{Load}_{\text{average}}$	Auslastung	[%]
P_{average} (ggf. berechnet)	Leistung	[W]
Netzwerk-Karte (Summe aller Ports)		
P_{idle} und P_{max}	Leistung	[W]
alternativ: $P = f(\text{Load})$	Leistung	[W]
$\text{Load}_{\text{average}}$	Auslastung	[%]
P_{average} (ggf. berechnet)	Leistung	[W]
Gesamtsystem (Berechnung Overhead)		
P_{idle}	Leistung	[W]
P_{max}	Leistung	[W]
P_{average}	Leistung	[W]

Quelle: Öko-Institut

Stellt eine Plattform nur eine einzelne digitale Basisressource zur Verfügung, wie dies bei reiner Netzwerk-Hardware (Router, Switches, Amplifier) der Fall ist, genügt die Messung am Gesamtsystem und die Bestimmung der Auslastung der relevanten digitalen Basisressource.

Sofern es nicht möglich ist, alle Leistungsaufnahmen durch eigene Messungen zu ermitteln, können auch Angaben aus Datenblättern (z.B. Thermal Design Power – TDP für CPUs) weiterhelfen, allgemeine Angaben zu Komponenten (z.B. <https://www.buildcomputers.net/power-consumption-of-pc-components.html>) oder Werkzeuge, die die Hardware-Hersteller zur Auslegung der Stromversorgung zur Verfügung stellen (z.B. HPE Power Adviser <https://poweradvisorex.it.hpe.com>).

Performance-Kennzahlen

Zur Berechnung der Leistungsfähigkeit der Computer-Plattform und den durch diese erbrachten digitalen Basisressourcen (DBR, siehe Tabelle 1) werden die in Tabelle 12 genannten Performance-Kennzahlen benötigt. In die Berechnung der erbrachten digitalen Arbeit (DW) gehen

darüber hinaus noch die durchschnittlichen Auslastungen der jeweiligen Komponenten ein, die in Tabelle 11 dargestellt sind.

Tabelle 12: Performance-Kennzahlen

Bezeichnung	Messwert	Einheit
CPU (pro CPU)		
Taktfrequenz	Frequenz	[GHz]
Busbreite	Anzahl	[Bit]
ggf. Performance-Kennzahl (z.B. SSJOPS)	Anzahl	[...]
GPU (pro GPU)		
Taktfrequenz	Frequenz	[GHz]
Anzahl Transistoren	Anzahl	[10 ⁶]
Shader und Raytracing Recheneinheiten *	Anzahl	[TFLOPS]
Tensor Recheneinheiten *	Anzahl	[AI TOPS]
RAM		
Speicherplatz gesamt	Anzahl	[GByte]
Permanentspeicher (SSD/HDD)		
Speicherplatz gesamt	Anzahl	[TByte]
Netzwerk-Karte (pro Port)		
Maximale Bandbreite	Anzahl	[Mbit/s]

* Die Eignung dieser GPU-Kennzahlen muss noch im Projektverlauf geprüft werden

Quelle: Öko-Institut

GPU-Performance, vgl. : <https://www.nvidia.com/de-de/geforce/graphics-cards/compare/>

Problematische Stoffe

Der Einsatz und das Vorhandensein von problematischen Stoffen in der digitalen Lieferkette wird in eco:digit mit vier Bausteinen erfasst:

1. Der Einsatz von Gefahrstoffen bei der Produktion von Hardware-Komponenten. Hierzu werden Daten aus des Ökobilanz der Hardware-Komponenten genutzt.
2. Der Gehalt von Schadstoffen in den Hardware-Komponenten. Hierfür sind Angaben über das Vorhandensein problematischer Stoffe in den Geräten erforderlich.

Hierzu gehören:

- Schwermetallgehalte im Gerät;
- Art und Konzentration halogenierter Flammenschutzmittel in den Kunststoffteilen;
- Menge halogenfreier oder halogenhaltiger Kabel und
- Art und Konzentration von Weichmachern in den Kunststoffteilen.

Falls es keine gerätespezifischen Angaben gibt, werden für eine erste Abschätzung Literaturwerte zu durchschnittlichen Konzentrationen in Elektronikgeräten verwendet.

3. Einsatz problematischer Stoffe bei der Nutzung von Hardware-Komponenten.
Hier wird der Verbrauch an Kältemitteln und Isoliergasen in Rechenzentren bilanziert. Erforderlich sind Angaben zu den jährlichen Verlustmengen an diesen Chemikalien in den beteiligten Rechenzentren.
4. Stand des Wissens zu besonders besorgniserregenden Stoffen (SVHC, substances of very high concern).

Hersteller von Hardware-Komponenten müssen der Europäischen Chemikalienagentur melden, wenn ihre Komponenten besonders besorgniserregende Stoffe (SVHC) in Mengen von 0,1 % (Massenprozent) oder mehr enthalten. Zusätzlich muss diese Information den privaten Abnehmern der Geräte auf Nachfrage mitgeteilt werden. Diese Informationen sind wichtig, um den Ersatz von SVHC zu fördern und das Einbringen dieser Stoffe in Abfallströme zu verringern. Daher wird in der Bewertungsmethode von eco:digit im Indikator „SVHC-Score“ auch erfasst, ob diese Informationen vorliegen oder nicht. Privatpersonen oder Unternehmen können diese Information direkt bei den Lieferanten ihrer Hardware-Komponenten erfragen. Diese Informationen müssen innerhalb von 45 Tagen geliefert werden (Siehe REACH Artikel 33, <https://echa.europa.eu/de/regulations/reach/candidate-list-substances-in-articles/communication-in-the-supply-chain>).

Plattform-Profil

Die Ergebnisse der Datenerhebung und Berechnung der Aufwandskennzahlen der jeweiligen Plattform müssen in einem einheitlichen Datenformat abgelegt werden, damit die Messwerte in eine virtualisierte Simulationsumgebung übernommen werden können. Hierzu werden Plattform-Profile erstellt, die mindestens aus nachfolgenden Informationen bestehen:

Tabelle 13: Plattform-Profil mit festgelegter durchschnittlicher Nutzung

```
{
  "platform_profile": "average",
  "platform_ID": "name or identifier",
  "svhc_score": score,
  "usage": {
    "load_average": [av_co, av_me, av_st, av_tr],
    "lifetime_average": years
  },
  "embedded": {
    "EBR_CED": ["co", "me", "st", "tr"],
    "EBR_GWP": ["co", "me", "st", "tr"],
    "EBR_ADP": ["co", "me", "st", "tr"],
    "EBR_Water": ["co", "me", "st", "tr"],
    "EBR_WEEE": ["co", "me", "st", "tr"],
    "EBR_TOX": ["co", "me", "st", "tr"]
  },
  "power_demand": {
    "EBR_P": ["co", "me", "st", "tr"]
  }
}
```

Quelle: Öko-Institut

Dabei stehen "co", "me", "st", "tr" stellvertretend für die jeweiligen Aufwandskennzahlen, die der digitalen Basisressource zugeordnet sind. Bei den Aufwandskennzahlen für die Herstellung ("embedded") sind dies die Umweltwirkungskategorien (EI) pro mittlerer digitaler Arbeit (DW) (siehe). Für die Aufwandskennzahlen für die Nutzungsphase ("power_demand") wird die elektrische Leistung (P_{el}) pro durchschnittlich genutzter digitaler Basisressource (DBR) berechnet.

Statt eines starren Plattform-Profiles, in dem die technische Lebensdauer der Hardware und die durchschnittlichen Auslastungen mit "average_load" festgelegt sind, kann auch ein

dynamisches Plattform-Profil erstellt werden, in dem die Herstellungsemissionen ("embedded") als Gesamtwert (EI) dokumentiert sind und die Leistungsaufnahmen ("power_demand") als Funktionen in Abhängigkeit der Auslastung angegeben werden ($P = f(\text{Load})$). Anhand der übergebenen "usage"-Parameter können dann die Aufwandskennzahlen (EBR) durch das Rechenmodell fallspezifisch ermittelt werden. Dieses dynamische Plattform-Profil kann dazu genutzt werden, Optimierungspotenziale in der Auslastung und Nutzungsdauer der Hardware-Plattform zu identifizieren.

Tabelle 14: Plattform-Profil mit dynamischer Lebensdauer und Auslastung

```
{
  "platform_profile": "dynamic",
  "platform_ID": "name or identifier",
  "svhc_score": score,
  "usage": {
    "load_dynamic": [co, me, st, tr],
    "lifetime_dynamic": years
  },
  "embedded": {
    "EI_CED": ["co", "me", "st", "tr"],
    "EI_GWP": ["co", "me", "st", "tr"],
    "EI_ADP": ["co", "me", "st", "tr"],
    "EI_Water": ["co", "me", "st", "tr"],
    "EI_WEEE": ["co", "me", "st", "tr"],
    "EI_TOX": ["co", "me", "st", "tr"]
  },
  "power_demand": {
    "P_function": ["co", "me", "st", "tr"]
  }
}
```

Quelle: Öko-Institut

Zur Modellierung einer Simulationsumgebung müssen voraussichtlich noch weitere Kennzahlen der jeweiligen Plattform erhoben und in die Plattform-Profile übernommen werden. Dies können z.B. die technischen Daten der Plattform sowie Performance-Kennzahlen sein.

Messung der zu untersuchenden Software

Nutzung von digitalen Basisressourcen

Auf der Verbrauchsseite soll die Inanspruchnahme von digitalen Basisressourcen durch die Software gemessen werden (vgl. Software nutzt digitale Basisressourcen).

Es müssen innerhalb des Prüfstands geeignete Logging-Tools eingesetzt werden, die folgende Parameter erfassen:

Tabelle 15: Messung der genutzten digitalen Arbeit eines Software-Produktes

- Service units: Anzahl an Nutzungseinheiten im Messzeitraum [Anz]
- DW_{co} : CPU- oder GPU-Arbeit berechnet aus Volllast-Sekunden [Gbit/s*s]
- DW_{me} : RAM-Speicherarbeit [GByte-Sekunden]

- DW_{st} : Permanentspeicherarbeit [GByte-Sekunden]
- DW_{tr} : Datenübertragungsarbeit [Mbit/s*s]

Quelle: Öko-Institut, Hinweis: für CPU- oder GPU-Arbeit kann bei Bedarf auch eine andere Messgröße gewählt werden

Die „Service units“ als Anzahl an Nutzungseinheiten im Messzeitraum [Anz] muss kontextspezifisch definiert werden.

Die Messung der digitalen Arbeit (DW) kann auch dadurch erfolgen, indem zunächst die Differenz der mittlere Auslastung (Load) der jeweiligen Komponenten erfasst wird (berechnet aus mittlere Auslastung während der Ausführung der Software minus mittlere Auslastung im Leerlauf-Zustand ohne die Software) und diese Differenz mit den maximal durch die Plattform bereitgestellten digitalen Basisressourcen (DBR) (siehe Tabelle 1) und der Ausführungsdauer der Software (t_{soft}) multipliziert werden:

$$DW_{dbr} = \Delta Load_{average,dbr} \cdot DBR_{dbr} \cdot t_{soft} \text{ mit } dbr = \{co, me, st, tr\}$$

Eine Beschreibung möglicher Messmethoden findet sich in Gröger et al. (2018). Diese Messmethoden müssen in eco:digit noch weiterentwickelt und auf alle Plattformen anwendbar gemacht werden.

Literatur

- Boavizta (2024): <https://github.com/Boavizta/environmental-footprint-data/blob/main/boavizta-data-us.csv>, zuletzt geprüft am 02.10.2024.
- Bunke, D.; Graulich, K.(2003): Ein Indikator für den Einsatz gefährlicher Stoffe in Produkten und Prozessen: Monoethylenglykol-Äquivalente. Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung (UWSF), 15 (2), S. 106 – 114, 2003.
- Bunke, D.; Liu, R.; Behrens, F.; Gröger, J. (2024): Indikator TOX und MEG-Äquivalente: Bilanzierung problematischer Stoffe in Software und digitalen Dienstleistungen. Green ICT Connect 2024, Berlin.
- Energizta (2024): <https://github.com/Boavizta/Energizta/>, zuletzt geprüft am 02.10.2024.
- Gröger, J.; Köhler, A.; Naumann, S.; Filler, A.; Guldner, A.; Kern, E. et al. (2018): Entwicklung und Anwendung von Bewertungsgrundlagen für ressourceneffiziente Software unter Berücksichtigung bestehender Methodik. Hg. v. Umweltbundesamt. Öko-Institut e.V. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/entwicklung-anwendung-von-bewertungsgrundlagen-fuer>, zuletzt geprüft am 02.10.2024.
- Gröger, J.; Liu, R. (2021): KPI4DCE und GCC Berechnungstool. Version: v2.5. 23.03.2021. Entwickelt im Rahmen der Forschungsprojekte Green Cloud Computing (2021) und KPI4DCE (2018). Online verfügbar unter https://www.oeko.de/uploads/oeko/das_institut/institutsbereiche/produkte-stoffstroeme/KPI4DCE-GCC-Berechnungstool.xlsm, zuletzt geprüft am 02.10.2024.
- Liu, R.; Bunke, D.; Behrens, F.; Gröger, J. (2024): Environmental impacts of digital infrastructures and digital services: CO2, resource consumption, substances of concern and more. Electronic goes green 2024, Berlin. Online verfügbar unter <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10631234/>, zuletzt geprüft am 02.10.2024.
- SDIA (2022): Creating a digital environmental footprint: a Life Cycle Assessment approach. Whitepaper. Hg. v. Sustainable Digital Infrastructure Alliance e.V. Online verfügbar unter <https://sdialliance.org/resources/digital-environmental-footprint-life-cycle-assessment-approach/>, zuletzt geprüft am 02.10.2024.

Öko-Institut e.V | Freiburg | Darmstadt | Berlin

Das Öko-Institut ist eines der europaweit führenden, unabhängigen Forschungs- und Beratungsinstitute für eine nachhaltige Zukunft. Seit der Gründung im Jahr 1977 erarbeitet das Institut Grundlagen und Strategien, wie die Vision einer nachhaltigen Entwicklung global, national und lokal umgesetzt werden kann. Das Institut ist an den Standorten Freiburg, Darmstadt und Berlin vertreten.

www.oeko.de | info@oeko.de

Kontakt

Jens Gröger	+49 30 405085-378	j.groeger@oeko.de
Felix Behrens	+49 30 405085-342	f.behrens@oeko.de
Ran Liu	+49 30 405085-327	r.liu@oeko.de
Dirk Bunke	+49 761 45295-246	d.bunke@oeko.de

Diese Veröffentlichung entstand in dem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Forschungsprojekt **eco:digit**.

ECO  **DIGIT**

www.ecodigit.de

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages