

MEG-Äquivalente und der SVHC Score: Bilanzierung problematischer Stoffe in Software und digitalen Dienstleistungen

Dirk Bunke
Öko-Institut e.V.
Berlin, Germany; d.bunke@oeko.de

Ran Liu
Öko-Institut e.V.
Freiburg, Germany;

Felix Behrens
Öko-Institut e.V.
Berlin, Germany;

Jens Gröger
Öko-Institut e.V.
Berlin, Germany;

Zusammenfassung — Eine Vielzahl an Chemikalien wird bei der Herstellung und Nutzung elektronischer Geräte eingesetzt. Bei problematischen Stoffen stehen für die meisten Anwendungen inzwischen Alternativen zur Verfügung, die bessere Eigenschaften haben. Für die Bewertung der Nachhaltigkeit im IKT-Bereich ist es daher wichtig zu wissen, in welchem Umfang problematische Chemikalien Verwendung finden. Im Projekt ECO:DIGIT haben wir hierfür den **Indikator TOX** entwickelt, der die Methode der Ökobilanzen ergänzt. Der Indikator TOX besteht aus einer Kennzahl, den MEG-Äquivalenten. Dies ist die Gesamtmenge an Problemstoffen, die angewendet werden, gewichtet nach ihrer Gefährlichkeit. Als Referenzsubstanz für die Aggregation wird Monoethylenglykol (MEG) eingesetzt. Die hier beschriebene Methode der Schadstoff-Bilanzierung mithilfe von **MEG-Äquivalenten** kann für alle Gefahrstoffe genutzt werden, nicht nur im Elektronikbereich. Zusätzlich zeigt der **SVHC Score**, wieviel bekannt ist über die Konzentrationen einer besonders problematischen Gruppe von Chemikalien in einem Gerät, die sogenannten SVHC („Substances of very high concern“).

Stichwörter: Digitale Infrastrukturen, Digitale Dienstleistungen, MEG-Äquivalente, Indikator TOX, SVHC Score, REACH, LCA, Ökobilanz, Umweltauswirkungen, Gefahrstoffe, REACH, ECO:DIGIT

I. EINFÜHRUNG

In den letzten Jahren wurden zahlreiche Forschungsstudien durchgeführt, um die mit digitalen Infrastrukturen [1-6] und Diensten [7, 8] verbundenen Umweltauswirkungen zu bewerten.

Ziel einer Ökobilanz ist es, alle bedeutenden Umweltaspekte einer digitalen Dienstleistung aufzuzeigen. In der öffentlichen Diskussion steht die Umweltwirkungskategorie Klimawandel an erster Stelle, gefolgt von Primärenergieverbrauch, Wasserverbrauch und abiotischem Ressourcenverbrauch (ADP). Die Toxizitätsauswirkungen, die mit den zahlreichen Chemikalien verbunden sind, die in den Herstellungsprozessen und in den Phasen der Produktnutzung eingesetzt werden, sind aufgrund methodischer Beschränkungen und begrenzter Datenverfügbarkeit bisher nur unzureichend untersucht worden. Der Abbau und die Verarbeitung von Rohstoffen sind für große Stoffströme, die Zerstörung von Ökosystemen und den Anfall von giftigen Abfallstoffen verantwortlich. Die

europäischen Länder erreichen Jahr für Jahr nicht die EU-Recyclingquote für Elektro- und Elektronik-Altgeräte. Um die Umweltauswirkungen bei der Rohstoffgewinnung und bei der Entsorgung der Elektro- und Elektronik-Altgeräte zu verringern, müssen Kreislaufaspekte in der LCA-Methodik berücksichtigt werden. Ein Kreislaufindikator sollte nicht auf die Verwendung von recycelten Materialströmen und die Vorteile der zweiten Nutzungsphase beschränkt werden, sondern sich vielmehr auf die Recyclingfähigkeit der Geräte konzentrieren.

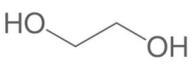
Ein Haupthindernis für das Recycling ist das Vorhandensein problematischer Stoffe in den Abfallströmen. Aber problematische Stoffe sind nicht nur am Ende des Lebenszyklus von elektronischen Geräten relevant. Schon bei der Herstellung von IKT-Hardware werden viele gefährliche Stoffe verwendet, die aufwändige Risikomanagementmaßnahmen erfordern, um Gesundheitsschäden bei den Arbeitnehmern zu vermeiden. Elektronische Geräte können sehr unterschiedliche Mengen an problematischen Stoffen enthalten, z. B. bromierte Flammschutzmittel in den Kunststoffteilen. Darüber hinaus werden für die Erbringung digitaler Dienstleistungen Chemikalien mit negativen Auswirkungen auf die Umwelt benötigt, z. B. Kühlmittel in Rechenzentren. Oft gibt es mehrere Optionen, die es ermöglichen würden, die Umweltbelastung einer Dienstleistung zu reduzieren. Hierfür ist es wichtig, dass die entsprechenden Belastungen sichtbar und quantifiziert werden.

Wir schlagen daher vor, den Untersuchungsrahmen einer Analyse der Umweltauswirkungen digitaler Infrastrukturen und Dienste zu erweitern und über Energieverbrauch und CO₂ Emissionen hinauszugehen. Zusätzlich sollten auch die Verwendung und das Vorhandensein von gefährlichen Stoffen erfasst und bewertet werden. Hierfür ist eine Gewichtung von Schadstoffen und eine Aggregation ihrer Mengen erforderlich. Für die Gewichtung von Stoffen können die international verwendeten so genannten "Gefahrenhinweise" (H-Sätze) genutzt werden. Sie charakterisieren das Potenzial eines Stoffes, schädliche Wirkungen zu verursachen. Als Referenzstoff wurde die organische Chemikalie Monoethylenglykol (MEG) gewählt. Dies ermöglicht es, die Menge der in einem Produkt enthaltenen Stoffe in Kilogramm MEG-Äquivalenten (kg

MEG-Äqu.) auszudrücken. Die Prinzipien dieses Ansatzes werden auch in der nachfolgenden Abbildung gezeigt.

ABBILDUNG 1: BILANZIERUNG VON SCHADSTOFFEN: MONOETHYLENGLYKOL ALS BEZUGSSUBSTANZ.

Wie können Sie Problemstoffe bilanzieren? MEG als Vergleich
Monoethylenglykol (MEG) CAS (Chemical Abstracts Services) Nr: 107-21-1



H-Sätze (Gefahrenhinweise):

H 302 **Gesundheitsschädlich beim Verschlucken**
Wirkfaktor (WF 10)

H 373 **Kann die Organe schädigen bei längerer oder wiederholter Exposition**
Wirkfaktor (WF 50)

Wirkfaktor MEG = höchster Wert der Wirkfaktoren der H-Sätze von MEG = 50

Eine Gruppe besonders gefährlicher Chemikalien sind die „besonders besorgniserregenden Stoffe“ (SVHC). Zusätzlich zur Angabe der Menge an gefährlichen Stoffen (in kg MEG-Äquivalenten) kann in dem von uns entwickelten **SVHC Score** erfasst werden, wieviel über diese Stoffe in einem elektronischen Gerät und auch in einer digitalen Lieferkette bekannt ist. Diese Informationen können helfen, nicht nur die Verwendung gefährlicher Stoffe, sondern auch die Recyclingfähigkeit durch Designauswahl und Einkaufsanforderungen zu optimieren.

In den folgenden Abschnitten wird ein Ansatz zur Bewertung problematischer Stoffe aus dem Forschungsprojekt "Enabling green COmputing and DIGital Transformation" (ECO:DIGIT) vorgestellt [33]. Verglichen mit der Ökobilanz, zeichnet er sich durch zusätzliche Elemente aus: die Schadstoffbilanzierung mit MEG-Äquivalenten im Indikator TOX und den SVHC Score.

Die im Projekt ECO:DIGIT angewandte Bewertungsmethodik verbindet die Ökobilanz mit dem Indikator TOX und dem SVHC Score. Auf diese Weise kann sie Informationen liefern, die den Übergang zu einer stärker kreislauforientierten digitalen Infrastruktur unterstützen [34, 35].

Das Forschungsprojekt ECO:DIGIT wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Ziel des Projektes ist es, eine objektive Messmethodik zu entwickeln und diese in einen universell einsetzbaren Prüfstand zu implementieren. Die Messmethodik wird den Energie- und Ressourcenverbrauch von dezentralisierten digitalen Lösungen erfassen [34]. Das Projekt ist noch nicht abgeschlossen, und die Projektergebnisse werden weiterhin zur Diskussion über methodische Fragen und die praktische Umsetzung beitragen.

II. METHODISCHER ANSATZ

A. Die Ökobilanz und der Indikator TOX

Die Ökobilanz hilft Umweltwissenschaftlern und Fachleuten für Nachhaltigkeit, fundierte Aussagen über die Umweltauswirkungen von Produkten und Dienstleistungen zu treffen. Auch digitale Dienstleistungen können mit Ökobilanzen analysiert werden.

Die drei Ebenen der Umweltauswirkungen, die mit der Interaktion von IKT und der natürlichen Umwelt verbunden sind, werden allgemein als Auswirkungen erster, zweiter und dritter Ordnung definiert [9]. Diese Arbeit befasst sich mit den

Auswirkungen erster Ordnung, d.h. mit den negativen direkten Auswirkungen, die mit der Produktion, der Nutzung und der Entsorgung von IKT-Produkten als Teil einer digitalen Dienstleistung verbunden sind. Die Auswirkungen zweiter und dritter Ordnung sind nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Der Schwerpunkt des im folgenden beschriebenen Indikators TOX ist die Bewertung der Verwendung und des Vorhandenseins von problematischen Chemikalien. Der Indikator TOX befasst sich mit Gefahrstoffen am Arbeitsplatz, mit Gefahrstoffen in IKT-Hardware, mit dem und mit problematischen Stoffen in der Nutzungsphase von IKT. In allen Bereichen der Verwendung oder des Vorhandenseins von problematischen Stoffen können die Mengen mehrerer Stoffe summiert und als MEG-Äquivalente ausgedrückt werden. Zusätzlich zum Indikator TOX wird mit dem SVHC Score der Kenntnisstand zum Vorkommen der besonders besorgniserregenden Stoffe in elektronischen Geräten erfasst und bewertet.

Die Zielgruppe für die beschriebene Methode sind Ökobilanz-Praktiker, die ein umfassendes Verständnis und eine Quantifizierung der Umweltauswirkungen im Zusammenhang mit der Bereitstellung digitaler Dienstleistungen anstreben. Die im Kapitel II.C. vorgeschlagenen zusätzlichen Elemente können auch verwendet werden, um für einzelne digitale Produkte und Dienstleistungen im Hinblick auf die Verwendung und das Vorhandensein problematischer Stoffe zu bewerten und zu vergleichen. Dies würde das Bewusstsein für diese Fragen schärfen und Entscheidungen für sicherere und nachhaltigere Chemikalien unterstützen.

B. Bewertung der Umweltauswirkungen nach dem Konzept der Ökobilanz

Der Ansatz der Ökobilanzierung (LCA) ist eine anerkannte, wissenschaftlich fundierte Methode zur Bewertung der Umweltauswirkungen von Produkten und Dienstleistungen unter Berücksichtigung aller Lebenszyklusphasen und verschiedener Wirkungskategorien. Auf diese Weise erhält man einen umfassenden, ganzheitlichen Überblick über die mit einem Produkt oder einer Dienstleistung verbundenen besonders hohen Belastungen (Hotspots) und vermeidet Kompromisse zwischen verschiedenen Lebenszyklusphasen und Wirkungskategorien. ISO 14040/44 [31, 32] liefert den Rahmen und die Leitlinien für eine Ökobilanz. IKT-spezifische Methoden im Zusammenhang mit einer Ökobilanz sind z. B. das GHG Protocol ICT Sector Guidance (2017) [10], ITU-T L.1410 / ETSI ES 203 199 [11, 12], ADEME methodological standard for the environmental assessment of digital services [13].

Für jedes Gerät der digitalen Infrastruktur, das von dem digitalen Dienst genutzt wird, können die Umweltauswirkungen mit Hilfe etablierter LCA-Methoden bestimmt werden. Im Rahmen des ECO:DIGIT-Projekts wurden grundlegende Kategorien von Umweltauswirkungen bewertet: Treibhauspotenzial (GWP), Potenzial für den Abbau abiotischer Ressourcen (ADP), Wasserverbrauch (WU), der kumulative Energiebedarf (CED) digitaler Infrastrukturen und die Gesamtmenge an Elektro- und Elektronik-Altgeräten (WEEE) in Kilogramm. Zusätzlich wurde der neue Indikator TOX verwendet, um speziell das Vorhandensein und die Verwendung problematischer Stoffe

in der digitalen Lieferkette zu erfassen. Damit wird der LCA-Ansatz ergänzt.

C. Die Bewertung problematischer Stoffe innerhalb der digitalen Lieferkette

Das Hauptziel des LCA-Ansatzes ist die Bewertung der Umweltauswirkungen von Produkten und Dienstleistungen unter Berücksichtigung aller Lebenszyklusphasen und verschiedener Auswirkungskategorien. Im Zusammenhang mit Chemikalien ist eine wichtige Umweltauswirkungskategorie ihr Toxizitätspotenzial. Innerhalb der LCA-Gemeinschaft ist das USEtox®-Modell [30], das von der Lebenszyklusinitiative des UNEP unterstützt wird, eine wissenschaftlich anerkannte Methode zur Bewertung der human- und ökotoxikologischen Auswirkungen von Chemikalien. USEtox® bewertet die Umweltkonsequenzen zwischen den freigesetzten Schadstoffemissionen und ihren Auswirkungen auf die Ökosysteme und die menschliche Gesundheit auf der Grundlage von Verbleib-, Expositions- und Wirkungsparametern.

Der in den nächsten Abschnitten beschriebene Indikator TOX liefert im Vergleich zum LCA-Ansatz mit USEtox zusätzliche Informationen über gefährliche Stoffe.

Der Indikator TOX konzentriert sich nicht wie USEtox auf die Umweltauswirkungen. Er bewertet die verwendeten problematischen Stoffe, unabhängig davon, ob sie letztendlich in die Umwelt gelangen oder nicht. Warum? Digitale Dienste können sehr unterschiedliche Mengen an problematischen Stoffen beinhalten, die in den digitalen Geräten verwendet werden oder enthalten sind. Das Vorhandensein dieser Stoffe kann zu problematischen Expositionen von Mensch und Umwelt sowie zu problematischen Verunreinigungen von Stoffströmen führen. Daher ist es ein wichtiges Ziel der Produkt- und Prozessgestaltung, die Verwendung problematischer Stoffe zu reduzieren und die Konzentrationen solcher Stoffe in Produkten zu verringern.

Die Ergebnisse der Emissionsbewertung in Ökobilanzen erlauben keinen direkten Vergleich von Produkten und Dienstleistungen hinsichtlich der Verwendung und des Gehalts an problematischen Stoffen. Daher schlagen wir im Folgenden den Indikator TOX vor. Er berücksichtigt die Verwendung und den Gehalt an problematischen Stoffen - basierend auf Informationen aus einer Analyse der verwendeten oder enthaltenen Stoffe in einer bestimmten Lebenszyklusphase. Er besteht aus drei Modulen.

Im Gegensatz zum LCA-Ansatz geht es bei den drei Elementen des Indikators TOX nicht um die Bewertung von Emissionen. Sie dienen dazu, zu bewerten und darzustellen, inwieweit problematische Stoffe mit einer digitalen Lieferkette, einer digitalen Dienstleistung oder einer bestimmten Hardwarekomponente verbunden sind.

Die drei Elemente des Indikators TOX verwenden dieselbe Referenzsubstanz, um Zahlen über die Menge an problematischen Stoffen zusammenfassen zu können. Die Referenzsubstanz ist die organische Substanz Monoethylenglykol (MEG). Daher werden die Ergebnisse der Aggregationen im Indikator TOX in Kilogramm MEG-Äquivalenten ausgedrückt. Die Ergebnisse aus diesen Elementen können so zu einer Zahl zusammengefasst werden.

Der Indikator TOX wurde zum ersten Mal als allgemein nutzbarer Ansatz zur Bewertung des Einsatzes von

Chemikalien entwickelt, der in verschiedenen Produktbereichen zur Anwendung kommen kann. Als Kenngröße zur Bilanzierung werden hierbei sogenannte MEG-Äquivalente verwendet. Er wurde für Schadstoff-Bilanzierungen im Baubereich genutzt [18, 19, 20]. Im Rahmen des ECO:DIGIT-Projekts wird er zum ersten Mal auf Chemikalien angewandt, die in digitalen Lieferketten verwendet werden.

In den folgenden Abschnitten beschreiben wir die drei Bereiche, in denen problematische Stoffe innerhalb der digitalen Lieferkette auftreten können, sowie Ansätze zur Bewertung und Zusammenfassung der Stoffe:

- Gefährliche Stoffe an Arbeitsplätzen in der Produktion von IKT-Hardware (Abschnitt III.1);
- Gefährliche Stoffe in IKT-Hardware (Abschnitt III.2);
- problematische Stoffe in der Nutzungsphase der IKT (Abschnitt III.3).

Die Ergebnisse aus diesen drei zusätzlichen Bewertungselementen können zu einem TOX-Indikator zusammengefasst werden, der sich speziell auf die drei oben genannten Bereiche bezieht. Es ist möglich, diesen Ansatz auf andere Themen im Zusammenhang mit problematischen Stoffen in der digitalen Lieferkette auszuweiten.

In den nachfolgend beschriebenen Bereichen ist eine große Anzahl von Chemikalien relevant. Um die Mengen der verwendeten oder in einem Produkt enthaltenen Chemikalien aggregieren zu können, wird Monoethylenglykol (MEG) als Referenzstoff verwendet. Dieser Ansatz wird im folgenden Abschnitt III.1 erklärt. Für Stoffe, die als gefährlich eingestuft sind, werden die erforderlichen Gewichtungsfaktoren auf der Grundlage der Gefahrenhinweise (H-Sätze) der Stoffe abgeleitet. Diese Gefahrensätze umfassen nicht das Treibhauspotenzial (Global Warming Potential, GWP) von Stoffen, z. B. von fluorierten Gasen (die als Kühlmittel verwendet werden). Für Chemikalien ohne H-Sätze können Gewichtungsfaktoren auf der Grundlage anderer Eigenschaften der Chemikalien, z. B. ihres GWP, abgeleitet werden. Dies wird in Abschnitt III.3 beschrieben.

Zusätzlich zum Indikator TOX empfehlen wir, einzelne Hardwarekomponenten hinsichtlich des Informationsstandes über besonders besorgniserregende Stoffe (Substances of Very High Concern, SVHC) zu charakterisieren. Dies sind die gefährlichsten Stoffe und werden in der REACH-Kandidatenliste aufgeführt. Für besonders besorgniserregende Stoffe gibt es in Europa spezielle Anmelde- und Informationspflichten. Sie gelten auch für Geräte, die in Europa importiert werden.

Der **SVHC Score**, der im Rahmen des ECO:DIGIT-Projekts entwickelt wurde, zeigt an, ob für eine Hardwarekomponente Informationen zu diesen Stoffen verfügbar sind oder nicht. Produkte mit solchen Informationen tragen zu mehr Transparenz über diese Stoffe und zur Substitution durch weniger problematische Stoffe bei. Daher zeigt der SVHC Score den Wissensstand zu diesen Stoffen in einem bestimmten Gerät an. Der SVHC Score wird im Kapitel IV beschrieben.

In den folgenden Abschnitten beschreiben wir die drei Elemente des Indikators TOX (Kapitel III) und den SVHC Score (Kapitel IV).

III. DER INDIKATOR TOX UND SEINE ELEMENTE

Der Indikator TOX besteht aus drei Elementen. Sein der Schwerpunkt sind die Verwendung und das Vorhandensein problematischer Stoffe.

1) Element 1: Gefährliche Stoffe an Arbeitsplätzen bei der Herstellung von IKT-Hardware

Für die Produktion von IKT-Hardware wird eine große Anzahl gefährlicher Stoffe benötigt. Die Bestände dieser Chemikalien wurden z.B. von Kim et al. [14] und Yoon et al. [15] analysiert. Mehr als vierhundert chemische Produkte wurden in Halbleiterfertigungsanlagen in jährlichen Mengen von mehr als 40.000 t pro Anlage verwendet [14].

Wenn diese gefährlichen Stoffe ohne geeignete Schutzmaßnahmen verwendet werden, verursachen sie schwere Gesundheitsschäden bei den Beschäftigten und problematische Emissionen in die Umwelt [4]. Bei Frauen, die in Halbleiterfabriken auf den Philippinen arbeiten, sind Fälle von Fehl- und Totgeburten dokumentiert worden [16]. Die Schädigung der Gesundheit der Arbeitnehmer ist eines der Hauptprobleme bei der Herstellung von IKT-Hardware.

Informationen über die chemische Identität und die genaue Menge der gefährlichen Stoffe, die bei der Herstellung eines bestimmten elektronischen Geräts verwendet werden, sind rar. Beispiele für die Mengen an Chemikalien, die für die Herstellung eines Wafers (dünne Siliziumscheibe zur Halbleiterfertigung) benötigt werden, sind in Tabelle 1 aufgeführt (Anmerkung: Dieses Beispiel wurde gewählt, um den Ansatz zu erläutern. Neuere Ökobilanz-Datensätze können andere Werte aufweisen. Dies ist für die Beschreibung des Ansatzes der MEG-Äquivalente nicht von Bedeutung).

TABELLE 1: BEISPIELE FÜR CHEMIKALIEN, DIE FÜR DIE HERSTELLUNG VON WAFERN VERWENDET WERDEN, GEWICHTUNGSFAKTOREN UND MEG-ÄQUIVALENTE. (EINHEIT: GRAMM MEG-ÄQUIVALENTE PRO CM² WAFER)

Substanz	Betrag	Wirkfaktor	MEG-Äquivalente
Schwefelsäure	6 g/cm ²	100	12 g
Wasserstoffperoxid	2 g/cm ²	100	4 g
Fluorwasserstoff	0,5 g/cm ²	1.000	10 g
Phosphorsäure	2,7 g/cm ²	100	5,4 g
2-Propanol	2,3 g/cm ²	50	2,3 g
Ammoniumhydroxid	0,89 g/cm ²	100	1,78 g

Quelle: Spalte 1, 2 [16]; Spalte 3, 4 eigene Berechnung, basierend auf [18,19]

Für die sichere Verwendung von Chemikalien sind detaillierte Informationen über ihre gefährlichen Eigenschaften und die damit verbundenen Risikomanagementmaßnahmen unerlässlich. Im Rahmen des Global Harmonisierten Systems (GHS) für die Einstufung von Chemikalien werden Gefahrenhinweise (H-Sätze) verwendet, um das Potenzial einer Chemikalie zu beschreiben, schädliche Auswirkungen auf Mensch und Umwelt zu verursachen. Darüber hinaus ermöglichen diese H-Sätze die Einstufung von Chemikalien nach dem Schweregrad ihrer schädlichen Auswirkungen [17]. Um Stoffe nach ihrem Gefährdungspotenzial zu vergleichen, kann Monoethylenglykol (MEG) als Referenzsubstanz verwendet werden. Dies ermöglicht es, die Menge der eingesetzten Gefahrstoffe in MEG-Äquivalenten auszudrücken. Die

Verwendung von Informationen aus der Einstufung von Chemikalien für den Vergleich von Stoffen und ihre Gewichtung ist ein gemeinsames Element in mehreren Ansätzen zur Bewertung von Chemikalien [21, 22]. Gefahrenhinweise sind ein zentrales Element im Risikomanagement von Problemstoffen. Sie sind daher für Zehntausende von Chemikalien bekannt und öffentlich zugänglich [23]. Wenn der Gefahrenhinweis eines Teilbereichs bekannt ist, kann der Gewichtungsfaktor für die Toxizität bestimmt werden. Tabelle 2 zeigt Beispiele für H-Sätze und ihre Gewichtungsfaktoren („Wirkfaktor“). Eine vollständige Liste der H-Sätze und zugehörigen Wirkfaktoren wird im Anhang 1 am Ende dieses Artikels gezeigt.

TABELLE 2: BEISPIELE FÜR H-SÄTZE, BEDEUTUNG UND GEWICHTUNGSFAKTOREN („WIRKFAKTOR“)

Quelle: [17, 18, 19]

Der Gewichtungsfaktor für den Referenzstoff Monoethylenglykol beträgt 50. Die Menge einer bestimmten Substanz i wird in Kilogramm MEG-Äquivalenten angegeben. Diese Angabe wird nach der folgenden Gleichung (1) berechnet:

Der Ansatz der MEG-Äquivalente ermöglicht es, die Daten über die Menge der verwendeten gefährlichen Chemikalien in

H Satz	Bedeutung	Wirkfaktor
H 300	Lebensgefahr bei Verschlucken	1.000
H 301	Giftig bei Verschlucken	100
H 302	Gesundheitsschädlich bei Verschlucken	10
H 304	Kann bei Verschlucken und Eindringen in die Atemwege tödlich sein.	1.000
H 310	Lebensgefahr bei Hautkontakt	1.000
H 311	Giftig bei Hautkontakt	100
H 312	Gesundheitsschädlich bei Hautkontakt	10
H 350	Kann Krebs erzeugen	50.000
H 400	Sehr giftig für Wasserorganismen.	1.000
H 410	Sehr giftig für Wasserorganismen mit langfristiger Wirkung	50.000
H 411	Giftig für Wasserorganismen, mit langfristiger Wirkung.	1.000

$$\begin{aligned}
 & \text{MEG-Äquivalente}(\text{Menge}_{\text{Substanz } i}) \\
 &= \text{Menge}_{\text{Substanz } i} \cdot \frac{\text{Wirkfaktor}_{\text{Substanz } i}}{\text{Wirkfaktor}_{\text{Monoethylenglykol}}} \\
 &= \text{Menge}_{\text{Substanz } i} \cdot \frac{\text{Wirkfaktor}_{\text{Substanz } i}}{50}
 \end{aligned}$$

einer einzigen Zahl zusammenzufassen. In Tabelle 1 sind in den Spalten 3 und 4 die Gewichtungsfaktoren und MEG-Äquivalente für die Stoffe angegeben, die zur Herstellung von 1 cm² Wafers verwendet werden. Um das Bewusstsein für problematische Stoffe in der IKT-Produktion zu schärfen, sollte die gewichtete Menge der verwendeten Stoffe Teil der Charakterisierung und des Vergleichs der Nachhaltigkeitsauswirkungen von IKT-Produkten und -Dienstleistungen sein.

Dieser Teilindikator kann erweitert werden, wenn mehr Informationen über bestimmte Gruppen problematischer Stoffe am Arbeitsplatz zur Verfügung stehen, z. B. für per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) und für Schwefelhexafluorid (SF₆). Bei künftigen Bewertungen der Nachhaltigkeit elektronischer Geräte und Dienstleistungen sollten die Identität und Menge der verwendeten PFAS ein wichtiges Element sein.

2) Element 2: In ICT-Hardware enthaltene gefährliche Stoffe

Von den zahlreichen Chemikalien, die bei der Herstellung von IKT verwendet werden, verbleiben einige im Produkt selbst. Beispiele hierfür sind Flammschutzmittel, Anti-Tropf-Reagenzien und Weichmacher in den Kunststoffen, die in elektronischen Geräten verwendet werden [23]. Um eine gewünschte Funktionalität (z. B. die Biegsamkeit eines Materials) zu erreichen, stehen in der Regel eine Vielzahl von Chemikalien und Ausführungen zur Verfügung. Die Chemikalien können sich nicht nur in ihren physikalischen und chemischen Eigenschaften, sondern auch in ihrer Toxizität für Mensch und Umwelt stark unterscheiden.

Für einige dieser Gruppen verbietet die Chemikaliengesetzgebung bereits sehr problematische Stoffe (z. B. RoHS-Beschränkung für PBDEs, Stockholmer Übereinkommen über polybromierte Biphenyle). Darüber hinaus sind für die kommenden Jahre weitreichende Beschränkungen geplant, z. B. für bromierte Flammschutzmittel [24] und PVC [25].

Die Anforderungen zur Vermeidung mehrerer Gruppen problematischer Zusatzstoffe sind ein gemeinsames Element in den Vergabekriterien vieler wichtiger freiwilliger Umweltzeichen für elektronische Geräte. Beispiele hierfür sind das Europäische Umweltzeichen, das TCO-Siegel und der deutsche Blaue Engel. Freiwillige Verpflichtungen zur Vermeidung solcher Stoffe sind Teil der Umweltberichte von IKT-Herstellern [26].

IKT-Hardware kann einen sehr unterschiedlichen Gehalt an solchen gefährlichen Stoffen aufweisen. Daher sollte die Erfassung und Bewertung des Gehaltes an diesen Stoffen Teil der Nachhaltigkeitsbewertung von elektronischen Geräten und Dienstleistungen sein.

Informationen über den Gehalt an gefährlichen Stoffen für ein bestimmtes elektronisches Gerät können aus verschiedenen Quellen bezogen werden. Für einige Produkte liegen Stücklisten vor. Wenn solche Daten fehlen, können allgemeine Werte für die Konzentration problematischer Stoffe in Materialien für eine erste Bewertung verwendet werden. Tabelle 3 zeigt die durchschnittlichen Konzentrationen von Flammschutzmitteln und problematischen Metallen in Kunststoffteilen in elektronischen Altgeräten [27].

TABELLE 3: KONZENTRATIONEN VON FLAMMSCHUTZMITTELN UND METALLEN IN KUNSTSTOFFEN VON ABFÄLLEN AUS ELEKTRONISCHEN GERÄTEN

Flamm-schutzmittel	Konzentration		Metalle	Konzentration	
TBBPA	1.700	mg/kg	Antimon	1.400	mg/kg
DecaBB	14	mg/kg	Cadmium	36	mg/kg
TBP	50	mg/kg	Blei	1.400	mg/kg
BTBPE	360	mg/kg	Quecksilber	0,3	mg/kg
DBDPE	1.100	mg/kg	Nickel	270	mg/kg
DDC-CO	66	mg/kg			

Quelle: [26]

Wenn genauere Informationen verfügbar sind, können die allgemeinen Werte durch gerätespezifische Werte ersetzt werden. Problematische organische und anorganische Verbindungen in einem elektronischen Gerät lassen sich anhand von Bisphenol A und Blei als Referenzsubstanzen zusammenfassen. Andere Stoffe können entsprechend ihrer gefährlichen Eigenschaften mit diesen Referenzsubstanzen verglichen werden. Liegen zusätzliche Informationen über den Gehalt an bestimmten problematischen Stoffen in einem elektronischen Gerät vor, können diese nach ihrer Toxizität charakterisiert und zu den oben beschriebenen Werten hinzugefügt werden. Die für diesen Schritt benötigten Informationen sind die Konzentrationen der Stoffe und ihre H-Sätze. Für jeden Stoff mit H-Sätzen kann in der oben beschriebenen Weise ein Gewichtungsfaktor abgeleitet werden. Er ermöglicht es dann, die verwendete Menge einer Substanz in MEG-Äquivalenten auszudrücken. Das Vorgehen hierzu wird weiter oben im Abschnitt III.1 beschrieben.

3) Element 3: Problematische Stoffe in der Nutzungsphase der digitalen Infrastruktur

Chemikalien werden an mehreren Stellen in der digitalen Lieferkette eingesetzt, um digitale Dienste bereitzustellen. Beispiele sind Reinigungsmittel für Monitore, Kühlmittel in Rechenzentren und fluorierte Treibhausgase wie SF₆ als Schutzgase in Schaltanlagen (siehe Abbildung 2). Diese Chemikalien tragen zu den Umweltauswirkungen eines digitalen Dienstes bei.

ABB. 2 FLUORIERTER SCHUTZGASE IN SCHALTANLAGEN, BEISPIEL SF₆.

Im Falle von Rechenzentren werden diese Chemikalien von den Betreibern der Rechenzentren oder von



spezialisierten Unternehmen gekauft, die mit der Wartung z. B. der Kühlsysteme oder Schaltanlagen beauftragt sind. In beiden Fällen sind die Menge und die technischen Spezifikationen der chemischen Produkte (Stoffe oder Gemische) bekannt. Die Sicherheitsdatenblätter der chemischen Produkte geben Auskunft über die beteiligten Gefahrstoffe und deren Konzentrationen (zumindest in Konzentrationsbereichen). Dadurch ist es möglich, die

verwendeten Mengen zu zählen und mit Gewichtungsfaktoren, die die Toxizität der Chemikalien widerspiegeln, zu aggregieren.

Der allgemeine Ansatz ist für verschiedene Arten von Chemikalien (z. B. Reinigungsmittel und Kühlmittel) derselbe. Zur Erleichterung des Vergleichs können funktionsspezifische Referenzstoffe ausgewählt werden. Dies wird im Folgenden für die in Rechenzentren verwendeten Kühlmittel veranschaulicht.

Im Rahmen eines Forschungsprojekts zu Leistungsindikatoren für die ökologische Bewertung von Rechenzentren wurden die in mehreren Rechenzentren benötigten Kühlmittelmengen ermittelt [7]. In einem Rechenzentrum mit einer Kühlkapazität von 60 kW wurde eine Gesamtmenge von 24 kg Kühlmittel verbraucht, mit einem durchschnittlichen jährlichen Verlust von 4 %. Die Kühlmittel unterscheiden sich stark in ihrem globalen Erwärmungspotenzial.

In diesem Beispiel wurde der Stoff R 134a als Kühlmittel verwendet. Er ist eines der am häufigsten verwendeten Kühlmittel. Er wurde als Referenzsubstanz gewählt, um Rechenzentren hinsichtlich ihres Verbrauchs an Kühlmitteln zu vergleichen. Die Menge, die jährlich verloren geht (4 % von 24 kg), entspricht 0,96 kg R134a-Äquivalenten.

Wir haben R 134a als Referenzsubstanz gewählt, um den Kühlmittelverbrauch von Rechenzentren auf der Grundlage ihres GWP-Werts im Verhältnis zum GWP von R134a zu kommunizieren. Dies ist keine Doppelzählung der GWP-Auswirkungen, da in den meisten Fällen die Wirkungskategorie des Klimawandels durch fossile Brennstoffe in der Stromerzeugung dominiert wird und Kühlmittel dort vernachlässigt werden.

Darüber hinaus kann die Menge der verbrauchten Kühlmittel in auch in Kilogramm MEG-Äquivalenten angegeben werden. Für die möglichen Auswirkungen eines Stoffes auf das Klima gibt es keine Gefahrenhinweise (H-Sätze) in der CLP-Verordnung. Daher kann für solche Stoffe ohne H-Sätze keine Gewichtung auf der Grundlage von H-Sätzen vorgenommen werden. Der TOX-Gewichtungsfaktor kann aber direkt aus dem Treibhauspotenzial des Stoffes abgeleitet werden. Die Gewichtungsfaktoren haben Werte zwischen 0 und 10.000. Für Stoffe mit einem GWP von bis zu 10.000 ist der TOX-Gewichtungsfaktor gleich dem GWP. Für Stoffe mit einem GWP über 10.000 wird der TOX-Gewichtungsfaktor auf 10.000 gesetzt. (Dies ist die Obergrenze des Gewichtungsfaktors für Wirkungen, die die Emission einer erheblichen Menge eines Stoffes erfordern. Für Stoffe mit chronischen Wirkungen auch bei sehr niedrigen Konzentrationen kann der TOX-Gewichtungsfaktor einen Wert von 50.000 haben).

Für die Berechnung der MEG-Äquivalente wird die gleiche Gleichung verwendet, die bereits in Abschnitt III.1 beschrieben wurde.

Im obigen Beispiel hat R134a einen GWP-Wert von 1.446 und einen Gewichtungsfaktor von demselben Wert. Daher entspricht die oben berechnete Menge an Verlusten von R134a (16 kg) (für 1 MW Kühlleistung) $16 \text{ kg} * 1.446 / 50 = 463 \text{ kg MEG-Äquivalente}$. Diese Äquivalente - die sich aus den Kühlmittelverlusten eines Jahres ergeben - können den digitalen Diensten des Rechenzentrums zugerechnet werden.

IV. DER SVHC SCORE

Der SVHC Score zeigt den Informationsstand zum Vorkommen einer besonderen Gruppe von Stoffen in Geräten an. Diese Gruppe sind nicht alle gefährlichen Stoffe, sondern die „besonders besorgniserregenden Stoffe“ (SVHC).

Informationen über gefährliche Stoffe in IKT-Hardware sind im Allgemeinen schwer zu erhalten. Es gibt keine Verpflichtung für Hersteller, Informationen über alle gefährlichen Stoffe, z. B. Prozesschemikalien, die in der Herstellung verwendet werden, innerhalb der Lieferketten bereitzustellen. Eine Ausnahme bilden die besonders besorgniserregenden Stoffe (SVHC). Hier bestehen besondere Kommunikationspflichten.

Besonders besorgniserregende Stoffe können irreversible Schäden für die menschliche Gesundheit oder die Umwelt verursachen. Solche Stoffe werden von den europäischen Behörden identifiziert. Die Liste der besonders besorgniserregenden Stoffe im Sinne von REACH Art. 58 wird von der Europäischen Chemikalienagentur (ECHA) veröffentlicht. Diese Liste ist als REACH-Kandidatenliste bekannt [28].

Die Aufnahme eines Stoffes in die Kandidatenliste löst rechtliche Verpflichtungen für Importeure, Hersteller und Lieferanten eines Erzeugnisses aus, das einen solchen Stoff in einer Konzentration von über 0,1 % (nach Gewicht) enthält. Die Konzentrationsangabe bezieht sich bei Erzeugnissen, die aus mehreren Teilen bestehen, auf die einzelnen Teilerzeugnisse. Die Lieferanten eines solchen Erzeugnisses müssen den Abnehmern des Erzeugnisses ausreichende Informationen zur Verfügung stellen, um eine sichere Verwendung des Erzeugnisses zu ermöglichen. In diesem Fall handelt es sich bei den Abnehmern um industrielle oder gewerbliche Anwender und Händler. Als Minimum muss der Name des Stoffes angegeben werden.

Die Verbraucher können ähnliche Informationen verlangen. Der Lieferant des Erzeugnisses muss diese Informationen innerhalb von 45 Tagen kostenlos zur Verfügung stellen. Darüber hinaus müssen Hersteller und Importeure Erzeugnisse, die besonders besorgniserregende Stoffe (über 0,1 %) enthalten, in der SCIP-Datenbank (Substances of Concern in articles as such or in Complex Objects (Products)) melden [29]. Diese Verpflichtung ist Teil der Europäischen Abfallrahmenrichtlinie. Die SCIP-Datenbank ist öffentlich zugänglich und ermöglicht die Suche nach Erzeugnissen aus allen Sektoren, einschließlich IKT.

Die folgende Abbildung zeigt ein Beispiel für einen Datensatz der SCIP-Datenbank. In der Abbildung werden die SVHC genannt, die in einem spezifischen Desktop PC enthalten sind.

ABB. 3 BESONDERS BESORGNISERREGENDE STOFFE (SVHC) IN EINEM DESKTOP PC. BEISPIEL FÜR DIE INFORMATIONEN IN DER SCIP DATENBANK.

OVERVIEW	
For the safe use instruction of the article go to: Safe use instruction	
CANDIDATE LIST SUBSTANCES	
Substance name(s)	Reason for inclusion
2-methyl-1-(4-methylthiophenyl)-2-morpholinopropan-1-one	Toxic for reproduction (Article 57c)
1,3,5-Tris(oxiran-2-ylmethyl)-1,3,5-triazinane-2,4,6-trione (TGIC)	Mutagenic (Article 57b)
Lead titanium trioxide	Toxic for reproduction (Article 57c)
Lead titanium zirconium oxide	Toxic for reproduction (Article 57c)
Hexahydromethylphthalic anhydride	Respiratory sensitising properties (Article 57(f) -
1, 2-dimethoxyethane; ethylene glycol dimethyl ether (EGDME)	Toxic for reproduction (Article 57c)
Diboron trioxide	Toxic for reproduction (Article 57c)

Quelle: ECHA 2024

Die in Artikel 33 der REACH-Verordnung festgelegten rechtlichen Verpflichtungen können genutzt werden, um systematisch Informationen über den Gehalt an besonders besorgniserregenden Stoffen in einzelnen Hardwarekomponenten anzufordern oder zu erhalten. Diese Informationen sind wichtig, um

- die Substitution solcher Stoffe durch weniger problematische Stoffe zu fördern, sofern dies möglich ist;
- das Wissen über das Vorhandensein oder Nichtvorhandensein dieser Stoffe in Erzeugnissen und in Abfallströmen, die von diesen Erzeugnissen herrühren, zu erweitern; und
- die Auswirkungen auf Mensch und Umwelt aufgrund des Vorhandenseins dieser Stoffe im Lebenszyklus von IKT-Hardware und den damit verbundenen Materialströmen zu verringern.

Elemente einer digitalen Lieferkette mit ausreichenden Informationen über das Vorhandensein von besonders besorgniserregenden Stoffen sollten gegenüber Elementen ohne diese Informationen vorrangig behandelt werden.

Innerhalb des TOX-Indikators zeigt der sogenannte "SVHC Score" den Kenntnisstand über SVHC in einer bestimmten Hardwarekomponente an. Er kann Werte von 1 bis 5 annehmen. Die folgende Abbildung zeigt den SVHC Score und nennt in Stichworten die Bedeutung der Werte:

ABB. 4. DER SVHC SCORE UND DIE BEDEUTUNG DER WERTE.

-Der SVHC Score-	
• SVHC Score 5: Keine Information, keine Aktivität.	
• SVHC Score 4: Information angefragt.	
• SVHC Score 3: Information erhalten.	
• SVHC Score 2: SVHC identifiziert (Namen der SVHC)	
• SVHC Score 1: SVHC Gehalt spezifiziert oder keine enthalten.	
Lieferkette, 4 Elemente: SVHC Score = Summe (SVHC Score (El. 1-4)) / 4.	

Je niedriger der Wert, desto mehr ist über den SVHC-Gehalt in einem elektronischen Gerät bekannt. Die Punktzahlen haben die folgende Bedeutung:

- **SVHC Score 5:** Keine Information, keine Aktivität. Es ist in der Analyse nicht bekannt, ob das Gerät

SVHCs in Konzentrationen über 0,1% enthält. Es ist noch nicht in der SCIP-Datenbank nachgeschaut worden. Beim Lieferanten des Erzeugnisses wurde noch keine Anfrage gestellt.

- **SVHC Score 4:** Information angefragt. Beim Lieferanten wurden Informationen zum SVHC-Gehalt im Produkt angefordert.
- **SVHC Score 3:** Information gefunden. In der SCIP-Datenbank wurden Informationen zum SVHC-Gehalt für das bewertete Produkt gefunden oder der Hersteller dieses Produktes hat die Informationen geliefert.
- **SVHC Score 2:** SVHC identifiziert (Namen der SVHC)). Die Namen und CAS-Nummern der SVHC, die in dem Produkt enthalten sind (oberhalb 0,1%) sind bekannt.
- **SVHC Score 1:** SVHC Gehalt spezifiziert oder keine gefunden. Inhalt geklärt (Name, Konzentration, Ort). Dieser (beste) Score wird vergeben, wenn zusätzliche Informationen zu den SVHC vorliegen. Hierzu gehören genauere Angaben zur Konzentration (nicht nur, dass die Konzentration über 0,1% liegt) und über die Materialien bzw. Komponenten, in denen die SVHC enthalten sind. Der SVHC Score 1 wird auch vergeben, wenn die Information vorliegt, dass gar keine SVHC über 0,1% im Gerät enthalten sind.

Für eine digitale Infrastruktur mit n Hardware-Plattformen wird ihr SVHC Score als Durchschnittswert der SVHC Scores der beteiligten Plattformen berechnet (Gleichung 2):

$$SVHC_{\text{digitale Infrastruktur}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n SVHC(\text{Plattform}_i)$$

Die für diese Bewertung eines bestimmten elektronischen Geräts erforderlichen Informationen können auf zwei Arten gesammelt werden: Direkter Kontakt mit dem Lieferanten des Geräts (der Lieferant muss diese Informationen innerhalb von 45 Tagen bereitstellen) oder Suche nach dem spezifischen Produkt in der SCIP-Datenbank der ECHA.

V. SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

Die Kombination der Ökobilanz-Methode mit dem Indikator TOX und dem SVHC Score führt zu einem vollständigeren Bild der Umweltauswirkungen von Produkten und Dienstleistungen. MEG-Äquivalente, die auf den Gefahrenhinweisen von Chemikalien beruhen, ermöglichen es, die Mengen der in digitalen Geräten verwendeten oder vorhandenen Chemikalien zu gewichten und zu aggregieren. Darüber hinaus zeigt die SVHC-Bewertung, inwieweit Informationen über den Gehalt an besonders besorgniserregenden Stoffen verfügbar sind. Diese Informationen sind wichtig, weil sie die Substitution dieser Stoffe fördern und die Transparenz von besonders kritischen Stoffen in den Stoffströmen erhöhen.

Die im Rahmen des ECO:DIGIT-Projekts entwickelten Methoden sollen die Umweltauswirkungen verschiedener Softwareanwendungen vergleichbar machen. Der Indikator TOX und der SVHC Score können jedoch auch in anderen Bereichen eingesetzt werden, um die Umweltauswirkungen von Produkten besser zu bewerten und vorherzusagen und sie hinsichtlich ihrer Umweltauswirkungen zu optimieren.

Danksagung Diese Arbeit wurde im Rahmen des Forschungsprojektes ECO:DIGIT (<https://ecodigit.de>) durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

REFERENZEN

- [1] Bilsen, V.; Devriendt, W.; Bley, F.; Carpentier, M.; Duchêne, V.; Lecocq, C.; Legein, E.; Gröger, J.; Liu, R.; Köhler, A. R.; Quack, D.; Behrens, F.; Gaušas, S. (2021): Greening DCs and ECNs: towards climate neutrality by 2050, final report, 2021. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Study-on-Greening-Cloud-Computing-and-Electronic-Communications-Services-and-Networks.pdf>, zuletzt geprüft am 9. April 2024.
- [2] Hintemann, R.; Hinterholzer, S. (2020): Significant increase in the energy requirements of data centres, Deutlicher Anstieg des Energiebedarfs der Rechenzentren – Borderstep Institut. Borderstep Institut (ed.). Online verfügbar unter <https://www.borderstep.de/deutlicher-anstieg-des-energiebedarfs-der-rechenzentren-im-jahr-2020/>, last updated on 17 Feb 2021, zuletzt geprüft am 8. Juli 2021.
- [3] Liu, R.; Koehler, A. R.; Gailhofer, P.; Gensch, C.-O.; Wolff, F. (2019): Impacts of the digital transformation on the environment and sustainability. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/342039732_Impacts_of_the_digital_transformation_on_the_environment_and_sustainability, zuletzt geprüft am 9. April 2024.
- [4] Alfieri, F.; Spiliotopoulos, C. (2023): ICT Task Force study: Final Report. In: *1831-9424*. DOI: 10.2760/486253.
- [5] Kamiya, G.; Bertoldi, P. (2024): Energy Consumption in Data Centers and Broadband Communication Networks in the EU. In: *1831-9424*. DOI: 10.2760/706491.
- [6] Bordage, F.; Montenay, L. de; Benqassem, S.; Delmas-Orgelet, J.; Domon, F.; Prunel, D.; Vateau, C.; Perasso, E.: Digital technologies in Europe: an environmental life cycle approach. GreenIT.fr (ed.). Online verfügbar unter <https://www.greenit.fr/wp-content/uploads/2021/12/EU-Study-LCA-7-DEC-EN.pdf>, zuletzt geprüft am 9. April 2024.
- [7] Gröger, J.; Liu, R.; Stobbe, L.; Druschke, J.; Richter, N. (2021): Green Cloud Computing, Lifecycle-based data collection on the environmental impact of cloud computing, Lebenszyklusbasierte Datenerhebung zu Umweltwirkungen des Cloud Computing. Umweltbundesamt (ed.). Dessau-Roßlau, März 2021. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-06-17_texte_94-2021_green-cloud-computing.pdf, zuletzt geprüft am 9. April 2024.
- [8] Schödwell, B.; Zarnkow, R.; Liu, R.; Gröger, J.; Wilkens, M. (2018): Key figures and indicators for assessing the resource efficiency of data centres and testing their practical applicability, Kennzahlen und Indikatoren für die Beurteilung der Ressourceneffizienz von Rechenzentren und Prüfung der praktischen Anwendbarkeit. Umweltbundesamt (ed.), 2018.
- [9] Hilty, L. M.; Aebischer, B. (2015): ICT for Sustainability: An Emerging Research Field. In: *ICT Innovations for Sustainability*, pp. 3–36. DOI: 10.1007/978-3-319-09228-7_1.
- [10] Global e-Sustainability Initiative; Carbon Trust (2017): ICT Sector Guidance, built on the GHG Protocol Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard, July 2017. Online verfügbar unter <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2023-03/GHGP-ICTSG%20-%20ALL%20Chapters.pdf>, zuletzt geprüft am 9. April 2024.
- [11] ITU - International Telecommunication Union (2015): L.1410 : Methodology for environmental life cycle assessments of information and communication technology goods, networks and services, Recommendation ITU-T L.1410. International Telecommunication Union (ed.). Online verfügbar unter <https://www.itu.int/rec/T-REC-L.1410-201412-l/en>, last updated on 3 Apr 2024, zuletzt geprüft am 3. April 2024.
- [12] ETSI ES 203 199 V1.3.0 (2014-12): Environmental Engineering (EE); Methodology for environmental Life Cycle Assessment (LCA) of Information and Communication Technology (ICT) goods, networks and services
- [13] ADEME – General principles for the environmental labelling of consumer products, Methodological standard for the environmental assessment of digital services Online verfügbar unter https://codde.fr/wp-content/uploads/2023/02/PCR-Digital-Services_v1.0_EN.pdf, zuletzt geprüft am 3. April 2024.
- [14] Kim, S.; Yocon, C.; Ham, S.; Park, J.; Kwon, O.; Park, D.; Choi, S.; Kim, S.; Ha, K.; Kim, W. (2018): Chemical use in the semiconductor manufacturing industry. *International Journal of Occupational and Environmental Health* 2018, Vol. 24, NOS. 3-4, 109 -118, Published online 2018; doi: 10.1080/10773525.2018.1519957.
- [15] Yoon, C.; Kim, S.; Park, D.; Choi, Y.; Jo, J.; Lee, K.: Chemical Use and Associated Health Concerns in the Semiconductor Manufacturing Industry. In: *Safety and Health at Work* 11 (2020), 500 – 508, <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2020.04.005>.
- [16] Björnsson, O. (2020): Toxic Tech. Occupational poisoning in ICT manufacturing. SWED WATCH, Report 98, Make ICT fair, Sweden 2020.
- [17] Oltmanns, J.; Bunke, D.; Jenseit, W. (2016): Compilation of chemical indicators. Development, revision and additional analysis. Eurostat, Luxembourg, 2016.
- [18] Bunke, D.; Graulich, K. (2001):MEG Equivalents as an Indicator of Hazardous Substance Use in Products and Processes. *Gate to Environmental Health Sciences: Life Cycle Management*. May 2002, p. 1-9.
- [19] 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.
- [20] Bunke, D.; Gensch, C.; Möller, M.; Rüdener, I.; Ebinger, F.; Graulich, K. (2003): Assessment of Toxicological Risks due to Hazardous Substances: Scoring of Risk Phrases. In: *Int J LCA* 8 (1) 1-2, 2003.
- [21] Reihlen, A.; Bunke, D.; Gruhlke, A.; Groß, R.; Blum, C. (2016): Guide on sustainable chemicals. Umweltbundesamt, Dessau, 2016. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/161221_uba_fb_chemikalien_engl_bf.pdf, zuletzt geprüft am 9. April 2024.
- [22] UNEP United Nations Environment Programme and Secretariat of the Basel, Rotterdam and Stockholm Conventions (2023): Chemicals in plastics: a technical report. Geneva.
- [23] European Chemicals Agency (ECHA) (2024a): Home, ECHA, Helsinki 2024, <https://echa.europa.eu/de/home>
- [24] European Chemicals Agency (ECHA) (2023a): Regulatory strategy on flame retardants. ECHA, Helsinki 2023, Online verfügbar unter <https://echa.europa.eu/de/-/echa-identifies-certain-brominated-flame-retardants-as-candidates-for-restriction>, zuletzt geprüft am 9. April 2024.
- [25] European Chemicals Agency (ECHA) (2023b): Investigation report on PVC and PVC additives. ECHA, Helsinki 2023, Online verfügbar unter https://echa.europa.eu/documents/10162/17233/rest_pvc_investigation_report_en.pdf.
- [26] apple (2013): Environmental Progress Report 2022. Online verfügbar unter https://www.apple.com/environment/pdf/Apple_Environmental_Progress_Report_2022.pdf, zuletzt geprüft am 9. April 2024.
- [27] Taverna, R.; Gloor, R.; Zennegg, M.; Birchler, E.: Material flows in Swiss electronic waste, Stoffflüsse im Schweizer Elektronikschrott. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Zürich 2017.
- [28] European Chemicals Agency (ECHA) (2024b): Candidate List substances in articles. ECHA, Helsinki 2024, Online verfügbar unter <https://echa.europa.eu/en/regulations/reach/candidate-list-substances-in-articles>
- [29] European Chemicals Agency (ECHA) (2024c): SCIP database. ECHA, Helsinki 2024, <https://echa.europa.eu/en/scip>
- [30] Fantke, P., Bijster, M., Guignard, C., Hauschild, M., Huijbregts, M., Jolliet, O., Kounina, A., Magaud, V., Margni, M., McKone, T.E., Posthuma, L., Rosenbaum, R.K., van de Meent, D., van Zelm, R. (2017): USEtox® 2.0 Documentation (Version 1), <http://usetox.org> .
- [31] ISO 14040 (2021): Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020);
- [32] ISO 14044 (2021): Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017 + Amd 2:2020)

- [33] Forschungsprojekt ECODIGIT : : Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) <https://ecodigit.de> , zuletzt geprüft am 11. Oktober 2024
- [34] Gröger, J.; Behrens, F.; Liu, R.; Bunke, D. (2024): Ökobilanz digitaler Dienstleistungen. Methodik zur Bestimmung der Umweltwirkungen von Software, Cloud- Services und anderen digitalen Diensten in verteilten IT-Infrastrukturen. Öko-Institut, Freiburg, 2024. Online verfügbar unter https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Methodenskizze_Oekobilanz_Software.pdf, zuletzt geprüft am 11. Oktober 2024.
- [35] 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 11.10.2024.

Anhang I: H-Sätze und zugehörige Wirkfaktoren (WF)		
H Sätze	Bedeutung	Wirkfaktor
H300	Lebensgefahr bei Verschlucken.	1000
H301	Giftig bei Verschlucken.	100
H302	Gesundheitsschädlich bei Verschlucken.	10
H304	Kann bei Verschlucken und Eindringen in die Atemwege tödlich sein.	1000
H310	Lebensgefahr bei Hautkontakt.	1000
H311	Giftig bei Hautkontakt.	100
H312	Gesundheitsschädlich bei Hautkontakt.	10
H314	Verursacht schwere Verätzungen der Haut und schwere Augenschäden.	100
H315	Verursacht Hautreizungen.	5
H317	Kann allergische Hautreaktionen verursachen.	500
H318	Verursacht schwere Augenschäden.	100
H319	Verursacht schwere Augenreizung.	50
H330	Lebensgefahr bei Einatmen.	1000
H331	Giftig bei Einatmen.	100
H332	Gesundheitsschädlich bei Einatmen.	10
H334	Kann bei Einatmen Allergie, asthmaartige Symptome oder Atembeschwerden verursachen.	500
H335	Kann die Atemwege reizen.	5
H336	Kann Schläfrigkeit und Benommenheit verursachen.	5
H340	Kann genetische Defekte verursachen	50000
H341	Kann vermutlich genetische Defekte verursachen.	100
H350	Kann Krebs erzeugen	50000
H350 i	Kann bei Einatmen Krebs erzeugen.	50000
H351	Kann vermutlich Krebs erzeugen	100
H360	Kann die Fruchtbarkeit beeinträchtigen oder das Kind im Mutterleib schädigen	1000
H360 F	Kann die Fruchtbarkeit beeinträchtigen.	1000
H360 D	Kann das Kind im Mutterleib schädigen.	1000
H360 FD	Kann die Fruchtbarkeit beeinträchtigen. Kann das Kind im Mutterleib schädigen.	1000
H361	Kann vermutlich die Fruchtbarkeit beeinträchtigen oder das Kind im Mutterleib schädigen	50
H361 f	Kann vermutlich die Fruchtbarkeit beeinträchtigen.	50

H361 d	Kann vermutlich das Kind im Mutterleib schädigen.	50
H361 fd	Kann vermutlich die Fruchtbarkeit beeinträchtigen. Kann vermutlich das Kind im Mutterleib schädigen.	50/50
H362	Kann Säuglinge über die Muttermilch schädigen.	100
H370	Schädigt die Organe	1000
H371	Kann die Organe schädigen	100
H372	Schädigt die Organe bei längerer oder wiederholter Exposition	500
H373	Kann die Organe schädigen bei längerer oder wiederholter Exposition	50
Umweltgefahren		
H400	Sehr giftig für Wasserorganismen.	1000
H410	Sehr giftig für Wasserorganismen mit langfristiger Wirkung.	50000
H411	Giftig für Wasserorganismen, mit langfristiger Wirkung.	1000
H412	Schädlich für Wasserorganismen, mit langfristiger Wirkung.	100
H413	Kann für Wasserorganismen schädlich sein, mit langfristiger Wirkung.	50