

TEXTE

94/2021

Abschlussbericht

Green Cloud Computing

**Lebenszyklusbasierte Datenerhebung zu
Umweltwirkungen des Cloud Computing**

von:

Jens Gröger, Ran Liu
Öko-Institut e.V., Berlin

Dr. Lutz Stobbe, Jan Druschke, Nikolai Richter
Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration (IZM), Berlin

Herausgeber:

Umweltbundesamt

TEXTE 94/2021

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums
für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3717 34 348 0
FB000544

Abschlussbericht

Green Cloud Computing

Lebenszyklusbasierte Datenerhebung zu Umweltwirkungen des
Cloud Computing

von

Jens Gröger, Ran Liu
Öko-Institut e.V., Berlin

Dr. Lutz Stobbe, Jan Druschke, Nikolai Richter
Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration (IZM), Berlin

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

[f/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

[t/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Durchführung der Studie:

Öko-Institut e.V.
Merzhauser Straße 173
79100 Freiburg

Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration (IZM)
Gustav-Meyer-Allee 25
13355 Berlin

Abschlussdatum:

März 2021

Redaktion:

GreenIT Beratungsstelle nachhaltige Informations- und Kommunikationstechnik
Marina Köhn

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Juni 2021

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Green Cloud Computing

Im Projekt Green Cloud Computing (GCC) wurde die Methodik zur Bewertung von Rechenzentren mit Effizienzkennzahlen (KPI4DCE – Key Performance Indicators for Data Centre Efficiency) weiterentwickelt und darauf aufbauend die neue GCC-Methodik entwickelt. Die entwickelten Kennzahlen geben Auskunft über die Umwelteffekte von Cloud-Dienstleistungen bezogen auf deren Service-Einheiten. Hierzu wird der Umweltaufwand zur Herstellung von Informationstechnik und zum Betrieb von Rechenzentren in den vier Wirkungskategorien Rohstoffaufwand (ADP), Treibhausgasemissionen (GWP), Kumulierter Energieaufwand (KEA) und Wasserverbrauch erfasst und den Cloud-Dienstleistungen zugeordnet. Auf dieser Grundlage werden pro Dienstleistung vier Aufwandskennzahlen berechnet, beispielsweise der CO₂-Fußabdruck oder der Rohstoffverbrauch pro Service-Einheit. Die GCC-Methodik wurde exemplarisch für die vier Cloud-Dienstleistungen *Online-Storage*, *Virtuelle Desktop-Infrastruktur*, *Videostreaming* und *Videokonferenzen* angewendet und dabei die verschiedenen Möglichkeiten zur Allokation der Hardwareressourcen auf die Cloud-Dienstleistungen aufgezeigt. Die Anwendungsbeispiele zeigen, dass die GCC-Methodik gut dazu geeignet ist, Umweltwirkungen für einzelne Cloud-Services zu benennen und zu kommunizieren. Zusätzlich wurden in dem Projekt Teiluntersuchungen zu den Entwicklungen in der Halbleiterindustrie, zu Ökobilanzen von IKT-Komponenten, zu kritischen Metallen, zur Entwicklung des Energie- und Ressourcenbedarfs von Rechenzentren sowie zum Energiebedarf von Telekommunikationsnetzen durchgeführt, die dazu beitragen, das Kennzahlensystem in die aktuellen technischen Entwicklungen einzuordnen.

Abstract: Green Cloud Computing

In the Green Cloud Computing (GCC) project, the methodology for evaluating data centres with efficiency indicators (KPI4DCE - Key Performance Indicators for Data Centre Efficiency) was further developed and, based on this, the new GCC methodology was created. The novel indicators provide information on the environmental effects of cloud services in relation to their service units. For this purpose, the environmental effort for the production of information technology and the operation of data centres is recorded in the four impact categories of abiotic resource depletion potential (ADP), global warming potential (GWP), cumulative energy demand (CED) and water consumption and assigned to the cloud services. On this basis, four effort metrics are calculated per service unit, for example the carbon footprint or the raw material consumption per service unit. The GCC methodology was applied exemplarily for the four cloud services *online storage*, *virtual desktop infrastructure*, *video streaming*, and *videoconferencing*, showing the different possibilities for allocating hardware resources to the cloud services. The application examples show that the GCC methodology is well suited for naming and communicating environmental impacts of different cloud services. In addition, sub-studies on developments in the semiconductor industry, on life cycle assessments of ICT components, on critical metals, on the development of energy and resource requirements of data centres as well as on the energy demand of telecommunication networks were carried out as part of the project. These contribute to classifying the KPI system in the current technical developments.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	6
Abbildungsverzeichnis.....	8
Tabellenverzeichnis	9
Abkürzungsverzeichnis	13
Zusammenfassung.....	16
Summary	25
1 Hintergrund und Zielsetzung.....	34
2 Methodenentwicklung	35
2.1 KPI4DCE Methodik	35
2.2 Beispiele für KPI4DCE-Kennzahlen.....	37
2.3 Bewertungsmethodik Green Cloud Computing (GCC).....	42
2.4 Cloud Computing Servicemodelle.....	44
2.5 Cloud Computing Serviceeinheiten.....	45
2.6 Allokationsregeln	46
2.7 Green Cloud Computing Kennzahlen	52
3 Hintergrundanalysen.....	54
3.1 Entwicklung in der Halbleiterindustrie	54
3.2 Orientierende Ökobilanzen für IKT-Komponenten.....	59
3.3 Kritische Metalle in IKT-Komponenten	83
3.4 Entwicklung des Energie- und Ressourcenbedarfs von Rechenzentren.....	90
3.5 Energiebedarf von Telekommunikationsnetzen und Datenübertragung.....	97
4 Anwendung der GCC-Bewertungsmethodik	106
4.1 Online-Storage	106
4.2 Virtuelle Desktop Infrastruktur.....	109
4.3 Videostreaming.....	114
4.4 Home-Office.....	118
4.5 Videokonferenzen.....	122
5 Projektergebnisse und verbleibender Forschungsbedarf	138
5.1 Projektergebnisse	138
5.2 Beantwortung der Forschungsfragen	140
5.3 Schlussfolgerungen	142
5.4 Verbleibender Forschungsbedarf	143
6 Quellen	147

A	Anhang: KPI4DCE-Berechnungstool	152
B	Anhang: KPI4DCE-Berechnungsmethodik	154
B.1	Bilanzierung der Umweltwirkungen von Rechenzentren	154
B.2	Berechnung auf der Umweltwirkungen auf IKT-Komponentenebene	157
B.3	Berechnung auf der Umweltwirkungen auf Produktebene.....	164
B.4	Ergebnisdarstellung der Wirkungsfaktoren	172
C	Anhang: Datensätze	177
C.1	Herstellung des Silizium-Wafers	177
C.2	Herstellung des Prozessors (CPU)	183
C.3	Herstellung der RAM-Module	191
C.4	Herstellung des Netzteils (PSU: Power Supply Unit).....	192
C.5	Charakterisierungsfaktoren für ADP	194
D	Anhang: Bewertung der Relevanz kritischer Rohstoffe	197

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Treibhausgasemissionen Videokonferenz-Teilnahme bei verschiedenen Anzeigergeräte-Kombinationen (Herstellungs- und Nutzungsphase)	23
Figure 2:	Greenhouse gas emissions for participation at video conference for different display unit combinations (production and use phase)	32
Abbildung 3:	KPI4DCE-Kennzahlen für Rohstoffverbrauch (ADP)	38
Abbildung 4:	KPI4DCE-Kennzahlen für Treibhausgaspotenzial (GWP)	39
Abbildung 5:	KPI4DCE-Kennzahlen für Kumulierten Energieaufwand (CED).....	40
Abbildung 6:	Verteilung der Umweltwirkungen von Rechenzentren nach Lebenszyklusphase ..	41
Abbildung 7:	Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen KPI4DCE und GCC-Kennzahlen.....	43
Abbildung 8:	Aufgabenteilung zwischen Anbietern und Nutzern unterschiedlicher Servicemodelle	45
Abbildung 9:	Bezugnahme der Literaturquellen zur Bilanzierung von Halbleiterbauelementen.	61
Abbildung 10:	Darstellung der Unterschiede der Modellierung zwischen dem KPI4DCE-Projekt und der vorliegenden Studie	63
Abbildung 11:	Übersicht der Datensätze und des methodischen Vorgehens	64
Abbildung 12:	Schematische Abbildung Storage Server (opencompute.org)	79
Abbildung 13:	Verdoppelung des Bedarfs an IT-Leistung alle zwei Jahre	94
Abbildung 14:	Szenario 1: Technologieverbesserung alle zwei Jahre	95
Abbildung 15:	Szenario 2: Technologieverbesserung alle drei Jahre	96
Abbildung 16:	Kanalmodell (schematisch).....	97
Abbildung 17:	Geräte- und Komponentenkategorien im Sachbilanzmodell.....	99
Abbildung 18:	Theoretische Leistungsaufnahme im Telekommunikationsnetzwerk bei 1 GB/h bis vor das Rechenzentrum, innerhalb Deutschlands (2020)	102
Abbildung 19:	Leistungsaufnahme im Telekommunikationsnetzwerk bei 1 GB/h bis vor das Rechenzentrum in Abhängigkeit der Technikgeneration.....	104
Abbildung 20:	CO ₂ -Fußabdruck für Online-Storage im Vergleich.....	108
Abbildung 21:	Kumulierter Energieaufwand (CED) für Online-Storage im Vergleich.....	109
Abbildung 22:	Anzahl Videokonferenz-Teilnehmende (4 Server) und CPU-Last (pro Server) im Wochenverlauf Montag bis Sonntag	126
Abbildung 23:	Elektrische Leistungsaufnahme (4 Server) im Wochenverlauf Montag bis Sonntag	127
Abbildung 24:	Für Videokonferenzen genutzte Bandbreiten pro Teilnehmenden	129
Abbildung 25:	Zusammensetzung der Treibhausgasemissionen für Videokonferenzen vom Rechenzentrum bis zum Teilnehmenden.....	131
Abbildung 26:	Treibhausgasemissionen Videokonferenz-Teilnahme bei verschiedenen Anzeigergeräte-Kombinationen (Herstellungs- und Nutzungsphase)	134
Abbildung 27:	Vergleich der Treibhausgasemissionen von Videokonferenzen mit verschiedenen Anzeigergeräten mit den Personenkilometern verschiedener Verkehrsmittel.....	136
Abbildung 28:	Screenshot 1 aus der Ergebnisdarstellung beim KPI4DCE-Berechnungstool v2.4	152
Abbildung 29:	Screenshot 2 aus der Ergebnisdarstellung beim KPI4DCE-Berechnungstool v2.4	153
Abbildung 30:	Schematische Darstellung der Systemgrenzen	154
Abbildung 31:	Verhältnis der Die-Fläche mit Anzahl der Kerne der CPUs.....	158

Abbildung 32:	Berechnungsablauf des Cloud-Computing-Tools: Herstellung der CPUs	159
Abbildung 33:	Berechnungsablauf des Cloud-Computing-Tools: Herstellung der RAM-Module.	161
Abbildung 34:	Berechnungsablauf des Cloud-Computing-Tools: Herstellung der 2,5“ SSD.....	162
Abbildung 35:	Berechnungsablauf des Cloud-Computing-Tools: Herstellung der bestückten Hauptleiterplatte der Server	163
Abbildung 36:	CO ₂ Emissionen von Sumco Group und aufgeschlüsselt für Japan und der Überseeproduktion	180
Abbildung 37:	Vergleich der Umweltdaten verschiedener Intel-Front-End-Standorte.....	188

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Allokation der Umweltwirkungen auf Cloud Services	16
Tabelle 2:	Green Cloud Computing Kennzahlen für unterschiedliche Umweltwirkungen	18
Tabelle 3:	Berechnung des CO ₂ -Fußabdrucks für Online-Storage bei 4 Rechenzentren	19
Tabelle 4:	GCC-Kennzahlen für Virtuelle Desktop Infrastruktur (VDI)	20
Tabelle 5:	Berechnung der GCC-Kennzahlen für 1 h Videostreaming für die Umweltwirkungen Rohstoffverbrauch, Treibhausgaspotenzial und Primärenergiebedarf	21
Tabelle 6:	GCC-Kennzahl „CO ₂ -Fußabdruck“ für Videokonferenzen	22
Table 7:	Allocation of environmental impacts to cloud services	25
Table 8:	Green Cloud Computing metrics for different environmental impacts	27
Table 9:	Calculation of the carbon footprint for online storage at 4 data centres	28
Table 10:	GCC Key Figures for Virtual Desktop Infrastructure (VDI)	29
Table 11:	Calculation of the GCC key figures for 1 h video streaming for the environmental impacts raw material consumption, greenhouse gas potential and primary energy demand.....	30
Table 12:	GCC carbon footprint for videoconferencing	31
Tabelle 13:	Bezeichnung der KPI4DCE-Kennzahlen	36
Tabelle 14:	Fragestellungen der KPI4DCE-Kennzahlen	37
Tabelle 15:	Wichtige Parameter der untersuchten Rechenzentren	38
Tabelle 16:	Allokation der Umweltwirkungen auf Cloud Services	48
Tabelle 17:	Allokation auf Hardware-Ebene am Beispiel Server _{GWP}	49
Tabelle 18:	Allokation über virtuelle Ressourcen	50
Tabelle 19:	Green Cloud Computing Kennzahlen für unterschiedliche Umweltwirkungen	53
Tabelle 20:	Vergleich der Inventare für die Herstellung des Silizium-Wafers	65
Tabelle 21:	Produktionsverteilung der Wafer-Substrat-Herstellung nach Ländern	66
Tabelle 22:	Spezifikation des Prozessor-Werks in Irland	68
Tabelle 23:	Inventar für Front-End-Prozesse der CPUs in der vorliegenden Studie	68
Tabelle 24:	Produktionsverteilung der Front-End-Prozesse für die Intel-CPU's nach Ländern ..	69
Tabelle 25:	Inventar für die Back-End-Prozesse der CPUs in der vorliegenden Studie.....	70
Tabelle 26:	Produktionsverteilung der Back-End-Prozesse für die Intel-CPU's nach Ländern ...	70
Tabelle 27:	Produktionsverteilung der Front-End-Prozesse für die IC-Herstellung nach Ländern	71

Tabelle 28:	Produktionsverteilung der Back-End-Prozesse für die IC-Herstellung nach Ländern	72
Tabelle 29:	Referenz-RAM-Modul und Ermittlung der Gold-Menge pro RAM-Modul.....	72
Tabelle 30:	Referenz-RAM-Modul und Ermittlung der Leiterplattfläche pro RAM-Riegel	73
Tabelle 31:	Ermittlung der Gold-Menge pro SSD-Festplatte	74
Tabelle 32:	Exemplarische Mainboards der Server mit ihrer Lagenanzahl.....	74
Tabelle 33:	Annahme der Transportwege der Mikrochips und Leiterplatte	76
Tabelle 34:	Vereinfachte BOM-Liste eines Motherboards für Server.....	77
Tabelle 35:	Restliche Komponenten eines Rack Servers.....	77
Tabelle 36:	Restliche Komponenten eines Blade Systems mit 16 Blade Server Modulen.....	78
Tabelle 37:	Spezifikation des Referenzspeichersystems von SK Telekom SCube AF-Media	79
Tabelle 38:	Komponentenzusammensetzung des Speichersystems mit 2 Server-Nodes	80
Tabelle 39:	Spezifikation des Referenzswitches von Edgecore AS7326-56X	81
Tabelle 40:	Komponentenzusammensetzung des Referenzswitches	82
Tabelle 41:	Materialien- bzw. Komponentenzusammensetzung eines Referenznetzteils	83
Tabelle 42:	Die 30 kritischen Rohstoffe für die EU 2020	85
Tabelle 43:	Für Cloud-Computing relevante kritische Rohstoffe, nach (EC, 2020; USGS, 2020)	87
Tabelle 44:	Halbleitermaterialien in unterschiedlichen Komponenten.....	88
Tabelle 45:	Ergebnistabelle aus dem Streaming Modell, Technikgeneration 2020.....	101
Tabelle 46:	Allokation der Umweltwirkungen GWP auf den Cloud-Service Online-Storage ...	107
Tabelle 47:	Berechnung des CO ₂ -Fußabdrucks für Online-Storage bei 4 Rechenzentren	107
Tabelle 48:	Mengengerüst Rechenzentren zur Desktop-Virtualisierung.....	110
Tabelle 49:	Jährlicher Ressourcenaufwand Rechenzentren einer Bundesbehörde	112
Tabelle 50:	Allokation der Hardware-Ausstattung auf die Virtuelle Desktop Infrastruktur	112
Tabelle 51:	GCC-Kennzahlen für Virtuelle Desktop Infrastruktur (VDI)	113
Tabelle 52:	Vergleich Treibhausgaspotenzial (GWP) VDI-Arbeitsplatz mit Desktop-PC.....	114
Tabelle 53:	Mengengerüst Video-Streaming Rechenzentren	116
Tabelle 54:	Berechnung der GCC-Kennzahlen für 1 h Videostreaming für die Umweltwirkungen Rohstoffverbrauch, Treibhausgaspotenzial und Primärenergiebedarf	117
Tabelle 55:	Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen der Home-Office- Informationstechnik	119
Tabelle 56:	Treibhausgasemissionen für die Datenübertragung Home-Office	120
Tabelle 57:	GWP-Kennzahl Home-Office	121
Tabelle 58:	Energieverbrauch und Energiekosten eines Arbeitstages im Home-Office	122
Tabelle 59:	Server für Videokonferenzen	124
Tabelle 60:	Energiebedarf des Rechenzentrums für 1 Woche Videokonferenz-Dienstleistung	128
Tabelle 61:	GCC-Kennzahl „CO ₂ -Fußabdruck“ für Videokonferenzen	130
Tabelle 62:	Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen Router und Endgeräte	132
Tabelle 63:	Treibhausgasemissionen verschiedener Verkehrsmittel pro Personenkilometer	135

Tabelle 63:	Vergleich der ADP-Werte für die Bereitstellung von elektrischer Energie im „Strommix Deutschland“ nach verschiedenen CML-Methoden	155
Tabelle 64:	„Die“-Fläche und Anzahl der Kerne der CPUs	157
Tabelle 65:	Zusammenfassung der Speicherdichte nach Technikgenerationen.....	160
Tabelle 66:	Spezifikation der SSD-Flashspeicher.....	161
Tabelle 67:	Zusammenfassung der konstanten Faktoren für Server	164
Tabelle 68:	Erhobene Daten Server	165
Tabelle 69:	Zusammenfassung der Berechnungsformeln für Rack-Server	166
Tabelle 70:	Zusammenfassung der Berechnungsformeln für Blade-Server-System.....	167
Tabelle 71:	Zusammenfassung der konstanten Faktoren für Speichersysteme.....	167
Tabelle 72:	Erhobene Daten Speichersysteme	168
Tabelle 73:	Zusammenfassung der Berechnungsformeln für Speichersystem.....	169
Tabelle 74:	Zusammenfassung der konstanten Faktoren für Netzwerk-Switches	169
Tabelle 75:	Erhobene Daten Netzwerkkomponenten	169
Tabelle 76:	Erhobene Daten Kühlsystem	170
Tabelle 77:	Erhobene Daten Energieversorgung	171
Tabelle 78:	Die im Tool verwendeten Wirkungsfaktoren der drei betrachteten Wirkungskategorien	172
Tabelle 79:	Berechnung der in 2016 produzierten Wafer-Substrate (in cm ²)	178
Tabelle 80:	Siltronic Produktionsdaten und Umweltdaten.....	179
Tabelle 81:	Produktionsvolumen der Wafer-Substrat-Herstellung von Sumco in 2016.....	181
Tabelle 82:	Produzierte Waferfläche von Sumco in 2016.....	181
Tabelle 83:	Umweltdaten für Sumco Japan	181
Tabelle 84:	Umweltwirkung der Herstellung von 1 cm ² Wafer-Substrat.....	183
Tabelle 85:	Die globale monatliche Wafer-Kapazität für 2016	184
Tabelle 86:	Ermittlung der Wafer-Kapazität der Irland-Fabs anhand der CED-Werte für Front-End-Prozesse (Intel).....	185
Tabelle 87:	Ermittlung der „good-die-out“-Fläche der Prozessoren pro Jahr in Irland Fabs...	185
Tabelle 88:	Gesamte monatliche Wafer-Kapazität alle Back-End-Standorten Intel	186
Tabelle 89:	Ermittlung der Wafer-Kapazität der Back-End-Standorte anhand der CED-Werte für Back-End (Intel).....	186
Tabelle 90:	Ermittlung der „good-die-out“-Fläche der Prozessoren pro Jahr aus dem Back-End-Prozess Intel.....	187
Tabelle 91:	Ermittlung der „good-die-out“-Fläche der Prozessoren pro Jahr aus dem Back-End-Prozess Intel.....	187
Tabelle 92:	Produktionsdaten der Irland Fab.....	189
Tabelle 93:	Übersicht der Umweltwirkung von Front- und Back-End (Intel).....	189
Tabelle 94:	Zusammenstellung der zu vergleichenden Datenquelle	190
Tabelle 95:	Vergleich der Daten für CED, GWP und Wasserverbrauch für CPU-Herstellung ..	190
Tabelle 96:	Referenz-RAM-Modul und Ermittlung der gesamten „Die“-Fläche der Chips	191
Tabelle 97:	Vergleich der Die-Fläche mit den entsprechenden technologischen Generationen und der Speicherdichte	192
Tabelle 98:	BOM-Liste des Mainboards eines Netzteils.....	192

Tabelle 99:	BOM-Liste des Powerboards eines Netzteils.....	193
Tabelle 100:	BOM-Liste des Controllerboards eines Netzteils.....	193
Tabelle 101:	Gegenüberstellung der Charakterisierungsfaktoren für ADP nach den CML- Methoden „förderbaren Reserven“ und „Gesamtreserven“	194
Tabelle 102:	Anwendungen und Relevanz kritischer Rohstoffe (USGS, 2020; EC, 2020)	197

Abkürzungsverzeichnis

AC	Alternating Current (Wechselstrom)
ADP	Abiotic Depletion Potential (Abiotischer Rohstoffverbrauch)
APC	Arbeitsplatzcomputer
AT	ein einzelner Arbeitstag
AVT	Aufbau- und Verbindungstechnik
BNetzA	Bundesnetzagentur
BOM-Liste	Bill of materials (Stückliste)
BSI	Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik
CaaS	Container as a Service
CBRAM	Conductive Bridging random access memory
CED	Cumulated Energy Demand (=Kumulierter Energieaufwand, KEA)
CF	Charakterisierungsfaktor
CMDB	Configuration Management Database
CML	Centrum voor Milieukunde
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CPU	Central Processing Unit
CRM	Critical Raw Materials
CSP	Cloud Service Provider
DC/DC	Direct Current (Gleichstrom)
DCiE	Data centre infrastructure efficiency
DRAM	Dynamic Random Access Memory
DV	Direktverdampfer
EIRP	Grenzwert der isotropen Strahlungsleistung
EMIB	Embedded Multi-Die Interconnect Bridge
FaaS	Function as a Service
Fab	Halbleiterfabrik
FeRAM	Ferroelectric Random Access Memory
FinFET	Rippen- (Finnen-) Feldeffekttransistor
FK	Flüssigkeitskühler
FPGA	Field Programmable Gate Array
FTTH	Fibre To The Home (Glasfaserhausanschluss)
GB	Gigabyte (Datenmenge)
Gb	Gigabit (Datenmenge)
GCC	Green Cloud Computing
GE	Gigabit Ethernet (Datenübertragungsrate)
GPU	Graphic Processing Unit (Grafikprozessoren)
GWP	Global Warming Potential (Treibhausgaspotenzial)
HAP	Hazardous Air Pollutant
HDDs	Hard Disk Drives
HE	Höheneinheit (von Serverschrankeinschüben)
HFKW	Teilfluorierter Kohlenwasserstoff

HF-Technik	Hochfrequenztechnik
HPC	high-performance computing
IA	Inline Amplifier
IaaS	Infrastructure as a Service
ICs	Integrated Circuits (integrierte Schaltungen)
IEEE-SA	Electrical and Electronics Engineers Standards Association
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
ILCD	International Reference Life Cycle Data System
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IRDS	International Roadmap for Devices and Systems
IT	Informationstechnik
JRC	Joint Research Centre
KEA	Kumulierter Energieaufwand (Primärenergiebedarf), englisch: CED
kg CO₂ eq.	Kilogramm Kohlendioxid Äquivalente
kg Sb eq.	Kilogramm Antimon Äquivalente
KK	Kühlkörper
KPI	Key Performance Indicators
KPI4DCE	Key Performance Indicators for Data Centre Efficiency
Logfile	Protokolldatei zur Aufzeichnung von Ereignissen des Computersystems
Mbps	Megabits per Second (Geschwindigkeit beim Datentransfer)
MJ	Megajoule (Energieeinheit)
MOSFET	Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor
MRAM	Magnetoresistive Random Access Memory
NAND	Logikgatter aus AND (und) und NOT (nicht)
NIC	Network Interface Card (Bandbreite der virtuellen Netzwerkkarte)
NIST	National Institute of Standards and Technology
NVMe	Non-Volatile Memory Express (Datenschnittstelle)
Öko	Ökologisch
OLT	Optical Line Terminal
OMUX	Optical Multiplexer
ONU	Optical Network Unit
ops	operations per second
PaaS	Platform as a Service
PC	Personal Computer
PCB	Printed Circuit Board (Leiterplatte)
PCIe	Peripheral Component Interconnect Express (Datenschnittstelle)
PCM	Phase-change memory
PEF	Product Environmental Footprint
PON	passive optische Netzwerke
ProBas	Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente
PSU	Power Supply Unit
PUE	Power Usage Effectiveness (Effizienzkennzahl für Gebäudetechnik)
RAM	Random-Access Memory (Arbeitsspeicher)

ReRAM	Resistive Random Access Memory
RZ	Rechenzentrum
SaaS	Software as a Service
SATA	Serial Advanced Technology Attachment (Datenschnittstelle)
SCM	Storage Class Memory
SDN	Software-Defined Networks
SERT	Server Efficiency Rating Tool
SiP	System-in-Package
SPEC	Standard Performance Evaluation Corporation
SSDs	Solid State Drives
STST-MRAM	Spin-transfer torque magnetic random-access memory
TB	Terabyte (Datenmenge, Einheit für Speicherplatz)
TDP	Thermal Design Power
UBA	Umweltbundesamt
UMTS	dritte Mobilfunkgeneration
USV	unterbrechungsfreie Stromversorgung
VDI	Virtuelle Desktop Infrastruktur
VDSL	Very High Speed Digital Subscriber Line
VK	Videokonferenz
VM	Virtuelle Maschine
VOC	Volatile Organic Compounds
WEEE	Waste of electrical and electronic equipment

Zusammenfassung

Green Cloud Computing Methodik

Im Rahmen des vorliegenden Projektes Green Cloud Computing wurde eine Methodik entwickelt, mit der Aufwandskennzahlen für Cloud-Dienstleistungen berechnet werden können.

Bei der Green Cloud Computing Methodik (GCC-Methodik) wird der Umweltaufwand zur Herstellung von Informationstechnik und zum Betrieb von Rechenzentren in den vier Wirkungskategorien Rohstoffaufwand (ADP), Treibhausgasemissionen (GWP), Kumulierter Energieaufwand (CED) und Wasserverbrauch erfasst.

Aufwand im Rechenzentrum

- ▶ **Abiotischer Rohstoffverbrauch:** ADP (*Abiotic Depletion Potential*)
bewertet die Inanspruchnahme von Mineralien und fossilen Rohstoffen
Einheit: kg Antimon Äquivalente pro Jahr [kg Sb.eq./a]
- ▶ **Treibhausgaspotenzial:** GWP (*Global Warming Potential*)
bewertet die Wirkung auf die Erderwärmung
Einheit: Kilogramm Kohlendioxid Äquivalente pro Jahr [kg CO₂.eq./a]
- ▶ **Kumulierter Energieaufwand:** CED (*Cumulative Energy Demand*)
Verbrauch an energetischen Ressourcen (erneuerbar + nicht-erneuerbar)
Einheit: Megajoule pro Jahr [MJ/a]
- ▶ **Wasserverbrauch:** Water (*Water Usage*)
Verbrauch an direkt genutztem Wasser
Einheit: Kubikmeter pro Jahr [m³/a]

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Der Aufwand im Rechenzentrum wird mit Hilfe von Allokationsregeln den einzelnen Cloud-Dienstleistungen zugeordnet. So werden pro Dienstleistung vier Aufwandskennzahlen berechnet, beispielsweise Treibhausgasemissionen pro Service-Einheit, die unmittelbar Auskunft über die Umweltwirkungen der jeweiligen Dienstleistung geben.

Allokationsregeln

Die Allokation erfolgt durch eine prozentuale Zuordnung der Umweltwirkungen der Teilbereiche des Rechenzentrums auf die jeweiligen Dienste. In Tabelle 1 wird diese Allokation schematisch für die Services 1 bis n am Beispiel des Treibhausgaspotenzials (GWP) dargestellt.

Tabelle 1: Allokation der Umweltwirkungen auf Cloud Services

Teilbereich im Rechenzentrum	Umweltwirkung (z.B. GWP)	Anteil Service 1 [%]	Anteil Service n [%]	Summe Anteil 1...n [%]	Umweltwirkung Service 1	Umweltwirkung Service n
Server	Server _{GWP}	A _{1sv}	An _{sv}	100%	An _{sv} * Server _{GWP}	An _{sv} * Server _{GWP}
Speicher	Storage _{GWP}	A _{1st}	An _{st}	100%	A _{1st} * Storage _{GWP}	An _{st} * Storage _{GWP}

Teilbereich im Rechenzentrum	Umweltwirkung (z.B. GWP)	Anteil Service 1 [%]	Anteil Service n [%]	Summe Anteil 1...n [%]	Umweltwirkung Service 1	Umweltwirkung Service n
Netzwerk	Network _{GWP}	A _{1nw}	A _{nnw}	100%	A _{1nw} * Network _{GWP}	A _{nnw} * Network _{GWP}
Infrastruktur	Infra _{GWP}	A _{1infr}	A _{ninfra}	100%	A _{1infr} * Infra _{GWP}	A _{ninfra} * Infra _{GWP}
Summe	Datacenter _{GWP}				Service 1 _{GWP}	Service n _{GWP}

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Jeder Service erhält einen prozentualen Anteil an den Umweltwirkungen des jeweiligen Teilbereiches. Zum Beispiel werden die Umweltwirkungen in der Wirkungskategorie Treibhausgaspotenzial der Server (Server_{GWP}) durch den Anteil des Services n an der Serverbeanspruchung (A_{nsv}) berechnet.

Die partielle Umweltwirkung des Services n berechnet sich dann für den Serveranteil zu:

$$\text{Service n Server}_{GWP} = A_{nsv} * \text{Server}_{GWP}$$

Die Herausforderung besteht darin, die jeweiligen Prozentwerte festzulegen bzw. zu ermitteln. Im einfachsten Fall bietet das Rechenzentrum nur einen einzelnen Service an. Dann kann der jeweilige Anteil zu 100 % gesetzt werden. Sobald jedoch mehr als ein einzelner Dienst angeboten wird, ist eine anteilige Allokation nötig. In dem Vorhaben werden weitere Möglichkeiten der Allokation über die Hardware-Ressourcen sowie über virtuelle Ressourcen vorgestellt.

Green Cloud Computing Kennzahlen

Durch die Anwendung der Allokationsregeln ist es möglich, Cloud-Dienstleistungen den jeweiligen Umweltaufwand des Rechenzentrums zuzuordnen. Daraus ergibt sich für jede Dienstleistung (n) ein spezifischer jährlicher Umweltaufwand in folgenden Wirkungskategorien und mit folgenden Bezeichnungen und Einheiten:

- ▶ Rohstoffverbrauch (ADP): Aufwand Service n_{ADP} [kg Sb eq./a]
- ▶ Treibhausgasemissionen (GWP): Aufwand Service n_{GWP} [kg CO₂ eq./a]
- ▶ Kumulierter Energieaufwand (CED): Aufwand Service n_{CED} [M]/a]
- ▶ Wasserverbrauch: Aufwand Service n_{Water} [m³/a]

Dem Umweltaufwand steht ein jeweiliger *Nutzen* des Cloud Services gegenüber, mit dem die Dienstleistung bezeichnet wird. Der Nutzen wird dabei in Serviceeinheiten quantifiziert und erhält eine physikalische Einheit, die vom jeweiligen Service abhängt und für die Ergebnisdarstellung geeignet ausgewählt werden muss. Als Bilanzierungszeitraum wird ebenfalls die Bereitstellung der Dienstleistung über den Zeitraum *eines* Jahres [a] gewählt.

Beispiel für diese physikalischen Einheiten des Nutzens sind: [Arbeitsplätze/a], [Kunden/a], [Stunden/a], [TB/a] usw.

Bei den Green Cloud Computing (GCC) Kennzahlen handelt es sich um *Aufwandskennzahlen*. Je geringer der Aufwand zur Erbringung einer Dienstleistung, desto effizienter und damit

umweltschonender wird diese bereitgestellt. Die Berechnung der GCC-Kennzahlen erfolgt durch die Bildung eines Quotienten aus Aufwand und Nutzen:

$$GCC = \frac{\text{Aufwand}}{\text{Nutzen}}$$

Für jede Cloud Dienstleistung (n) ergeben sich insgesamt 4 mögliche GCC-Kennzahlen für unterschiedliche Umweltwirkungen, die in nachfolgender Tabelle 2 zusammengestellt sind:

Tabelle 2: Green Cloud Computing Kennzahlen für unterschiedliche Umweltwirkungen

GCC-Bezeichnung	Einheit	Beispielhafte Benennung zur Kommunikation der Kennzahl
GCC Service n_{ADP}	kg Sb eq./su	Rohstoffverbrauch pro Serviceeinheit
GCC Service n_{GWP}	kg CO ₂ eq./su	CO ₂ -Fußabdruck pro Serviceeinheit
GCC Service n_{CED}	MJ/su	Energieverbrauch pro Serviceeinheit
GCC Service n_{Water}	m ³ /su	Wasserverbrauch pro Serviceeinheit

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Die Bezeichnung der Serviceeinheit und deren Einheit [su] können entsprechend dem Cloud Service angepasst werden

Anwendungsbeispiele für GCC-Methodik

Die GCC-Methodik wurde exemplarisch für die vier Cloud-Dienstleistungen *Online-Storage*, *Virтуelle Desktop-Infrastruktur*, *Videostreaming* und *Videokonferenzen* angewendet und dabei die verschiedenen Möglichkeiten zur Allokation der Hardwareressourcen auf die Cloud-Dienstleistungen aufgezeigt. Die Anwendungsbeispiele zeigen, dass die GCC-Methodik gut dazu geeignet ist, Umweltwirkungen für einzelne Cloud-Services zu benennen. Durch die Vereinheitlichung der Allokationsregeln kann die GCC-Methodik für eine umweltbezogene Produktdeklaration, beispielsweise für einen CO₂-Fußabdruck oder eine Energieverbrauchskennzeichnung für Cloud-Services genutzt werden.

Die Untersuchungen stellen vor allem eine Überprüfung dar, ob diese Methodik in der Praxis funktioniert und plausible Ergebnisse liefert („proof of concept“). Die hier berechneten Zahlen für die Umwelteffekte von Cloud-Dienstleistungen gelten nur für die jeweiligen Fallbeispiele und sind nicht grundsätzlich auf alle gleichartigen Cloud-Dienstleistungen übertragbar. Damit die Ergebnisse verallgemeinert und für Hochrechnungen verwendet werden können, wäre es erforderlich, die Methodik bei einer Vielzahl von Rechenzentren bzw. Cloud-Dienstleistungen anzuwenden.

GCC-Kennzahlen für Online-Storage

Zur Berechnung von GCC-Kennzahlen für die Treibhausgasemissionen von Online-Storage (GCC Online-Storage_{GWP}) wird der Umweltaufwand für die Dienstleistung auf den Nutzen der Dienstleistung bezogen.

Als Nutzen, wird der vom Cloud-Dienst Online-Storage belegte Speicherplatz definiert, von dem angenommen wird, dass er 90 % des gesamten belegten Speicherplatzes der Speicher-Systeme im Rechenzentrum beträgt. Es wird angenommen, dass die restlichen 10 % für andere Service-Aufgaben im Rechenzentrum gebraucht werden. Als Serviceeinheit wird die Belegung von 1 Terabyte Online-Speicherplatz über den Zeitraum eines Jahres festgelegt.

In Tabelle 3 werden die Ergebnisse der Berechnung der GCC-Kennzahlen für die 4 untersuchten Rechenzentren (RZ01 – RZ04) dargestellt. Zunächst werden die Treibhausgasemissionen für Server, Speichersystem, Netzwerk und Infrastruktur über Allokationsfaktoren der Dienstleistung Online-Storage zugeordnet. Die Summe der Treibhausgasemissionen (Aufwand: Summe_{GWP}) wird über alle Teilbereiche des jeweiligen Rechenzentrums gebildet, die zur Dienstleistung Online-Storage für ein Jahr beitragen (Aufwand). Um den CO₂-Fußabdruck für die Bereitstellung von 1 Terabyte Online-Speicherplatz (Nutzen) für ein Jahr zu ermitteln, wird im nächsten Schritt der Aufwand auf die Gesamtmenge der erbrachten Dienstleistung (Nutzen: Summe Online-Storage) des jeweiligen Rechenzentrums bezogen.

Tabelle 3: Berechnung des CO₂-Fußabdrucks für Online-Storage bei 4 Rechenzentren

Bezeichnung	Einheit	RZ01	RZ02	RZ03	RZ04
Server _{GWP}	kg CO ₂ eq./a	48.996	4.011	10.003	9.092
Storage _{GWP}	kg CO ₂ eq./a	156.524	33.822	444.161	67.403
Network _{GWP}	kg CO ₂ eq./a	4.327	5.274	28.268	1.121
Infra _{GWP}	kg CO ₂ eq./a	75.756	23.753	198.089	29.996
Aufwand: Summe_{GWP}	kg CO ₂ eq./a	285.603	66.861	680.521	107.611
Nutzen: Summe Online-Storage	TB/a	1.020	403	3.759	509
GCC Online-Storage_{GWP} (Aufwand / Nutzen)	kg CO₂ eq./TB	280	166	181	211

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Die Bandbreite der GCC-Kennzahlen zum CO₂-Fußabdruck von Online-Storage reicht für die vier Rechenzentren von 166 Kilogramm CO₂-Äquivalente pro Terabyte (RZ02) über 181 kg CO₂ eq./TB (RZ03), 211 kg CO₂ eq./TB (RZ04) bis zu 280 Kilogramm CO₂-Äquivalente pro Terabyte (RZ01). Das bedeutet, pro Terabyte belegtem Online-Speicher werden jährlich CO₂-Emissionen in der entsprechenden Größenordnung freigesetzt.

GCC-Kennzahlen für Virtuelle Desktop Infrastruktur

Eine „Virtuelle Desktop Infrastruktur“ (VDI) stellt eine Desktop-Umgebung durch ein Betriebssystem bereit, das nicht auf dem lokalen Computer installiert ist, sondern über eine Netzwerkverbindung auf einem externen Server ausgeführt wird. Das Endgerät dient nur noch zur Dateneingabe über Tastatur und Maus sowie zur Datenausgabe über einen Monitor und ggf. weiterer Schnittstellen (z.B. Audio, Videokamera). Die Datenverarbeitung, Speicherung und Ausführung von Anwendungssoftware finden dagegen auf dem Server statt. Zur Ausführung eines Virtuellen Desktops ist auf den Servern im Rechenzentrum eine Virtualisierungs-Software erforderlich und auf den lokalen Endgeräten ist lediglich ein Basis-Betriebssystem notwendig.

Die Green-Cloud-Computing-Methode wird dazu angewendet, den Energieverbrauch und die CO₂-Emissionen, die durch eine Virtuelle Desktop Infrastruktur entstehen, zu bilanzieren. Hierzu werden zwei Rechenzentren untersucht, die für eine Bundesbehörde mit rund 1.000 Beschäftigten an zwei unterschiedlichen Standorten (Berlin und Bonn) betrieben werden.

Etwas mehr als ein Zehntel der vorhandenen Rechenzentrums-Kapazitäten wird für die Virtuelle Desktop Infrastruktur für 890 Arbeitsplätze genutzt. Im Rahmen dieses Anwendungsbeispiels

wird untersucht, welche Ressourcen im Rechenzentrum zur Bereitstellung eines einzelnen VDI-Arbeitsplatzes über den Zeitraum eines Jahres aufgewendet werden müssen.

Von den beiden Rechenzentren ist nur ein Teil der IT-Infrastruktur für den Cloud-Dienst Desktop-Virtualisierung reserviert. Der überwiegende Teil wird für andere Dienste bereitgehalten. Daher ist eine Allokation der Hardware-Ressourcen auf den untersuchten Dienst nötig. Hierzu werden zusätzlich zur physischen Hardware-Ausstattung auch alle virtuellen Ressourcen der Rechenzentren erfasst, d.h. die den virtuellen Servern zugeordneten CPU-Kerne, RAM, Festplatten-Speicherplatz und Netzwerk-Bandbreite. Die Anteile an den virtuellen Ressourcen können ihrerseits wieder der physischen Hardware-Ausstattung Server, Speichersystem und Netzwerk zugeordnet werden, sowie über deren Energieverbrauch dem Anteil an der Gebäude-Infrastruktur.

Durch die Allokation über die virtuellen Ressourcen ist es möglich, den jährlichen Aufwand der Rechenzentren dem jeweiligen Cloud-Service zuzuordnen und im zweiten Schritt auf die einzelne Service-Einheit (hier: VDI-Arbeitsplatz) zu beziehen. Dadurch können GCC-Kennzahlen gebildet werden, die den jeweiligen Aufwand der Dienstleistung im Rechenzentrum pro Jahr beschreiben. In Tabelle 4 wird die Zuordnung dargestellt und der jährliche Ressourcenaufwand für jeden einzelnen der insgesamt 890 Arbeitsplätze berechnet.

Tabelle 4: GCC-Kennzahlen für Virtuelle Desktop Infrastruktur (VDI)

Hardware	GCC VDI _{ADP} [kg Sb eq./a/user]	GCC VDI _{GWP} [kg CO ₂ eq./a/user]	GCC VDI _{CED} [MJ/a/user]
Server	1,8E-04	44	732
Speichersysteme	4,0E-05	4	72
Netzwerk	2,1E-06	2	39
Infrastruktur	4,8E-06	9	152
Summe	2,2E-04	59	995

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Pro Arbeitsplatz Virtuelle Desktop Infrastruktur werden im Rechenzentrum jährlich Rohstoffe in Höhe von 0,22 Gramm Antimon-Äquivalente (GCC VDI_{ADP}), Treibhausgasemissionen von 59 Kilogramm Kohlendioxid-Äquivalente (GCC VDI_{GWP}) und Primärenergie in Höhe von 995 Megajoule (GCC VDI_{CED}) aufgewendet. Von den Hardware-Komponenten ist es jeweils der Server-Anteil, der den größten Beitrag zu diesen drei Kennwerten leistet. Beim Rohstoffbedarf (ADP) macht der Server 79 % aus, beim Treibhausgaspotenzial (GWP) und beim Kumulierten Energieaufwand (CED) sind es jeweils 74 %. Der Ressourcenaufwand für die Bereitstellung des VDI-Arbeitsplatzes wird maßgeblich durch den Umfang der beanspruchten Hardware-Ressourcen für die VDI und die Effizienz der Infrastrukturleistungen beeinflusst.

GCC-Kennzahlen für Videostreaming

Zur Ermittlung der *GCC-Kennzahlen für Videostreaming* wird als Nutzen des Rechenzentrums die Auslieferung von Videostreaming-Stunden definiert. Der komplette Aufwand im Rechenzentrum wird dieser Dienstleistung zugeordnet. Die Allokation erfolgt auf der Ebene Hardware-Ressourcen mit Allokationsfaktoren für alle Teilbereiche von 100 %. Die Serviceeinheit ist die Bereitstellung eines Videostreams über einen Zeitraum von 1 Stunde.

Nach Auswertung des Netzwerkverkehrs des Videostreaming-Anbieters liefert dieser eine Datenmenge von 2 Gigabyte pro Stunde Videomaterial aus bzw. streamt in einer Bandbreite von 4,44 Mbit/s. Diese Datenmenge korreliert gut mit der typischen Datenmenge auf der Kunden-seite zum Empfang eines Full-HD-Videostreams (Bildschirmauflösung 1920 x 1080 Pixel) anderer Streaming-Anbieter. Die von den Rechenzentren ausgelieferte Stundenzahl an Videostreaming (Nutzen) beträgt 619 Millionen Stunden über den Zeitraum eines Jahres. Diese Zahl entspricht der durchschnittlichen Bereitstellung von 158 Streams pro Server zu jedem Zeitpunkt. In der Praxis ist davon auszugehen, dass diese Auslastung abhängig von der Tageszeit stark schwankt und die Server zu Stoßzeiten deutlich mehr Streams ausliefern als zu Schwachlastzeiten.

In Tabelle 5 ist die Berechnung der GCC-Kennzahlen für Videostreaming dargestellt. Die Umweltwirkungen setzen sich jeweils zusammen aus den IT-Teilbereichen Server, Speichersystem und Netzwerk sowie den Umweltwirkungen der Gebäude-Infrastruktur. Durch die Quotientenbildung (Aufwand durch Nutzen) ergeben sich die jeweiligen GCC-Aufwandskennzahlen.

Tabelle 5: Berechnung der GCC-Kennzahlen für 1 h Videostreaming für die Umweltwirkungen Rohstoffverbrauch, Treibhausgaspotenzial und Primärenergiebedarf

Bezeichnung	Rohstoffverbrauch (ADP)	Treibhausgaspotenzial (GWP)	Primärenergiebedarf (CED)
Server	5,39 kg Sb eq./a	559 t CO ₂ eq./a	9.295 GJ/a
Storage	2,90 kg Sb eq./a	110 t CO ₂ eq./a	1.777 GJ/a
Network	0,24 kg Sb eq./a	43 t CO ₂ eq./a	727 GJ/a
Infrastruktur	0,10 kg Sb eq./a	189 t CO ₂ eq./a	3.172 GJ/a
Aufwand: Summe	8,63 kg Sb eq./a	901 t CO₂ eq./a	14.972 GJ/a
Nutzen: Summe Videostreaming	619 Mio. h/a	619 Mio. h/a	619 Mio. h/a
GCC Videostreaming	1,39E-08 kg Sb eq./h	0,00146 kg CO₂ eq./h	0,0242 MJ/h

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Der Ressourcenbedarf für die Bereitstellung einer Stunde Videostreaming beträgt in besser lesbaren Einheiten:

- ▶ GCC Videostreaming_{ADP}: 0,014 µg Sb eq./h
- ▶ GCC Videostreaming_{GWP}: 1,46 g CO₂ eq./h
- ▶ GCC Videostreaming_{CED}: 24,2 kJ/h

Zur Einordnung der Größenordnung der Treibhausgasemissionen im Rechenzentrum wird der Wert des CO₂-Fußabdruck von 1,46 Gramm Kohlendioxid-Äquivalenten pro Stunde Videostream, noch in anderen Bezugsgrößen ausgedrückt. Auf eine elektrische Leistungsaufnahme mit dem verwendeten Emissionsfaktor des deutschen Strommixes bezogen, entspricht dieser Wert rund 2,3 Watt pro Videostream. Umgerechnet auf die Personenkilometer mit einem PKW (143 g CO₂ eq./km) entspricht dies einer Autofahrt von 10 Metern. Der CO₂-Fußabdruck der Streaming-Dienstleistung erscheint vor diesem Hintergrund sehr gering. Allerdings ist in dieser Umweltwirkung nicht die Übertragung über das Telekommunikationsnetzwerk vom Rechen-

zentrum zum Zuschauer enthalten und ebenfalls nicht der Energieverbrauch der Heimvernetzung (Router, WLAN) sowie der Endgeräte (Fernsehgeräte, Computer) der Nutzenden. Um eine vollständige CO₂-Bilanz für Videostreaming zu erhalten, müssen daher auch CO₂-Emissionen in Netzwerken und in Haushalten einbezogen werden.

GCC-Kennzahlen für Videokonferenzen

Ein weiteres Fallbeispiel ist der Cloud-Dienst Videokonferenz. Ein konkreter Videokonferenz-Anbieter wird untersucht und mithilfe der GCC-Methodik der Umweltaufwand bezogen auf die Treibhausgasemissionen zur Bereitstellung einer Stunde Videokonferenz für einen einzelnen Teilnehmenden ermittelt. Diese Kennzahl lässt sich dazu verwenden, den CO₂-Fußabdruck von Videokonferenzen anhand deren Teilnehmerzahl und deren Dauer für das Rechenzentrum zu berechnen.

Tabelle 6: GCC-Kennzahl „CO₂-Fußabdruck“ für Videokonferenzen

Bezeichnung	Wert	Einheit
Herstellungsaufwand Server _{GWP}	1.945	[kg CO ₂ eq.]
Nutzungsjahre pro Server	4	[a]
Aufwand: Herstellung pro Woche	9,35	[kg CO ₂ eq./wo]
Energiebedarf Rechenzentrum	112	kWh _{el} /wo
Aufwand: Nutzungsphase pro Woche (Energiebedarf)	52	kg CO ₂ eq./wo
Nutzen: Teilnehmerstunden pro Woche	27.133	[TIn*h/wo]
Berechnung der GCC-Kennzahl (= Aufwand / Nutzen)		
GCC Videokonferenz _{GWP} Herstellung	0,34	[g CO ₂ eq./TIn/h]
GCC Videokonferenz _{GWP} Nutzung	1,93	[g CO ₂ eq./TIn/h]
GCC Videokonferenz_{GWP}	2,27	[g CO₂ eq./TIn/h]

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

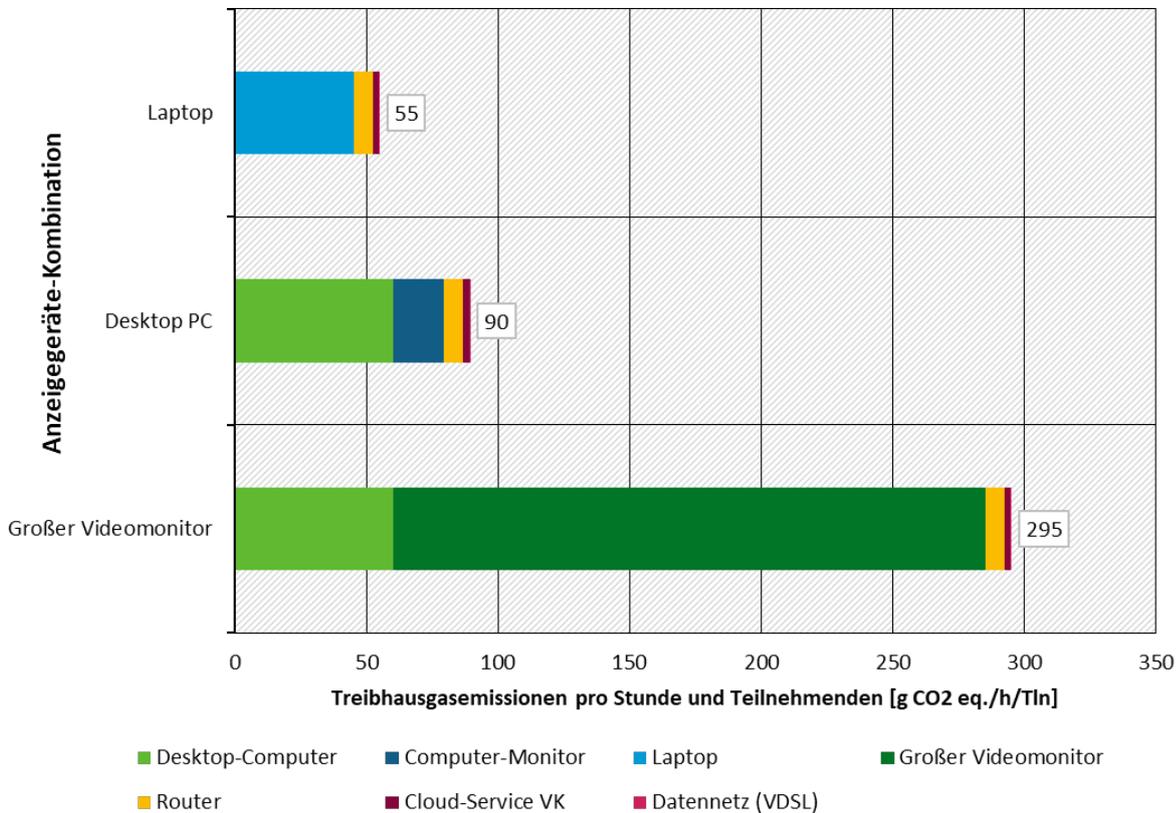
Die Treibhausgasemissionen (GWP) zur Teilnahme an einer Stunde Videokonferenz betragen 2,27 Gramm CO₂-Äquivalente. Diese Zahl setzt sich zusammen aus 0,34 Gramm CO₂-Äquivalente für die Herstellung der Server (15%) und 1,93 Gramm CO₂-Äquivalente für den Energieverbrauch im Rechenzentrum in der Nutzungsphase (85%).

Zur Einordnung der Größenordnung der Treibhausgasemissionen im Rechenzentrum wird der Wert des CO₂-Fußabdruck von 2,27 Gramm Kohlendioxid-Äquivalenten pro Stunde und Teilnehmenden, noch in anderen Bezugsgrößen ausgedrückt. Auf eine elektrische Leistungsaufnahme im Rechenzentrum mit dem verwendeten Emissionsfaktor des deutschen Strommixes bezogen, entspricht dieser Wert rund 5 Watt pro Teilnehmenden. Umgerechnet auf die Personenkilometer mit einem PKW (143 g CO₂ eq./km) entspricht dies einer Autofahrt von 15 Metern.

Die GCC-Kennzahl stellt nur den Anteil des Umweltaufwands im Rechenzentrum dar. Tatsächlich gehört zu einer Videokonferenz auch die Übertragung der Daten in Telekommunikationsnetzwerken und die Nutzung von Endgeräten beim jeweiligen Teilnehmenden.

Die Berechnung der GCC-Kennzahl wird daher erweitert um den CO₂-Fußabdruck des Daten-Netzwerks (VDSL) und verschiedenen Kombinationen von Anzeigegeräten. Dadurch ergeben sich die in Abbildung 1 dokumentierten Treibhausgasemissionen für die Teilnahme einer Person an einer Videokonferenz über den Zeitraum einer Stunde.

Abbildung 1: Treibhausgasemissionen Videokonferenz-Teilnahme bei verschiedenen Anzeigegeräte-Kombinationen (Herstellungs- und Nutzungsphase)



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Die Teilnahme an einer Videokonferenz mit einem Laptop ist mit Treibhausgasemissionen von 55 Gramm CO₂-Äquivalenten pro Stunde verbunden. Mit einem Desktop-PC mit Monitor sind es 90 Gramm. Findet die Teilnahme vor einem großen Videomonitor statt, ist dies mit Treibhausgasemissionen von 295 Gramm CO₂-Äquivalenten pro Stunde verbunden.

Die Ausweitung des Bilanzraums um die Datennetzwerke und die Endgeräte zeigt am Beispiel Videokonferenzen die hohe Bedeutung der IT, die beim Nutzer installiert ist (Router, Computer und Anzeigegeräte). Während die GCC-Kennzahl *GCC Videokonferenz_{GWP}* nur 2,27 Gramm CO₂-Äquivalenten pro Stunde und Teilnehmenden beträgt, liegen die Treibhausgasemissionen bei der schlankeste Gerätekombination Laptop und Router mit 52,5 Gramm bereits um einen Faktor von 23 höher als die Emissionen im Rechenzentrum. Der Anbieter der Cloud-Dienstleistung Videokonferenz hat bei diesen Nutzungsszenarien nur einen sehr geringen Anteil an den Gesamtemissionen.

Schlussfolgerungen

Folgende Schlussfolgerungen zur GCC-Methodik werden aus den Projektergebnissen gezogen:

- ▶ GCC-Kennzahlen eignen sich gut zur Kommunikation der Umweltperformance einzelner Cloud-Dienste an Kunden und Auftraggeber und zu deren Vergleich (Außensicht). Sie eignen sich auch gut für den Anbieter der jeweiligen Dienste für das Erkennen von Verbesserungspotenzial der Clouddienstleistung (Innensicht). Es besteht die Möglichkeit zur Weiterentwicklung der GCC-Methodik zur produktbezogenen Kennzeichnung (z.B. Energieeffizienzkennzeichnung), zur umweltverträglichen Beschaffung von Cloud-Dienstleistungen und zur Auszeichnung besonders effizienter Dienste mit einem Umweltzeichen (z.B. Blauer Engel).
- ▶ Zur Vergleichbarkeit von GCC-Kennzahlen sind die Allokationsregeln entscheidend. Es sollten mit den Anbietern gemeinsame Zuordnungsregeln entwickelt und die Methodik breiter angewendet werden. Beispielgebend für das Vereinbaren einheitlicher Berechnungsstandards könnten hier die Methoden zur Entwicklung von Produktkategorieregeln bei Umweltproduktdeklarationen gemäß nach der Norm ISO 14025 (Umweltkennzeichnungen und -deklarationen – Typ III Umweltdeklarationen) darstellen. Ziel eines solchen Prozesses könnte die Einführung eines CO₂-Fußabdrucks für spezielle Cloud-Dienstleistungen sein.
- ▶ Die Datenerfassung für Cloud-Services war dadurch erschwert, dass viele Dienste in Colocation-Rechenzentren ausgeführt werden und Dienste-Anbieter keinen Einblick in den Energieverbrauch der von ihnen genutzten Server haben. Hier besteht ein dringender Handlungsbedarf. Verträge mit Host- und Colocation-Anbietern sollten (allein schon aus Gründen des Verbraucherschutzes und der Nachprüfbarkeit von Abrechnungen) grundsätzlich beinhalten, dass energie- und umweltbezogene Informationen vom Betreiber an die Kunden weitergegeben werden.

Summary

Green Cloud Computing Methodology

The Green Cloud Computing project has developed a methodology to calculate effort indicators for cloud services.

In the so-called "GCC methodology", the environmental expenditure for the production of IT technology and the operation of data centres is recorded in the four impact categories of abiotic depletion potential (ADP), global warming potential (GWP), cumulative energy demand (CED) and water consumption.

Effort in the data centre

- ▶ **Raw material consumption:** ADP (*Abiotic Depletion Potential*)
assesses the use of minerals and fossil raw materials
Unit: kg antimony equivalents per year [kg Sb. eq./a].
- ▶ **Greenhouse gas emissions:** GWP (*Global Warming Potential*)
Assesses the effect on global warming
Unit: Kilogram carbon dioxide equivalents per year [kg CO₂-eq./a].
- ▶ **Cumulative energy demand:** CED (*Cumulative Energy Demand*)
Consumption of energy resources (renewable + non-renewable)
Unit: megajoules per year [MJ/a]
- ▶ **Water consumption:** Water (*Water Usage*)
Unit: Cubic metres per year [m³/a]

Source: Own representation, Öko-Institut

The effort in the data centre is allocated to the individual cloud services with the help of allocation rules. Four effort indicators are calculated for each service, for example greenhouse gas emissions per service unit, which provide direct information about the environmental impact of the respective service.

Allocation rules

The allocation is carried out by assigning the environmental impacts of the subareas of the data centre to the respective services as a percentage. Table 6 shows this allocation schematically for services 1 to n using the example of the global warming potential (GWP).

Table 7: Allocation of environmental impacts to cloud services

Subarea in the data centre	Environmental impact (e.g. GWP)	Share of service 1 [%]	Share of service n [%]	Total share 1...n [%]	Environmental impact Service 1	Environmental impact Service n
Server	Server _{GWP}	A _{1sv}	An _{sv}	100%	An _{sv} * Server _{GWP}	An _{sv} * Server _{GWP}
Memory	Storage _{GWP}	A _{1st}	An _{st}	100%	A _{1st} * Storage _{GWP}	An _{st} * Storage _{GWP}

Subarea in the data centre	Environmental impact (e.g. GWP)	Share of service 1 [%]	Share of service n [%]	Total share 1...n [%]	Environmental impact Service 1	Environmental impact Service n
Network	Network _{GWP}	A _{1nw}	A _{nnw}	100%	A _{1nw} * Network _{GWP}	A _{nnw} * Network _{GWP}
Infrastructure	Infra _{GWP}	A _{1infr}	A _{nnfra}	100%	A _{1infr} * Infra _{GWP}	A _{nnfra} * Infra _{GWP}
Total	Datacenter_{GWP}				Service 1_{GWP}	Service n_{GWP}

Source: Own representation, Öko-Institut

Each service receives a percentage share of the environmental impacts of the respective sub-area. For example, the environmental impacts in the impact category global warming potential of servers (Server_{GWP}) are calculated by the share of the service n in the total server supply (A_{nsv}).

The partial environmental impact of the service n is then calculated for the server share:

$$\text{Service n Server}_{GWP} = A_{nsv} * \text{Server}_{GWP}$$

The challenge is to define or determine the respective percentages. In the simplest case, the data centre only offers a single service. Then the respective share can be set at 100 %. However, as soon as more than one service is offered, a proportional allocation is necessary. In the project, further possibilities of allocation via hardware resources as well as via virtual resources are presented.

Green Cloud Computing Key Figures

By applying the allocation rules, it is possible to assign cloud services to the respective environmental expenditure of the data centre. This results in a specific annual environmental expenditure for each service (n) in the following impact categories and with the following designations and units:

- ▶ Raw material consumption (ADP): Effort Service n_{ADP} [kg Sb eq./a].
- ▶ Greenhouse gas emissions (GWP): Effort Service n_{GWP} [kg CO₂ eq./a]
- ▶ Cumulative energy demand (CED): Expenditure Service n_{CED} [MJ/a]
- ▶ Water consumption: Expenditure Service n_{Water} [m³/a]

The environmental effort is compared to the respective *benefit of* the cloud service, which is used to describe the service. The benefit is quantified in service units and receives a physical unit that depends on the respective service and must be selected appropriately for the presentation of results. The provision of the service over the period of *one* year [a] is also selected as the accounting period.

Example of these physical units of benefit are: [workplaces/a], [customers/a], [hours/a], [TB/a], etc.

The Green Cloud Computing (GCC) indicators are *effort indicators*.

The lower the effort required to provide a service, the more efficient and thus environmentally

friendly it is provided. The GCC indicators are calculated by forming a quotient of effort and benefit:

$$GCC = \frac{Effort}{Benefit}$$

For each cloud service (n), there are a total of 4 possible GCC indicators for different environmental impacts, which are compiled in the following table 7:

Table 8: Green Cloud Computing metrics for different environmental impacts

GCC designation	Unit	Exemplary naming for the communication of the key figure
GCC Service n_{ADP}	kg Sb eq./su	Raw material consumption per service unit
GCC Service n_{GWP}	kg CO ₂ eq./su	Carbon footprint per service unit
GCC Service n_{CED}	MJ/su	Energy consumption per service unit
GCC Service n_{Water}	m ³ /su	Water consumption per service unit

Source: Own representation, Öko-Institut

The designation of the service unit and its unit [su] can be adapted according to the cloud service

Application examples for GCC methodology

The GCC methodology was applied as an example for the four cloud services *online storage*, *virtual desktop infrastructure*, *video streaming* and *video conferences*, showing the different possibilities for allocating hardware resources to the cloud services. The application examples show that the GCC methodology is well suited for naming environmental impacts for individual cloud services. By standardising the allocation rules, the GCC methodology can be used for an environmental product declaration, for example for a carbon footprint or an energy consumption label for cloud services.

The studies are primarily a *proof of concept* of whether this methodology works in practice and delivers plausible results. The figures calculated here for the environmental effects of cloud services only apply to the respective case studies and are not fundamentally transferable to all similar cloud services. In order to generalise the results and use them for extrapolations, it would be necessary to apply the methodology to a large number of data centres or cloud services.

GCC key figures for online storage

For the calculation of GCC indicators for the greenhouse gas emissions of online storage (GCC Online-Storage_{GWP}), the environmental effort for the service is related to the benefit of the service.

The benefit is defined as the storage space used by the cloud service online storage, which is assumed to be 90 percent of the total used storage space of the storage systems in the data centre. It is assumed that the remaining 10 per cent is needed for other service tasks in the data centre. The service unit is defined as the usage of 1 terabyte of online storage space over the period of one year.

Table 8 shows the results of the calculation of the GCC key figures for 4 assessed data centres (DC01 - DC04). First, the GHG emissions for server, storage system, network and infrastructure are allocated to the online storage service via allocation factors. The sum of the greenhouse gas

emissions (Effort: Total_{GWP}) is formed over all subareas of the respective data centre that contribute to the online storage service for one year (effort). In order to determine the carbon footprint for the provision of 1 terabyte of online storage space (benefit) for one year, the next step is to relate the effort to the total amount of the service provided (Benefit: Total online storage) of the respective data centre.

Table 9: Calculation of the carbon footprint for online storage at 4 data centres

Designation	Unit	DC01	DC02	DC03	DC04
Server _{GWP}	kg CO ₂ eq./a	48,996	4,011	10,003	9,092
Storage _{GWP}	kg CO ₂ eq./a	156,524	33,822	444,161	67,403
Network _{GWP}	kg CO ₂ eq./a	4,327	5,274	28,268	1,121
Infra _{GWP}	kg CO ₂ eq./a	75,756	23,753	198,089	29,996
Effort: Total_{GWP}	kg CO ₂ eq./a	285,603	66,861	680,521	107,611
Benefit: Total online storage	TB/a	1,020	403	3,759	509
GCC Online Storage_{GWP} (Effort / Benefit)	kg CO₂ eq. /TB	280	166	181	211

Source: Own representation, Öko-Institut

The range of GCC key figures on the CO₂ footprint of online storage for the four data centres extends from 166 kilogrammes of CO₂ equivalents per terabyte (DC02) to 181 kg CO₂ eq./TB (DC03), 211 kg CO₂ eq./TB (DC04) and 280 kilogrammes CO₂ equivalents per terabyte (DC01). This means that CO₂ emissions of the corresponding magnitude are released annually per terabyte of used online storage.

GCC key figures for Virtual Desktop Infrastructure

A "virtual desktop infrastructure" (VDI) provides a desktop environment through an operating system that is not installed on the local computer but is run on an external server and connected via a network. The end user device is only used for data input via keyboard and mouse and for data output via a monitor and possibly other interfaces (e.g. audio, video camera). Data processing, storage and execution of application software, on the other hand, take place on the server. To run a virtual desktop, virtualisation software is required on the servers in the data centre and only a basic operating system is required on the local end devices.

The green cloud computing methodology is used to calculate the energy consumption and CO₂ emissions generated by a virtual desktop infrastructure. For this purpose, two data centres are examined that are operated for a federal authority with around 1,000 employees at two different locations (Berlin and Bonn).

Slightly more than one tenth of the existing data centre capacity is used for the virtual desktop infrastructure for 890 workstations. In the context of this example, it is examined which resources in the data centre have to be expended to provide a single VDI workstation over the period of one year.

Of the two data centres, only part of the IT infrastructure is reserved for the cloud service desktop virtualisation. The majority is kept available for other services. Therefore, it is necessary to

allocate the hardware resources to the service under investigation. For this purpose, in addition to the physical hardware equipment, all virtual resources of the data centres are also recorded, i.e. the virtual CPU cores, virtual RAM, virtual hard disk space and network bandwidth allocated to the virtual servers. The shares of the virtual resources can in turn be assigned to the physical hardware equipment server, storage system and network, as well as to the share of the building infrastructure via their energy consumption.

Through the allocation via the virtual resources, it is possible to assign the annual expenditure of the data centres to the respective cloud service and, in the second step, to refer to the individual service unit (here: VDI workstation). In this way, Green Cloud Computing (GCC) ratios can be formed, which describe the respective effort of the service in the data centre per year.

Table 9 shows the allocation and calculates the annual resource expenditure for each of the 890 VDI-workstations.

Table 10: GCC Key Figures for Virtual Desktop Infrastructure (VDI)

Hardware	GCC VDI _{ADP} [kg Sb eq./a/user]	GCC VDI _{GWP} [kg CO ₂ eq./a/user]	GCC VDI _{CED} [MJ/a/user]
Server	1.8E-04	44	732
Storage systems	4.0E-05	4	72
Network	2.1E-06	2	39
Infrastructure	4.8E-06	9	152
Total	2.2E-04	59	995

Source: Own representation, Öko-Institut

For each workstation of virtual desktop infrastructure, raw materials amounting to 0.22 grams of antimony equivalents (GCC VDI_{ADP}), greenhouse gas emissions of 59 kilograms of carbon dioxide equivalents (GCC VDI_{GWP}) and primary energy amounting to 995 megajoules (GCC VDI_{CED}) are used annually in the data centre. On the side of hardware components, it is the servers that make the largest contribution to these three parameters. In terms of raw material requirements (ADP), the server accounts for 79 percent, while in terms of global warming potential (GWP) and cumulative energy expenditure (CED) it is 74 percent in each case. The resource requirements for the provision of the VDI workstation are significantly influenced by the amount of hardware resources used for the VDI and the efficiency of the infrastructure services.

GCC key figures for video streaming

To determine the *GCC key figures for video streaming*, the delivery of hours of video streaming is defined as the benefit of the data centre. The complete effort in the data centre is allocated to this service. The allocation is done at the hardware resource level with allocation factors for all sub-areas of 100 percent. The service unit is the delivery of a video stream over a period of 1 hour.

According to an evaluation of the network traffic of the video streaming provider, the provider delivers a data volume of 2 gigabytes per hour of video material or streams in a bandwidth of 4.44 Mbps. This amount of data correlates well with the typical amount of data on the customer side for receiving a full HD video stream (screen resolution 1920 x 1080 pixels) from other streaming providers. The number of hours of video streaming (benefit) delivered by the data

centres is 619 million hours over the period of one year. This figure corresponds to the average delivery of 158 streams per server at any point in time. In practice, it can be assumed that this utilisation fluctuates greatly depending on the time of day and that the servers deliver significantly more streams at peak times than at off-peak times.

Table 10 shows the calculation of the GCC indicators for video streaming. The environmental impacts are composed of the IT sub-areas server, storage system and network as well as the environmental impacts of the building infrastructure. The respective GCC indicators result from the quotient formation (effort by benefit).

Table 11: Calculation of the GCC key figures for 1 h video streaming for the environmental impacts raw material consumption, greenhouse gas potential and primary energy demand

Designation	Raw material consumption (ADP)	Global Warming Potential (GWP)	Primary energy demand (CED)
Server	5.39 kg Sb eq./a	559 t CO ₂ eq./a	9,295 GJ/a
Storage	2.90 kg Sb eq./a	110 t CO ₂ eq./a	1,777 GJ/a
Network	0.24 kg Sb eq./a	43 t CO ₂ eq./a	727 GJ/a
Infrastructure	0.10 kg Sb eq./a	189 t CO ₂ eq./a	3,172 GJ/a
Effort: Total	8.63 kg Sb eq./a	901 t CO₂ eq./a	14,972 GJ/a
Benefit: Total video streaming	619 million h/a	619 million h/a	619 million h/a
GCC video streaming	1.39E-08 kg Sb eq./h	0.00146 kg CO₂ eq./h	0.0242 MJ/h

Source: Own representation, Öko-Institut

The resource requirement for providing one hour of video streaming is in more readable units:

- ▶ GCC video streaming_{ADP}: 0.014 µg Sb eq./h
- ▶ GCC video streaming_{GWP}: 1.46 g CO₂ eq./h
- ▶ GCC video streaming_{CED}: 24.2 kJ/h

To classify the order of magnitude of greenhouse gas emissions in the data centre, the value of the CO₂ footprint of 1.46 grams of carbon dioxide equivalents per hour of video stream, is still expressed in other reference values. Based on an electrical power consumption with the emission factor of the German electricity mix used, this value corresponds to around 2.3 watts per video stream. Converted to passenger kilometres with a car (143 g CO₂ eq. /km), this corresponds to a car journey of 10 metres. Against this background, the CO₂ footprint of the streaming service appears very small. However, this environmental impact does not include the transmission via the telecommunications network from the data centre to the viewer, nor does it include the energy consumption of the home networking (router, WiFi) and the end devices (TV sets, computers) of the users. To obtain a complete carbon footprint for video streaming, CO₂ emissions in networks and households must therefore also be included.

GCC key figures for videoconferencing

One of the case studies is videoconferencing. A specific videoconferencing provider is investigated and, using the GCC methodology, the environmental effort related to the greenhouse gas emissions for providing one hour of videoconferencing for a single participant is determined. This metric can be used to calculate the carbon footprint of videoconferencing for the data centre based on the number of participants and their duration.

Table 12: GCC carbon footprint for videoconferencing

Designation	Value	Unit
Production Server _{GWP}	1,945	[kg CO ₂ eq.]
Years of use per server	4	[a]
Effort: Production per week	9.35	[kg CO ₂ eq./week]
Energy demand data centre	112	kWh _{el} /week
Effort: Usage phase per week (energy demand)	52	kg CO ₂ eq./week
Benefit: Participant hours per week	27,133	[user*h/week]
Calculation of the GCC ratio (= effort / benefit)		
GCC Video Conference _{GWP} Production	0.34	[g CO ₂ eq. /user/h]
GCC Video Conference _{GWP} Usage phase	1.93	[g CO ₂ eq. /user/h]
GCC Video Conference_{GWP}	2.27	[g CO₂ eq. /user/h]

Source: Own representation, Öko-Institut

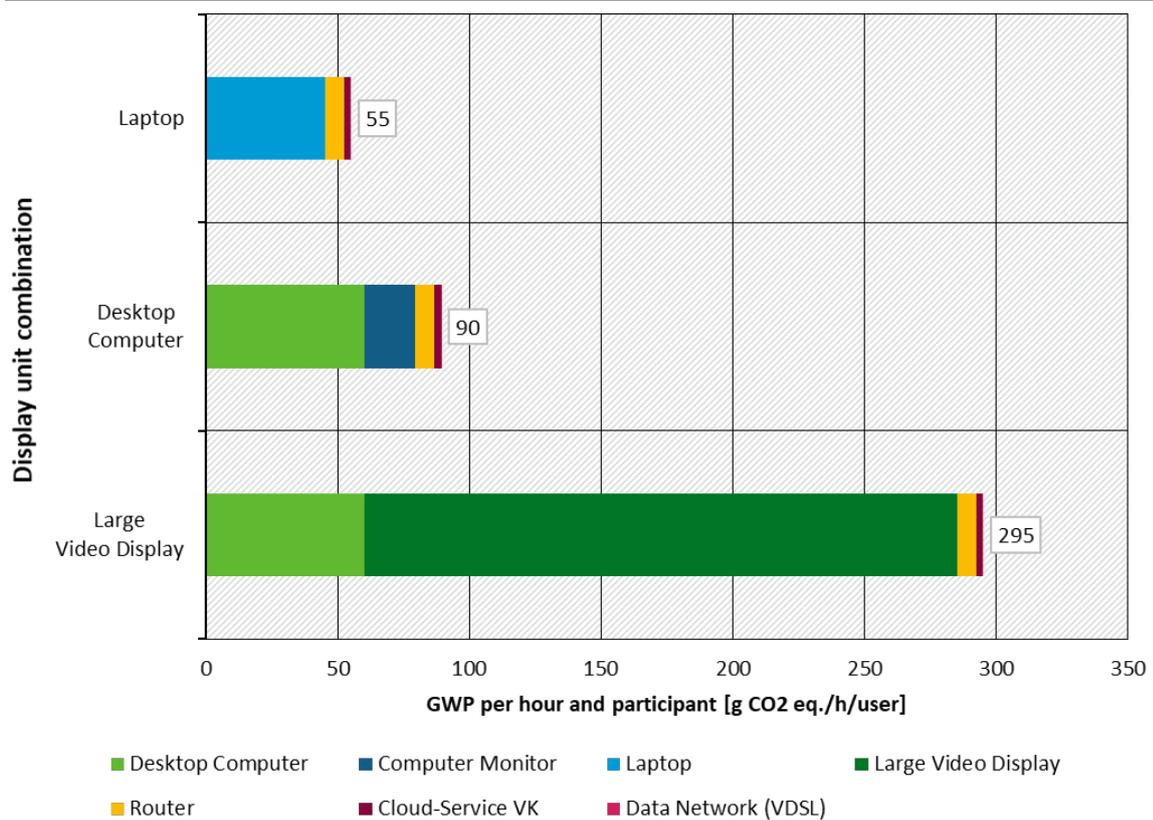
The greenhouse gas emissions (GWP) to participate one hour of videoconferencing are 2.27 grams of CO₂ equivalents. This number is made up of 0.34 grams of CO₂ equivalents for the production of the servers (15%) and 1.93 grams of CO₂ equivalents for the energy consumption in the data centre during the usage phase (85%).

To classify the magnitude of greenhouse gas emissions in the data centre, the value of the CO₂ footprint of 2.27 grams of carbon dioxide equivalents per hour and participant is still expressed in other reference values. Based on an electrical power consumption in the data centre with the emission factor of the German electricity mix used, this value corresponds to around 5 watts per participant. Converted to passenger kilometres with a car (143 g CO₂ eq. /km), this corresponds to a car journey of 15 metres.

The GCC indicator only represents the share of the environmental effort in the data centre. In fact, a videoconference also includes the transmission of data in telecommunication networks and the use of end user terminals at the respective participant's premises.

The calculation of the GCC indicator is therefore extended to include the carbon footprint of the data network (VDSL) and several combinations of display devices. This results in the GHG emissions documented in figure 2 for the participation of one person in a video conference over the period of one hour.

Figure 2: Greenhouse gas emissions for participation at video conference for different display unit combinations (production and use phase)



Source: Own representation, Öko-Institut

Participating in a video conference with a laptop is associated with greenhouse gas emissions of 55 grams of CO₂ equivalents per hour. With a desktop PC with monitor, it is 90 grams. If the participation takes place in front of a large video display, this is associated with greenhouse gas emissions of 295 grams of CO₂ equivalents per hour.

The expansion of the accounting area to include the data networks and the end user devices shows the high significance of the IT installed at the user's premises (router, computer and display devices) in the example of video conferencing. While the GCC key figure *GCC video conference_{GWP}* is only 2.27 grams of CO₂ equivalents per hour and participant, the greenhouse gas emissions for the slimmest device combination laptop and router, at 52.5 grams, are already a factor of 23 higher than the emissions in the data centre. The provider of the cloud service video conferencing has only a very small share of the total emissions in these usage scenarios.

Conclusions

The following conclusions on the GCC methodology are drawn from the project results:

- GCC metrics are well suited for communicating the environmental performance of individual cloud services to customers and clients and for comparing them (external view). They are also well suited for the provider of the respective services to identify potential for improvement of the cloud service (internal view). There is the possibility of further developing the GCC methodology for product-related labelling (e.g. energy efficiency labelling), for environmentally compatible procurement of cloud services and for awarding an eco-label (e.g. German eco-label *Blue Angel*) to particularly efficient services.

- ▶ Allocation rules are crucial for the comparability of GCC metrics. Common allocation rules should be developed with the providers and the methodology should be applied more broadly. The methods for developing product category rules for environmental product declarations in accordance with the ISO 14025 standard (Environmental labelling and declarations - Type III environmental declarations) could serve as an example for agreeing on uniform calculation standards. The goal of such a process could be the introduction of a carbon footprint for specific cloud services.
- ▶ Data collection for cloud services has been hampered by the fact that many services are run in colocation data centres and service providers have no insight into the energy consumption of the servers they use. There is an urgent need for action here. Contracts with host and colocation providers should (also for reasons of consumer protection and the verifiability of billing) generally include that energy and environmental information is passed on from the operator to the customers.

1 Hintergrund und Zielsetzung

Unter Cloud-Computing wird die Bereitstellung von IT-Infrastruktur (Hard- und Software) verstanden, auf die ein Anwender durch ein Netzwerk (in der Regel das Internet) zugreifen kann und die eine ähnliche Funktionalität bietet, wie eine lokale IT-Infrastruktur. Die IT-Infrastruktur stellt beispielsweise Rechenleistung, Speicherkapazität, Anwendungssoftware oder Datenbankdienste zur Verfügung, die nicht beim Anwender selbst lokal installiert sein müssen, sondern die über Internetverbindung durch eine Nutzerschnittstelle verfügbar sind. Beim Anwender wird dadurch eine vergleichsweise einfache und wenig anspruchsvolle Hardware-Infrastruktur notwendig. Durch die Auslagerung solcher Dienste aus dem eigenen Unternehmen bzw. der eigenen Behörde, besteht das Potenzial, den organisatorischen Aufwand zu reduzieren, Investitions- und Betriebskosten einzusparen, Skalierungseffekte zu nutzen und die beanspruchte IT-Dienstleistung zu professionalisieren. Die Cloud-Dienste für den privaten Nutzer bewirken, dass herkömmliche Geschäftsmodelle ergänzt oder gänzlich ersetzt werden, wie bspw. der Online-Handel ergänzt den Einzelhandel und stationäre Videotheken wurden durch Video-Streaming-Angebote im Internet ersetzt.

Die steigende Nachfrage des Cloud-Computings wird nicht zuletzt durch die Applikationen der Digitalisierung befördert. Sie lassen den Gesamtenergie- und Hardwarebedarf der Rechenzentren und der Telekommunikationsnetze steigen. Das Umweltbundesamt Österreich hat im Auftrag der Europäischen Kommission ermittelt, dass im Jahr 2018 die Cloud-Dienste für 35 % des Energiebedarfs der Rechenzentren in Europa verantwortlich sind (Montevecchi et al. 2020). Für das Jahr 2025 wird sogar ein Anteil von 60 % prognostiziert. Zur Herstellung der Rechenzentrums- und Internet-Infrastruktur werden Sonder- und Edelmetalle benötigt, die auch für die Zukunftstechnologien der Energiewende gebraucht werden und die bisher nicht oder nur zu einem geringen Teil durch Recycling zurückgewonnen werden.

Vor diesem Hintergrund muss die Umwelt- und Ressourcenpolitik die Digitalisierung und den damit einhergehenden Ausbau an Rechenzentrums-Infrastruktur wesentlich stärker in den Fokus nehmen und bestmöglich quantifizieren. Der Energie- und Ressourcenaufwand zur Herstellung der Rechenzentrums-Hardware wird weiter steigen und die Knappheit kritischer Rohstoffe voraussichtlich weiter verschärfen. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass sich durch die Digitalisierung Geschäftsmodelle und Konsumverhalten stark verändert haben und eine zunehmende Verlagerung der Umweltlasten in die IT-Infrastruktur stattgefunden hat. Diese Verlagerung wird in Zukunft weiter zunehmen. Die dafür notwendige Leistungssteigerung in den Rechenzentren führt zu höheren Energieverbräuchen. Entscheidend ist wie effizient Energie und Hardwareressourcen in Rechenzentren eingesetzt werden. Damit die Digitalisierung in nachhaltig zukunftsfähige Bahnen gelenkt werden kann, müssen geeignete wissenschaftliche Instrumente entwickelt werden, die Umweltinanspruchnahme durch Rechenzentren und Cloud-Dienstleistungen besser bewerten zu können.

Diese Studie stellt sich vor diesem Hintergrund folgende Forschungsfragen:

1. Wie wirkt sich die Verlagerung von IT-Leistungen in Cloud-Rechenzentren auf die Inanspruchnahme von natürlichen Ressourcen und Treibhausgasemissionen aus?
2. Welche Zielkonflikte oder Synergien gibt es zwischen Energie- u. Rohstoffeinsatz?
3. Mit welchen Methoden können die Umweltwirkungen von Cloud-Dienstleistungen bilanziert werden?
4. Und eignen sich diese Methoden zur Identifizierung ressourcenschonender Cloud-Dienstleistungen im Sinne eines Umweltzeichens oder Mindestanforderungen für die umweltverträgliche Beschaffung?

2 Methodenentwicklung

2.1 KPI4DCE Methodik

Im Forschungsprojekt „Kennzahlen und Indikatoren für die Beurteilung der Ressourceneffizienz von Rechenzentren und Prüfung der praktischen Anwendbarkeit“ im Auftrag des Umweltbundesamtes haben Schödwell et al. (2018) die Bewertungsmethodik *Key Performance Indikatoren für Rechenzentrumseffizienz* (KPI4DCE) entwickelt. Mit der Methodik kann die Effizienz eines gesamten Rechenzentrums bewertet werden, unabhängig von der jeweiligen Aufgabe, die es erfüllt. Hierzu wird der generische Nutzen des Rechenzentrums, ausgedrückt als Rechenoperationen, belegter Speicherplatz, externer Datenverkehr und Infrastrukturleistung jeweils auf die unterschiedlichen Umweltaufwände (Rohstoffverbrauch, Energieverbrauch, Treibhausgasemissionen und Wasserverbrauch) bezogen.

Die KPI4DCE-Kennzahlen werden jeweils berechnet als der Quotient aus Nutzen und Aufwand:

$$KPI = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}}$$

Der Nutzen eines Rechenzentrums lässt sich bei der KPI4DCE-Methodik in vier Teilbereichen aufteilen, wobei für jeden Teilbereich ein Indikator festgelegt ist, der den Nutzen beschreibt (siehe nachfolgende Info-Box).

Nutzen des Rechenzentrums bei KPI4DCE

► **Server:** Wie viele Rechenoperationen führen die Server pro Jahr aus?

Die Anzahl der Rechenoperationen werden hier pro CPU aus den Datenblättern des Benchmarks SPEC CPU 2006¹ (*integer operations per second*) entnommen und zusammen mit der mittleren Serverauslastung auf das Jahr hochgerechnet. Prinzipiell können auch andere Benchmarks genutzt werden, wobei die Ergebnisse nur bei gleichen Benchmarks vergleichbar sind.

$Nutzen_{Server} = \text{Anzahl CPUs} * \text{CPU Benchmark} * \text{Sekunden pro Jahr} * \text{Mittlere Serverauslastung}$
 Einheit: Rechenoperationen pro Jahr [$ops_{SPECint_rate/a}$]

► **Speicher:** Wie viel Speicherplatz wird jährlich mit Nutzdaten belegt?

$Nutzen_{Speicher} = \text{Installierter Speicherplatz} * \text{Mittlere Speicherplatzbelegung}$
 Einheit: Gigabyte pro Jahr [GB/a]

► **Netzwerk:** Welche Datenmenge wird jährlich über die externe Netzwerkschnittstelle übertragen?

$Nutzen_{Netzwerk} = \text{Mittlere genutzte Bandbreite externer Datenverkehr} * \text{Sekunden pro Jahr}$
 Einheit: Gigabit Datentransfer pro Jahr [Gb/a]

► **Infrastruktur:** Welche Ressourcenmengen werden von der IT selbst beansprucht?

$Nutzen_{Infrastruktur} = \text{Aufwand Server} + \text{Aufwand Speicher} + \text{Aufwand Netzwerk}$
 Einheiten abhängig vom jeweiligen Ressourcenindikator [kg Sb.eq./a, kg CO₂eq./a, MJ/a, m³/a]

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

¹ <https://www.spec.org/cpu2006/results/cpu2006.html>

Als Umwelt-Aufwand werden in der KPI4DCE-Methodik die Wirkungskategorien der orientierenden Ökobilanzen aus Herstellung der Informationstechnik sowie die der Nutzung der IT und Gebäudetechnik berücksichtigt (siehe nachfolgende Info-Box).

Aufwand im Rechenzentrum

- ▶ **Abiotischer Rohstoffverbrauch:** ADP (*Abiotic Depletion Potential*)
bewertet die Inanspruchnahme von Mineralien und fossilen Rohstoffen
Einheit: kg Antimon Äquivalente pro Jahr [kg Sb.eq./a]
- ▶ **Treibhausgaspotenzial:** GWP (*Global Warming Potential*)
bewertet die Wirkung auf die Erderwärmung
Einheit: Kilogramm Kohlendioxid Äquivalente pro Jahr [kg CO₂.eq./a]
- ▶ **Kumulierter Energieaufwand:** CED (*Cumulative Energy Demand*)
Verbrauch an energetischen Ressourcen (erneuerbar + nicht-erneuerbar)
Einheit: Megajoule pro Jahr [MJ/a]
- ▶ **Wasserverbrauch:** Water (*Water Usage*)
Einheit: Kubikmeter pro Jahr [m³/a]

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Bildet man aus den 4 genannten Nutzen und den 4 berechneten Aufwänden jeweils die Quotienten, so ergibt sich eine Anzahl von 16 verschiedenen Kennzahlen, die die unterschiedlichen Fragestellungen an das Rechenzentrum beantworten und für unterschiedliche Optimierungsmöglichkeiten heran gezogen werden können. In Tabelle 13 sind die verschiedenen KPI4DCE-Kennzahlen mit ihrer jeweiligen Bezeichnung dargestellt.

Tabelle 13: Bezeichnung der KPI4DCE-Kennzahlen

Nutzen/Aufwand	Infrastruktur	Server	Speicher	Netzwerk
ADP (Rohstoffe)	KPI Infra _{ADP}	KPI Server _{ADP}	KPI Storage _{ADP}	KPI Network _{ADP}
GWP (Treibhausgase)	KPI Infra _{GWP}	KPI Server _{GWP}	KPI Storage _{GWP}	KPI Network _{GWP}
CED (Primärenergie)	KPI Infra _{CED}	KPI Server _{CED}	KPI Storage _{CED}	KPI Network _{CED}
Water (Wasser)	KPI Infra _{Water}	KPI Server _{Water}	KPI Storage _{Water}	KPI Network _{Water}

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

In Tabelle 14 sind die Fragestellungen aufgelistet, die durch die jeweiligen KPI4DCE-Kennzahlen beantwortet werden. Soll beispielsweise ein Vergleich angestellt werden, welches Speichersystem mit weniger Rohstoffaufwand (ADP) verbunden ist, beispielsweise ein Speichersystem mit rotierenden Festplatten (HDDs) verglichen mit Halbleiterspeichern (SSDs), so kann die Kennzahl *KPI Storage_{ADP}* herangezogen werden. Zur Optimierung der Treibhausgasemissionen (GWP) bei der Gebäudetechnik eignet sich der *KPI Infra_{GWP}*. Die Kennzahlen können sowohl für den Variantenvergleich genutzt werden als auch für die Optimierung im laufenden Betrieb. So führt beispielsweise eine höhere Auslastung von Servern einerseits auf der Aufwandsseite zu einem höheren Energieverbrauch (CED), andererseits steigen damit die Anzahl der durchgeführten Rechenoperationen. Wenn der Energieverbrauch weniger stark zunimmt als die Rechenleistung, so steigt der *KPI Server_{CED}* und damit die Energieeffizienz des Systems.

Tabelle 14: Fragestellungen der KPI4DCE-Kennzahlen

KPI-Bezeichnung	Fragestellung
KPI Infra _{ADP}	Welchen Wirkungsgrad hat die Infrastruktur in Bezug auf die eingesetzten Rohstoffe?
KPI Server _{ADP}	Wie viele Rechenoperationen werden pro Rohstoffeinheit erbracht?
KPI Storage _{ADP}	Wie viel Speicherplatz wird pro Rohstoffeinheit aktiv genutzt?
KPI Network _{ADP}	Wie viele Daten werden pro Rohstoffeinheit übertragen?
KPI Infra _{GWP}	Welchen Wirkungsgrad hat die Infrastruktur in Bezug auf die Treibhausgas-Emissionen?
KPI Server _{GWP}	Wie viele Rechenoperationen werden pro CO ₂ -Einheit erbracht?
KPI Storage _{GWP}	Wie viel Speicherplatz wird pro CO ₂ -Einheit aktiv genutzt?
KPI Network _{GWP}	Wie viele Daten werden pro CO ₂ -Einheit übertragen?
KPI Infra _{CED}	Welchen Wirkungsgrad hat die Infrastruktur in Bezug auf die eingesetzte Primärenergie?
KPI Server _{CED}	Wie viele Rechenoperationen werden pro Energieeinheit erbracht?
KPI Storage _{CED}	Wie viel Speicherplatz wird pro Energieeinheit aktiv genutzt?
KPI Network _{CED}	Wie viele Daten werden pro Energieeinheit übertragen?
KPI Infra _{Water}	Welchen Wirkungsgrad hat die Infrastruktur in Bezug auf das eingesetzte Wasser?
KPI Server _{Water}	Wie viele Rechenoperationen werden pro Wassermenge erbracht?
KPI Storage _{Water}	Wie viel Speicherplatz wird pro Wassermenge aktiv genutzt?
KPI Network _{Water}	Wie viele Daten werden pro Wassermenge übertragen?

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Im Rahmen der vorliegenden Studie „Green Cloud Computing“ wurde die KPI4DCE Methode methodisch weiterentwickelt, die zugrunde liegenden Emissions- und Ökobilanzdaten aktualisiert (siehe Kapitel 3) sowie ein erweitertes Datenerfassungs- und Berechnungswerkzeug in Form eines EXCEL-Tools entwickelt (siehe Anhang A). Weiterhin wurde die KPI4DCE-Methodik, die sich auf gesamte Rechenzentren und deren Teilbereiche (Server, Speichersysteme, Netzwerk und Gebäudetechnik) bezieht, weiter spezifiziert, damit sie auf einzelne Cloud-Dienste angewendet werden kann (siehe Kapitel 2.2).

2.2 Beispiele für KPI4DCE-Kennzahlen

Zur Prüfung der Anwendbarkeit der aktualisierten KPI4DCE-Methodik wurden Daten von vier verschiedenen Rechenzentren erhoben und ausgewertet. Die Rechenzentren RZ01 bis RZ04 sind unterschiedlich leistungsfähig und erfüllen unterschiedliche Aufgaben. Einige wichtige Parameter sind in Tabelle 15 dokumentiert. Die Bandbreite der mittleren elektrischen Leistungsaufnahmen der Rechenzentren reicht von 39 Kilowatt bis 283 Kilowatt. Die Anzahl der Server reicht von 21 bis 243 Stück, die Anzahl der Speichersysteme von 8 Stück (rund 1 Petabyte) bis 37 Stück (rund 2.000 Petabyte) und die Anzahl der Netzwerkgeräte von 6 Stück (100 Ports) bis 86 Stück (2.000 Ports).

Tabelle 15: Wichtige Parameter der untersuchten Rechenzentren

Parameter	Einheit	RZ01	RZ02	RZ03	RZ04
Mittlere elektrische Leistungsaufnahme	kW _{el}	283	39	223	60
Power Usage Effectiveness (PUE)	-	1,4	1,7	1,5	1,4
Jahresarbeitszahl Kühlsystem (JAZ)	-	3,7	2,0	3,0	3,5
Anzahl Server	Stück	243	21	103	82
Anzahl Speichersysteme	Stück	37	28	21	8
Anzahl Netzwerk-Geräte	Stück	56	64	86	6

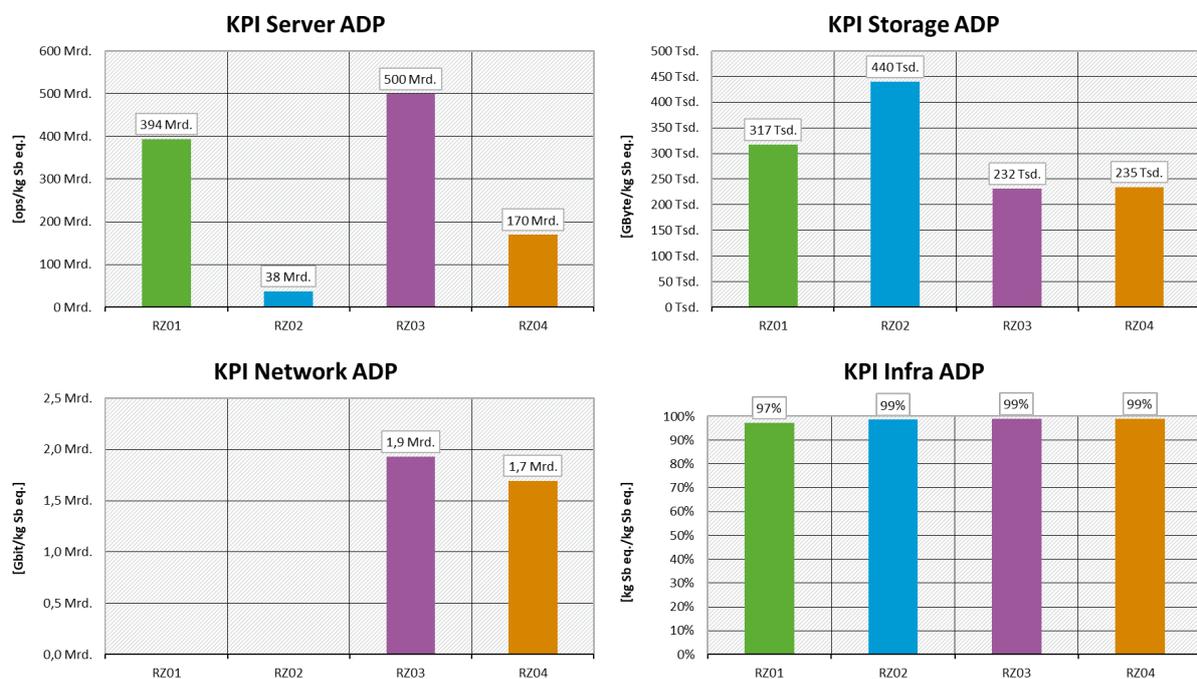
Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Im Folgenden soll nur ein Überblick über die Ergebnisse dieser Datenerhebung gegeben und die daraus ermittelten KPI4DCE-Kennzahlen aufgezeigt werden. Eine grundsätzliche Darstellung des KPI4DCE-Kennzahlensystems ist in der Studie von Schödwell et al. (2018) dokumentiert.

2.2.1 KPI4DCE-Kennzahlen nach Wirkungskategorie

Für alle vier Rechenzentren wurden die KPI4DCE-Kennzahlen für die Umweltwirkungen Abiotischer Rohstoffverbrauch (ADP), Treibhausgaspotenzial (GWP) und Primärenergiebedarf (CED) ermittelt und auf die Teilbereiche Server, Speichersysteme, Netzwerk und Gebäudetechnik aufgeteilt. Der Wasserverbrauch blieb unberücksichtigt, da keines der Rechenzentren über adiabate Kühlsysteme oder andere Wasser relevante Gebäudetechnik verfügte. Die KPI4DCE-Kennzahlen werden jeweils als Quotient aus jeweiligem Nutzen des Teilbereiches mit dessen Aufwand berechnet (siehe Kapitel 2.1).

Abbildung 3: KPI4DCE-Kennzahlen für Rohstoffverbrauch (ADP)

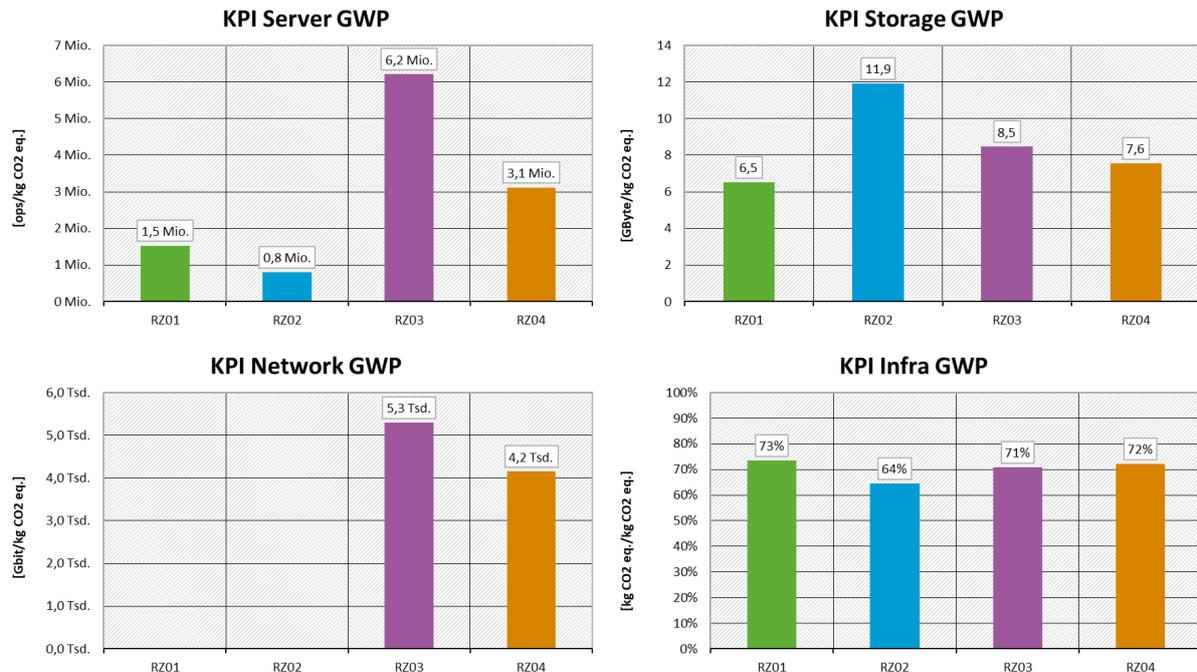


Quelle: KPI4DCE-Berechnungstool v2.4 (2020), eigene Darstellung, Öko-Institut

Die KPI4DCE-Kennzahlen der vier Rechenzentren unterscheiden sich erheblich.

Beim **Abiotischen Rohstoffverbrauch (ADP)** sind diese Unterschiede besonders zwischen Rechenzentrum 2 (RZ02) und Rechenzentrum 3 (RZ03) zu beobachten. Die Kennzahl **KPI Server ADP** weist für das Rechenzentrum 2 einen Wert von 38 Milliarden Rechenoperationen pro Kilogramm Antimon-Äquivalente (Mrd. ops/kg Sb eq.) aus, bei Rechenzentrum 3 sind es 500 Milliarden Rechenoperationen, rund 13mal so viele. Rechenzentrum 3 erbringt die Rechenleistung daher deutlich effizienter in Bezug auf den Rohstoffbedarf. Interessanterweise ist Rechenzentrum 2 jedoch bei der Kennzahl **KPI Storage ADP**, die den Rohstoffaufwand für Speichersysteme beschreibt, effizienter als Rechenzentrum 3. Der KPI Storage ADP von Rechenzentrum 2 hat einen Wert von 440 Tausend Gigabyte pro Kilogramm Antimon-Äquivalente (Tsd. GByte/kg Sb eq.) im Vergleich zu 232 Tausend Gigabyte bei Rechenzentrum 3. Die Kennzahlen zum Rohstoffverbrauch im Netzwerk **KPI Network ADP** konnten nur für die beiden Rechenzentren 3 (RZ03) und 4 (RZ04) gebildet werden, da für RZ01 und RZ02 kein externer Datenverkehr erfasst werden konnte. Sie liegen für RZ03 und RZ04 in der gleichen Größenordnung. Die Rohstoffkennzahl für die Infrastruktur **KPI Infra ADP** ist dagegen wenig aussagekräftig. Sie liegt zwischen 97 % im Rechenzentrum 1 und 99 % in den Rechenzentren 2, 3 und 4. Der Herstellungsaufwand für die Gebäudeinfrastruktur wird in der Methodik definitionsgemäß nicht berücksichtigt, da er eine untergeordnete Rolle spielt (siehe Forschungsprojekt KPI4DCE Schödwell et al. 2018). Da der Rohstoffverbrauch durch energetische Ressourcen im Betrieb des Rechenzentrums im Vergleich zum Herstellungsaufwand der Informationstechnik ebenfalls eine geringere Rolle spielt (siehe Kapitel 2.2.2), liegen die mit der Kennzahl KPI Infra ADP erkennbaren Rohstoffverluste in der Gebäudetechnik im genannten Bereich von nur 1 bis 3 %.

Abbildung 4: KPI4DCE-Kennzahlen für Treibhausgaspotenzial (GWP)



Quelle: KPI4DCE-Berechnungstool v2.4 (2020), eigene Darstellung, Öko-Institut

Die Kennzahlen zum **Treibhausgaspotenzial (GWP)** unterscheiden sich ebenfalls stark. An der Kennzahl **KPI Server GWP** kann abgelesen werden, wie viele Rechenoperationen pro Kilogramm CO₂-Äquivalente erbracht werden (ops_{SPECint_rate}/kg CO₂ eq.). Rechenzentrum 2 (RZ02) erbringt 0,8 Millionen solcher Rechenoperationen, während Rechenzentrum 3 (RZ03) mit 6,2

Millionen rund achtmal so viele Operationen durchführt. Beim aktiv genutzten Speicherplatz ist jedoch auch hier wieder RZ02 effizienter. Die Kennzahl **KPI Storage GWP** nennt für Rechenzentrum 2 einen Speicherplatz von 11,9 Gigabyte pro Kilogramm CO₂-Äquivalente (GB/kg CO₂ eq.), während Rechenzentrum 3 mit 8,5 GB/kg CO₂ eq. für den gleichen Aufwand zirka 30 % weniger Speicherleistung erbringt. Die Kennzahl **KPI Network GWP** beschreibt die Treibhausgasemissionen durch das Datennetzwerk. Die Datenmenge ist dabei die extern übertragene Datenmenge. Die Kennzahl liegt für die Rechenzentren 3 und 4 zwischen 5,3 und 4,2 Tausend Gigabit pro Kilogramm CO₂-Äquivalente (Gbit/kg CO₂ eq.). Nimmt man den Kehrwert dieser Zahl und bezieht sie auf eine Datenmenge von 1 GByte, so erhält man 1,5 bis 1,9 Gramm CO₂-Äquivalente pro Gigabyte übertragene Datenmenge. Die Kennzahl **KPI Infra GWP** zeigt den Wirkungsgrad der Gebäudetechnik unter dem Aspekt der Treibhausgasemissionen (kg CO₂ eq./ kg CO₂ eq.). Sie liegt in diesen Beispielen zwischen 64 % in Rechenzentrum 2 und 73 % in Rechenzentrum 1. Die Differenz zu 100 % beschreibt jeweils die Verluste, die durch die Gebäudetechnik entstehen. In diesen Beispielen gehen rund ein Drittel der Treibhausgasemissionen auf die Ineffizienzen der Gebäudetechnik zurück.

Abbildung 5: KPI4DCE-Kennzahlen für Kumulierten Energieaufwand (CED)



Quelle: KPI4DCE-Berechnungstool v2.4 (2020), eigene Darstellung, Öko-Institut

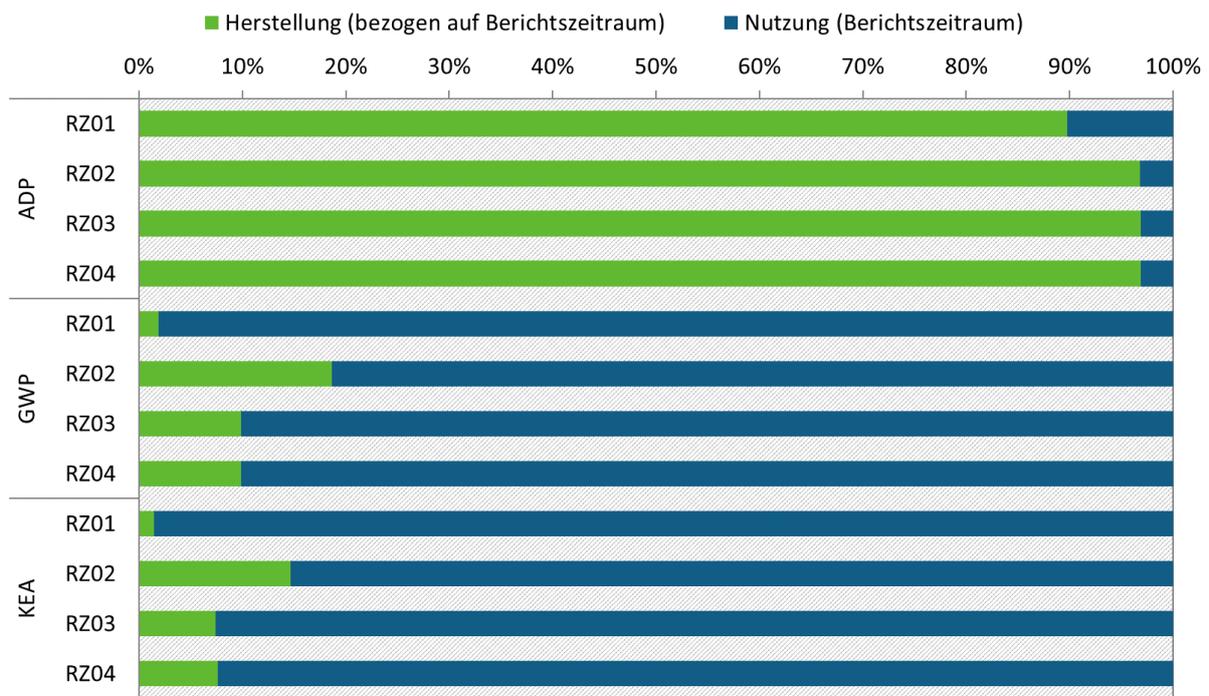
Die KPIs zum **Kumulierten Energieaufwand (KEA)**, hier mit der englischen Bezeichnung *Cumulated Energy Demand* (CED), unterscheiden sich in ihren graphischen Verläufen hier nur unwesentlich von denen des Treibhausgaspotenzials (GWP). Beide Wirkungskategorien hängen in diesen Beispielen stark zusammen, da für die Energieversorgung noch ein hoher Anteil an fossilen Energieträgern eingesetzt wird. Dennoch ist es sinnvoll, sowohl den GWP als auch den KEA bzw. CED auszuweisen, da bei kohlenstoffärmeren Energiesystemen (Einsatz von Biomasse und Ökostrom), zwar die Treibhausgasemissionen sinken, der Primärenergiebedarf aber konstant bleibt. Auf der anderen Seite sind die Emissionen, die bei Leckagen der HFKW-Kältemittel aus dem Kühlkreislauf entstehen nur beim Treibhausgaspotenzial (GWP) sichtbar. Zum **KPI Infra CED** ist anzumerken, dass er große Ähnlichkeiten mit dem Faktor DCiE (Data Centre Infrastructure Efficiency) aufweist, der als Kehrwert des bekannten PUE (Power Usage Effectiveness)

berechnet wird. Allerdings berücksichtigt der KPI Infra CED als Primärenergie-Wirkungsgrad auch die Herstellungsphase der Informationstechnik und die Umwandlungsverluste bei der Strombereitstellung.

2.2.2 Umweltwirkungen nach Lebenszyklusphase

Eine der Auswertungen, die das KPI4DCE-Kennzahlensystem ermöglicht, ist der Vergleich der Umweltwirkungen der Herstellung von IT-Komponenten mit den Umweltwirkungen in der Nutzungsphase. In Abbildung 6 wird dargestellt, wie sich bei den 4 untersuchten Rechenzentren die Herstellung im Vergleich zur Nutzungsphase verhält.

Abbildung 6: Verteilung der Umweltwirkungen von Rechenzentren nach Lebenszyklusphase



Quelle: KPI4DCE-Berechnungstool v2.4 (2020), eigene Darstellung, Öko-Institut

Bezogen auf den **Rohstoffverbrauch (ADP)** dominiert in allen 4 Rechenzentren die Herstellungsphase mit 90 bis 97 % der bilanzierten Rohstoffverbräuche. In der Nutzungsphase werden dagegen nur 3 bis 10 % der Antimon-Äquivalente verbraucht. Diese resultieren überwiegend aus dem Stromverbrauch in der Nutzungsphase, der über fossile Energieträger mit einem Rohstoffverbrauch verbunden ist. Aufgrund der Bewertungslogik bei der Berechnung von abiotischen Rohstoffverbräuchen (ADP) mit der Einheit Antimon-Äquivalente (siehe Kapitel B.1.2.1) fällt der Stromverbrauch hier weniger stark ins Gewicht.

Berechnet man die **Treibhausgasemissionen (GWP)**, die mit der Herstellung und Nutzung von Rechenzentren verbunden sind, so kehrt sich das Verhältnis um. Nur 2 % (RZ01) bis maximal 19 % (RZ02) der Treibhausgasemissionen sind durch die Herstellungsphase verursacht. Der überwiegende Anteil von 81 bis 98 % tritt bei der Nutzung der IT und Gebäudetechnik auf, sowohl durch den Stromverbrauch als auch durch Emissionen von treibhauswirksamen Kältemitteln.

Beim **Primärenergiebedarf (CED)** zeigt sich wieder ein ähnliches Bild wie bei den Treibhausgasemissionen. Hier sind es 85 bis 99 % des kumulierten Energieaufwandes, der in der

Nutzungsphase eingesetzt wird. Die Herstellung der Informationstechnik ist dagegen nur mit 1 bis 15 % am gesamten Energiebedarf beteiligt.

Als **Interpretation der Ergebnisse** kann abgeleitet werden, dass für den Rohstoffverbrauch die Herstellung von IT-Komponenten am relevantesten ist. Bei den Treibhausgasemissionen und dem Primärenergiebedarf ist es dagegen die Nutzungsphase, also der tatsächliche Betrieb der Rechenzentren, der für den überwiegenden Teil der Umweltwirkungen verantwortlich ist.

2.3 Bewertungsmethodik Green Cloud Computing (GCC)

Die Bewertungsmethodik *Green Cloud Computing* (GCC) hat zum Ziel, die Umweltwirkungen einzelner Cloud-Dienste messbar und berechenbar zu machen. Durch die Anwendung der *Green Cloud Computing* Methodik ist es möglich, einen „Umweltfußabdruck“, wie beispielsweise einen „CO₂-Fußabdruck“ für spezifische Dienstleistungen anzugeben.

Ausgangspunkt hierfür ist die KPI4DCE-Methodik. Diese ermöglicht es, die Umweltwirkungen von Rechenzentren zu bestimmen und in Form von Rohstoffaufwand (ADP), Treibhausgasemissionen (GWP), Primärenergiebedarf (CED) und Wasserverbrauch auszuweisen (siehe Kapitel 2.1). Bei der weiteren Verrechnung dieses Aufwandes gibt es zwischen KPI4DCE und der GCC-Methodik jedoch Unterschiede.

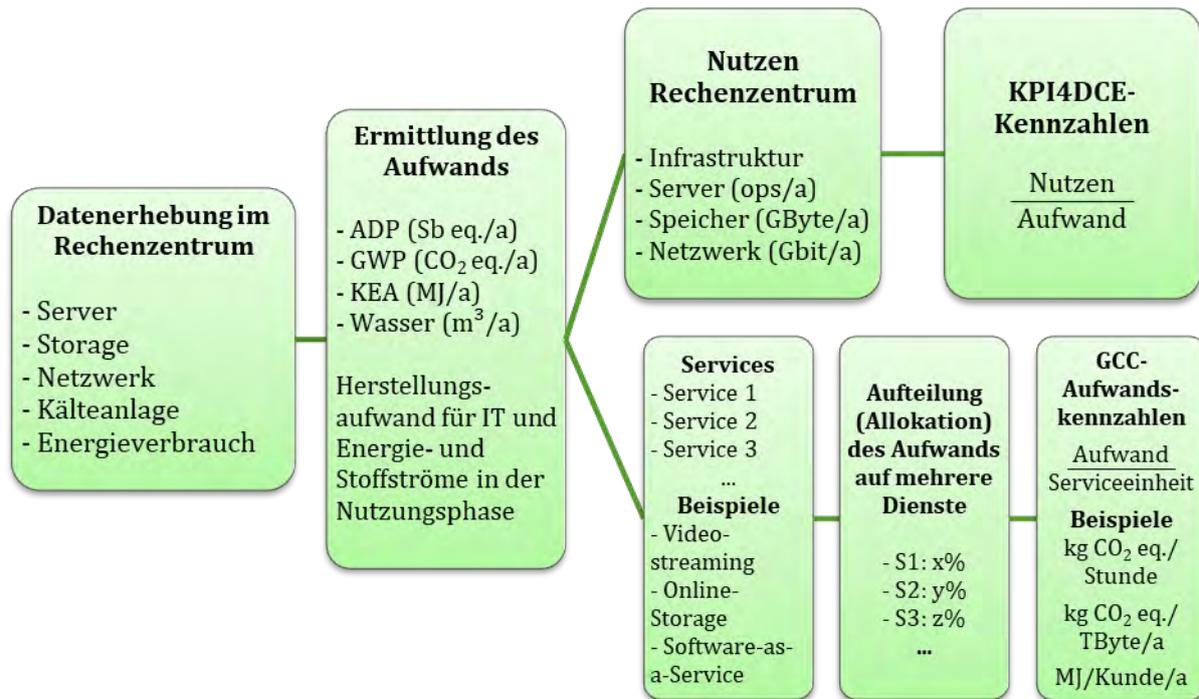
Bei KPI4DCE handelt es sich um *Effizienz Kennzahlen*, da der Nutzen des Rechenzentrums auf den Aufwand bezogen wird. Je höher der Nutzen oder je geringer der Aufwand, desto höher die Effizienz Kennzahl KPI4DCE.

Bei der GCC-Methodik werden dagegen *Aufwands Kennzahlen* gebildet. Beispielsweise die Höhe der CO₂-Emissionen für eine einzelne Dienstleistung. Der Umweltaufwand zur Bereitstellung einer Dienstleistung wird mit der Menge an erbrachter Dienstleistung ins Verhältnis gesetzt. Je geringer der Aufwand zur Erbringung der gleichen Dienstleistung ist, desto umweltverträglicher ist diese.

Weiterhin unterscheiden sich die Methoden durch die Granularität des Untersuchungsgegenstandes. Die KPI4DCE-Methodik hat das Rechenzentrum im Fokus und macht Aussagen über die Effizienz der vier Teilbereiche Server, Speichersysteme, Netzwerk und Gebäudetechnik. Die GCC-Methodik geht hier einen Schritt weiter und beschreibt den Aufwand für die einzelnen Cloud Dienstleistungen, abhängig vom jeweiligen Produkt (Serviceeinheit) des Cloud-Anbieters. Hierzu werden die Umweltwirkungen der einzelnen Teilbereiche des Rechenzentrums über sogenannte Allokationsregeln (siehe Kapitel 2.6) den durch das Rechenzentrum bereitgestellten Dienstleistungen zugeordnet.

In Abbildung 7 sind die Gemeinsamkeiten und Unterschiede beider Methoden dargestellt.

Abbildung 7: Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen KPI4DCE und GCC-Kennzahlen



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Gemeinsamkeiten

Beide Methoden KPI4DCE und GCC erfassen den Umweltaufwand der Herstellung der IT-Komponenten im Rechenzentrum durch die Datenerhebung zu Anzahl und technischer Parameter der Informationstechnik (Server, Storage und Netzwerk) sowie der Energie- und Stoffströme in der Nutzungsphase des Rechenzentrums. Daraus wird der Umweltaufwand als Abiotischer Rohstoffverbrauch (ADP), Treibhausgaspotenzial (GWP), Kumulierter Energieaufwand (CED) und Wasserverbrauch berechnet (siehe Kapitel B.1.2). Bei den weiteren Berechnungen unterscheiden sich KPI4DCE und GCC.

Unterschiede

Wie in Abbildung 7 schematisch dargestellt, wird zur Berechnung der KPI4DCE-Kennzahlen der Nutzen des Rechenzentrums als Nutzen der Infrastruktur (Bereitstellung von Energie), der Server (Rechenoperationen), der Speichersysteme (belegter Speicherplatz) und des Netzwerkes (externer Datenverkehr) ermittelt. Bei der GCC-Methodik erfolgt dagegen eine Ermittlung der bereitgestellten Dienste (z.B. Videostreaming, Online-Storage, Software-as-a-Service) und eine Zuordnung (Allokation) zu den in Anspruch genommenen Rechenzentrumsressourcen. Diese Allokation kann, je nach Praktikabilität und Datenverfügbarkeit, auf der Ebene dezidierter Hardware erfolgen, auf der Ebene von virtuellen Ressourcen, von Software-Instanzen oder gar auf der Ebene einzelner Prozesse (siehe Kapitel 2.6). Dadurch wird den einzelnen Diensten ein spezifischer Aufwand anteilig am Gesamtaufwand im Rechenzentrum zugewiesen. Die GCC-Aufwandskennzahl wird schließlich als der Quotient aus spezifischem Aufwand (z.B. CO₂-Äquivalenten pro Jahr) und der Anzahl an erbrachten Serviceeinheiten (z.B. Stunden ausgelieferte Videostreams pro Jahr) berechnet. Die GCC-Kennzahl beschreibt damit den Umweltaufwand pro erbrachter Serviceeinheit. Die Einheit der GCC-Kennzahl ist abhängig von der betrachteten Umweltwirkung (ADP, GWP, CED, Wasser) und von der Einheit der jeweiligen Dienstleistung (z.B. pro Stunde, pro Kunde, pro Menge, pro Zeiteinheit).

2.4 Cloud Computing Servicemodelle

Die Begriffsbestimmung zum „Cloud Computing“ und zu deren Servicemodellen basieren auf die Definition des Bundesamts für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI). Das BSI hat die Definition zum „Cloud Computing“ der US-amerikanischen Standardisierungsstelle National Institute of Standards and Technology (NIST) weiterentwickelt und legt den Begriff wie folgt fest:

Definition „Cloud Computing“ nach Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI)

Cloud Computing bezeichnet das dynamisch an den Bedarf angepasste Anbieten, Nutzen und Abrechnen von IT-Dienstleistungen über ein Netz. Angebot und Nutzung dieser Dienstleistungen erfolgen dabei ausschließlich über definierte technische Schnittstellen und Protokolle. Die Spannweite, der im Rahmen von Cloud Computing angebotenen Dienstleistungen, umfasst das komplette Spektrum der Informationstechnik und beinhaltet unter anderem Infrastruktur (z. B. Rechenleistung, Speicherplatz), Plattformen und Software.

Quelle: BSI (2020)

Das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI 2020) definiert die drei verschiedenen Servicemodelle wie folgt:

► Infrastructure as a Service (IaaS)

Bei IaaS werden IT-Ressourcen wie z. B. Rechenleistung, Datenspeicher oder Netze als Dienst angeboten. Ein Cloud-Kunde kauft diese virtualisierten und in hohem Maß standardisierten Services und baut darauf eigene Services zum internen oder externen Gebrauch auf. So kann ein Cloud-Kunde z. B. Rechenleistung, Arbeitsspeicher und Datenspeicher anmieten und darauf ein Betriebssystem mit Anwendungen seiner Wahl laufen lassen.

► Platform as a Service (PaaS)

Ein PaaS-Provider stellt eine komplette Infrastruktur bereit und bietet dem Kunden auf der Plattform standardisierte Schnittstellen an, die von Diensten des Kunden genutzt werden. So kann die Plattform z. B. Mandantenfähigkeit, Skalierbarkeit, Zugriffskontrolle, Datenbankzugriffe, etc. als Service zur Verfügung stellen. Der Kunde hat keinen Zugriff auf die darunterliegenden Schichten (Betriebssystem, Hardware), er kann aber auf der Plattform eigene Anwendungen laufen lassen, für deren Entwicklung der Cloud Service Provider (CSP) in der Regel eigene Werkzeuge anbietet.

► Software as a Service (SaaS)

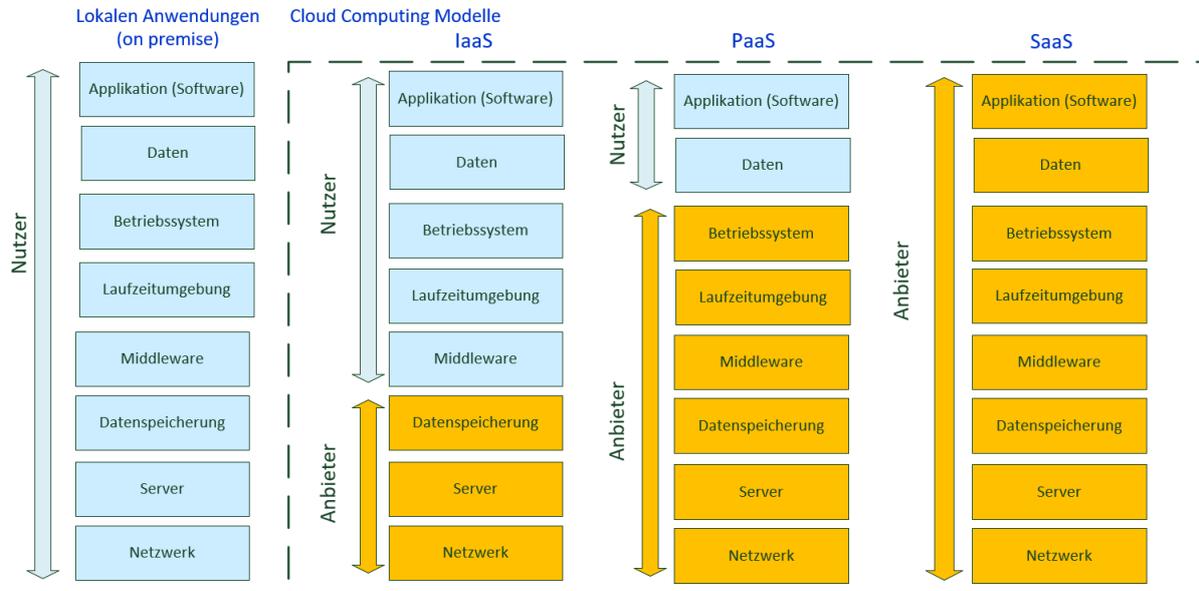
Sämtliche Angebote von Anwendungen, die den Kriterien des Cloud Computing entsprechen, fallen in diese Kategorie. Dem Angebotsspektrum sind hierbei keine Grenzen gesetzt. Als Beispiele seien Kontaktdatenmanagement, Finanzbuchhaltung, Textverarbeitung oder Kollaborationsanwendungen genannt.

Die verschiedenen Servicemodelle führen zu einer unterschiedlichen Aufgabenteilung zwischen den Service-Anbietern und den Nutzern, d.h. den Kunden, der jeweiligen Dienstleistung.

In Abbildung 8 wird diese Aufteilung schematisch dargestellt. Während bei rein lokalen Anwendungen auf dem Firmengelände (*on premise*) die Software, die Daten und auch die Hardware komplett in der Verantwortung des Nutzenden liegen, gehen die Aufgaben bei den verschiedenen Cloud-Services zunehmend an die Service-Anbieter über. Beim Servicemodell *Infrastructure as a Service (IaaS)* geht die Hardware, bestehend aus Netzwerk, Server Datenspeicherung, in den Aufgabenbereich des Service-Anbieters über. Bei dem Modell *Platform as a Service (PaaS)* übernimmt der Anbieter zusätzlich noch die Software-Schichten Betriebssystem, Middleware und

Laufzeitumgebung. Beim umfassendsten Servicemodell *Software as a Service (SaaS)* liegt zusätzlich auch die Applikations-Software beim Anbieter, der auch die Kundendaten speichert und verwaltet.

Abbildung 8: Aufgabenteilung zwischen Anbietern und Nutzern unterschiedlicher Servicemodelle



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut und Fraunhofer IZM

Allen Servicemodellen gemeinsam ist, dass eine bestimmte Dienstleistung definiert und an Kunden ausgeliefert wird, üblicherweise gegen eine monetäre Bezahlung. Die Dienstleistungen müssen quantifizierbar sein, damit auch die Bezahlung entsprechend quantifiziert werden kann.

2.5 Cloud Computing Serviceeinheiten

Eine der Herausforderungen zur Berechnung von Green Cloud Computing Kennzahlen ist die Festlegung einer geeigneten Bezugsgröße, auf die der Umweltaufwand im Rechenzentrum bezogen wird. Diese Bezugsgröße wurde in Abbildung 7 als „Serviceeinheit“ bezeichnet. Die Einheit soll eine allgemein verständliche physikalische oder numerische Größe darstellen, mit der der Cloud Service bereitgestellt wird. Angelehnt an die in Kapitel 2.4 beschriebenen Servicemodelle, können die Serviceeinheiten beispielsweise sein:

► Infrastructure as a Service (IaaS)

- Anzahl an Servern oder Serverkapazitäten (z.B. Virtuelle Server, Rechenoperationen)
- Größe des Datenspeichers
- Bandbreite der Netzwerkverbindung
- Fläche oder Aufstellereinheiten im Rechenzentrum

► Platform as a Service (PaaS)

- Anzahl an Kundenkonten (z.B. E-Mail-Postfächer, Login-Namen)
- Anzahl an Dateneinheiten (z.B. Datenbankzugriffe, Dateien, Container, Funktionen)
- Dauer der Nutzung

► Software as a Service (SaaS)

- Anzahl an Softwarelizenzen und Anwendungen
- Umfang der Nutzung (z.B. Speicherplatz, Netzwerkzugriffe, Instanzen)
- Dauer der Nutzung

Die Dienstleistung *Infrastructure as a Service* (IaaS) wird stark auf der Ebene der Rechenzentrums-Hardware angeboten, weshalb es größere Überschneidungen zu den bei den KPI4DCE-Kennzahlen definierten Nutzeinheiten (Rechenleistung, Speicherplatz, externer Datenverkehr und Infrastruktur) gibt. In einfachen Fällen (z.B. Bereitstellung von Online-Storage) können als GCC-Kennzahlen daher direkt die Kehrwerte der KPI4DCE-Kennzahlen verwendet werden.

Bei *Platform as a Service* (PaaS) und *Software as a Service* (SaaS) hängt es stark von den jeweiligen Dienstleistungen und Geschäftsmodellen ab, welche Serviceeinheiten gewählt werden können. Im Rahmen des vorliegenden Vorhabens wurde kein allgemeingültiges Vorgehen dazu entwickelt, welche Serviceeinheit gewählt werden muss. Grundsätzlich sollten vom Anwender des Kennzahlensystems solche Einheiten gewählt werden, die in der Außenkommunikation nachvollziehbar, verständlich und transparent sind. Da die Services üblicherweise monetär abgerechnet werden, eignen sich insbesondere auch solche Einheiten, die in den Abrechnungen ausgewiesen werden, beispielsweise Anzahl an Konten, Zugriffen, Nutzungsdauern.

Im Rahmen dieses Vorhabens wurden als Serviceeinheiten verwendet:

- Online-Storage: Terabyte pro Jahr [TB/a] (siehe Kapitel 4.1)
- Virtuelle Desktop Infrastruktur: virtualisierte Arbeitsplätze [AP/a] (siehe Kapitel 4.2)
- Videostreaming: Ausgelieferte Stunden Videostreaming [h/a] (siehe Kapitel 4.3)

2.6 Allokationsregeln

Durch die Erfassung von Hardwarebestand, Energie- und Stoffstrommonitoring ist es möglich, den Ressourcenaufwand von ganzen Rechenzentren zu bestimmen. Rechenzentren bieten in der Regel jedoch unterschiedliche Dienstleistungen gleichzeitig an, beispielsweise gleichzeitig Webseiten-Hosting, Online-Storage, Abrechnungssysteme, Datenbanken und E-Mail-Postfächer. Diese Dienste beanspruchen die Hardware unterschiedlich stark und sind damit für unterschiedlich hohe Anteile am Ressourcenverbrauch verantwortlich. Damit der Aufwand einzelnen Rechenzentrums-Dienstleistungen zugeordnet werden kann, ist es erforderlich, eine Allokation (Zuordnung) vorzunehmen.

Eine vergleichbare Fragestellung taucht bei der Ökobilanz von physischen Produkten auf, wenn Produktionsprozesse unterschiedliche Koppelprodukte hervorbringen und der Gesamtaufwand den einzelnen Teilprodukten zugeordnet werden muss. Die Ökobilanz-Norm (DIN EN ISO 14044) sieht dazu Allokationsverfahren vor, die durch den Anwender der Norm selbst plausibel gewählt werden müssen.

Als bevorzugte Reihenfolge der Auswahl von Allokationsverfahren nennt die Norm sinngemäß:

- Vermeidung der Allokation durch Aufteilung in einzeln bilanzierbare *Teilprozesse* oder *Erweiterung* des untersuchten Produktsystems um die Koppelprodukte,
- Nutzung von *physikalischen Größen* zur Aufteilung der Produktströme,
- Verteilung des Aufwands entsprechend dem *ökonomischen Wert* der Teilprodukte.

Übertragen auf die im Rechenzentrum erbrachten Dienstleistungen beschreibt der erste Spiegelstrich die Bilanzierung einzelner Teilbereiche des Rechenzentrums (*Teilprozesse*), wie es bei KPI4DCE durch die Aufteilung in Server, Speichersystem, Netzwerk und Gebäudetechnik erfolgt oder die *Erweiterung* des Bilanzraumes durch die Bilanzierung des gesamten Rechenzentrums (Beispiel: Berechnung des PUE-Wertes). Für GCC-Kennzahlen ist dies nur dann zielführend, wenn das gesamte Rechenzentrum nur eine einzelne Dienstleistung erbringt. Ein Beispiel hierfür ist das Videostreaming-Rechenzentrum, das in Kapitel 4.3 bilanziert wird.

Die Aufteilung nach *physikalischen Größen* gemäß dem zweiten Spiegelstrich ist im Rechenzentrum der Regelfall. Entweder können ganze Hardware-Komponenten, wie beispielsweise Server oder Storage-Systeme einzelnen Diensten zugeordnet werden (siehe Kapitel 2.6.2) oder andere physikalische Größen wie Rechenoperationen, Speicherplatz, Bandbreite, virtuelle Server oder gestartete Rechenprozesse können als virtuelle Ressourcen über geeignete Zuordnungsregeln für eine Allokation genutzt werden (siehe Kapitel 2.6.3).

Der dritte Spiegelstrich beschreibt die Verteilung nach *ökonomischen Werten*. Dies wäre grundsätzlich dann möglich, wenn alle Cloud Dienstleistungen mit einem aufwandsspezifischen Preis versehen wären. Der Ressourcenaufwand im Rechenzentrum könnte dann einfach über den jeweiligen monetären Anteil der Dienstleistung an den gesamten Einnahmen verteilt werden. Wie die Befragung von Marktakteuren bei einem im Rahmen des Forschungsprojektes durchgeführten Workshop ergab, wird der Preis für Cloud Dienstleistungen in der Praxis jedoch nicht am Aufwand festgelegt, sondern bildet sich durch Angebot und Nachfrage am Markt oder durch interne Mischkalkulation. Dabei können Cloud Dienstleistungen sogar kostenlos angeboten werden, wenn dies in der Mischkalkulation vorteilhaft ist oder wenn sie werbefinanziert sind. Eine Zuordnung der Ressourcen über den Preis ist daher bei Cloud Dienstleistungen nicht sinnvoll.

2.6.1 Grundlagen zur Allokation

Ausgangspunkt für die Verteilung der Umweltwirkungen des Rechenzentrums auf unterschiedliche Dienstleistungen ist eine Erhebung des Aufwands im Rechenzentrum gemäß den oben beschriebenen Regeln (vgl. Kapitel 2.1). Daraus ergeben sich Umweltwirkungen in den Wirkungskategorien Rohstoffverbrauch (ADP), Treibhausgasemissionen (GWP), Kumulierter Energieaufwand (CED) und Wasserverbrauch jeweils bezogen auf die Teilbereiche des Rechenzentrums Server, Speichersysteme, Netzwerk und Gebäude-Infrastruktur.

Die Allokation erfolgt durch eine prozentuale Zuordnung der Umweltwirkungen der Teilbereiche des Rechenzentrums auf die jeweiligen Dienste. In Tabelle 16 wird diese Allokation schematisch für die Services 1 bis n am Beispiel des Treibhausgaspotenzials (GWP) dargestellt.

Tabelle 16: Allokation der Umweltwirkungen auf Cloud Services

Teilbereich im Rechenzentrum	Umweltwirkung (z.B. GWP)	Anteil Service 1 [%]	Anteil Service n [%]	Summe Anteil 1...n [%]	Umweltwirkung Service 1	Umweltwirkung Service n
Server	$Server_{GWP}$	$A1_{sv}$	An_{sv}	100%	$An_{sv} * Server_{GWP}$	$An_{sv} * Server_{GWP}$
Speicher	$Storage_{GWP}$	$A1_{st}$	An_{st}	100%	$A1_{st} * Storage_{GWP}$	$An_{st} * Storage_{GWP}$
Netzwerk	$Network_{GWP}$	$A1_{nw}$	An_{nw}	100%	$A1_{nw} * Network_{GWP}$	$An_{nw} * Network_{GWP}$
Infrastruktur	$Infra_{GWP}$	$A1_{infr}$	An_{infr}	100%	$A1_{infr} * Infra_{GWP}$	$An_{infr} * Infra_{GWP}$
Summe	$Datacenter_{GWP}$				Service 1_{GWP}	Service n_{GWP}

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Jeder Service erhält einen prozentualen Anteil an den Umweltwirkungen des jeweiligen Teilbereiches. Zum Beispiel werden die Umweltwirkungen in der Wirkungskategorie Treibhausgaspotenzial der Server ($Server_{GWP}$) durch den Anteil des Services n an der Serverbeanspruchung (An_{sv}) berechnet.

Die partielle Umweltwirkung des Services n berechnet sich dann für den Serveranteil zu:

$$\text{Service n } Server_{GWP} = An_{sv} * Server_{GWP}$$

Die Herausforderung besteht darin, die jeweiligen Prozentwerte festzulegen bzw. zu ermitteln. Im einfachsten Fall bietet das Rechenzentrum nur einen einzelnen Service an. Dann kann der jeweilige Anteil zu 100 % gesetzt werden. Sobald jedoch mehr als ein einzelner Dienst angeboten wird, ist eine anteilige Allokation nötig.

2.6.2 Allokation über Hardware-Ressourcen

In einigen Anwendungsfällen ist es möglich, zumindest Teile der Hardware-Ressourcen von Rechenzentren bestimmten Diensten direkt zuzuordnen. So können beispielsweise bestimmte Server-Cluster für spezielle Aufgaben abgestellt sein. Der Energieverbrauch und Herstellungsaufwand dieser Server können dann vollständig den jeweiligen Diensten zugeschlagen werden. Gleiches gilt für Storage-Systeme, die direkt einzelnen Diensten zugeordnet werden können. Die Allokation erfolgt dann auf Hardwareebene. Wichtig ist es hierbei, dass allgemein erforderliche Rechenzentrumsaufgaben, wie die Bereitstellung von Sicherheitsschichten (z.B. Firewall), das interne Netzwerk aber auch die Aufwände der Gebäudetechnik wiederum anteilig den verschiedenen nach außen hin angebotenen Diensten zugeordnet werden.

Die Allokation auf Hardwareebene ist in Tabelle 17 am Beispiel des Treibhausgaspotenzials für Server schematisch dargestellt. Der untersuchte Service ist in dem Beispiel Service 1, der 40 von zusammen 100 der physischen Server bindet und damit auf Serverebene für 40 % der Treibhausgasemissionen ($Server_{GWP}$) verantwortlich ist. Die sonstigen Dienste 2...n machen in dem Beispiel ebenfalls 40 % der Treibhausgasemissionen der Server aus. Ein Anteil von 20 % des Server-bedingten GWP entfällt auf die internen Dienste, die für den Betrieb des Rechenzentrums erforderlich sind. Diese internen Dienste stellen keine vermarktbar Dienstleistung dar und werden daher nicht mit eigenen GCC-Kennzahlen versehen. Ihr GWP wird wiederum anteilig den

Services 1 sowie 2...n zugeschlagen (jeweils zur Hälfte). Als Allokationsfaktoren ergeben sich daraus Allokationsfaktoren (An_{sv}) von jeweils 50 % für Service 1 und für die Summe der übrigen Services 2...n.

Tabelle 17: Allokation auf Hardware-Ebene am Beispiel Server_{GWP}

Hardware-Nutzung	Anzahl physischer Server	Umweltwirkung (z.B. GWP)	Anteil am GWP	Berechnung Allokation An_{sv} [%]	An_{sv} [%]	Zugeordnetes GWP
Server für Service 1	40 Stück	120 t CO ₂ e/a	40%	$40\% + 20\% * 40\% / 80\%$	50%	150 t CO ₂ e/a
Server für Services 2...n	40 Stück	120 t CO ₂ e/a	40%	$40\% + 20\% * 40\% / 80\%$	50%	150 t CO ₂ e/a
Server für interne Dienste	20 Stück	60 t CO ₂ e/a	20%	-	-	-
Summe	100 Stück	300 t CO₂e/a	100%	40% + 40% + 20%	100%	300 t CO₂e/a

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

2.6.3 Allokation über virtuelle Ressourcen

Laufen auf einem einzelnen physischen Server mehrere Dienste parallel, so wird dies in der Regel nicht mit einem gemeinsamen Betriebssystem erfolgen, sondern getrennt voneinander auf mehreren Virtuellen Maschinen bzw. virtuellen Servern (siehe nachfolgende Infobox), die parallel auf einem physischen („dezidierten“) Server installiert sind und unabhängig voneinander betrieben werden. Jeder virtuelle Server bringt dabei sein eigenes Betriebssystem mit und beansprucht individuell unterschiedlich viele Hardware-Ressourcen.

Virtuelle Maschine / virtueller Server

Bei einer Virtuellen Maschine (VM) handelt es sich um eine abgeschottete, virtualisierte Umgebung, mit der sich mehrere vom Betriebssystem des Host-Systems unabhängige Gastsysteme parallel auf einem physischen Rechner betreiben lassen. Die Virtuellen Maschinen agieren unabhängig voneinander und beeinflussen sich gegenseitig nicht. Die Hardware-Ressourcen verwaltet ein sogenannter Hypervisor. Aus Sicht der Virtuellen Maschine stehen zugeteilte Rechenleistung, Arbeitsspeicher, Festplattenkapazität und Netzwerkverbindungen exklusiv zur Verfügung.

Quelle: storage-insider.de

Über eine Virtualisierungssoftware werden den unterschiedlichen virtuellen Servern jeweils virtuelle Ressourcen in Form von CPU-Kerne (cores), Arbeitsspeicher (RAM), virtueller Speicherplatz (disk) und Bandbreite der virtuellen Netzwerkkarte (NIC) zugeordnet. Bei einer Virtualisierung bietet sich daher für die Zuordnung des Umweltaufwands auf verschiedene Cloud Services auch die Allokation über virtuelle Ressourcen an. In Tabelle 18 wird dies schematisch anhand von Beispielwerten dargestellt.

Tabelle 18: Allokation über virtuelle Ressourcen

Bezeichnung Dienst	Anzahl virtuelle CPU-Kerne (cores)	Virtueller Speicherplatz (disk)	Bandbreite virtuelle Netzwerkkarte (NIC)	An _{sv} [%]	An _{st} [%]	An _{nw} [%]	An _{infra} [%]
Service 1	100 Stück	500 TB	500 Mbit/s	10%	11%	14%	11%
Service 2	200 Stück	1.000 TB	500 Mbit/s	20%	22%	14%	20%
...	300 Stück	2.000 TB	1.500 Mbit/s	30%	44%	43%	38%
Service n	400 Stück	1.000 TB	1.000 Mbit/s	40%	22%	29%	31%
Summe	1.000 Stück	4.500 TB	3.500 Mbit/s	100%	100%	100%	100%

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Die Summen der virtuellen Ressourcen sind dabei in der Regel deutlich höher, als die tatsächlichen physischen Ressourcen (z.B. Anzahl an CPU-Kernen), da die Virtualisierung zum Ziel hat, Ressourcen besser auszulasten und durch die Bündelung von zeitlich versetzten Lasten auf einer Maschine, Leerlaufverluste zu reduzieren. Das Verhältnis der virtuellen Ressourcen, die für einen Dienst eingesetzt werden, zur Gesamtzahl der virtuellen Ressourcen kann aber unmittelbar als Verteilungsschlüssel verwendet werden: werden beispielsweise 10 % der virtuellen CPU-Kerne beansprucht, so kann dies mit 10 % der physischen Serverkapazitäten gleichgesetzt werden. Dies ist in Tabelle 18 mit dem Zahlenbeispiel für Service 1 beschrieben ($A_{1sv} = 10\%$). Ist einem Service ein bestimmter Prozentsatz des virtuellen Festplattenspeicherplatzes zugewiesen (Service 2 z.B. 1.000 von 4.500 Terabyte), so kann dieses Verhältnis auf den physischen Festplattenspeicherplatz angewendet werden ($A_{2st} = 22\%$). Das gleiche Vorgehen wird auf die Bandbreite im Netzwerk angewendet.

$$An_{sv} = \frac{vCores_{Service\ n}}{vCores_{total}}$$

$$An_{st} = \frac{vDisk_{Service\ n}}{vDisk_{total}}$$

$$An_{nw} = \frac{vNIC_{Service\ n}}{vNIC_{total}}$$

Mit:

An_{sv}: Allokationsfaktor für Umweltwirkungen der Server (sv) des Service (s) mit der laufenden Nummer n

An_{st}: Allokationsfaktor für Umweltwirkungen der Storage-Systeme (st) des Service (s) mit der laufenden Nummer n

An_{nw}: Allokationsfaktor für Umweltwirkungen des Netzwerkes (nw) des Service (s) mit der laufenden Nummer n

vCores: Anzahl an virtuellen CPU-Kernen (cores)

vDisk: Virtueller Speicherplatz (disk)

vNIC: Bandbreite virtuelle Netzwerkkarte (NIC – network interface controller)

total: bezogen auf das gesamte Rechenzentrum

Für die Allokation des Infrastrukturaufwandes (insbesondere Klimatisierung und Verluste in der Energiebereitstellung) bieten die virtuellen Ressourcen nur einen indirekten Ansatz, da sie in der Virtualisierungssoftware nicht zugewiesen werden. Durch die Verteilung des Umweltaufwandes auf Server, Speichersysteme und Netzwerk bildet sich der Allokationsfaktor für die Infrastruktur als anteiliger Wert aus den jeweiligen Teilaufwänden der drei Teilbereiche Server, Speichersystem und Netzwerk. Für das Treibhausgaspotenzial (GWP) wird der Anteil des Services n (An_{infra}) am Treibhausgaspotenzial der Infrastruktur ($Infra_{GWP}$) damit folgendermaßen berechnet:

$$An_{infra} = An_{sv} * \frac{Server_{GWP}}{Datacenter_{GWP}} + An_{st} * \frac{Storage_{GWP}}{Datacenter_{GWP}} + An_{nw} * \frac{Network_{GWP}}{Datacenter_{GWP}}$$

Mit:

- An_{infra} : Allokationsfaktor für Umweltwirkungen der Infrastruktur (infra) des Service mit der laufenden Nummer n , hier bezogen auf das Treibhausgaspotenzial (GWP)
- $Server_{GWP}$: Treibhausgaspotenzial (GWP) aller Server im Rechenzentrum
- $Storage_{GWP}$: Treibhausgaspotenzial (GWP) aller Speichersysteme im Rechenzentrum
- $Datacenter_{GWP}$: Treibhausgaspotenzial (GWP) gesamtes Rechenzentrum

Für die übrigen Umweltwirkungen (ADP, CED und Wasserverbrauch) gilt dies analog.

Der konzeptionelle Ansatz hinter der Bilanzierung virtueller Ressourcen ist, dass eine gemeinsame Zählgröße herangezogen wird, die sowohl den angebotenen Cloud Dienstleistungen zugeordnet werden kann als auch den im Rechenzentrum genutzten Hardwareressourcen. Durch die Bildung von prozentualen Anteilen der virtuellen Ressourcen zu deren zur Verfügung stehenden Gesamtmenge können dann die Umweltwirkungen der Hardware mit den gleichen Prozentsätzen aufgeteilt werden.

Statt virtuelle Server als Zählgrößen zu verwenden, ist es genauso möglich andere Software-definierte Hardwareanteile zur Aufteilung zu nutzen. Solche Software-definierte Hardwareanteile sind beispielsweise *Software-Container* oder *Funktionen* (siehe nachfolgende Infoboxen).

Werden Cloud Dienstleistungen beispielsweise in Containern ausgeführt, so können auch die Anzahl der Container und die jeweils den Containern zugeordneten Hardwareressourcen für die Allokation genutzt werden. Eine noch feinere Aufteilung bietet die Bilanzierung von einzelnen ausgeführten Funktionen. Durch eine Auswertung von *Logfiles* ist es möglich, nachzuvollziehen, welche Funktionen wie viele CPU-Kapazitäten, Arbeitsspeicher, Netzwerkbandbreite und Zeitdauer beanspruchen. Daraus lassen sich ebenfalls, sehr granular Hardwareressourcen und damit Umweltwirkungen pro Funktionsausführung allokalieren.

Container / container as a Service (CaaS)

Container ist eine ausführbare Einheit von Software, in der Anwendungscode zusammen mit seinen Bibliotheken und Abhängigkeiten gebündelt werden, so dass er auf unterschiedlichen Computerumgebungen ausgeführt werden kann. Zu diesem Zweck nutzen Container eine Form der Betriebssystem-Virtualisierung, bei der Merkmale des Betriebssystems genutzt werden, um sowohl Prozesse zu isolieren als auch die Menge an CPU, Speicher und Festplatte zu kontrollieren, auf die diese Prozesse Zugriff haben. *Containers as a Service* (CaaS) ist ein Cloud-Service-Modell, das es Benutzern ermöglicht, Container, Anwendungen und Cluster hochzuladen, zu organisieren, zu starten, zu stoppen, zu skalieren und anderweitig zu verwalten.

Quelle: ibm.com

Funktionen / *Function as a Service*

Function as a Service (FaaS) ist eine Kategorie von Cloud-Computing-Diensten, die eine Plattform zur Verfügung stellt, die es Kunden ermöglicht, Anwendungsfunktionalitäten zu entwickeln, auszuführen und zu verwalten, ohne die Komplexität des Aufbaus und der Wartung der Infrastruktur, die typischerweise mit der Entwicklung und Einführung einer Anwendung verbunden ist. Der Aufbau einer Anwendung nach diesem Modell ist eine Möglichkeit, eine „serverlose“ Architektur zu erreichen, und wird typischerweise beim Aufbau von Mikrodienstleistungen verwendet. Anwendungsfälle für *Function as a Service* sind mit einer bedarfsabhängigen Funktionalität verbunden, die es ermöglicht, die unterstützende Infrastruktur herunterzufahren und keine Kosten zu verursachen, wenn sie nicht genutzt wird.

Quelle: Wikipedia (2020b)

2.7 Green Cloud Computing Kennzahlen

Durch die Anwendung der im Kapitel 2.6 vorgestellten Allokationsregeln ist es möglich, Cloud-Dienstleistungen den jeweiligen Umweltaufwand des Rechenzentrums zuzuordnen. Daraus ergibt sich für jede Dienstleistung (n) ein spezifischer jährlicher Umweltaufwand in folgenden Wirkungskategorien und mit folgenden Bezeichnungen und Einheiten:

- ▶ Rohstoffverbrauch (ADP): Aufwand Service n_{ADP} [kg Sb eq./a]
- ▶ Treibhausgasemissionen (GWP): Aufwand Service n_{GWP} [kg CO₂ eq./a]
- ▶ Kumulierter Energieaufwand (CED): Aufwand Service n_{CED} [M]/a]
- ▶ Wasserverbrauch: Aufwand Service n_{Water} [m³/a]

Dem Umweltaufwand steht ein jeweiliger *Nutzen* des Cloud Services gegenüber, mit dem die Dienstleistung bezeichnet wird. Der Nutzen wird dabei in Serviceeinheiten (vgl. Kapitel 2.5) quantifiziert und erhält eine physikalische Einheit, die vom jeweiligen Service abhängt und für die Ergebnisdarstellung geeignet ausgewählt werden muss. Als Bilanzierungszeitraum wird ebenfalls die Bereitstellung der Dienstleistung über den Zeitraum *eines* Jahres [a] gewählt.

Beispiel für diese physikalischen Einheiten des Nutzens sind: [Arbeitsplätze/a], [Kunden/a], [Stunden/a], [TB/a] usw. (vgl. Serviceeinheiten in Kapitel 2.5).

Bei den Green Cloud Computing (GCC) Kennzahlen handelt es sich um Aufwandskennzahlen. Je geringer der Aufwand zur Erbringung einer Dienstleistung, desto effizienter und damit umweltschonender wird diese bereit gestellt. Die Berechnung der GCC-Kennzahlen erfolgt durch die Bildung eines Quotienten aus Aufwand und Nutzen:

$$GCC = \frac{\text{Aufwand}}{\text{Nutzen}}$$

Der Jahresbezug ([1/a]) von Aufwand und Nutzen kürzt sich bei der Quotientenbildung heraus, weshalb die GCC-Kennzahlen direkt den Umweltaufwand pro einzelner Serviceeinheit beschreiben.

Für jede Cloud Dienstleistung (n) ergeben sich insgesamt 4 mögliche GCC-Kennzahlen für unterschiedliche Umweltwirkungen, die in nachfolgender Tabelle 19 zusammengestellt sind:

Tabelle 19: Green Cloud Computing Kennzahlen für unterschiedliche Umweltwirkungen

GCC-Bezeichnung	Einheit	Beispielhafte Benennung zur Kommunikation der Kennzahl
GCC Service n_{ADP}	kg Sb eq./su	Rohstoffverbrauch pro Serviceeinheit
GCC Service n_{GWP}	kg CO ₂ eq./su	CO ₂ -Fußabdruck pro Serviceeinheit
GCC Service n_{CED}	MJ/su	Energieverbrauch pro Serviceeinheit
GCC Service n_{Water}	m ³ /su	Wasserverbrauch pro Serviceeinheit

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Die Bezeichnung der Serviceeinheit und deren Einheit [su] können entsprechend dem Cloud Service angepasst werden

Beispiele zur Berechnung von GCC-Kennzahlen werden in Kapitel 4 vorgestellt.

3 Hintergrundanalysen

Die Bewertung von Umweltwirkungen durch Rechenzentren und Cloud-Dienstleistungen erfolgt im Rahmen dieses Projektes auf der Grundlage von orientierenden Ökobilanzen. Ökobilanzen (*life cycle assessments*) umfassen im Idealfall den gesamten Lebensweg eines Produktes, von der Rohstoffgewinnung bis zur Entsorgung, und berücksichtigen dabei die aus Umweltsicht jeweils wichtigsten Stoff- und Energieströme. Die Umweltwirkungen sind daher stark von der jeweiligen Technologiegeneration, dem Herstellungsverfahren, dem Ort der Herstellung, Handelsströmen und letztlich auch politischen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen abhängig. Im Rahmen dieses Vorhabens wurden Hintergrundanalysen durchgeführt, um die ökobilanzielle Datenbasis zur Berechnung der Umweltwirkungen weiter zu verbessern und um ggf. auch nicht quantifizierbare Umweltwirkungen besser einordnen zu können.

Folgende Hintergrundanalysen werden nachfolgend dokumentiert:

- ▶ Kapitel 3.1 Entwicklung in der Halbleiterindustrie
- ▶ Kapitel 3.2 Orientierende Ökobilanzen für IKT-Komponenten
- ▶ Kapitel 3.3 Kritische Metalle in IKT-Komponenten
- ▶ Kapitel 3.4 Entwicklung des Energie- und Ressourcenbedarfs von Rechenzentren
- ▶ Kapitel 3.5 Energiebedarf von Telekommunikationsnetzen und Datenübertragung

3.1 Entwicklung in der Halbleiterindustrie

3.1.1 Globale Randbedingungen der Technologieentwicklung

Die technische Bereitstellung des prognostizierten Bedarfs an Rechen- und Speicherkapazität in Cloud-Rechenzentren (vgl. u.a. Cisco 2019) ist auf das engste verbunden mit der Technologieentwicklung der Halbleiter- bzw. Mikroelektronikindustrie. Es ist diese Industrie, welche in den vergangenen Jahrzehnten kontinuierlich und in relativ festen periodischen Abständen die Leistungsparameter von Computern, Speichersystemen und Netzwerktechnik verbesserte. In diesem Zusammenhang sind zunächst die Namen Moore und Dennard zu erwähnen.

Der Wissenschaftler Gordon E. Moore hat die zeitliche Entwicklung der physikalischen Miniaturisierung von Halbleiter-Transistoren und damit die Steigerung der Rechenleistung untersucht. Er prognostizierte im Jahr 1965, das sich die Anzahl der Transistoren pro Chip etwa alle 24 Monate bei konstanten Kosten verdoppelt. Robert H. Dennard formulierte im Jahr 1974 in Anlehnung an Moore eine andere Skalierungstheorie. Sie besagt, dass die elektrische Leistungsdichte² bei kleiner werdenden Transistoren konstant bleibt und mit der Taktfrequenz skaliert.

Beide Paradigmen sind aktuell nicht mehr zutreffend. Mit zunehmender Miniaturisierung, d.h. aktuell Strukturgrößen von weit unter 20nm, wirken sich die verwendeten Materialien deutlich stärker auf die elektrischen Eigenschaften aus. Bei Strukturgrößen unter 10nm treten Effekte wie spontane Elektromigration auf, also Materialtransport durch die Bewegung von Ionen. Bei höheren Frequenzen treten zum Beispiel Leckströme auf, d. h. unerwünschte Stromflüsse nebeneinanderliegender Leiterbahnen durch kapazitive Effekte oder Materialverunreinigungen, was die Zuverlässigkeit reduziert. Die hohe elektrische Leistungsdichte erzeugt aber insbesondere thermische Probleme. Die sichere Entwärmung ungleichmäßig ausgelasteter Mehrkernprozessoren kann mit einem konventionellen thermischen Management nicht gewährleistet

² elektrische Leistungsdichte gibt an, viel Leistung in Watt pro Flächeneinheit umgesetzt wird.

werden. Vor diesem Hintergrund regelt eine Automatik die Auslastung des Prozessors so, dass ein zuverlässiger Betrieb gewährleistet bleibt. Schlussendlich wird damit aber die potentielle Rechenkapazität der CPU nur anteilig genutzt. Die ungenutzten Transistoren werden *Dark Silicon* genannt.

Des Weiteren steigen die Technologieentwicklungs- und Fertigungskosten. Neben der Lithographie sind auch Softwareentwicklungskosten ein Hauptfaktor, warum sich die Kosten pro Chipfläche mit immer kleineren Strukturen (Technology Nodes) vervielfachen. Der Preis pro Transistor sinkt jedoch nicht so stark wie die Zunahme an Transistoren pro Fläche, weswegen insgesamt der Preis pro Chipfläche steigt.

Vor diesem Hintergrund werden neben der monolithischen Miniaturisierung und 3D Strukturierung (More Moore) seit einigen Jahren auch neue, heterogene Technologien der Systemintegration (More Than Moore) entwickelt. Diese beinhalten den Aufbau nebeneinander und übereinanderliegender Multichip-Systeme, die durch neuartige Umverdrahtungsebenen mit einander verbunden werden. Neben rein elektrischen Verbindungen werden auch elektro-optische Technologien zur Verschaltung von Chip und Leiterplatte seit geraumer Zeit erforscht.

Die langfristige Entwicklung grundsätzlich neuer Computer z.B. auf Basis der Quantenphysik werden als *Beyond Moore* bezeichnet.

Die International Roadmap for Devices and Systems 2017 (IRDS) ist eine Aktivität der Institute of Electrical and Electronics Engineers Standards Association (IEEE-SA). Sie repräsentiert die globale Mikroelektronikindustrie und ist damit wesentliches Instrument der Technologieentwicklung. Die aktuellen Roadmaps beschreiben wesentliche technische Entwicklungen, quantifizieren Technologieziele und diskutieren Herausforderungen dabei. Die IRDS fokussiert sowohl auf die Komponentenebene als auch auf produkt- und systembezogenen Entwicklungen, wie beispielsweise die Ausstattungsanforderungen künftiger Rechenzentren (IRDS Roadmap 2017).

Einen besseren Überblick aktueller Technologietrends auf der Ebene der Systemkonfiguration, d.h. der Konfiguration von Server, Speicher, und Netzwerkelementen im Rechenzentren, lieferte die Konferenz Intels Data Centric Innovation Summit, die im August 2018 stattfand (Intel 2018).

Im Folgenden werden wesentliche Techniktrends sowohl auf Komponentenebenen als auch auf Konfigurationsebenen strukturiert erfasst und kurz skizziert.

3.1.2 Trends auf Komponentenebene

3.1.2.1 Von flächiger Miniaturisierung (2D) zu vertikalen (3D) Strukturen

Technologien zur Realisierung von *More Moore*. Primäre Techniktrends sind:

- ▶ Rippen- (Finnen-) Feldeffekttransistor (FinFET): Hierbei handelt es sich um einen nicht-planaren (vertikalen) Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor (MOSFET). Diese Architektur realisiert bessere elektrische Eigenschaften ohne parasitäre Effekte. Vorteile sind demnach ein vergrößerter Kanalbereich, kürzere Schaltzeiten und geringere Leckströme. Er ist ab 22nm Technologie für CPUs eingeführt, für die Umsetzung sind allerdings Low k Materialien (Materialien mit einer niedrigen Dielektrizitätskonstante) nötig.³
- ▶ 3D (vertikale) NAND: Hierbei werden die Speicherzellen vertikal übereinandergestapelt. Durch die vertikale Stapelung verkürzen sich die Verbindungen zwischen den Speicherzellen. Die Speichergeschwindigkeit wird dadurch erhöht und der elektrische Energieverbrauch

³ 22nm Technologie wurde im Jahr 2012, 14nm (2014) und 10nm (2017) eingeführt. Die aktuelle 7nm Technologie wurde erstmals im Jahr 2020 gefertigt.

reduziert. Die Lagenzahl steigt von aktuell 64 auf mehr als 100 Lagen. Die Lagendicke muss reduziert werden, damit die vertikale Kontaktierung (Through Silicon Vias) nicht zu lang wird. Insbesondere das thermische Management muss bei dieser Größenskalierung im Konzept beachtet werden, außerdem müssen Höhenbegrenzung der Baustandards eingehalten werden. Probleme der Verformungen, welche schon bei 2D-NAND bekannt sind, vergrößern sich.

3.1.2.2 Von Monolithischer Integration (System-on-Chip) zu heterogener Multi-Chip Integration (System-in-Package)

Technologien im Kontext *More Than Moore*. Technologietrends sind u.a.:

- ▶ Embedded Multi-Die Interconnect Bridge (EMIB) von Intel (Produktbezeichnung StratiX): Für Server-Prozessoren entwickeltes System-in-Package (SiP), welches die steigenden Anforderungen an schnelle Interconnects und Skalierbarkeit von Rechenleistung unterstützt. Die Technologie basiert auf einem eingebetteten Silizium-Interposer, welcher bis zu vier ICs (CPU-Kerne, DRAM, FPGA) verbindet. Das System beinhaltet einen sehr breitbandigen Kommunikationsbus mit bis zu 1.024 Bit.
- ▶ Chiplet (AMD): Das Chiplets-Konzept ist ein Multi-Chip-Package, welches mehrere kleine ICs (Funktionsblöcke wie Prozessor, RAM oder Controller) auf einem großen Silizium-Interposer miteinander verschaltet. Dabei ist dieser Interposer nicht wie üblich passiv, sondern kann wie ein *Field Programmable Gate Array* (FPGA) programmiert werden und damit aktive Funktionen übernehmen. Vorteile dieses Aufbaus ist die hohe Modularität, welche in der Produktion die Möglichkeit zu Austausch defekter Funktionsblöcke erlaubt und damit die Gesamtausbeute steigert.

3.1.2.3 Neue Materialien und Komponenten

Die Forschung ist natürlich immer noch versucht, für Anwendungen möglichst Materialien zu finden, die deren Anforderungen möglichst gut erfüllen. Trends sind:

- ▶ Low K Dielektrika: Materialien mit niedrigen Dielektrizitätskonstanten könnten zukünftig aufgrund ihrer guten Eigenschaften als Isolator vermehrt in ICs verwendet werden. Bei der Auswahl der Materialien sollte auch die Eignung für das thermische Management beachtet werden. Bei steigender Lagenzahl wächst auch die Bedeutung einer guten Isolierung.
- ▶ Magnetische Speicher: In ersten Prototypen wie Ferroelectric Random Access Memory (FeRAM) werden die Zustände nicht in herkömmlichen MOSFETS, sondern im Magnetfeld auf Kondensatoren geschrieben. Bei Magnetoresistive Random Access Memory (MRAM) werden die Zustände im magnetischen Feld zwischen den Polen gespeichert. Die Miniaturisierung dieser Technologie ist allerdings sehr ineffizient und muss weiter erforscht werden.
- ▶ Memristor: In dieser Speicherzellenart werden Zustände in unterschiedlichen Niveaus des Widerstands definiert. Sie sind kleiner und sparsamer als MOSFETs. Erste Prototypen können bis zu 92 Zustände in einer Zelle annehmen und 6,5 Bits darstellen. Verwendet wird die Technologie im Prototyp „The Machine“ von HP Enterprises.
- ▶ Germanium, Gallium, Indium, Arsen und Antimon werden als Dotierungselemente weiterhin an Bedeutung innerhalb der Halbleiterindustrie gewinnen.
- ▶ Aufgrund der steigenden Elektromigration bei kleineren Strukturgrößen werden beim Aufbau von Umverdrahtungslagen (Redistribution Layer im Chip Package) Barrierschichten

aus Kobalt oder anderen Materialien auf den Kupfer- oder Aluminiumbahnen abgeschieden werden müssen.

3.1.2.4 Thermisches Design und Zuverlässigkeit

Durch eine Miniaturisierung bei konstanter Energiedichte muss zwangsweise die Abführung der entstehenden Wärme verbessert werden. Ansonsten kann es zu Schäden am Chip selbst oder den verwendeten Strukturen kommen. Trends sind:

- ▶ Begrenzung der CPU-Taktung: Aufgrund einer begrenzten Energiedichte ist die CPU-Taktung auf max. 4,2 GHz begrenzt. Erreichen dieser Grenze ist für das Jahr 2033 prognostiziert.
- ▶ Flüssigkeitskühlung: Hierbei wird die CPU nicht mit Luft durch einen herkömmlichen Lüfter, sondern durch den indirekten Kontakt mit einem flüssigen Kühlmittel gekühlt. Die Vorteile gegenüber einer herkömmlichen Kühlung sind eine bessere Abführung der Wärme und reduzierte Geräuschemissionen.
- ▶ Chip-integrierte Kühlung: Es gibt erste Konzepte, bei der Kühlmittel nicht auf den Chip, sondern auch durch den Chip geleitet werden sollen, um eine verbesserte Kühlung zu gewährleisten. Allerdings benötigen sie einen hohen Druck, da diese Kühlkanäle im Chip sehr klein sind.

3.1.3 Trends auf Konfigurationsebene

3.1.3.1 Skalierbare Prozessoren mit dezidierten Beschleunigern

Neben den technologischen Trends, die auf Basis von Hardware und Materialzusammensetzung eine Lösung für den steigenden Bedarf an Rechen- und Speicherkapazität verfolgen, stehen ebenso softwarebasierte Technologien zur Verfügung. Mit Software-definierte Ressourcenallokation können Prozessorkerne besser ausgelastet werden, Trends sind:

- ▶ Compute Pools: Skalierbare Prozessoren mit Optane™ DC persistenten Speicher. Die Optane-Technologie von Intel ist eine Art nichtflüchtiger Speicher, der fast so schnell ist wie ein flüchtiger Arbeitsspeicher (DRAM) und auch die Fähigkeit hat, Daten auch bei ausgeschalteter Stromversorgung noch zu speichern.
- ▶ Accelerator Pools: Field Programmable Gate Array (FPGA) ist ein programmierbarer integrierter Schaltkreis (IC). FPGAs sind Beschleuniger, die Standardfunktionen erfüllen und auch selbstlernend sich dem funktionalen Bedarf der CPU anpassen. Mit FPGA lassen sich hochkomplexe Verknüpfungen zwischen Speicher-Pool und Mikroprozessoren herstellen und programmierbar machen. Sie haben einen hohen I/O Durchsatz und Tausende paralleler Prozessoreinheiten. FPGA sollen in 16nm, 10nm und 7nm Technologie produziert werden.
- ▶ CPU: Die Anzahl der Kerne in den CPUs werden in den nächsten Jahren weiter steigen. Der Energieverbrauch pro Kern wird dabei jedoch aufgrund der konstanten Energiedichte sinken müssen. So wird sich die Zahl der Kerne pro Steckplatz laut der Prognose in den nächsten 10 Jahren verfünffachen.

3.1.3.2 Hierarchische und skalierbare Speicherarchitektur

Cloud Computing Rechenzentren benötigen insbesondere schnelle Speicherzugriffe bei gleichzeitig hoher Speicherkapazität. Der Speicher bzw. Zwischenspeicherbedarf wächst, um hohe Datenmengen zu verarbeiten und mit niedriger Latenz bereitzustellen. Technisch muss daher ein fließender Übergang von flüchtigem zu nichtflüchtigem Speicher realisiert werden.

- ▶ **Persistent Memory:** Optane DC ist ein gut skalierbarer Speicher. Die Module sind DDR4 und DDR5 Pin kompatibel und in den Speichergrößen von 128, 256 und 512 GB Modulen erhältlich. Sie bieten eine Hardwareverschlüsselung und stellen mithilfe von Machine Learning häufig frequentierte Daten schneller zur Verfügung. Als ein neuer Produkttyp sollen sie den Übergang zwischen, HDD/SSD und RAM überbrücken.
- ▶ **Storage Class Memory (SCM):** Man unterscheidet bei diesem Speicher, der sich aus einer Mischung von volatilen und non-volatilen-Speicher zusammensetzt, zwischen Storage-type und Memory-type SCM, der je nach Konfiguration näher am DRAM und der CPU oder am Storage in SSD und HDD gelegen ist. Intel Optane ist hierbei ein gutes Beispiel für M-SCM-Speicher.
- ▶ **SSD Accelerator:** Spezielle Software und FPGAs ermöglichen einen höchst latenzarmen und parallelen Speicherzugriff.

3.1.3.3 Intelligente und durchgängig optische Netze

Um Speicher- und Compute-Pools optimal zu nutzen, sind schnellere, breitbandigere Netzwerklösungen nötig. Auf Komponentenebene werden bereits 100GE (Gigabit Ethernet) Anschlüsse realisiert. Laut Intel wird im Rechenzentrum der Bedarf an Switchen um Faktor 15 und bei optischen Transceivern⁴ um den Faktor 30 zunehmen. Trends sind:

- ▶ **Silicon Photonics:** Durch die Übertragung von Signalen auf Glasfaserkabeln bis nahe an die CPU heran, erhöht sich die Geschwindigkeit der Übertragung erheblich, da nun die elektrische Wegstrecke auf der Leiterplattenebene noch weiter verkürzt wird. Erste Transceiver für die Übermittlung der Lasersignale sind bereits erhältlich. Dadurch müssen die empfangenen Signale nicht erst in langsamere elektrische Signale übersetzt werden, sondern werden stattdessen gleich als optische Signale weitergeleitet. Die Geschwindigkeit beträgt hierbei laut Intel momentan bis zu 100 Gbps, in Zukunft wird mit bis zu 400 Gbps gerechnet.
- ▶ **Ethernet NICs:** Der Trend geht momentan in die Richtung, Schnittstellen wie SATA und PCIe durch den günstigeren Ethernet-Standard zu ersetzen. Die Signale müssen nur über Netzwerkkarten (NIC) umgewandelt werden, um übermittelt zu werden. So wird ein einheitlicher Standard zur Übertragung innerhalb des RZs geschaffen und eine verbesserte Modularität wird gewährleistet.

3.1.3.4 Software-Defined Networks und Virtualisierung

Nicht nur bessere Technologien, sondern auch die effizientere Nutzung der bestehenden Technik ist ein Thema der Verarbeitung und Speicherung der Daten in den nächsten Jahren. Folgende Trends werden hierbei beobachtet:

- ▶ **Software-Defined Networks (SDN):** In sogenannten Softwaredefinierten Netzwerken wird zwischen zwei logischen Ebenen unterschieden, der Data Plane und der Control Plane. Data Plane stellt die Anwendungs- und Datenebene und Control Plane ist für das korrekte Weiterleiten des Signals verantwortlich. Durch das Zusammenwirken dieser beiden Ebenen ist eine bessere Auslastung der vorhandenen Hardware möglich, was auch die Betriebskosten, insbesondere den elektrischen Energieaufwand eines solchen Netzwerkes reduziert. Neuere Technik wird bereits von Herstellern als „SDN-fähig“ bezeichnet.

⁴ Ein optischer Transceiver erhält optische Signale aus dem Glasfaserkabel und wandelt diese in elektrische Signale um.

- **Virtualisierung:** Durch eine virtuelle, also software-bedingte Aufteilung, ist eine bessere und effizientere Nutzung der Hardware-Ressourcen möglich. So können auch mehrere freie Kapazitäten verschiedener Netzwerke trotz räumlicher Entfernungen virtuell verbunden und diese als ein Netzwerk genutzt werden.

3.2 Orientierende Ökobilanzen für IKT-Komponenten

Das Sachbilanzmodell sowie die Umweltbewertung des Cloud-Computing in dieser Studie bauen auf den Ergebnissen des Forschungsprojektes „Kennzahlen und Indikatoren für die Beurteilung der Ressourceneffizienz von Rechenzentren und Prüfung der praktischen Anwendbarkeit“ (KPI4DCE) (Schödwell et al. 2018) auf. Schödwell et al. (2018) haben die Unsicherheiten der Modellierung in Bezug auf relevante Annahmen und Datengrundlagen im Forschungsbericht dokumentiert und Empfehlungen für weitere Forschungsarbeiten beschrieben. Aus diesem Grund werden die kritischen Aspekte hinsichtlich der verwendeten Daten und Modelle im Rahmen des vorliegenden Vorhabens analysiert.

Die folgenden Kapitel dienen dazu, die Ergebnisse der KPI4DCE-Studie mittels bestehender Literaturwerte einzuordnen und zu bewerten, und die aktualisierte Datengrundlage für die Modellierung in der vorliegenden Studie zu beschreiben.

3.2.1 Identifizierung umweltrelevanter Komponenten

Bezogen auf die Herstellungsphase sind die umweltrelevanten Komponenten gemäß den eigenen Erfahrungswerten und den Ergebnissen verschiedener Vorstudien (z.B. (Schödwell et al. 2018; Prakash et al. 2016; Peiró und Ardente 2015; Prakash et al. 2012)), insbesondere komplexe Halbleiterbauteile wie CPU, DRAM, SSD und andere ICs auf den Leiterplatten sowie die Leiterplatten selbst.

Während der Nutzungsphase, also dem Betrieb der Rechenzentren, sind aufgrund des hohen Energiebedarfs vor allem die unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV), die Klimatisierung und aber auch die Server und Speichergeräte von besonderem Interesse.

Eine hohe Anzahl an Netzwerkcontrollern oder anderen Bauteilen kann trotz der vergleichsweise geringen Umweltlast der einzelnen Komponenten aufgrund ihrer hohen Gesamtanzahl ebenfalls zu einer nicht zu vernachlässigenden Einflussgröße führen.

Ein wichtiger Faktor für die Umweltrelevanz ist die Langlebigkeit von Komponenten, da diese maßgeblich die Frequenz der Wiederbeschaffung und damit die Anzahl der innerhalb eines bestimmten Zeitraums neu angeschafften Komponenten bestimmt. Durch eine häufige Wiederbeschaffung akkumuliert sich die Umweltlast der jeweiligen Herstellungsphase.

In Vorstudien und Literaturrecherchen (z.B. Schödwell et al. 2018; Prakash et al. 2016; Boyd 2012) hat sich gezeigt, dass sowohl der Transport als auch die Entsorgung (End-of-Life) in ihrer Umweltwirkung im Vergleich zur Herstellungs- und Nutzungsphase vernachlässigbar sind, weshalb Transport und Entsorgung im Folgenden vorerst nicht weiter betrachtet werden. Eine Ausnahme beim Transport ist der Transport von CPUs, Speicherchips und Leiterplatten, da dieser meist per Flugzeug und damit mit einer relevanten Umweltbelastung erfolgt. Dieser Aspekt wird im Folgenden (s. 3.2.3.7) berücksichtigt.

3.2.2 Analyse existierender Ökobilanzdaten

3.2.2.1 Auswertung der Literatur zu Halbleiterbauelementen

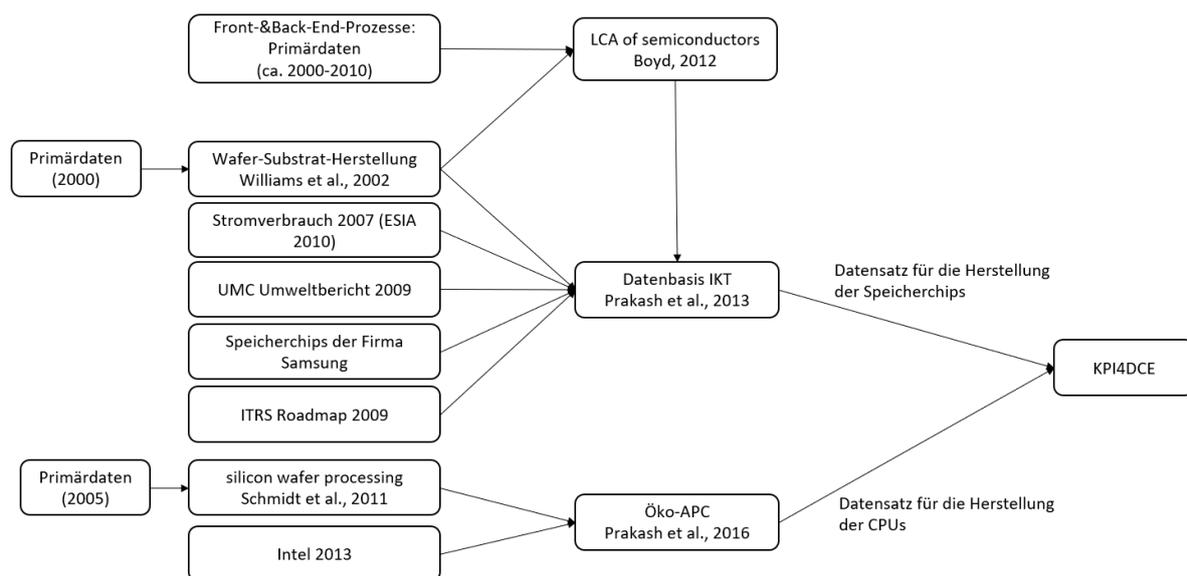
Der größte Teil der Umweltauswirkungen ist auf aktive Halbleiterbauelemente, insbesondere DRAM-Speicherchips, SSD-Speichermedien sowie Prozessoren (CPUs) zurückzuführen. Die umweltseitige Bewertung von Prozessoren (im Folgenden CPU genannt) und Speicherchips sowie

Flash-Chips für SSDs ist ein in den letzten Jahren in Fachkreisen zunehmend diskutiertes Thema. Die außerordentlich hohe Komplexität der Fertigung, schnelle Entwicklungszyklen und eine geringe Verfügbarkeit aktueller und transparenter Daten erschweren eine genaue Ökobilanzierung der Halbleiterfertigung. Nachfolgend ist eine Auswahl der für diese Studie relevanten Literaturquellen aufgezeigt:

- Williams et al. (2002): 1.7 kg microchip
E. D. Williams, Ru.U. Ayres, and M. Heller. The 1.7 kilogram microchip: Energy and material use in the production of semiconductor devices. *Environmental Science and Technology*, 36(24):5504–5510, 2002
- Schmidt et al. (2011): silicon wafer processing
M. Schmidt, H. Hottenroth, M. Schottler, G. Fetzer, and B. Schlüter. Life cycle assessment of silicon wafer processing for microelectronic and solar cells. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 17:126–144, 2012, published online: 8 December 2011
- Boyd (2012): LCA of semiconductors
S. B. Boyd. *Life-Cycle Assessment of Semiconductors*. Springer Science+Business Media, New York, 2012
- Prakash et al. (2013): Datenbasis IKT
S. Prakash, R. Liu, K. Schischke, L. Stobbe. Schaffung einer Datenbasis zur Ermittlung ökologischer Wirkungen der Produkte der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) (UBA TEXTE 82/2013), Umweltbundesamt (Hrsg.) Dessau-Roßlau, 2013
- Prakash et al. (2016): Öko-APC
S. Prakash, F. Antony, Dr. A. R. Köhler, R. Liu. Ökologische und ökonomische Aspekte beim Vergleich von Arbeitsplatzcomputern für den Einsatz in Behörden unter Einbeziehung des Nutzerverhaltens (Öko-APC). Umweltbundesamt (Hrsg.) Dessau-Roßlau, 2016
- Schödwell et al. (2018): KPI4DCE
B. Schödwell, Prof. Dr. R. Zarnekow, R. Liu, J. Gröger. Kennzahlen und Indikatoren für die Beurteilung der Ressourceneffizienz von Rechenzentren und Prüfung der praktischen Anwendbarkeit. Umweltbundesamt (Hrsg.) Dessau-Roßlau, 2018

Die folgende Abbildung 9 stellt den Zusammenhang zwischen den Literaturquellen dar.

Abbildung 9: Bezugnahme der Literaturquellen zur Bilanzierung von Halbleiterbauelementen



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut und Fraunhofer IZM

Dabei wird ersichtlich, dass sich die Produktionsdaten für die Wafer-Substrat-Herstellung häufig aus der Studie von Williams et al. (2002) und Schmidt et al. (2011) aus den Jahren 2000 und 2005 stammen. Die Produktionsdaten für die Herstellung des Wafer-Substrats sind somit nicht mehr auf dem neusten Stand. Laut Prakash et al. (2013) ist auch der Datensatz von Williams et al. (2002), der von Boyd (2012) zur Berechnung der Umweltwirkungen der Wafer-Herstellung verwendet wurde, mittlerweile veraltet und kann somit nicht mehr verwendet werden. Zudem ist die Berechnung der „wafer energy“ in Abhängigkeit von der Ausbeute der einzelnen Prozessschritte nicht nachvollziehbar. Eine eigene Nachrechnung führte zu abweichenden Ergebnissen. Die Studie von Schmidt et al. (2011) wurde zwar 2011 veröffentlicht, allerdings ist als Zeitbezug der Primärdaten das Jahr 2005 angegeben. Der Datensatz von Schmidt et al. (2011) wurde von Prakash et al. (2016) als repräsentativ eingeschätzt und größtenteils für die Bilanzierung übernommen. In der KPI4DCE-Studie (Schödwell et al. 2018) wurde der Datensatz ebenfalls verwendet. Es ist anzumerken, dass der Datensatz vor allem die direkte Wafer-Strukturierung (IC-Herstellung im Front-End) abbildet und die Vorkette (Rohmaterialien, Wafer-Fertigung) sowie das Testen und Packaging nicht berücksichtigt werden. Da Datensätze für hochreine Chemikalien, wie sie in der Wafer-Prozessierung verwendet werden, nicht vorhanden sind, wurden für diesen Datensatz generische Materialien bilanziert, was laut SEMATECH nicht akkurat ist (Prakash et al. 2016).

Das Verhältnis der Umweltwirkung (hinsichtlich GWP) zwischen der Herstellung von Logik- und Speicherchips wird von Schmidt et al. (2011) mit 3:1 angegeben. Dieses Verhältnis ist laut der Einschätzung der Autoren und Autorinnen der Studie eventuell nicht mehr aktuell und sollte daher überprüft werden.

Für den Datensatz von Boyd (2012) wurden zehn Jahre lang (ca. 2000-2010) Primärdaten aus anonymen Quellen innerhalb der Elektronikindustrie gesammelt und sehr detailliert dokumentiert. Die Aktualität dieser Daten sollte geprüft werden, zumal die Herstellung der Wafer auf Williams et al. (2002) basiert und auch hier die Produktion der hochreinen Chemikalien nur bedingt berücksichtigt wurde.

Die für die KPI4DCE-Studie verwendeten spezifischen Datensätze (CPU, RAM-Module, HDD, unbestückte Leiterplatte) stammen aus den jeweiligen Vorstudien des Umweltbundesamtes (Prakash et al. 2013; Prakash et al. 2016) und aus der EuP-Vorstudie Lot 9 und der JRC-Studie (Bio by Deloitte 2015a; Peiró und Ardenete 2015) sowie der Ecoinvent-Datenbank Version 3.2. Die KPI4DCE-Studie (Schödwell et al. 2018) dokumentiert die Unsicherheiten der Modellierung. Ein besonders kritischer Punkt ist, dass die Modellierung der Leiterplatten in Netzteilen auf Basis des ecoinvent-Datensatzes „printed wiring board production, for power supply unit, desktop computer, Pb containing“ erfolgt. Diese Vereinfachung führt zu einem vermutlich überbewerteten Ergebnis des Rohstoffaufwands (ADP) aufgrund der in dem Datensatz enthaltenen Tantal-Kondensatoren. Diese Fehlerquelle wird in der vorliegenden Studie geprüft.

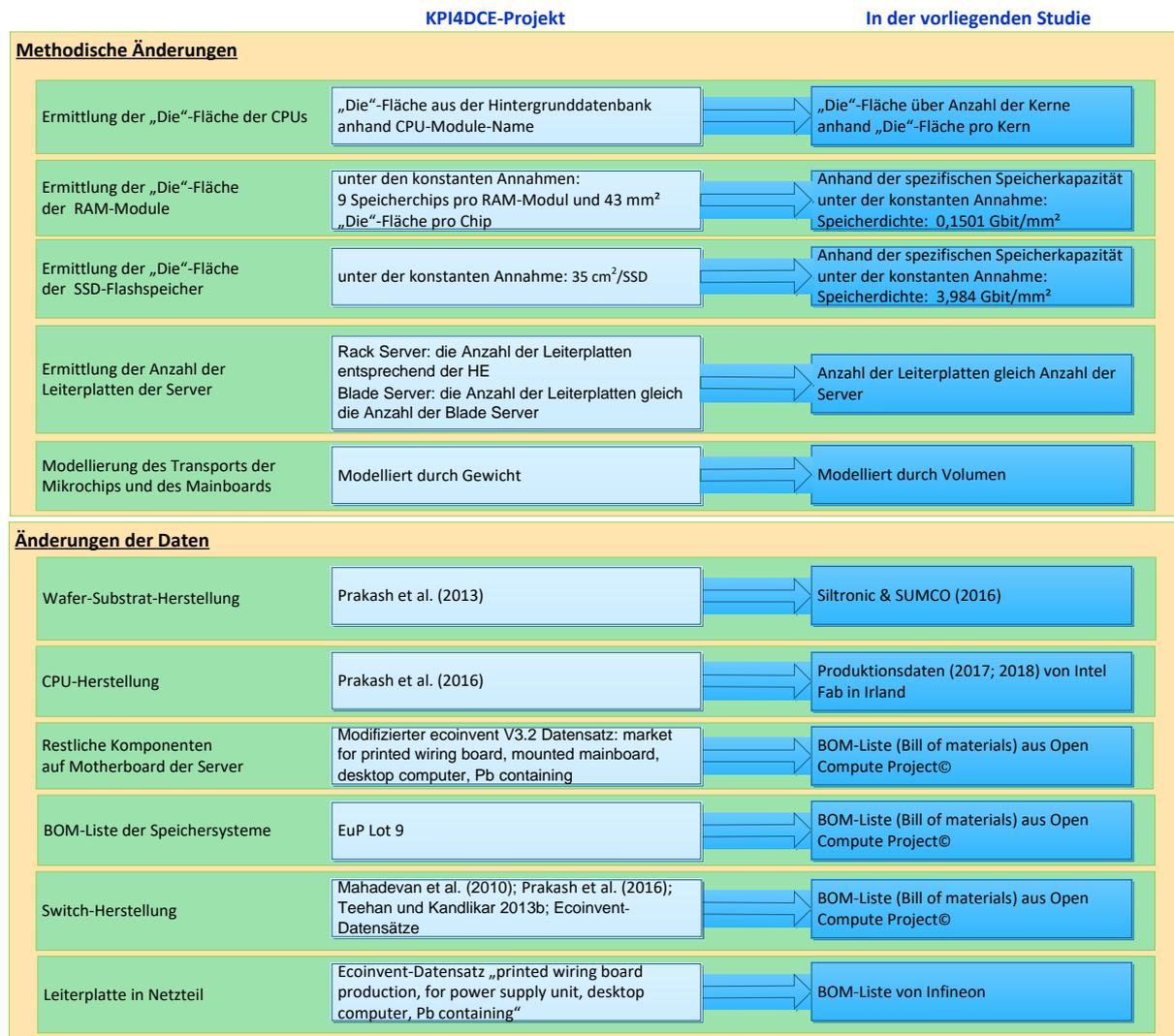
Darüber hinaus sollten die methodischen Ansätze im Hinblick auf die aktuelle technologische Entwicklung und Datengrundlage in dieser vorliegenden Studie im Rahmen der Möglichkeit angepasst werden.

3.2.2.2 Überblick über die Unterschiede der Modellierung zwischen der KPI4DCE-Studie und der vorliegenden Studie

Das Sachbilanzmodell dieser Studie orientiert sich vorwiegend an dem des KPI4DCE-Projekts (Schödwell et al. 2018). Änderungen ergeben sich vor allem in Bezug auf die Modellierung des Prozessors, der bestückten Leiterplatte im Netzteil, der mikroelektronischen Komponenten auf der Hauptplatine und der Skalierung verschiedener Datensätze.

Abbildung 10 veranschaulicht die Änderungen zwischen der KPI4DCE-Studie und der vorliegenden Studie hinsichtlich der Modellierung. Die Änderungen betreffen dabei vor allem zwei Aspekte: methodische Änderungen und die Änderungen der Daten. Methodische Änderungen sind Änderungen, die für die methodische Entscheidung z.B. hinsichtlich der Bezugsgröße oder Skalierungsfaktoren relevant sind. Bei den Änderungen der Daten handelt es sich um eine Aktualisierung der für die Modellierung benötigten Datengrundlage. Die Änderungen betreffen vor allem die umweltrelevanten Komponenten (s. 3.2.1) und die in der KPI4DCE-Studie beschriebenen kritischen Punkte (s. 3.2.2.1). Die genaue Beschreibung der Datengrundlage wird in Abschnitt 3.2.3 dokumentiert. Die genauen Berechnungsschritte zur Ermittlung der Umweltwirkungen (ADP, CED und GWP) und die vom RZ-Betreiber anzugebenden Parametern werden in den Abschnitten B.2 und B.3 erläutert.

Abbildung 10: Darstellung der Unterschiede der Modellierung zwischen dem KPI4DCE-Projekt und der vorliegenden Studie



Quelle: Eigene Darstellung

3.2.3 Aktualisierung der Datengrundlage

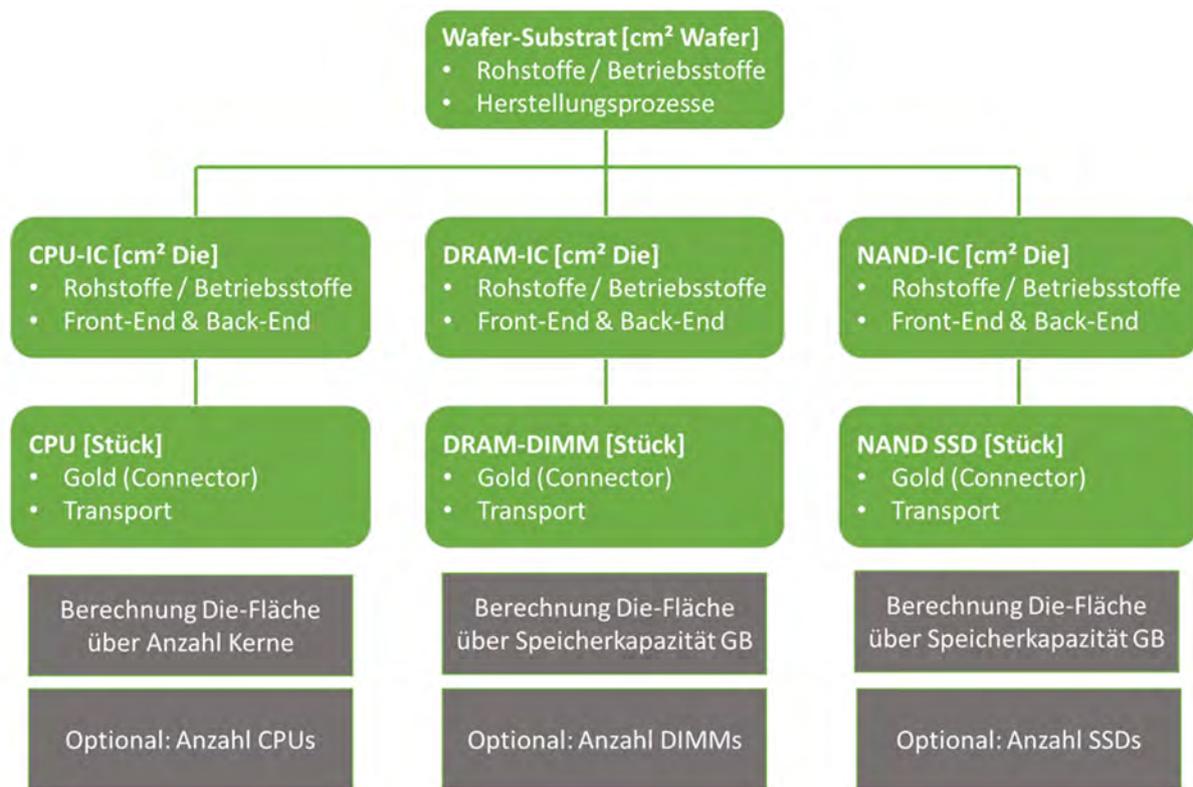
3.2.3.1 Übersicht der Datensätze und des methodischen Vorgehens

Der Handlungsbedarf zur Überarbeitung von Datensätzen ergibt sich aus dem Zusammenspiel von hoher Umweltrelevanz in der Herstellungsphase und geringer Datensatzqualität. Folgende Komponentendatensätze sollten demnach näher geprüft beziehungsweise überarbeitet werden:

- ▶ Halbleiterbauteile
 - CPU
 - RAM
 - SSD
- ▶ Restliche mikroelektronische Komponenten der Server-Mainboards
- ▶ Leiterplatte im Netzteil

Die Abbildung 11 zeigt, welche Datensätze verwendet werden und wie sie zusammenhängen. Das Wafer-Substrat wird für alle drei Halbleiter-Bauteile CPU, RAM und SSD-Flashspeicher (NAND) benötigt. Es werden zusätzliche Datensätze jeweils für die Herstellung der Halbleiter mit der Bezugsgröße pro Kubikzentimeter Chip-Fläche („Die“-Fläche) und der Fertigung der handelbaren Bauteile mit der Bezugsgröße pro Stück benötigt. Diese Datensätze sind in der folgenden Abbildung grün gekennzeichnet. Als graue Kästen ist in der Abbildung dargestellt, wie die weitere bauteilspezifische Berechnung erfolgt. Bei CPUs über die Anzahl der Kerne, beim RAM und den SSD-Speichern über die Speicherkapazität. Zur Berechnung auf der Ebene einzelner Server kommen schließlich noch die Anzahlen der verwendeten Bauteile hinzu.

Abbildung 11: Übersicht der Datensätze und des methodischen Vorgehens



Quelle: Eigene Darstellung Öko-Institut und Fraunhofer IZM

Die folgenden Kapitel dokumentieren nur die Änderungen in der vorliegenden Studie im Vergleich zu den Annahmen in der KPI4DCE-Studie (Schödwell et al. 2018). Die unveränderten Datensätze werden nicht erneut erläutert.

3.2.3.2 Wafer-Substrat-Herstellung

3.2.3.2.1 Bezugsgröße für die Wafer-Substrat-Herstellung

Als Bezugsgröße wird eine Flächeneinheit (cm²) Wafer-Äquivalent (Wafer eq.) gewählt. Obwohl eine Unterscheidung der Herstellung von 200mm und 300mm Wafer-Substraten genauer wäre, lassen die zur Verfügung stehenden Daten eine solche Detaillierung nicht zu.

3.2.3.2.2 Datengrundlage für die Modellierung der Wafer-Substrat-Herstellung

Für die Modellierung der Wafer-Substrat-Herstellung in der vorliegenden Studie wurden Unternehmensdaten von Siltronic und Sumco verwendet (Tabelle 20). Eine detaillierte Beschreibung befindet sich in Anhang C.1

Tabelle 20: Vergleich der Inventare für die Herstellung des Silizium-Wafers

	Flüsse	Siltronic (Tabelle 81)	SUMCO (Tabelle 84)	in der vorliegen- den Studie ^{a)}	Einheit
Marktanteil		15%	28%		
Input	Strom	5,72E-02	6,86E-02	6,46E-02	kWh/cm ²
	Dampf, Wärme	2,57E-02	-	2,57E-02	MJ/cm ²
	Erdgas	1,34E-02	-	1,34E-02	MJ/cm ²
	Heizöl	2,05E-03	1,11E-02	7,92E-03	MJ/cm ²
	Ultrareines Wasser	5,99E-04	4,82E-04	5,23E-04	m ³ /cm ²
	Leitungswasser	-	1,03E-05	1,03E-05	m ³ /cm ²
	Kühlwasser	1,70E-03	-	Nicht berücksich- tigt, da im Kreis- lauf geführt	m ³ /cm ²
	Grundwasser	-	1,64E-04	1,64E-04	m ³ /cm ²
	2-Aminoethanol	-	7,08E-07	7,08E-07	kg/cm ²
	lineares Alkylbenzolsulfonat (LAS)	-	8,21E-08	8,21E-08	kg/cm ²
	Eisen(III)-chlorid	-	3,18E-07	3,18E-07	kg/cm ²
	Xylol	-	3,64E-06	3,64E-06	kg/cm ²
	Verbindung mit sechswerti- gem Chrom	-	3,59E-08	3,59E-08	kg/cm ²
	1,2,4-Trimethylbenzol	-	4,10E-06	4,10E-06	kg/cm ²
	Toluol	-	3,64E-07	3,64E-07	kg/cm ²
	Fluorwasserstoff und seine wasserlöslichen Salze	-	3,29E-05	3,29E-05	kg/cm ²
	Poly(oxyethylen)alkylether	-	9,23E-08	9,23E-08	kg/cm ²
	Polyoxyethylennonylphe- nylether	-	2,92E-06	2,92E-06	kg/cm ²
	Silicon Sand	-	-	1,81E-04 ^{b)}	kg/cm ²
Output					
	Wafer-out	1	1	1	cm ²
	direkte Treibhausgasemissio- nen (Scope 1)	1,13E-03	-	1,13E-03	kg CO ₂ e /cm ²
	Xylole	-	6,15E-08	6,15E-08	kg/cm ²
	Toluol	-	5,13E-08	5,13E-08	kg/cm ²

	Flüsse	Siltronic (Tabelle 81)	SUMCO (Tabelle 84)	in der vorliegen- den Studie ^{a)}	Einheit
	Fluorwasserstoff und seine wasserlöslichen Salze	-	2,05E-08	2,05E-08	kg/cm ²

Quelle: Eigene Darstellung; a) Gewichteter Mittelwert nach Marktanteil wird gebildet, wenn Inventar bei beiden Unternehmen vorhanden ist. b) Silizium-Gewicht in 1cm² Wafer-Substrat (775µm Waferdicke): 0,181 Gramm.

Da die Emissionsfaktoren der Strommixe (Treibhausgasemissionen pro Kilowattstunde) länderspezifisch sind, wird der durchschnittliche Strommix in Anlehnung an die weltweite Verteilung der Wafer-Substrat-Herstellung herangezogen. Die Produktionsverteilung nach Ländern wurde gemäß der Darstellung in Tabelle 21 vorgenommen. Bei der weiteren Modellierung wird ein gewichteter Mittelwert der länderspezifischen Emissionsfaktoren berücksichtigt.

Tabelle 21: Produktionsverteilung der Wafer-Substrat-Herstellung nach Ländern

Produktionsverteilung der Wafer-Substrat-Herstellung nach Ländern	Anteil
Japan	59%
Deutschland	15%
Südkorea	10%
Singapur	16%
Summe	100%

Quelle: (Siltronic - Fact Book 2017)

3.2.3.3 Central Processing Unit (CPU)

3.2.3.3.1 Bezugsgröße für die CPU-Herstellung

Der Datensatz hat das Ziel, die material- und herstellungsbezogenen Umweltlasten einer zentralen Prozessoreinheit (CPU) abzubilden, wie sie in Servern in Rechenzentren eingesetzt werden. Die Herstellung umfasst drei prinzipielle Schritte (Wafer-Substrat-Herstellung; CPU-Front-End; CPU-Back-End) und wird daher aus drei Datensätzen bestehen, die addiert werden. Zusätzlich wird die Gold-Menge zur Beschichtung der Anschlussdrähte der CPUs und des CPU-Sockels abgeschätzt. Die Bezugsgröße ändert sich von einer flächenbezogenen Angabe (pro cm²) zu einer stückbezogenen Angabe (pro CPU). Das erfordert eine Skalierung der flächenbezogenen Angaben anhand von technischen Parametern auf die Stückangabe (s. B.2.1.1). Der Datensatz besteht aus vier Berechnungsbestandteilen:

- ▶ Wafer-Substrat-Herstellung (s. 3.2.3.2, cm² Wafer)
- ▶ CPU Front-End-Prozesse (s. 3.2.3.3.2.1, cm² Die)
- ▶ CPU Back-End-Prozesse (s. 3.2.3.3.2.2, cm² Die)
- ▶ Gold-Menge (s. 3.2.3.3.2.3, Stück CPU)

3.2.3.3.2 Datengrundlage für die Modellierung der CPU-Herstellung

Bezüglich der potentiellen Umweltlast einer CPU wirken sich verschiedene technische Aspekte teilweise gegenläufig aus. Die flächenmäßige Abmessung der CPU wird beispielsweise sowohl

von der Komplexität (z.B. Anzahl der Kerne, Cache, I/O) als auch der Technologiegeneration (z.B. 22nm, 14nm, 10nm und bald 7nm minimale Strukturbreite) bestimmt. Mit jeder neuen Technologiegeneration müssen feinere Strukturen (leitende und nichtleitende) abgeschieden werden. Der Materialmix des gesamten Systems nimmt zu, unter anderem aufgrund der Notwendigkeit einer Barrierschicht aus z.B. Nickel zur Vermeidung von Migrationseffekten der Kupferleiterbahnen. Daten zu real eingesetzten Materialien und deren Verbrauch sind nicht öffentlich verfügbar, da Details zu diesen Technologien von den Chip-Herstellern meist geheim gehalten werden.

Bekannt ist, dass die Anzahl der Fertigungsschritte zunimmt. Die semiadditiv aufzubauenden 3D-Strukturen (z.B. aktuelle finFETs) erfordern mehr Maskenschritte, chemisch-mechanische Planarisierungs- und Reinigungsprozesse etc. Bei 600 bis 1000 Prozessschritten verlängern sich teilweise die Durchlaufzeiten (Cycle Time) der Wafer in der Fabrik (Fab). Durchschnittlich werden nur 1 bis 1,5 Maskenlagen pro Tag gefertigt. Experten geben an, dass aktuelle 14nm/10nm-Komponenten etwa aus 60 Lagen bestehen und künftige 7nm-Komponenten über 80 bis 85 Lagen verfügen.⁵ Dies bedeutet, dass für ein hohes Produktionsvolumen, die Fertigungskapazität, d.h. der Maschinenpark und die Fab-Infrastrukturen, mit der Anzahl der Lagen skalieren muss. Die durchschnittliche Fertigungskapazität eines Reinraums einer modernen Fab zur Herstellung von Logik-Komponenten (z.B. CPUs) wird mit 30.000 bis 50.000 Wafern pro Monat angenommen.

Vor diesem Hintergrund sind die umweltbezogenen Daten aus Umweltmanagementberichten von Unternehmen kritisch zu reflektieren. Entscheidend sind möglichst genaue Angaben zu Art, Umfang und Technologie der in einer Halbleiterfabrik (Fab) hergestellten Produkte.

Der in diesem Projekt neu erstellte Datensatz basiert auf publizierten Umweltberichten der Firma Intel. Auf der Webseite „exploreintel“ (<https://exploreintel.com/>) werden umweltrelevante Informationen quartalsweise publiziert. Diese beinhalten:

- ▶ Wasserbedarf und Wassereinsparung
- ▶ Ungefährliche und gefährliche Abfälle
- ▶ Elektrischer Energiebedarf und Energieeinsparungen
- ▶ Luftemissionen inkl. GWP, VOC, HAP, NO_x, CO

Zusätzlich zu diesen stetig aktualisierten Informationen für alle Intel Fabs weltweit einschließlich IC-Herstellung (Front-End), Aufbau- und Verbindungstechnik (Assembly / Packaging) und Test (Testing), wurde durch Intel für die Fab 24 in Leixlip, Irland, eine Umweltbewertung nach ISO 14001 für das Jahr 2016 vorgenommen und der vollständige Bericht veröffentlicht (Intel Ireland 2017).

3.2.3.3.2.1 *Front-End-Prozesse*

Die von Intel Ireland bereitgestellten Umweltinformationen stammen aus den Jahren 2016 und 2017. Sie sind somit vergleichsweise aktuell und beziehen sich auf eine moderne Halbleiterfertigung (300 mm Wafer, 14 nm Technologie). Zudem werden an diesem Standort unter anderem die in einem Großteil aller Server verbauten Intel Xeon-Prozessoren gefertigt. Als Orientierung wurden Intel XEON-CPU's gewählt, da Intel aktuell (2018) rund 80 % Marktanteil in diesem Produktsegment verzeichnet.

⁵ <https://semiengineering.com/battling-fab-cycle-times/> (Stand: 12.11.2018)

Die Spezifikation des Prozessor-Werks in Irland ist in Tabelle 23 dargestellt.

Tabelle 22: Spezifikation des Prozessor-Werks in Irland

Standort	Leixlip, Irland
Produkte	Atom, Celeron, Pentium, Core, Xeon
Wafer-Durchmesser	300 mm
Generation	14 nm
Zertifizierung	ISO 14001
Absatzvolumen [€/a]	880.000.000
Kommentar	hoher Umweltstandard des Standortes möglicherweise nicht repräsentativ für andere Fabs

Quelle: Eigene Darstellung

Die Daten für den Front-End-Prozess basieren auf Intels Prozessor-Werk in Irland (s. Tabelle 23). Eine detaillierte Beschreibung der Berechnungswege ist in Anhang C.2.1 enthalten.

Tabelle 23: Inventar für Front-End-Prozesse der CPUs in der vorliegenden Studie

	Flüsse	in der vorliegenden Studie	Einheit
Input	Silizium-Wafer-Substrat (mit Verlust)	1,33E+00	cm ² /cm ² good die out
	Strom	1,75E+00	kWh/cm ² good die out
	Erdgas	4,14E-01	kWh/cm ² good die out
	Wasser (öffentliche Wasserversorgung)	1,31E-02	m ³ /cm ² good die out
	Chemikalien (Solvent)	1,29E-02	kg/cm ² good die out
Output	"good die out"	1,00E+00	cm ² /cm ² good die out
	Ammonia (NH ₃)	2,21E-06	kg/cm ² good die out
	Carbon monoxide (CO)	3,49E-06	kg/cm ² good die out
	Nitrogen oxides (NO _x /NO ₂)	5,07E-05	kg/cm ² good die out
	Chlorine and inorganic compounds (as HCl)	6,06E-07	kg/cm ² good die out
	Hydro-fluorocarbons (HFCs): trifluoromethane (CHF ₃) als konkrete HFCs	1,84E-07	kg/cm ² good die out
	Nitrous oxide (N ₂ O)	1,81E-04	kg/cm ² good die out
	Sulphur hexafluoride (SF ₆)	1,82E-07	kg/cm ² good die out

	Flüsse	in der vorliegenden Studie	Einheit
	Perfluorocarbons (PFCs): Stickstofftrifluorid (NF ₃) als konkrete PFCs	1,06E-05	kg/cm ² good die out
	Carbon dioxide (CO ₂)	9,09E-02	kg/cm ² good die out
	Non-methane volatile organic compounds (NMVOCs)	8,91E-05	kg/cm ² good die out
	Fluorine and inorganic compounds (as HF)	6,78E-06	kg/cm ² good die out

Quelle: Eigene Darstellung aus (Intel Ireland 2017)

Analog zur Wafer-Substrat-Herstellung (vgl. 3.2.3.2.2) wird für den Front-End-Prozess zur Herstellung der Intel-CPUs ein gewichteter Mittelwert der länderspezifischen Emissionsfaktoren berücksichtigt. Die Verteilung der Produktionsmengen nach Land ist in Tabelle 24 dokumentiert.

Tabelle 24: Produktionsverteilung der Front-End-Prozesse für die Intel-CPUs nach Ländern

Länder (Intel)	Anteil
USA	68%
Israel	14%
Irland	18%
Summe	100%

Quelle: Eigene Einschätzung nach jährlich produzierten „Die“-Flächen

3.2.3.3.2 Back-End-Prozesse

Die Back-End-Prozesse von Intel finden ausschließlich in Asien statt, wobei die Testphase teilweise auch in den Fertigungsstätten durchgeführt wird. Die Ausbeute der Back-End-Prozesse liegt bei 90 %.

Leider wurden von Intel nur Ergebnisse der Back-End-Prozesse zu Treibhausgaspotenzial (GWP), Primärenergiebedarf (CED) und Wasserverbrauch veröffentlicht (s. Tabelle 88 in Anhang C.2.2) und nicht das Inventar der Prozesse. Um den Stromverbrauch in den jeweiligen Ländern daraus zu berechnen, wurden die GWP-Emissionsfaktoren der länderspezifischen Strommixe nach IPCC 2013 zugrunde gelegt (Berechnungsschritte s. Anhang C.2.2).

Tabelle 25: Inventar für die Back-End-Prozesse der CPUs in der vorliegenden Studie

	Flüsse	in der vorliegenden Studie	Einheit
Input	Die-In aus den Front-End-Fabs (mit Verlusten)	1,11E+00	cm ² /cm ² good die out
	Strom	2,04E-01	kWh/cm ² good die out
	Wasser	1,42E-03	m ³ /cm ² good die out
Output	Good-Die-Out	1,00E+00	cm ² /cm ² good die out

Quelle: Eigene Darstellung und Berechnung auf Basis von Intel Report (Intel Ireland 2017)

Analog zur Wafer-Substrat-Herstellung (vgl. 3.2.3.2.2) wird für den Front-End-Prozess zur Herstellung der Intel-CPU's ein gewichteter Mittelwert der länderspezifischen Emissionsfaktoren berücksichtigt. Die Verteilung der Produktionsmengen nach Land ist in Tabelle 26 dokumentiert.

Tabelle 26: Produktionsverteilung der Back-End-Prozesse für die Intel-CPU's nach Ländern

Länder (Intel)	Anteil
China	33%
Vietnam	19%
Malaysia	48%
Summe	100%

Quelle: Eigene Einschätzung nach der jährlichen produzierten „Die“-Fläche, s. Tabelle 91

3.2.3.3.2.3 Berechnung der Gold-Menge pro CPU

Der Sockel (FCLGA3647-Sockel) von Intel Xeon Scalable Processor Family hat 3647 Kontakte. Die Goldmenge für CPU-Pins und deren Sockel wird anhand der Anzahl der Kontakte pro Reihe und den Abmessungen der Sockelfläche auf eine Größenordnung von 0,36 g pro Stück CPU berechnet.

3.2.3.3.2.4 Weitere chemische Elemente pro CPU

Prinzipiell wären noch die Halbleiter-Dotierungen zu berücksichtigen. Dotieren bedeutet das Einbringen von Fremdatomen in einen Halbleiterkristall zur gezielten Veränderung der Leitfähigkeit. Zwei der wichtigsten Stoffe, mit denen Silizium dotiert werden kann, sind Bor (3 Valenzelektronen) und Phosphor (5 Valenzelektronen). Es werden jedoch auch andere Materialien wie Aluminium und Indium für 3-wertige Dotierungen sowie Arsen und Antimon für 5-wertige Dotierungen verwendet. Für letztere liegen jedoch keine genauen Mengenangaben vor, weshalb weitere chemische Elemente hier nicht berücksichtigt werden.

3.2.3.4 Arbeitsspeicher (RAM)

3.2.3.4.1 Bezugsgröße für die RAM-Herstellung

Bei der Herstellung der Speicherchips kann zwischen Front-End-Prozesse und Back-End-Prozesse differenziert werden. Die Bezugsgröße für die Front-End-Prozesse und die Back-End-Prozesse ist die „Die“-Fläche der Speicherchips. Speicherchips werden auf einer Leiterplatte (Speicherriegel, RAM-Riegel oder RAM-Modul) verlötet, die ihrerseits vergoldete Kontakte als Anschlussleiste aufweist. Die Gold-Menge wird pro RAM-Riegel berechnet. Die Skalierung der

„Die“-Fläche erfolgt anhand des Speicherplatzes. Die Herleitung der „Die“-Fläche wird in B.2.3.1 dokumentiert.

Die Bezugsgrößen der fünf Berechnungsbestandteile für die RAM-Herstellung umfassen:

- ▶ Wafer-Substrat-Herstellung (s. 3.2.3.2, cm² Wafer)
- ▶ IC Front-End-Prozesse (s. 3.2.3.4.2.1, cm² Die)
- ▶ IC Back-End-Prozesse (s. 3.2.3.4.2.1, cm² Die)
- ▶ Gold-Menge (s. 3.2.3.4.2.2, Stück RAM-Riegel)
- ▶ Fläche der Leiterplatte (s. 3.2.3.4.2.3, Stück RAM-Riegel)

3.2.3.4.2 Datengrundlage für die Modellierung der RAM-Herstellung

Die Datengrundlage für die Wafer-Substrat-Herstellung wurde in der vorliegenden Untersuchung aktualisiert (s. 3.2.3.2). Allerdings konnte aufgrund mangelnder Daten und Unklarheiten bei den Datenbezügen in den Veröffentlichungen (UMC CSR 2018; SK hynix 2017; Micron 2018) keine Aktualisierung der Produktionsdaten für die Speicherchipherstellung durchgeführt werden. Somit gelten weiterhin die Produktionsdaten für Speicherchips gemäß Prakash et al. (2013) wie im vorangegangenen KPI4DCE-Projekt (Schödwell et al. 2018).

3.2.3.4.2.1 Front-End- und Back-End-Prozesse

Die Inventardaten für die Speicherchip-Herstellung wurden bereits im KPI4DCE-Bericht (Schödwell et al. 2018) ausführlich dokumentiert.

Auf einem RAM-Modul bei Servern gibt es neben den 8 Bits eines Bytes noch einen zusätzlichen Chip als Paritätsbit oder als Controllerchip. Das Paritätsbit (engl.: parity bit) dient als Paritätskontrolle zur Überprüfung von Übertragungsfehlern oder Speicherdefekten. Deshalb muss die „Die“-Fläche der zusätzlichen ICs in der Modellierung ebenfalls berücksichtigt werden. Es wurde vereinfacht angenommen, dass die Anzahl der weiteren ICs (Paritätsbit und Controller) 6 Stück und „Die“-Fläche pro Chip durchschnittlich 50 mm² beträgt. Eine beispielhafte Berechnung für die Ermittlung der gesamten „Die“-Fläche eines RAM-Riegels wird in C.3.1 dargestellt.

Zur Berechnung des durchschnittlichen Emissionsfaktors für die Stromerzeugung wurde auch hier der Anteil an der Gesamtproduktion der jeweiligen Standorte angesetzt. Die Produktionsverteilung der Front-End-Prozesse ist in Tabelle 27 dokumentiert. Die Produktionsverteilung der Back-End-Prozesse konnte aufgrund mangelnder Daten nicht aktualisiert werden und entspricht somit weiterhin den im KPI4DCE-Projekt (Prakash et al. 2013) ursprünglich veröffentlichten Daten und ist in Tabelle 28 dokumentiert.

Tabelle 27: Produktionsverteilung der Front-End-Prozesse für die IC-Herstellung nach Ländern

Produktionsverteilung der Front-End-Prozesse nach Ländern	Anteil
Südkorea	26%
Taiwan	24%
Japan	18%
Nordamerika	12%
China	9%

Produktionsverteilung der Front-End-Prozesse nach Ländern	Anteil
Europe	3%
Rest of World	8%
Summe	100%

Quelle: Statista⁶

Tabelle 28: Produktionsverteilung der Back-End-Prozesse für die IC-Herstellung nach Ländern

Produktionsverteilung der Back-End-Prozesse nach Ländern	Anteil
USA	10%
Japan	10%
Korea	10%
Taiwan	15%
China	15%
Singapur	15%
Malaysia	15%
Philippinen	10%
Summe	100%

Quelle: Prakash et al. 2013

3.2.3.4.2.2 Berechnung der Gold-Menge pro RAM-Modul

Die Datengrundlage für die Berechnung der Goldmengen zur Beschichtung der Kontakte des RAM-Moduls ist in Tabelle 29 dargestellt.

Tabelle 29: Referenz-RAM-Modul und Ermittlung der Gold-Menge pro RAM-Modul

Hersteller	Wert	Quelle
Name des Moduls	Micron DDR4 SDRAM NVRDIMM	
Anzahl der Pins	288	(Micron 2017)
Goldoberfläche	760 mm ²	gemessen
Goldschichtdicke	2 µm	geschätzt
Dichte Gold	19,32 g/cm ³	
Goldmenge	29,35 mg	berechnet

Quelle: Eigene Darstellung

⁶ <https://www.statista.com/statistics/784660/worldwide-semiconductor-monthly-installed-capacity-share-region/> (Stand: 13.11.2018)

3.2.3.4.2.3 Fläche der Leiterplatte eines RAM-Moduls

Zur Ermittlung der Leitplattenfläche wurde vereinfacht angenommen, dass ein RAM-Modul der Bauart DDR4 der Firma Micron mit 288 Anschlusskontakten verwendet wurde. Tabelle 30 listet die Spezifikation und physischen Abmessungen dieses RAM-Moduls auf. Die Leiterplattfläche eines RAM-Moduls wird für die weiteren Berechnungen mit 42cm^2 angenommen.

Tabelle 30: Referenz-RAM-Modul und Ermittlung der Leiterplattfläche pro RAM-Riegel

Hersteller	Micron
Name des Moduls	DDR4 SDRAM NVRDIMM
Gewicht des Moduls	ca. 25 g
Speicherkapazität des Moduls	16 GB
Höhe des Moduls	31,25 mm
PCB-Länge	133,48 mm
PCB-Breite	31,40 mm
PCB-Fläche	4.191 mm^2 (Länge x Breite)
PCB-Fläche	42 cm^2 (Annahme für weitere Berechnungen)

Quelle: Eigene Darstellung nach Micron 2017

3.2.3.5 Solid State Drives (SSD-Festplatten)

3.2.3.5.1 Bezugsgröße für NAND-Herstellung

Solid State Drives (SSD-Festplatten) werden in der sogenannten NAND-Technik gefertigt. Der Begriff NAND bezieht sich dabei auf die Logikbausteine NOT (Inverter) und AND (Und-Verknüpfung), aus denen die einzelnen Speicherzellen zusammengesetzt sind. Die aktuelle Technologiegeneration ist 3D-NAND. Die übereinander liegenden Layer (Schichten) sind in einem dreidimensionalen (3D) Aufbau vertikal miteinander verbunden. Toshiba und Western Digital haben im Jahr 2018 in Japan mit der Massenfertigung von SSD-Festplatten in der Technologie 3D-NAND mit 96 Layern begonnen (Günsch 2018).

Die Bezugsgrößen der fünf Bestandteile für die Berechnung der Herstellung von SSD-Festplatten umfassen:

- ▶ Wafer-Substrat-Herstellung (s. 3.2.3.2, cm^2 Wafer)
- ▶ NAND Front-End-Prozesse (gleiche Berechnung wie bei RAM, s. 3.2.3.4.2.1, cm^2 Die)
- ▶ NAND Back-End-Prozesse (gleiche Berechnung wie bei RAM, s. 3.2.3.4.2.1, cm^2 Die)
- ▶ Gold-Menge (s. 3.2.3.5.2, Stück SSD)

3.2.3.5.2 Datengrundlage für die Modellierung der Herstellung der NAND-Flashspeicher

Hinsichtlich der Modellierung des Herstellungsaufwands für NAND-Flashspeicher wurde die gleiche Produktion wie bei RAM-Speicherchips angenommen. Allerdings wird die „Die“-Fläche pro SSD anhand der Speicherdichte hochgerechnet, so dass sich die „Die“-Fläche anhand der Speicherkapazität der eingesetzten SSDs berechnen lässt. Der Skalierungsfaktor ist in Abschnitt B.2.4.1 dokumentiert.

Die Datengrundlage für die Berechnung der Goldmenge der Kontakte der SSD- Festplatten ist in Tabelle 31 dargestellt.

Tabelle 31: Ermittlung der Gold-Menge pro SSD-Festplatte

Hersteller	Wert	Quelle
Goldfläche	170 mm ²	gemessen
Goldschichtdicke	2 µm	geschätzt
Dichte Gold	19,32 g/cm ³	
Goldmenge	6,58 mg	berechnet

Quelle: Eigene Darstellung

3.2.3.6 Unbestückte Leiterplatte

3.2.3.6.1 Bezugsgröße für unbestückte Leiterplatte

Die Bezugsgröße des Datensatzes ist ein Quadratmeter unbestückte Leiterplatte. Dabei beziehen sich alle Flüsse des Referenzprodukts auf die Bezugsgröße Quadratmeter (m²).

3.2.3.6.2 Datengrundlage für die Modellierung der Herstellung der unbestückten Leiterplatte

Der Datensatz für die Herstellung der unbestückten Leiterplatte stammt aus einem Datensatz, der vom Öko-Institut für die UBA-Datenbank „Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente (ProBas)“ erstellt wurde (Prakash et al. 2016; Schödwell et al. 2018). Der Datensatz entspricht einer FR4-Multilayer-Leiterplatte mit sechs Lagen und einem Ni-Au-Oberflächenfinish, die jedoch nicht mehr der aktuellen Technik für Server in Rechenzentren entspricht. Die Lagenanzahl und die Fläche der Leiterplatte entsprechend der aktuellen Server-Produkte, wurden somit recherchiert und in Tabelle 32 dargestellt, obwohl die Herstellungsdaten der unbestückten Leiterplatte in der vorliegenden Studie unverändert verwendet wurden. Die Lagenanzahl der Mainboards in Servern liegt zurzeit bei acht oder mehr Lagen. Aufgrund fehlender Daten zu diesen neueren Technologien und den damit verbundenen Unsicherheiten wurde jedoch keine Skalierung (beispielsweise anhand der Lagenanzahl) vorgenommen.

Tabelle 32: Exemplarische Mainboards der Server mit ihrer Lagenanzahl

Mainboard-Typen	Einführungsdatum	Anzahl der Lagen	Mainboard-Format	Fläche (cm ²)	Quelle
Facebook Server Tigo Pass – Intel Mainboard	Q3'2016	14	6.5"x20"	839	(Zhao und Ning 2017)
Microsoft Server Olympus Mainboard	-	8	-	-	(Shaw 2017)

Mainboard-Typen	Einführungsdatum	Anzahl der Lagen	Mainboard-Format	Fläche (cm ²)	Quelle
JRC-Studie und EuP-Studie	k.A.	6	-	1680	(Peiró und Ardente 2015)
Intel® Server Board S2600BPB / S2600BPS / S2600BPQ - Buchanan Pass	Q3'2017	k.A.	Custom 6.8" x 19.1"	838	(ARK Intel 2018)
Intel® Server Board S2600STB / S2600STQ - Sawtooth	Q3'2017	k.A.	SSI EEB 12" x 13"	1006	
Intel® Server Board S2600WFO / S2600WFT - Wolf Pass	Q3'2017	k.A.	Custom 16.7" x 17"	1832	
Intel® Server Board S7200APR - Adams Pass	Q1'2018	k.A.	Custom 6.8" x 14.2"	623	

Quelle: Eigene Darstellung

3.2.3.7 Transport der Mikrochips und des Mainboards

3.2.3.7.1 Bezugsgröße für den Transport

Die Bezugsgröße für den Transport ist eine Volumeneinheit. Eine auf dem Gewicht basierende Bezugsgröße wäre in diesem Fall nicht sinnvoll, da die Mikrochips ein vergleichsweise kleines Gewicht aufweisen, das sich für eine Skalierung des Transportaufwandes nicht eignet.

3.2.3.7.2 Datengrundlage für den Transport

Der Transport der Chips umfasst folgende Abschnitte:

- ▶ von der Wafer-Substrat-Herstellung zum Front-End-Prozess
- ▶ vom Front-End- zum Back-End-Prozess

Die Produktionsstandorte sind über die ganze Welt verteilt und liegen vor allem in China. Im Rahmen dieser Studie ist es nicht möglich, die komplette Logistikkette zu erfassen. Daher wird pauschal von einer Entfernung von 10.000 km und einem Transport per Flugzeug ausgegangen. Die Entfernung für die Leiterplatte beruht auf den Angaben der KPI4DCE-Studie (Tabelle 33).

Die Rohwafer werden als je 25 Stück in Verpackungen mit den Abmessungen 33,28 x 33,69 x 41,54 cm verschickt (Entegris 2019). Daraus ergibt sich ein Verpackungsvolumen von 2,64 cm³ pro cm² Waferfläche. Die Chips werden erst im Back-End-Prozess einzeln verpackt und zum Montagestandort transportiert. Danach ergibt sich ein durchschnittliches Verpackungsvolumen von 161 cm³ pro CPU bzw. 1415 cm³ pro RAM-Modul. Die Volumenangabe wurde auf Grundlage der Abmessungsinformationen von einer Handelsplattform (Alibaba 2019b; 2019a) berechnet.

Tabelle 33: Annahme der Transportwege der Mikrochips und Leiterplatte

Komponente	Transportmittel	Entfernung	Verpackungsvolumen	Quelle
Rohwafer bis zum Back-End-Standort	Flugzeug	20.000 km umfasst <ul style="list-style-type: none"> • Wafer-Substrat-Standort –Front-End-Standort: 10.000 km und • Front-End-Standort – Back-End-Standort: 10.000 km 	2,64 cm ³ pro cm ² Waferfläche	(Entegris 2019)
			- Für CPU: 287 Stück „Dies“ per 300 mm wafer (706,86 mm ²)	Durchschnittliche Werte auf Basis von Tabelle 65
			- Für RAM-Riegel: 17 cm ² / Riegel	Annahme: - 32 GB Speicherkapazität / RAM-Riegel - Speicherdichte: 1,875 GByte/cm ² (s. Tabelle 66)
			- Für NAND: 20,1 cm ² / SSD	Annahme: -1TB Speicherkapazität / SSD - Speicherdichte: 49,8 GByte/cm ² (s. Tabelle 67)
Prozessor	Flugzeug	10.000 km (fertige CPUs nach Montagestandort)	161 cm ³ pro CPU	(Alibaba 2019b)
RAM	Flugzeug	10.000 km (fertige RAMs nach Montagestandort)	1.415 cm ³ pro RAM-Riegel	(Alibaba 2019a)
NAND	Flugzeug	10.000 km (fertige NAND nach Montagestandort)	210 cm ³ pro Stück SSD	(Samsung 2016)
Mainboard	Flugzeug	10.000 km (vom Produktionsstandort nach Montagestandort)	3.618 cm ³ pro Stück	Eigene Annahme

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

3.2.3.8 Restliche Komponenten auf Mainboard der Server

3.2.3.8.1 Bezugsgröße für die restlichen mikroelektronischen Komponenten auf Server-Mainboards

Bei den restlichen Komponenten handelt es sich um andere mikroelektronische Komponenten ohne CPU und RAM. Die Bezugsgröße des Datensatzes ist ein Stück Leiterplatte.

3.2.3.8.2 Datengrundlage für die Modellierung der Herstellung der restlichen Komponenten auf Mainboard der Server

Als Referenzmainboard für Server wurde ein Facebook-Server mit einem Intel Motherboard V4.0 zugrunde gelegt. Dieser Server wurde als nutzungsoffene offene Hardware entwickelt, weshalb er besonders gut dokumentiert ist. Der Herstellungsaufwand wurde auf Basis einer

Veröffentlichung im Rahmen eines Open Compute-Projektes⁷ einer BOM-Liste eines Mainboards (QCT Rackgo X Tioga Pass) modelliert. Die veröffentlichte BOM-Liste (Open Compute Projekt© 2017) beinhaltet alle mikroelektronischen Komponenten mit Stückzahl und entsprechenden Typen, allerdings ohne Gewichts- bzw. Flächenangabe. Aus dieser BOM-Liste wurde ein vereinfachtes Inventar mit eigenen Annahmen zum Gewicht entwickelt (Tabelle 34).

Tabelle 34: Vereinfachte BOM-Liste eines Motherboards für Server

Mikroelektronische Komponenten	Anzahl ^{a)}	Wert pro Stück ^{b)}	Summe
Kondensator	1695	0,02 g	33,9 g
Diode	25	0,008 g	0,2 g
Inductor	37	0,0021 g	0,0777 g
Widerstände	1618	0,0014 g	2,2652 g
Transistor	65	0,3204 g	20,826 g
ICs	140	3 mm ² Die-Fläche ^{c)}	420 mm ²

Quelle: Eigene Darstellung. a) (Open Compute Projekt© 2017); b) eigene Einschätzung, Ecoinvent Datenbank, (AVX 2012); c) Annahme: Fläche der Gehäuse pro Stück liegt bei 30 mm², 10 % davon sind die „Die“-Fläche.

3.2.3.9 Restliche Komponenten der Server

In Tabelle 35 und Tabelle 36 sind die für die Modellierung zugrunde liegenden restlichen Komponenten eines Rack Server- und Bladeserversystems aufgeführt, auf denen die Modellierung basiert. Die Werte sind die gleichen wie in der KPI4DCE-Studie und stammen aus der EuP-Studie Lot 9 (Bio by Deloitte 2015a). Der Stromverbrauch in der Herstellungsphase für Montage und Tests wurde von (Peiró und Ardente 2015) mit 6,5 Kilowattstunden (kWhel) pro Server angegeben. Dieser Wert wurde in der vorliegenden Studie mit dem chinesischen Strommix modelliert. Die Materialienzusammensetzung der Komponenten ist in der KPI4DC-Studie (Schödwell et al. 2018) ausführlich dokumentiert und wird hier nicht noch einmal beschrieben.

Tabelle 35: Restliche Komponenten eines Rack Servers

Komponente / engl. Bezeichnung in (Bio by Deloitte 2015a)	Gewicht in Gramm	Anteil in %
Gehäuse / Chassis	13.454	87,08%
4 Lüfter / 4 Fans	946	6,12%
Optisches Laufwerk / ODD	189	1,22%
Erweiterungskarte / Expansion Card	349	2,26%
Kabel / Cables	470	3,04%
Li-Ion Batterie (nach (Peiró und Ardente 2015))	43	0,28%
Summe	15.451	100%

Quelle: Eigene Darstellung nach Bio by Deloitte 2015b und Peiró und Ardente 2015

⁷ Open Compute Projekt© (OCP) ist eine Initiative von Facebook <https://www.opencompute.org/>. Mitglieder umfasst viele berühmte IT-Unternehmen und Unternehmen für Infrastruktur in Rechenzentren wie VMware, Microsoft, Intel, HP, Google, Dell, Schneider Electric und auch die Komponentenhersteller wie z.B. Wiwynn und Quanta. Das Ziel des Projektes ist es, zu einem besseren Design und einer besseren Entwicklung von Rechenzentren beizutragen und auch die Interoperabilität der Hardware in Rechenzentren zu erhöhen. Somit wurden viele Dokumente über Hardware auf einer OCP –Plattform veröffentlicht.

Tabelle 36: Restliche Komponenten eines Blade Systems mit 16 Blade Server Modulen

Komponente auf Deutsch / Bezeichnung in (Bio by Deloitte 2015a) auf Englisch	Gewicht in Gramm	Anteil
Servergehäuse (16 Einbauplätze)/ enclosure (16 slots)		
Gehäuse / Chassis	87.000	92 %
Lüfter / Fans	2.361	2 %
zwei Leiterplatten: eine Mittelplatine (engl.: midplane) und eine Rückplatine (engl.: backplane).	5.343	6%
Blade Server Module		
Gehäuse / Chassis für 8 Servers	33.600	100 %

Quelle: Eigene Darstellung nach Bio by Deloitte 2015b

3.2.3.10 Datenspeichersysteme

3.2.3.10.1 Bezugsgröße für die Storage-Herstellung

Je nach individueller Konfiguration der Speichersysteme variieren Anzahl und Typ der Speichermedien und Anzahl der Netzteile. Daher wurde die Modellierung der Herstellung der Speichersysteme auf 3 Berechnungsbestandteile aufgeteilt, so dass die Netzbetreiber die Speichermedien und Netzteile spezifisch angeben können und somit ihre Umweltwirkungen separat berechnet werden können. Die 3 Berechnungsbestandteile umfassen somit 3 unterschiedliche Bezugsgrößen:

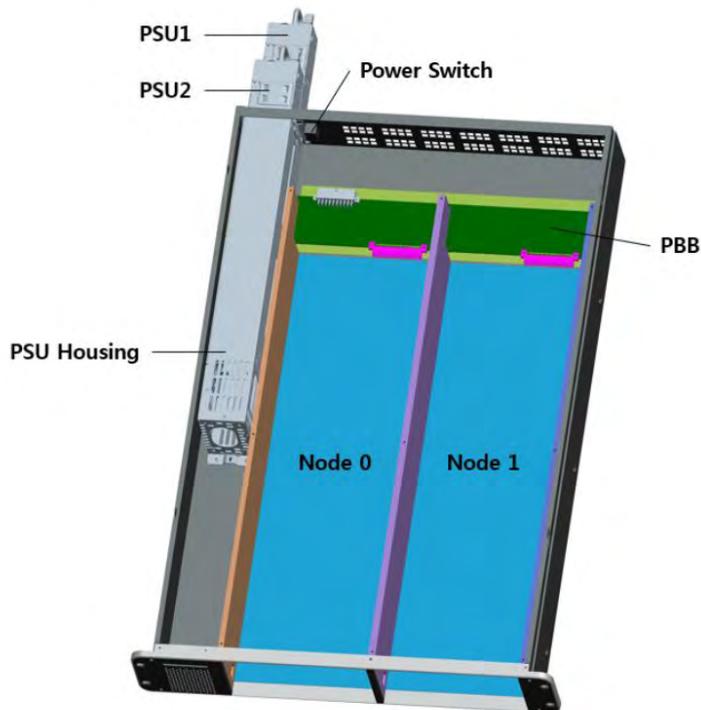
- ▶ Speichermedien: Speicherkapazität NAND-Flashspeicher für SSD (siehe Kapitel 3.2.3.5) und Anzahl der SSDs; Anzahl der HDDs
- ▶ Netzteile: Gewicht der Netzteile (siehe Kapitel 3.2.3.12)
- ▶ Die restlichen Komponenten (pro Speichersystem mit 32 Stück SSD/HDD, siehe Kapitel 3.2.3.10.2)

3.2.3.10.2 Datengrundlage für die Modellierung der Storage-Herstellung

Das Referenzspeichersystem stammt aus einem All-Flash Storage Server (SCube AF-Media) von dem südkoreanischen Unternehmen SK Telekom. Das Modell bietet zwei Möglichkeiten von Speichermedien an: max. 16 2,5“ SATA SSDs oder 2 NVMe SSD Add-in Speicherkarte. In der vorliegenden Studie wurde die Konfiguration mit SATA SSDs in der Modellierung betrachtet.

SCube AF-Media ist ein 19“ Speichersystem mit einer Dimension von 438 mm (Breite) x 88 mm (Höhe) x 700 mm (Länge). Das Speichersystem bietet Platz für zwei Speicherknoten (englisch: Node), zwei 750 W Netzteile und insg. 4 Belüftungen (s. Abbildung 12).

Abbildung 12: Schematische Abbildung Storage Server (opencompute.org)



Quelle: Direkt entnommen aus (Kim und Chang 2016)

Die Spezifikation des abgebildeten Speichersystems ist in Tabelle 37 aufgelistet.

Tabelle 37: Spezifikation des Referenzspeichersystems von SK Telekom SCube AF-Media

Komponente	Type	Werte bezogen auf das ganz Servergerät (=2 Nodes)	
Chassis	2 RU	1	438 mm (Breite) x 88 mm (Höhe) x 700 mm (Länge)
Nodes	Serverknoten	2	-
Prozessor	Intel Xeon D-1548	2 Stück CPU	Anzahl der Kerne pro CPU: 8 ⁸
RAM-Speicher	(4) DDR4, up to 128 GB pro Node	8 Stück RAM-Riegel	bis zu 128 GB x 2
2,5" 7 mm (Höhe) SSD	16 SATA SSD pro Node	32 Stück SSD	Max. 32 TB
zusätzliche SSD	für das Betriebssystem	1 Stück SSD	64 GB
Motherboard / RAID-Controller	Intel Xeon D SoC	2 Stück	40.285 mm ² pro Motherboard
SSD Support / Drive Plane Board (DPB)	Size: 324,6 mm x 37 mm	2 Stück	12.010 mm ² pro DPB
Server Sled Interface Board	-	2 Stück	21.985 mm ² Pro Leiterplatte

⁸ <https://ark.intel.com/content/www/us/en/ark.html> Scue

Komponente	Type	Werte bezogen auf das ganz Servergerät (=2 Nodes)	
Power Backplane Board (PBB)	Size: 359,8 mm x 60 mm	1 Stück	21.588 mm ²
Netzteile	750 W	2 Stück	2,8 kg (gewogen an einem 700W Netzteil)
Belüftung	2 Stück pro Node	4 Stück	0.95 kg

Quelle: Eigene Darstellung aus (Kim und Chang 2016); (Chang 2016); eigene Annahmen

Die Modellierung der Herstellung der CPU und RAM-Riegel, die separat modelliert wurden, basiert jeweils auf 3.2.3.3 und 3.2.3.4.

Für die Leiterplatten im Referenzspeichersystem wurde die Fläche der Leitplatten angegeben, jedoch nicht das Gewicht. Die orientierende Modellierung der bestückten mikroelektronischen Komponenten auf die Leiterplatten beruht auf der Leiterplatte von PSUs, in denen ebenfalls Motherboard, Controllerboard und Powerboard mit entsprechenden verfügbaren mikroelektronischen Komponenten vorhanden sind. Aufgrund mangelnder Daten war hier eine Vereinfachung erforderlich. Die BOM-Liste der betrachteten mikroelektronischen Komponenten befindet sich im Anhang (s. C.4).

Die Bezugsgröße der Datensätze aus der Ecoinvent-Datenbank der mikroelektronischen Komponenten ist das Gewicht. Um das Gewicht der mikroelektronischen Komponenten auf den jeweiligen Leiterplatten einzuschätzen, wurde das Verhältnis zwischen Fläche und Gewicht der Leiterplatten in PSU als Skalierungsfaktor verwendet. Die Einschätzung des Gewichts der unbestückten Leiterplatte beruht auf der EuP-Annahme, nämlich 4,5 kg pro m² Fläche bei einer Leiterplatte mit 6 Lagen. Tabelle 38 dokumentiert die für die Modellierung zugrunde gelegte Komponentenzusammensetzung.

Tabelle 38: Komponentenzusammensetzung des Speichersystems mit 2 Server-Nodes

Komponente	Wert	Anmerkung
Chassis	17,4 kg	Annahme basiert auf Anteil der Disc Array Enclosures aus der EuP-Vorstudie Lot 9 (Bio by Deloitte 2015a)
Unbestückte Leiterplatten	0,77 kg	Datengrundlage s. 3.2.3.4
Restliche mikroelektronische Komponenten auf Mainboard	Eingeschätzt: 3,90 kg	Datengrundlage s. Tabelle 99
Restliche mikroelektronische Komponenten auf Controllerboard (DPB + Server Sled Interface Board)	Eingeschätzt: 2,78 kg	Datengrundlage s. Tabelle 101
Restliche mikroelektronische Komponenten auf Powerboard	Eingeschätzt: 1,03 kg	Datengrundlage s. Tabelle 100
Belüftung	6 Stück, insg. 0,95 kg (Annahme wie bei Rack-Server)	Datengrundlage KPI4DCE (Schödtwell et al. 2018)
CPU	separat modelliert: 8 Kerne pro Stück, insg. 2 Stück	Datengrundlage s. 3.2.3.3

Komponente	Wert	Anmerkung
CPU-Kühlkörper	separat modelliert: 2 Stück	Datengrundlage KPI4DCE (Schödlwell et al. 2018)
RAM	separat modelliert: 8 Stück, max. 256 GB	Datengrundlage s. 3.2.3.4
SATA SSD und ein zusätzliche SSD für Betriebssystem	separat modelliert: 16 Stück mit max. 32 TB; 1 Stück mit 64GB	Datengrundlage s. 3.2.3.5
PSUs	separat modelliert, 2 Stück unter Annahme zum Gewicht von 2,8 kg	Datengrundlage s. 3.2.3.12

Quelle: Eigene Darstellung aus (Catlin 2018); eigene Annahmen

3.2.3.11 Netzwerk-Switches

3.2.3.11.1 Bezugsgröße für die Switch-Herstellung

Die Bezugsgröße der Switch-Herstellung ist vereinfacht als ein Stück definiert, auch wenn die Netzwerkgeräte in Rechenzentren je nach unterschiedlichen Übertragungsprotokollen und -Medien (Kupferkabel vs. Glasfaserkabel), Typen und Portdichten sehr unterschiedlich sind. Die Vereinfachung resultiert aus mangelnden Daten der verschiedenen Netzwerkswitches sowie einer Reduzierung der Komplexität bei der Datenabfragung für RZ-Betreiber.

3.2.3.11.2 Datengrundlage für die Modellierung der Switch-Herstellung

Ein relativ aktueller Switch Edgecore AS7326-56X (Catlin 2018) wurde als Referenzprodukt angenommen. Der Switch unterstützt 48 SFP28-Ports, 8 QSFP28-Ports und 2 SFP+-Ports für die Netzwerkkonnektivität. Die Spezifikation ist in Tabelle 39 aufgelistet. Tabelle 40 dokumentiert die für die Modellierung zugrunde gelegte Komponentenzusammensetzung.

Tabelle 39: Spezifikation des Referenzswitches von Edgecore AS7326-56X

Komponente	Parameter	Werte
Chassis	1 U Höhe	438,4 mm (Breite) x 43,5 mm (Höhe) x 536 mm (Länge)
Prozessor	1 Stück CPU von Intel Xeon D-1518	Anzahl der Kerne pro CPU: 4
RAM	2 Stück DDR SDRAM, Speicherkapazität: 8 GB / Riegel	Ings. 16 GB
M.2 SSD	1 Stück, 64 GB	42,0 mm x 22,0 mm x 3,5mm
Leiterplatte für CPU-Module	Lagenanzahl: 12	186 mm x 123 mm
Mainboard	Lagenanzahl: 14	418,7 mm x 249 mm
FAN-Board	Lagenanzahl: 4	281,16 mm x 57 mm
Kabelboard	Lagenanzahl: 4	keine Angabe, angenommen gleich wie die bei Fan-board
Netzteile	650 W, 2 Stück	2,8 kg (gewogen mit einem 700W Netzteil)
Belüftung	6 Stück	0,4 kg (Bio by Deloitte 2015a)
Gesamtgewicht	1 Stück	10 kg

Quelle: Eigene Darstellung aus (Catlin 2018); eigene Annahmen

Tabelle 40: Komponentenzusammensetzung des Referenzswitches

Komponente	Wert	Anmerkung	
Gesamtgewicht	10 kg	Tabelle 39	
Gehäuse, Kable und Belüftung	5,39 kg (Annahme: 54% Anteil des gesamten Gewichts)	Datengrundlage: (Schödwell et al. 2018)	
PSUs	separat modelliert, 2 Stück unter Annahme zum Gewicht von 2,8 kg	Datengrundlage s. 3.2.3.12	
bestückte Leiterplatten	1,89 kg	gerechnet	
davon	CPU	separat modelliert: 4 Kerne pro Stück, insg. 1 Stück	Datengrundlage s. 3.2.3.3
	CPU-Kühlkörper	separat modelliert: 1 Stück	Datengrundlage KPI4DCE (Schödwell et al. 2018)
	RAM	separat modelliert: 2 Stück, insg. 16 GB	Datengrundlage s. 3.2.3.4
	SSD	separat modelliert: 1 Stück mit 64GB	Datengrundlage s. 3.2.3.5
	Unbestückte Leiterplatten	1.591,87 cm ²	Datengrundlage s. 3.2.3.4
	Restliche mikroelektronische Komponenten auf Mainboard	1 Stück, orientiert nach Mainboard wie bei Rack-Server (ohne CPU, RAM)	Datengrundlage s. 3.2.3.8

Quelle: Eigene Darstellung aus (Catlin 2018); eigene Annahmen

3.2.3.12 PSU (Power Supply Unit) für Server

3.2.3.12.1 Bezugsgröße für die PSU-Herstellung

Als Bezugsgröße wird eine Gewichtseinheit in kg für die Netzteile festgelegt.

3.2.3.12.2 Datengrundlage für die Modellierung der PSU-Herstellung

Schödwell et al. (2018) haben im Rahmen des „KPI4DCE“-Projekts den Ecoinvent-Datensatz „printed wiring board production, for power supply unit, desktop computer, Pb containing“ zur Modellierung des Herstellungsaufwands der Leiterplatte im Netzteil für Server als Näherung verwendet. Ihre Ergebnisse zeigen, dass Tantal-Kondensatoren auf Netzteilleiterplatten für den Ressourcenverbrauch (ADP-Ergebnis) eine maßgebliche Rolle spielen. In dem Projekt wurde empfohlen, die Bauteile innerhalb eines Server-Netzteils in zukünftigen Untersuchungen nach dem Stand der Technik genauer zu begutachten.

Deshalb wurde dieser Aspekt in der vorliegenden Studie vertieft. Die Untersuchung basiert auf:

- ▶ Demontage eines Server-Netzteils (Fujitsu, PSU 700W) zur Überprüfung der elektronischen Komponenten, insbesondere auf das Vorhandensein von Tantal-Kondensatoren auf der Leiterplatte.
- ▶ Einholung von Experteneinschätzungen.⁹

⁹ Persönliche Mitteilung von Dovile Stanaityte und Klaus Grobe von dem Unternehmen ADVA Optical Networking

- Untersuchung der Komponentenzusammensetzung eines *Evaluation Boards* aus einem Technikbericht von Infineon für ein Server-Netzteil (Titanium, 1600 W) (Kutschak und Herrera 2018).

Zusammenfassend wurde festgestellt, dass keine Tantal-Kondensatoren auf Netzteil-Leiterplatten von Servern eingebaut werden. In der vorliegenden Studie wurde die Herstellung der Leiterplatten auf Basis einer Bauteilliste (BOM-Liste) des Infineon *Evaluation Boards* (Kutschak und Herrera 2018) modelliert.

Kutschak und Herrera (2018) berichten, dass es drei Leiterplatten für ein Evaluation Board eines 1600W-Netzteils gibt, nämlich Mainboard, Powerboard und Controllerboard. Die BOM-Liste der drei Boards umfasst die Anzahl der elektronischen Komponenten (s. Anhang C.4). Für die Modellierung des Herstellungsaufwands wurden die jeweiligen Massen und „Die“-Flächen von zwei Controllerchips geschätzt.

Die prozentuelle Aufteilung der Materialienzusammensetzung für die Modellierung der Netzteile im Rahmen des vorliegenden Vorhabens orientiert sich an KPI4DCE von Peiró und Ardente 2015. Die BOM-Liste der drei Leiterplatten beruht auf Kutschak und Herrera 2018.

Tabelle 41: Materialien- bzw. Komponentenzusammensetzung eines Referenznetzteils

PSU	Wert	Einheit	Quelle	
Gewicht	2	kg	Eigene Einschätzung	
Leistung	1600	Watt	Kutschak und Herrera 2018	
Lebensdauer	6	Jahre		
%Gewichtaufteilung				
	Stahl	39,3	%	Peiró und Ardente 2015
	Aluminium	6,6	%	
	Lüfter	4,5	%	
	Kunststoffe (EVA)	2,2	%	
	Kunststoffe (Polycarbonate)	1,5	%	
	PCB	45,0	%	
	Kabel	0,9	%	

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

3.3 Kritische Metalle in IKT-Komponenten

3.3.1 Kritikalität von Rohstoffen

Die Kritikalität von Rohstoffen kann und wird methodisch sehr unterschiedlich beurteilt. Folgende Ebenen werden in der Forschung unterschieden:

- geologische Verfügbarkeit (Rohstoffreserven)
- sozio-politische Bedingungen entlang der Wertschöpfungskette (Menschenrechte)

- Umweltlasten beim Abbau, der Raffinierung, dem Transport und der Entsorgung
- marktwirtschaftliche Verfügbarkeit bzw. Handelshürden
- steigender Bedarf für Anwendungen aufgrund technischer Entwicklungen
- unzureichende Recyclingraten bzw. Verwendung recycelter Materials

Zur Beurteilung dieser Kritikalität wird eine umfangreiche Datenlage benötigt. Öffentlich verfügbare und meist jährlich aktualisierte Daten zu Reserven, Welthandel, Nutzung, etc. sind folgenden Quellen zu entnehmen:

- ▶ Deutsche Rohstoffagentur (2017)
- ▶ British Geological Survey (2017)
- ▶ United States Geological Survey (2019)

Aufgrund unterschiedlicher verwendeter Daten und Methodiken variieren die Aussagen der oben genannten Berichte bezüglich der Verfügbarkeit bestimmter Rohstoffe. Die ausschließliche Berücksichtigung der geologischen Verfügbarkeit ist unzureichend. Die marktwirtschaftliche Verfügbarkeit, vor allem in Hinblick auf die zunehmende Marktkonzentration (Herfindahl-Index), und insbesondere auch die umweltbezogenen Lasten des Abbaus sind zukünftig verstärkt zu berücksichtigen. Daten zu Letzterem lassen sich der ProBas-Datenbank des Umweltbundesamtes entnehmen. Informationen zu den sozio-politischen Bedingungen in den Ländern, wo die jeweiligen Materialien abgebaut und aufbereitet werden, können beispielsweise mithilfe der World Governance Indicators der Weltbank gewonnen werden. Somit können keine eindeutigen Aussagen hinsichtlich der Kritikalität auf allen oben genannten Ebenen getroffen werden, sondern es muss für jedes Kriterium eine eigene Abschätzung und Interpretation vorgenommen werden.

Die Liste der Critical Raw Materials (CRM) der Europäischen Kommission wird in Intervallen von drei bis vier Jahren aktualisiert (siehe Liste von 2017 Tabelle 42). Hierbei ist festzustellen, dass Anzahl und Art der Rohstoffe fluktuiert. Die Kritikalität wird aufgrund unterschiedlichster Randbedingungen immer wieder neu beurteilt. Beispielsweise ist Gold zwar geologisch und marktwirtschaftlich betrachtet relativ gut verfügbar und insbesondere sehr gut recycelbar, allerdings sind der Abbau und die Aufbereitung sehr energieintensiv und umweltschädlich, besonders bei Verwendung von Cyanid beim Auswaschen. Diese Kritikalität von Gold wird in der CRM-Liste der EU derzeit nicht berücksichtigt ist aber Gegenstand der EU-Verordnung zur Sorgfaltspflicht in der Lieferkette von Zinn, Tantal, Wolfram und Gold. Dieser sogenannten Konfliktminerale sind seit dem Dodd-Frank-Act auch als 3TG bekannt. Tabelle 42 gibt eine Übersicht über die von der EU-Kommission als kritisch eingestuft Rohstoffe (Europäische Kommission, 2020).

Tabelle 42: Die 30 kritischen Rohstoffe für die EU 2020

Kritische Rohstoffe für die EU 2020			
Antimon	Germanium	Natürlicher Grafit	Titan
Baryt	Hafnium	Niob	Wolfram
Bauxit	Indium	Phosphor	Vanadium
Beryllium	Kobalt	Phosphorit	Metalle der Platingruppe
Bismut	Kokskohle	Scandium	Schwere Seltene Erden
Borat	Lithium	Siliziummetall	Leichte Seltene Erden
Flussspat	Magnesium	Strontium	
Gallium	Naturkautschuk	Tantal	

Quelle: Eigene Darstellung nach (Europäische Kommission, 2020)(EU 2017)

3.3.2 Seltene und kritische Rohstoffe in der IKT-Anwendung

Für die Fertigung von elektronischen und opto-elektronischen Komponenten, die in Servern, Datenspeichersystemen und Netzwerktechnik zum Einsatz kommen, werden heute hochwertige und teilweise auch kritische Materialien benötigt. Diese technischen Komponenten, welche die Hardwarebasis der Cloud bilden, unterscheiden sich dabei in der Materialzusammensetzung nur wenig von denen der Endgeräte. Aufgrund des Miniaturisierungszwang kann es bei kleinen Endgeräten (bspw. Notebook, Tablet und Smartphone) zu abweichenden Materialzusammensetzungen kommen (vgl. 3.2.3.12). Integrierte Schaltungen (ICs/Chips) für Prozessoren, Controller, Speicher, Leistungsschalter, Laser oder Verstärker sind prinzipiell gleich. Ebenso die Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT/Packaging), die Leiterplatten und Stecker.

Der Einsatz von seltenen und kritischen Materialien wird daher weniger von der Anwendung als vielmehr vom Miniaturisierungsgrad und den technischen Leistungsparametern bestimmt. Ob es gerechtfertigt ist, anzunehmen¹⁰, dass das IT-Equipment in Cloud-Rechenzentren relativ kurzen Austauschzyklen unterliegt, ist strittig. Eine generelle Aussage dazu kann nicht getroffen werden, denn belastbare Untersuchungen liegen nicht vor.

Die Miniaturisierung der Elektronik in Kombination mit fortschrittlichsten Energiemanagement- und Entwärmungskonzepten sorgen dafür, dass über einen langen Zeitraum immer mehr Rechenleistung und Speicherkapazität in gleichbleibenden Räumlichkeiten realisiert werden.

Im Bereich der Telekommunikationsnetze wird die Technikmodernisierung insbesondere durch die kontinuierliche Verbesserung der spektralen Effizienz angetrieben. Ein wichtiger Trend hierbei ist der Wechsel von der elektrischen zur opto-elektronischen Datenübertragung. Damit werden passive und aktive elektrooptische Komponenten benötigt, die über hohe optische Wirkungsgrade und Schaltfestigkeit verfügen. Die Miniaturisierung und Erhöhung von Schaltfrequenzen erfordert eine zunehmende Materialkomplexität. Die immer kleineren Grenzschichten bzw. funktionalen Materialübergänge müssen stabiler gemacht werden, um Elektromigration und thermische Aktivierungsenergien zu unterdrücken. Kupferleiterbahnen werden beispielsweise mit einer dünnen Nickellage beschichtet. Auch bei den Barriereschichten von Halbleiterbauelementen kommen zunehmend beispielsweise Hafnium oder auch Scandium zum Einsatz.

¹⁰ Konkrete Marktzahlen aus dem B2B-Bereich liegen meist der unternehmerischen Geheimhaltung und lassen sich mittels öffentlicher Quellen nur schwer quantifizieren.

Die Mengen dieser funktionalen Materialien sind pro Komponente sehr gering. Genaue Daten existieren kaum, da Fertigungsprozesse im Bereich der Halbleiterindustrie und generell in der Elektronikfertigung sehr vertraulich sind.

Merchant (2017) und Proske et al. (2016) enthalten Informationen über die Materialzusammensetzung von Smartphones. Da sich diese abgesehen von den verwendeten Mengen nicht wesentlich von der eines Servers oder andere IT-Equipment unterscheidet, ist in Synthese mit den CRM nachfolgend eine Liste mit möglichen Kandidaten für kritische Materialien aufgeführt. Die Auflistung ordnet dem Material typische Anwendungsgebiete zu.

Die Bewertung der Kritikalität einzelner Rohstoffe hinsichtlich umweltrelevanter und sozialer Aspekte wird in dieser Studie nicht gesondert vorgenommen, da ausschließlich Materialien betrachtet werden, die bereits von der EU-Kommission in dieser Hinsicht als kritisch eingestuft wurden (European Commission: List of Critical Raw Materials 2020 (EC, 2020)).

Die Kritikalität wurde jedoch in Bezug auf die Wechselwirkungen zwischen dem Rohstoffabbau und dessen Bedeutung im Cloud-Computing aus folgenden zwei Perspektiven neu bewertet:

1. Relevanz für Cloud-Computing:

Wie relevant ist der Rohstoff für die Herstellung von Komponenten, die zum Betrieb von Cloud-Computing-Anwendungen notwendig sind?

- a) Welche technische Funktion erfüllt der Rohstoff und wie essenziell ist diese?
- b) Für die Herstellung welcher Komponenten wird der Rohstoff benötigt?
- c) Existieren geeignete Substitute und mit welchen Vor- oder Nachteilen wären diese verbunden?

2. Verknappung durch Cloud-Computing:

Wie relevant sind Cloud-Computing-Anwendungen im Vergleich zum Gesamtverbrauch des Rohstoffs?

- a) Welchen Anteil am weltweiten Rohstoffverbrauch haben Cloud-Computing-Anwendungen (bzw. allgemeiner Elektronik/IKT)?

Folgende Rohstoffe wurden qualitativ sowohl bezüglich der Verknappung durch und Relevanz für Cloud-Computing auf einer Skala von 0-3 bewertet, wobei

- ▶ 0 – nicht relevant
- ▶ 1 – wenig relevant
- ▶ 2 – relevant
- ▶ 3 – sehr relevant

Die vollständige Bewertung aller kritischen Rohstoffe aus der Liste der Critical Raw Materials der Europäischen Kommission ist in Tabelle 103 im Anhang zu finden.

Als besonders relevant und demnach kritisch für Cloud-Computing werden nur die Rohstoffe angesehen, die in beiden Kategorien als „relevant“ oder „sehr relevant“ eingeschätzt wurden (Tabelle 43):

Tabelle 43: Für Cloud-Computing relevante kritische Rohstoffe, nach (EC, 2020; USGS, 2020)

Rohstoff	Anwendungen (Cloud-Computing)	Anwendungen (andere)	Aspekte der Kritikalität	Produktionsanteile pro Sektor	Recycling
Gallium (Ga)	Hochfrequenzkomponenten (insb. ICs/ Verstärker), LEDs, Laserdioden (III-V-Halbleiter)	Photovoltaik, Thermometer, Magnete	hohe Marktkonzentration in China; Primärproduktion ausschließlich als Koppelprodukt von Al/Zn; essenziell für Erneuerbare Energien, energieeffiziente Beleuchtung und Elektronikprodukte	70 % ICs ¹¹ 25 % LEDs 5 % PV	nahezu 0 % aus Altgeräten; 60 % aus Waferproduktion ¹²
Germanium (Ge)	Glasfaserleiter	Infraroptik, Polymerisationskatalysator, Photovoltaik	hohe Marktkonzentration in China; Primärproduktion häufig aus Kohlestaub	39 % Glasfaser 23 % Infrarot 31 % Katalysatoren 12 % PV 10 % andere	geringe Mengen aus Altgeräten; 60-100 % aus Produktion von Glasfaser- und Infrarotkomponenten
Silizium (Si)	Integrated Circuits	Photovoltaik, Legierungselement, Herstellung von Farben, Lacken und Silikon	energieintensive (Rück-)Gewinnung von hochreinem Silizium für PV und ICs; wirtschaftliche Relevanz	99 % Reinheit: 50 % Silikon 40 % Aluminium > 99 % Reinheit: 10 % PV und ICs	kein Recycling

Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Wie der Tabelle 43 zu entnehmen sind alle drei aufgeführten Rohstoffe sehr relevant für Cloud-Computing-Anwendungen, insbesondere zur Herstellung von halbleiterbasierten Prozessoren, Speichern und Leistungsverstärkern (Ga, Si) sowie von Glasfaserkabeln (Ge).

Allerdings ist nur im Falle von Ga und Ge der Ressourcenbedarf im Elektroniksektor entscheidend für den Gesamtbedarf. Bei Si überschattet der Bedarf anderer Anwendungen den der Elektronik. Hier muss allerdings unterschieden werden zwischen einem hohen (99 %) und einem sehr hohen (> 99 %) Reinheitsgrad, wobei Letzterer vor allem für die Chipherstellung benötigt wird. Si-Vorkommen, die zur wirtschaftlich sinnvollen Primärproduktion von Si mit diesem Reinheitsgrad geeignet sind, haben derzeit einen geringen Anteil am gesamten Weltmarkt, wodurch die reale Verfügbarkeit für solche Anwendungen knapper ist als es die rein elementbezogenen Vorkommen vermuten lassen. Genaue Zahlen zu den jeweiligen Anteilen werden oftmals nicht separat erfasst.

¹¹ ICs: Integrated Circuits (integrierte Schaltungen); PV: Photovoltaik

¹² Recycling aus Produktion bedeutet, dass Materialverluste im Fertigungsprozess gesammelt und direkt dem Recycling zugeführt werden.

Materialverluste aus Produktionsprozessen werden im Falle von Ga und Ge bereits zu über 60 % recycelt, doch aufgrund der geringen Materialmengen im Endprodukt ist das Recycling von Altgeräten zwar technisch möglich, aber in der Regel nicht wirtschaftlich. Der Anteil von Si in Endgeräten ist im Vergleich zu Ga und Ge zwar wesentlich höher, aber im Vergleich zur Gesamtmasse der Produkte meist nach wie vor gering, weshalb auch hier kein Recycling erfolgt, insbesondere auch aufgrund des hohen benötigten Reinheitsgrads.

In der folgenden Tabelle 44 sind Anwendungen sowie Vor- und Nachteile verschiedener Optionen für Halbleitermaterialien aufgeführt, in denen die oben genannten kritischen und für Cloud-Computing relevanten Rohstoffe verwendet werden.

Tabelle 44: Halbleitermaterialien in unterschiedlichen Komponenten

Materialoptionen		Komponenten	Vorteile	Nachteile
GaAs pHEMT	Galliumarsenid pseudo-morphic high electron mobility transistor	Final stage PA, Pre-Driver and Driver PA, Gain block PA, Low noise amplifier, Switches, Chips, VCSEL	<ul style="list-style-type: none"> • hoher Wirkungsgrad • klein (potenziell preiswerter) • gute Performance (Linearität und Geräuschverhalten) 	<ul style="list-style-type: none"> • für hohe Spannungen und Stromstärken weniger gut geeignet • hoher technischer Aufwand bei der Produktion
GaN HEMT	Galliumnitrid high electron mobility transistor	Final stage PA	<ul style="list-style-type: none"> • gut für hohe Frequenzen (mmWellen) geeignet • gute Performance • hohe Bandbreite • hohe Leistungsdichte • energieeffizient • hohe Elektronenbeweglichkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • hohe Kosten • schlechte Wärmeleitung
LDMOS	Laterally-diffused metal-oxide semiconductor	Final stage PA, Pre-Driver and Driver PA	<ul style="list-style-type: none"> • niedrige Kosten • gute Wärmeleitung • hohe Durchbruchspannung • niedrige Leistung 	<ul style="list-style-type: none"> • nur für niedrige Sub-6 Ghz-Frequenzen geeignet
InGaP HBT	Indiumgalliumphosphid heterojunction bipolar transistor	Pre-Driver and Driver PA, Gain block PA, VCSEL	<ul style="list-style-type: none"> • hohe Elektronenbeweglichkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • niedrige Stromdichte • hohe Kosten
SiGe BiCMOS	Siliciumgermanium bipolar complementary metal-oxide-semiconductor	Gain block PA, Low noise amplifier	<ul style="list-style-type: none"> • niedrige Kosten • gut für hohe Frequenzen (mmWellen) geeignet 	<ul style="list-style-type: none"> • geringe Wärmeleitung
RF-SOI	Radio frequency silicon-on-insulator	Low noise amplifier, Switches, Chips, Antenna tuner	<ul style="list-style-type: none"> • Möglichkeit der Zusammenführung mit Switches 	Ohne Angabe

Materialoptionen		Komponenten	Vorteile	Nachteile
CMOS	Complementary metal-oxide-semiconductor	Power amplifier	<ul style="list-style-type: none"> niedrige Kosten 	<ul style="list-style-type: none"> groß schlechte Performance (Linearität und Wirkungsgrad)
RF-SoS	Radio frequency silicon on sapphire	Switches	<ul style="list-style-type: none"> gut für hohe Frequenzen (mmWellen) geeignet niedrige Kosten 	Ohne Angabe
LiNbO ₃ / Li-TaO ₃	Lithiumniobat / Lithium-tantalat (Keramik)	Filter	<ul style="list-style-type: none"> niedriger akustischer Verlustfaktor 	Ohne Angabe
Y ₃ Fe ₅ O ₁₂	Yttrium-Eisen-Granat	Filter, Phase shifter	Ohne Angabe	Ohne Angabe
BaO ₄ SrTi	Barium-Strontium-Titanat	Phase shifter	Ohne Angabe	Ohne Angabe

Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer IZM nach (Yole Développement, 2019; Chengdu Keylink Microwave Technology Co. Ltd., 2020)

3.3.3 Reduzierung der Kritikalität von Rohstoffen

Es existieren mehrere Optionen zur Reduktion der Kritikalität von Rohstoffen. Ein sparsamer Einsatz der Materialien wäre offensichtlich, ist aber aufgrund des meist hohen funktionalen Nutzens schwer zu realisieren. Produktlebensdauererweiternde Maßnahmen sind ein weiterer Ansatz. Jedoch wird die Reduzierung des Primärrohstoffeinsatzes nur durch ein qualitativ hochwertiges Recycling der kritischen Materialien gelingen. Dieser Ansatz bedarf einiger Grundvoraussetzungen bzw. der Schaffung von flankierenden Randbedingungen.

Was sind die aktuellen Herausforderungen bezüglich des Recyclings?

In den meisten Fällen ist ein Materialrecycling theoretisch möglich, scheitert jedoch an der Wirtschaftlichkeit des Prozesses. Ein wichtiger Aspekt in diesem Zusammenhang ist die Tatsache, dass die meisten kritischen Rohstoffe nur in sehr kleinen Mengen in den einzelnen Produkten (IT-Equipment) vorkommen. Dieser Umstand erfordert zwingend eine Aufkonzentration einzelner Materialien, damit der Recyclingprozess wirtschaftlich tragfähig wird. Darüber hinaus trägt das Design des Produktes erheblich dazu bei, ob die Separierung der Rohstoffe erfolgreich und wirtschaftlich ist. Trotz Elektronikaltgeräteverordnung (WEEE) ist die Sammlung, Vorbehandlung und materialorientierte Separierung von Elektronikschrott unzureichend.

Warum ist ein verbessertes Recycling dennoch die beste Option?

Mit dem Trend zur Verlagerung von substanziellen Anteilen von Rechen- und Speicherkapazität in Rechenzentren (Cloud Computing) erfolgt bereits indirekt eine Aufkonzentration der Materialien. Mit dem Cloud Computing wird die Rechentechnik an einer überschaubaren Anzahl von kommerziell bewirtschafteten Standorten zusammengeführt (gepoolt). Damit besteht gegenüber der hohen und völlig intransparenten Verbreitung bei Endnutzern nun die Möglichkeit, eine gezielte und planbare Rückführung der Geräte in ein Recycling zu organisieren. Damit wird de facto eine Aufkonzentration durch Cloud Rechenzentren unterstützt. Wie bereits angedeutet, hat die Cloud das Potential auch Redundanz beim IT-Equipment abzubauen, und damit die absolute Menge an Rohstoffen zu reduzieren. Die Konzentration des IT-Equipments in einer begrenzten Anzahl von Standorten (das trifft übrigens auch auf den Telekommunikationssektor zu) ist aber der entscheidende Vorteil. Dieser Umstand ermöglicht, eine wirtschaftlich tragfähige Rückführung des genutzten Equipments zu einem Recyclingunternehmen. Mit zunehmenden Volumen

an Altgeräten und in Kombination mit Produktionsrückständen könnten wirtschaftliche Rahmenbedingungen zur Etablierung effektiverer Recyclingprozesse entstehen. Gerade für Gallium, Germanium, Indium und andere funktionale Mineralien wäre eine Rückgewinnung aus dem Cloud Computing Equipment eine sinnvolle Alternative.

3.4 Entwicklung des Energie- und Ressourcenbedarfs von Rechenzentren

3.4.1 Einflussfaktor: Komponenten und Technologieentwicklung

Die kontinuierliche Miniaturisierung und Weiterentwicklung elektronischer Komponenten bildet eine wichtige Grundlage zur Verbesserung der funktionalen Energieeffizienz von Servern, Datenspeicher- und Netzwerktechnik. Jonathan Koomey hat diese Wechselwirkung über einen Zeitraum von etwa 50 Jahren analysiert und die Ergebnisse dieser Untersuchung im Jahr 2010 publiziert.¹³ Koomey zeigte, dass sich die Prozessorrechenleistung pro Joule benötigter Energie bis zum Jahr 2000 alle 1,6 Jahre etwa verdoppelte. Im Zeitraum 2000 bis 2010 verlangsamte sich dieser Trend, sodass die Verdoppelung der Rechenleistung pro Joule etwa alle 2,6 Jahre erfolgte.¹⁴ Eine aktuelle Studie, welche den weiteren Trendverlauf beleuchtet, existiert leider nicht.

3.4.1.1 Trends und technologische Entwicklung elektronischer Komponenten

Allerdings weisen viele technische Entwicklungen darauf hin, dass sich die Energieeffizienz von Prozessoren noch immer etwa alle zwei Jahre verdoppelt. Gordon E. Moore reflektierte bereits frühzeitig die Fähigkeit der Halbleiterindustrie, in regelmäßigen Zeitzyklen immer kleinere Transistoren zu bauen und damit die Rechenleistung periodisch zu verdoppeln.¹⁵ Robert H. Denard beschrieb im gleichen Kontext den Trend, dass die Leistungsdichte der immer kleineren Transistoren konstant bleibt, so dass der Stromverbrauch proportional zur Chipfläche bleibt. Diese regelmäßige Reduzierung der elektrischen Spannung und Stromstärke synchron zur Miniaturisierung des planaren Formfaktors des Transistors endete etwa 2010. Trotz steigender Kosten und zunehmender Leistungsdichte wird die Miniaturisierung der Transistoren fortgesetzt. Die Beurteilung der aktuellen Entwicklung ist aus unterschiedlichen Gründen heterogen. Doch kann durchaus festgestellt werden, dass sich die Strukturgröße der Transistoren noch immer relativ regelmäßig etwa alle 2 Jahre verkleinert, was die im Jahr 2020 industriell realisierte 7nm Technologie demonstriert.¹⁶ Mittelfristig, in den nächsten fünf bis zehn Jahren, wird diese Miniaturisierung der CMOS-Technologie noch weitergehen. Diese wird primär durch eine immer komplexere Verdichtung (3D Designs) der Transistoren und dem Einsatz neuer Materialien realisiert. Des Weiteren wird sich mittels unterschiedlicher Maßnahmen wie beispielsweise Chiplet-Designs, optische Bussysteme oder chipintegrierte Kühlungen die Rechenleistung pro Energieaufwand sicherlich erhöhen. Ein weiterhin hohes Optimierungspotential haben in 3D aufgebaute Datenspeichersysteme wie STT-MRAM (Spin-transfer torque magnetic random-access memory), ReRAM (Resistive random access memory), CBRAM (Conductive Bridging random access memory), FeRAM (Ferroelectric random access memory) und PCM (Phase-change memory). Auch neue hierarchische Speicherarchitekturen in Kombination mit intelligenter Netzwerktechnik tragen durch effektiven Speicherzugriff zur Erhöhung der Auslastung und damit der Energieeffizienz bei. Hinzu kommen softwareseitige Maßnahmen, die insbesondere die

¹³ <https://spectrum.ieee.org/computing/hardware/moores-law-might-be-slowing-down-but-not-energy-efficiency>, Download 2020-11-03

¹⁴ <https://e-fundresearch.com/newscenter/157-aberdeen-standard-investments/artikel/38835-datenzentren-und-klimawandel>, Download 2020-11-03

¹⁵ <https://www.britannica.com/biography/Gordon-Moore>; Download 2020-11-03

¹⁶ <https://semiwiki.com/semiconductor-manufacturers/intel/282325-intel-vs-amd-q4-2019-conference-calls/>; Download 2020-11-02

Auslastung der theoretisch zur Verfügung stehenden Transistoren erhöht und damit das sogenannten Dark Silicon Problem löst.¹⁷

Neben der fortlaufenden Miniaturisierung und den designbedingten Fortschritten in der Prozessor- und Datenspeichertechnik, trägt die Halbleiterindustrie auch im Bereich der Leistungselektronik und Hochfrequenztechnik zur Steigerung der Energieeffizienz bei. Hierbei sind es die Eigenschaften bestimmter Halbleitersysteme wie Galliumnitrid (GaN) oder Siliciumcarbid (SiC), welche die Ladungsträgerdichte im System von HF-Transistoren und Leistungsschaltern in Größenordnung gegenüber konventioneller Siliciummonoxid (SiO)-Systemen (CMOS, Complementary Metal Oxide Semiconductor) erhöhen. Diese Halbleitersysteme lassen auch größere Betriebsspannungen zu, welche die Effizienz von Verstärkern beispielsweise verbessert. Die teilweise hohen Verlustleistungen von Leistungsverstärkern in der Netzwerktechnik und von Leistungselektronik in Netzteilen haben einen sichtbaren Anteil am Energiebedarf von Rechenzentren. Moderne Halbleiterkomponenten sind geeignet, die Verlustleistung und damit auch den Klimatisierungsaufwand im Rechenzentrum zu reduzieren.

3.4.1.2 Auswirkung der Technologieentwicklung auf die Rechenzentren

All diese technischen Entwicklungen zielen darauf ab, die Rechen- und Datenspeicherkapazität pro Flächeneinheit zu erhöhen. Gleichzeitig wird daran gearbeitet, den Energiebedarf nicht übermäßig steigen zu lassen. Klar ist aber, dass die Energiemenge pro Flächeneinheit im Rechenzentrum steigt und durch ein thermisches Management auf Komponenten-, Rack- und Raumebene sicher abgeführt werden muss. Die maximale thermische Auslegung für Prozessoren wird in diesem Zusammenhang mit dem Thermal Design Power -Wert (TDP) in Watt spezifiziert. Der maximale TDP-Wert für konventionelle Prozessoren (CPU) im Rechenzentrumseinsatz war bis etwa 2017 relativ konstant und hat 150 Watt nicht überschritten. Diese thermische Energie ist durch konventionelle Kühlsysteme (Heatpipes und Lüfter) sicher abführbar und gewährleistet einen zuverlässigen Betrieb des Servers auch unter etwas erhöhten Umgebungstemperaturen. Die zusätzliche Energie für die Lüfter beträgt je nach Auslastung und Formfaktor des Gerätes zwischen 5 und 15 % der Leistungsaufnahme des Servers. Grafikprozessoren (GPU) weisen schon lange maximale TDP-Werte von etwa 250 Watt auf. Mit den neusten Technologiegenerationen kommen für sehr rechenintensive Anwendungen wie Datenanalysen, Künstliche Intelligenz, Bildverarbeitung und Simulationen sehr performante Prozessorkonfiguration auf den Markt, die TDP-Werte von bis zu 400 Watt erreichen.¹⁸ Sicherlich sind diese Prozessoren zunächst eher für Hochleistungsrechner zu finden, allerdings ist ein Einsatz dieser Prozessorsysteme für bestimmte Cloud-Anwendungen durchaus vorstellbar. Mit diesem Trend zu räumlich hochverdichteten Serversystemen mit höheren TDP-Werten wird das thermische Management der Prozessoren zur Stellschraube. Denn sollte die Energiemenge pro Flächeneinheit deutlich anwachsen, werden meist flüssigkeitsbasierte Kühltechnologien direkt am oder im Chip notwendig. Fortschrittliche, flüssigkeitsbasierte Kühlungen haben den großen Vorteil extrem hohe Rechenleistung pro Flächeneinheit zu realisieren und damit teure Rechenzentrumsfläche zu sparen. Laut einem Whitepaper von Schneider Electric liegen weitere Vorteile der Flüssigkeitskühlung in der Ersparnis von Wasser (im Kontext der Raumklimatisierung), der Ersparnis von Energie für den Betrieb integrierter Lüfter (ca. 10%) sowie der höheren Abwärmequalität, dass zu der potentiell besseren Abwärmenutzung aufgrund des kontrolliert geführten Wärmepfades führt.¹⁹

¹⁷ <https://www.nextplatform.com/2019/09/13/tsmc-thinks-it-can-uphold-moores-law-for-decades/>; Download 2020-11-03

¹⁸ siehe Intel XEON Platinum Prozessoren der 9200 Serie oder NVIDIA HGX A100

¹⁹ <https://blog.se.com/datacenter/2019/07/11/not-just-about-chip-density-five-reasons-consider-liquid-cooling-data-center/>

Vor diesem Hintergrund, kann argumentiert werden, dass eine periodische Erneuerung der Server, Datenspeicher- und Netzwerktechnik sowohl zur Energieersparnis als auch zur Begrenzung des flächenmäßigen Ausbaus von Rechenzentren beitragen kann. Ob und unter welchen Voraussetzung es zur Energie- und Flächensparnis kommen kann, wird im Abschnitt 3.4.4 in einer Modellrechnung exemplarisch ermittelt. Gleichzeitig wurde in den obenstehenden Ausführungen skizziert, dass sich die leistungs- und energieseitige Verbesserung der Prozessortechnik mittelfristig sicherlich verlangsamt. Man sollte bei der Planung daher nicht mehr davon ausgehen, dass sich die Leistungsparameter von Prozessoren bei gleichbleibendem Energiebedarf etwa alle zwei Jahre verdoppeln, sondern diese Effekte eher alle drei bis vier Jahre eintreten werden. Bei Speicher, Leistungselektronik und HF-Technik sind die Entwicklungszyklen schon jetzt langsamer, aber dennoch substantiell. Die Analyse des individuellen Verbesserungspotentials einzelner Komponenten (Technologien) ist nicht Gegenstand dieser Studie. Daher können präzise Aussagen zu optimalen Generationswechselzyklen für einzelne Technikelemente nicht gegeben werden.

3.4.2 Einflussfaktor: Konfiguration des Equipments und des Rechenzentrums

Die anwendungs- und bedarfsspezifische Konfiguration und damit die hardwareseitige Auslegung von Servern, Datenspeicher- und Netzwerktechnik ist ein entscheidender Beitrag zur Energie- und Ressourceneffizienz. Das Server Efficiency Rating Tool (SERT) ist ein methodischer Ansatz zur Ermittlung der Energieeffizienz von Servern unter Berücksichtigung ihrer Konfiguration für unterschiedliche funktionale Arbeitsaufgaben und Leistungsintensitäten. SERT wurde im Kontext des ENERGY STAR Programms für Computer Server in Kollaboration mit der US-amerikanischen Umweltbehörde durch SPEC (Standard Performance Evaluation Corporation) entwickelt und kommt heute auch im Kontext der Durchführungsmaßnahme zur Europäischen Ökodesign-Richtlinie für Server und Datenspeicher (EU) 2019/424 zur Anwendung. SERT unterscheidet drei separate Workloads für Prozessoren (CPU), Arbeitsspeicher (Memory) und Festspeicher (Storage). Jeder dieser Workloads besteht aus einer Reihe von separaten Mini-Workloads, die als Worklets bezeichnet werden. Die SERT-Suite umfasst insgesamt sieben verschiedene CPU-Worklets, welche typische Algorithmen sind, die wiederum die Funktionalität für eine Anwendung bereitstellen. Die Beurteilung der Leistungscharakteristik der CPU orientiert sich demnach an unterschiedlichen Algorithmen und nicht an konkreten Anwendungsaufgaben. Jedes der Worklets wird zudem auf mehreren Laststufen (100 %, 75 %, 50 % und 25 %) ausgeführt. Messergebnisse auf Basis des SERT-Benchmarks zeigen, welchen Einfluss die Konfiguration und Auslastung eines Servers auf deren funktionale Energieeffizienz haben. Eine Über- und Unterdimensionierung ist suboptimal. Die Planung der Gerätetechnik im Rechenzentrum auf Basis von Energie-Leistungs-Benchmarks wie SERT schafft Effektivität und Effizienz.²⁰

Die Redundanzauslegung ist ein weiterer Aspekt, welcher einen nicht unerheblichen Einfluss auf den Energie- und Ressourcenbedarf von Rechenzentren hat.

Die unterschiedlich redundante Auslegung der Informationstechnik bei gleicher Verfügbarkeitsklasse ist im Cloud-Bereich ein erheblicher Skalierungsfaktor. Hier haben der Virtualisierungsgrad einer Anwendung und die Größenordnung der Nutzung (z.B. Kundenzahl, Zugriffe) einen großen Einfluss. Die Virtualisierung einer Anwendung erlaubt physische Server höher auszulasten und die Redundanz der Server für eine Anwendung abzubauen. In der Studie „The Energy Efficiency Potential of Cloud-Based Software: A U.S. Case Study“ hat Eric Masanet im Jahr 2013

²⁰ Der Ökonom und Managementberater Peter Drucker betonte immer wieder, dass Effektivität (doing the right thing) vor der Effizienz (doing the things right) stehen muss.

bereits auf das massive Energieeinsparpotential durch Redundanzabbau hingewiesen und dies als primären Vorteil von SAAS benannt.²¹

3.4.3 Einflussfaktor: Kontrolle und Steuerung des aktiven Betriebs

Ein lastadaptives Energiemanagement auf Geräteebene, wie es bei PCs und Notebooks seit langem Standard ist, wird im Bereich der Rechenzentrumstechnik kaum praktiziert. Technisch durchaus möglich, werden oft Anforderungen an die Verfügbarkeit und Dienstgüte als Argument gegen ein stringentes Energiemanagement ins Feld geführt. Klar ist auch, dass die Auslastung ja gesteigert und keine „leerlaufenden“ Systeme im Rechenzentrum stehen sollen.

Die Virtualisierung ist eine Softwarelösung, die sich zur Schlüsseltechnologie entwickelt hat, um die Nutzung bzw. Auslastung von Servern durch Migration virtueller Server oder IT-Lasten auf eine kleinere Anzahl physischer Maschinen zu verbessern. Die Virtualisierung ist eine Lösung auf Systemebene, die betriebliche Flexibilität und einen sparsamen Umgang mit IT-Ressourcen bietet. So sollte mittels Virtualisierung eine Energieeinsparung und Konsolidierung der Hardware immer angestrebt werden. Bemerkenswert ist auch, dass die Virtualisierung das Wärmemanagement und den damit verbundenen Energieverbrauch auf Hardware- und Infrastrukturebene beeinflusst. Aufgrund der Tatsache, dass sich die IT-Last in thermische Last umwandelt, kann die Migration von IT-Lasten bewusst und unter Berücksichtigung der Auswirkungen auf die Klima- und Kühlungsinfrastruktur auf Rack- und Raumebene gestaltet werden.

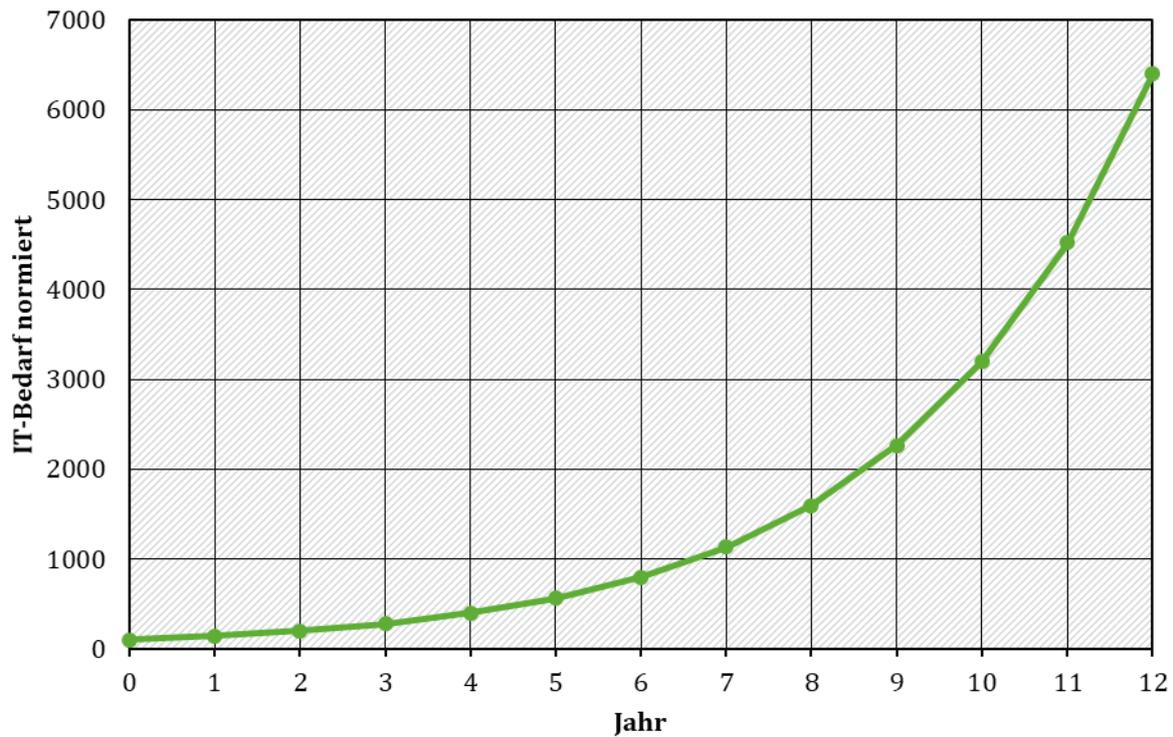
3.4.4 Beispielrechnung zur bedarfsgerechten Modernisierung

Mit den folgenden Rechenbeispielen soll gezeigt werden, wie sich der relative Technikbestand (Anzahl von Server in einem Rechenzentrum) und der absolute Technikeinsatz (kumulierte Anzahl von eingesetzten Servern) zur Abdeckungen eines normierten IT-Bedarfs (z.B. Rechenleistung) über einen längeren Zeitraum (12 Jahre) entwickelt, wenn man den technologischen Fortschritt (Verdoppelung der Rechenleistung alle zwei bzw. drei Jahre) und die Periode des Technikaustausches (Einsatz über drei oder sechs Jahre) variiert. In dem Beispiel wird zunächst davon ausgegangen, dass sich bei Technologieverbesserung (Verdopplung der Rechenleistung) der Energiebedarf der Server nicht ändert. Auch wird davon ausgegangen, dass sich mit der neuen Technikgeneration der Flächenverbrauch eines Servers nicht ändert, also weder zunimmt noch abnimmt.

Die nachstehende Abbildung 13 zeigt die Entwicklung eines fiktiven Bedarfs an IT-Leistung in einem Rechenzentrum (z.B. ein Datenvolumen, welches in einem definierten Zeitraum verarbeitete wird), ausgehend von einem normierten Wert 100 über einen Zeitraum von 12 Jahren. Diese IT-Leistung (IT-Bedarf) verdoppelt sich in diesem rein theoretischen Szenario alle zwei Jahre und kann beispielsweise eine Rechenleistung sein, die von einem Server dauerhaft erbracht werden muss. In der Realität steigt der IT-Bedarf je nach Art und Anwendung meist sehr unterschiedlich und eher auch sprunghaft.

²¹ <https://eta.lbl.gov/publications/energy-efficiency-potential-cloud>

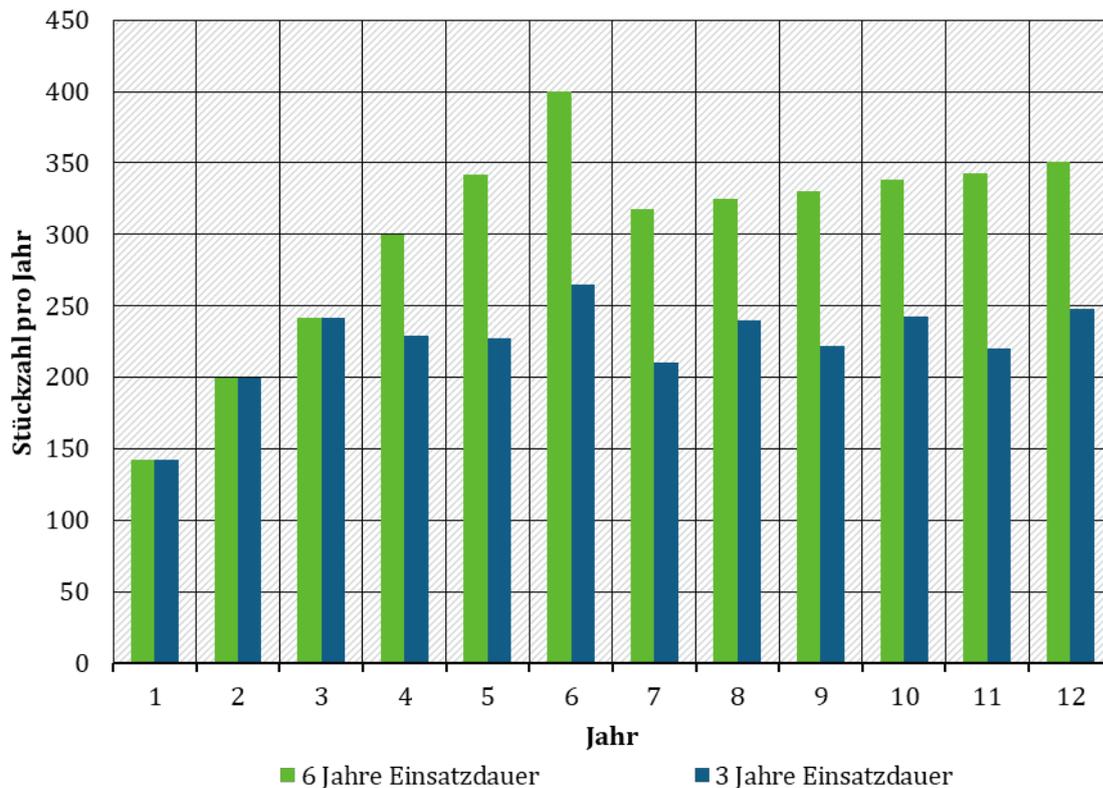
Abbildung 13: Verdoppelung des Bedarfs an IT-Leistung alle zwei Jahre



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Um den exponentiell steigenden Bedarf an IT-Leistung abzudecken, wird der Technikbestand zu Jahresbeginn so ausgelegt, dass er die Bedarfskurve am Jahresende abdeckt. Somit wird der Bestand jährlich einmal angepasst. Bei der jährlichen Anpassung des Technikbestandes wird immer die neueste Technikgeneration eingeführt. Die Technologieverbesserung (Verdoppelung der Rechenleistung) im fiktiven Rechenzentrum wird je nach Szenario entweder alle zwei oder alle drei Jahre mit neuer Technik realisiert. Des Weiteren wird die Einsatzdauer der Technik einmal mit drei Jahren und einmal mit sechs Jahren angenommen. Abbildung 14 zeigt das erste Szenario mit einer Technologieverbesserung alle zwei Jahre und einer Einsatzdauer der Server von entweder drei oder sechs Jahren.

Abbildung 14: Szenario 1: Technologieverbesserung alle zwei Jahre

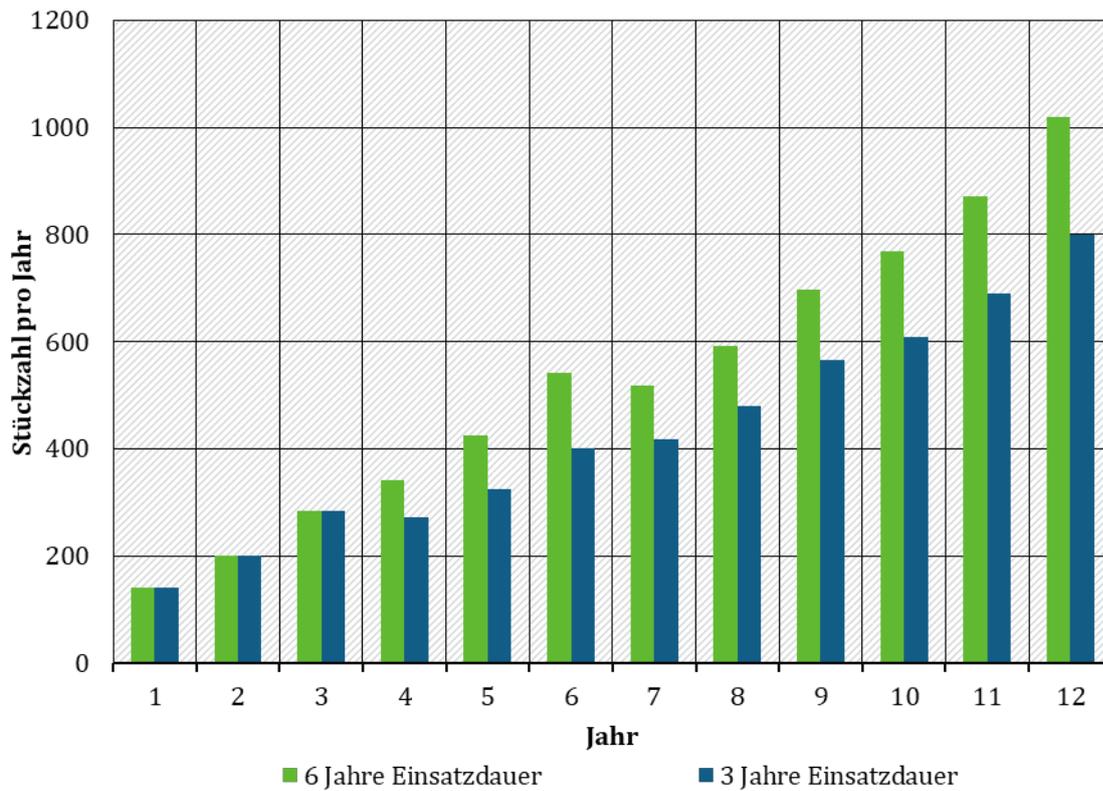


Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Wie das Szenario anschaulich zeigt, wirkt sich die kürzere Einsatzdauer von drei Jahren und damit der häufigere Austausch der Technik zunächst positiv auf den Flächenverbrauch sowie den Energiebedarf aus, weil die Verdopplung des Leistungsbedarfs durch die Verdoppelung der Rechenleistung pro Flächeneinheit kompensiert wird. Geht man zu Anfang des ersten Jahres von einem normierten IT-Leistungsbedarf mit dem Wert 100 und 100 Geräten aus, so benötigt man bei einer Einsatzdauer von drei Jahren im sechsten Jahr 265 Geräte und bei einer Einsatzdauer von sechs Jahren 400 Geräte. Dies ist, in diesem theoretischen Beispiel, ein um Faktor 1,5 höherer Flächen- und Energieverbrauch. Im weiteren Verlauf wirkt sich die Technologieverbesserung und der sukzessive Technikaustausch wieder positiver auf die Bestandszahlen aus. Im zwölften Jahr benötigt man zur Abdeckung des IT-Bedarfs mit dem Wert 6400 entweder bei einem dreijährigen Einsatz 248 Geräte oder bei einem sechsjährigen Einsatz 357 Geräte. An diesem Beispiel zeigt sich die Auswirkung des Technologiepotential auf gesteigerte Leistungsbedarfe. Durch den häufigeren Austausch der Geräte nach drei Jahren kommen pro Jahr weniger Geräte zum Einsatz. Damit bleibt auch der Flächen- und Energiebedarf um durchschnittlich 25 % geringer im Vergleich zu einer längeren Gerätenutzung von sechs Jahren.

Betrachtet man nun hingegen die absolute Stückzahl der im Gesamtzeitraum von zwölf Jahren eingesetzten Technik entsteht ein anderes Bild. Geht man auch hier von einem Anfangswert von 100 Geräten und einer Technologieverbesserung alle zwei Jahre aus, so werden bei einer Einsatzdauer von sechs Jahren insgesamt 751 Geräte und bei einer Einsatzdauer von drei Jahren insgesamt 977 Geräte benötigt. Der Gerätebedarf liegt somit bei dem dreijährigen Einsatzszenario um Faktor 1,3 höher. Dies wirkt sich negativ auf die Gesamtstückzahl und der damit verbundenen Umweltwirkung aus. Je nach Herstellungsaufwand und elektrischen Energiebedarfs kann die absolute Umweltwirkung eines Rechenzentrums berechnet werden und der ökologisch optimale Zeitpunkt eines Technikwechsels bestimmt werden.

Abbildung 15: Szenario 2: Technologieverbesserung alle drei Jahre



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Die Abbildung 15 zeigt ein zweites Szenario, bei dem die Technologieverbesserung erst alle drei Jahre einsetzt. Alle weiteren Annahmen sind identisch mit dem ersten Szenario. Dieses zweite Szenario soll den aktuellen Trend einer Verlangsamung des technischen Fortschritts bei gleichbleibend steigendem IT-Bedarf demonstrieren. Es zeigt die deutlichen Auswirkungen auf den Zuwachs des relativen und absoluten Technikbestandes und damit auf den Flächen- und Energiebedarf. Betrachtet man hierzu wieder die Zahlen des sechsten und zwölften Jahres, werden die Unterschiede zum Szenario 1 schnell deutlich. Aufgrund der Verzögerung des technischen Fortschrittes steigt der Bestand immer weiter an und schwingt nicht wie im Szenario 1 nach dem sechsten Jahr ein. Im sechsten Jahr wird in beiden Einsatzdauervarianten deutlich mehr Technik wie in Szenario 1 benötigt (etwa 140 Geräte) und der Unterschied zwischen dreijähriger und sechsjähriger Einsatzdauer ist auf Faktor 1,35 gesunken. Im zwölften Jahr werden pro Jahr etwa dreimal mehr Geräte benötigt als beim Szenario 1. Der relative Bestandsunterschied zwischen dreijähriger und sechsjähriger Einsatzdauer verkleinert sich auf Faktor 1,27. Betrachtet man nun noch den absoluten Gerätebestand, so werden bei dreijähriger Einsatzdauer 2049 Geräte und bei sechsjähriger Einsatzdauer 1561 Geräte benötigt. Der Gesamtbestand im Szenario 2 hat sich mehr als verdoppelt und wird damit eine Auswirkung auf die Gesamtumweltbilanz haben.²²

Als Fazit dieser theoretischen Betrachtung kann festgestellt werden, dass eine regelmäßige Technologieverbesserung (z.B. Mooresches Gesetz) sich bislang sehr positiv auf den Flächenbedarf von Rechenzentren ausgewirkt hat. Sollte eine Verlangsamung eintreten und der IT-Bedarf in gleicher Weise weiter steigen, wird mittelfristig in den nächsten zehn Jahren der Flächen- und Energiebedarf prinzipiell zunehmen. Geht man nun davon aus, dass die neuen Technikgenerationen selbst einen leicht steigenden Energiebedarf haben, verschärft sich das Szenario. Eine, an

²² Die Variablen dieser Berechnungen sind der individuelle Herstellungsaufwand der Hardware und der nutzungsbezogene elektrische Energieverbrauch.

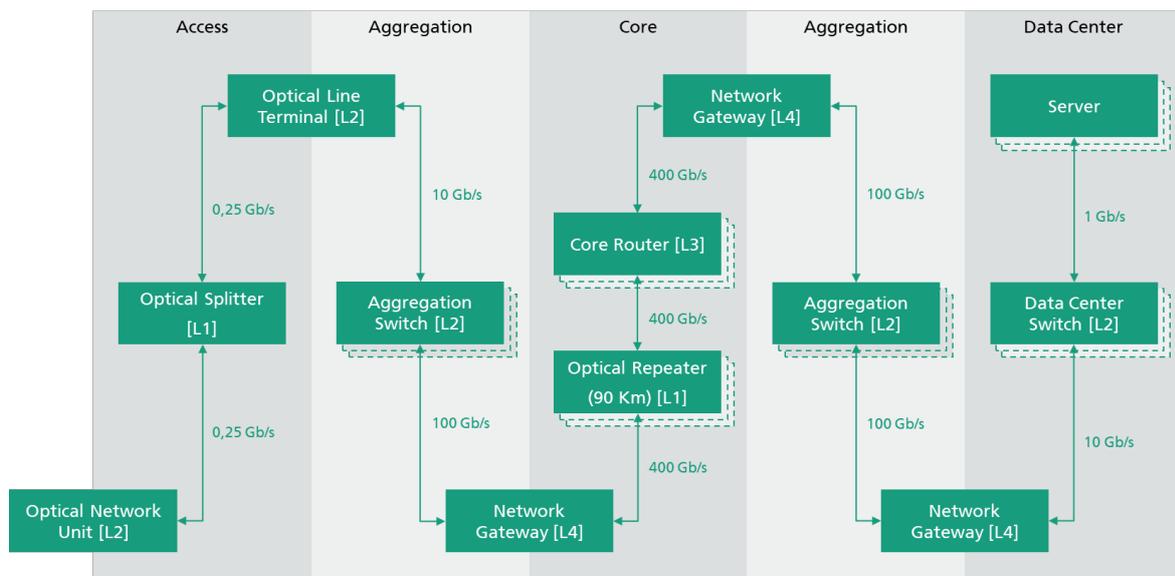
Anwendung und Bedarf ausgerichtete, effektive Konfiguration des Technikbestandes (SERT Benchmark) kann dieser negativen Entwicklung entgegenwirken. Auch die Auslegung der Stromversorgung (angemessen dimensionierte Netzteile mit höchsten Wirkungsgraden) und insbesondere das thermische Design und Management (z.B. eine flüssigkeitsbasierte Kühlung ohne Lüfter) können den Anstieg des Energiebedarfs teilweise kompensieren. Das Rechenbeispiel zeigt aber auch, die nicht zu unterschätzende Hebelwirkung der Technologieverbesserung, welche in einer direkten Wechselwirkung mit der Einsatzdauer steht. Die Einsatzdauer der Server kann theoretisch anhand von Annahmen zur IT-Bedarfsentwicklung einerseits und Annahmen zum Technologieverbesserungszyklus ökologisch optimal ausgelegt werden. Hierbei sollte aber die Umweltlast der Fertigung einberechnet werden und dies nicht nur energetisch, sondern insbesondere auch rohstoffseitig. Letztlich kann auch die effektive Abwärmenutzung in Kombination mit geringem Flächenbedarf ein ökologisch und ökonomisch interessantes Rechenzentrumskonzept sein.

3.5 Energiebedarf von Telekommunikationsnetzen und Datenübertragung

3.5.1 Generisches Energiemodell für Telekommunikationsnetze

Das generische Energiemodell für Telekommunikationsnetze, welches im Rahmen des parallel laufenden UTAMO-Projektes (FKZ: 3718 36 324 0) entwickelt wurde, verfolgt den Ansatz einer komponentenspezifischen Sachbilanz. Der Energiebedarf von Telekommunikationsnetzen wird technologie- und architekturenspezifisch entlang des Kommunikationskanals auf gerätetechnischer Komponentenebene abgebildet. Das Modell erfasst hierzu alle gerätetechnischen Netzelemente entlang des Kommunikationskanals bzw. Signalwegs vom Endkundenanschluss über das Zugangs-, Aggregations- und Transportnetz hin zu einem zweiten Endkundenanschluss. Das kann beispielsweise ein Rechenzentrum sein, in dem ein Cloud-Dienst bereitgestellt wird (siehe Abbildung 16).

Abbildung 16: Kanalmodell (schematisch)



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Das Kanalmodell bildet technologiespezifische Netzarchitekturen ab und orientiert sich bei der Auslegung an existierenden Netztopologien in Deutschland. Die Informationen hierfür stammen aus Datenbanken der Bundesnetzagentur (BNetzA) und öffentlichen Quellen der Netzbetreiber.

Das Kanalmodell kann in der Struktur beliebig an einzelne Technologien und Standortfaktoren angepasst werden, um beispielsweise unterschiedliche Ausstattungsoptionen und Routen abzubilden. Die Parametrisierung der gerätetechnischen Netzelemente beinhaltet primär die elektrische Leistungsaufnahme:

- ▶ der technologie- und generationsspezifischen Schnittstellen (Ports) im Up-Link und Down-Link für einzelne Betriebszustände,
- ▶ der technologie- und auslastungsabhängigen Verlustleistung der Leistungsverstärker,
- ▶ der digitalen Signal- und Datenverarbeitung des Kommunikationskanals,
- ▶ der Wandlungsverluste der Stromversorgung auf den Leiterplatten (DC/DC) und in den Netzteilen (AC/DC), sowie unter Umständen
- ▶ den zusätzlichen Energiebedarf für die lastabhängige Klimatisierung des Netzelementes.
- ▶ Des Weiteren können die Beschaltung und Auslastung des Netzelementes variabel eingestellt werden.

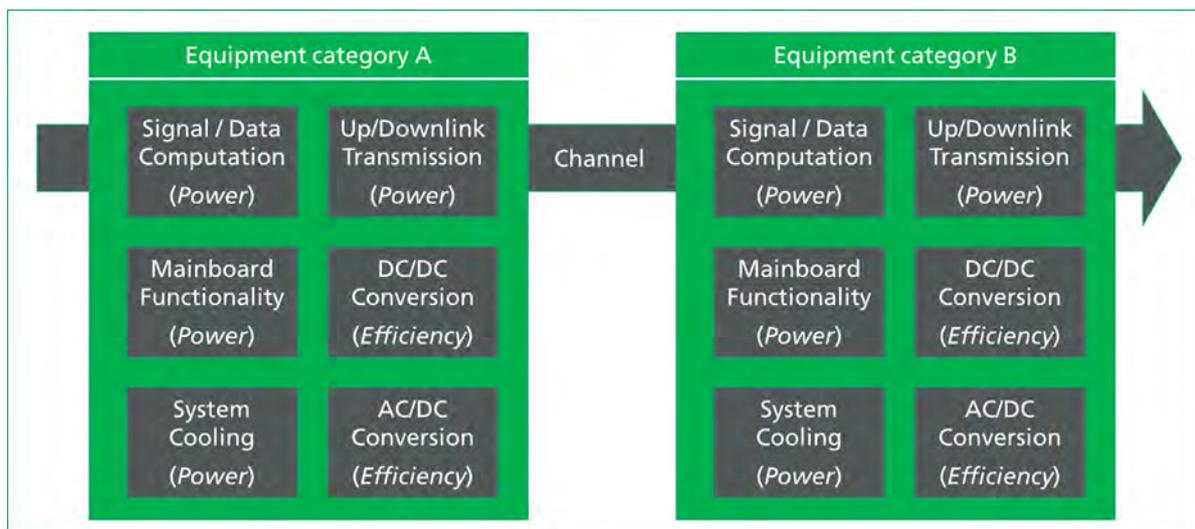
Auf dieser Wegstrecke (Kanal) durchläuft die zu übertragende Information als analoges oder digitales Signal unterschiedliche Geräte (Equipment) der Netzanlagentechnik. Diese Technikelemente können prinzipiellen Gerätekategorien wie Sendeanlage, Verteilungs- und Vermittlungstechnik, optische Transporttechnik, sowie Computern mit Datenspeichern zugeordnet werden. Gerätetechnisch werden folgende Netzanlagen erfasst:

- ▶ Funkzugangstechnik mit den Antennen, Funkanlage und Basisstation,
- ▶ Festnetzzugangstechnik mit Hausanschlusstechnik und Verteiltechnik auf der Straße,
- ▶ Vermittlungstechnik inklusive Switches, Router sowie Gateways,
- ▶ Transporttechnik mit optischen Multiplexern, Verstärkern und Terminals,

Neben dieser Netztechnik beinhaltet das Kernnetz auch vielfältige Server- und Datenspeichersysteme. Diese Computer bewerkstelligen die Netzsteuerung (Control), die Netzüberwachung (Monitoring) und die Netzteilnehmerverwaltung (Management). Hinzu kommen die unterbrechungsfreie Stromversorgungsanlage sowie die Kühlungs- und Klimatisierungsanlagen auf der Raumebene oder Installationsebene.

Jede einzelne Gerätekategorie der Anlagentechnik unterscheidet sich zwar in seiner Funktionalität, interessanterweise bestehen aber fast alle dieser Geräte aus vergleichbaren elektrischen, elektronischen und elektrooptischen Komponenten. Der Begriff Komponente wird somit im Modell nicht in einem sehr engen Sinne als einzelnes Bauteil verstanden, sondern als funktionale Baugruppe, die elektrische Energie aufnimmt und als Verlustleistung in Form von Wärme abgibt. Folgende Abbildung 17 zeigt die grundlegenden Komponenten-kategorien in einer vereinfachten schematischen Darstellung.

Abbildung 17: Geräte- und Komponentenkategorien im Sachbilanzmodell



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Mit dem Energiemodell wird eine technische Sachbilanz von wesentlichen Gerätekategorien der Netzwerktechnik und ihren funktionalen Hauptkomponenten erstellt. Die individuelle Konfiguration dieser Geräte kann in Szenarien angepasst werden. Im Folgenden werden exemplarisch die energierelevanten Parameter der Festnetztechnik in Kürze beschrieben. Die Beschreibung der Funkzugangsnetze ist dem UTAMO Projektbericht zu entnehmen.

3.5.1.1 Netzwerktechnik

Funktion und Technik

Hinsichtlich der Netzwerktechnik in den Aggregations- und Haupttransportnetzen des Kernnetzes werden für die Modellierung folgende funktionale Gerätearten unterschieden:

- ▶ **Switch:** Switche sind Netzwerkgeräte die auf der OSI-Schicht²³ 2, die Datenpakete innerhalb eines logischen Netzwerks an bestimmte physische Ports auf dem Gerät senden. Die Steuerung und damit der zuverlässige Datenaustausch basiert auf der Sicherungsschicht (Data Link Layer).
- ▶ **Router:** Router sind Netzwerkgeräte die auf der OSI-Schicht 3, die Datenpakete von einem logischen Netzwerk zu einem anderen entlang eines vordefinierten oder dynamisch erkannten Pfads weiterleiten. Dieses „routen“ basiert auf Informationen der Netzwerkschicht, die in den Steuerdaten der Netzwerkpakete eingebettet sind. Damit vermitteln Router in aktiver Form die Datenströme mittels einer Logik.
- ▶ **Gateway:** Gateways sind Netzwerkgeräte die auf der OSI-Schicht 4, logisch und physisch getrennte Netzwerke mit unterschiedlichen Protokollen und Architekturen verbinden. Gateways werden meist mit Netzsicherheitskomponenten (z.B. Firewalls) ausgerüstet, um das eigene Netzwerk vor unerwünschtem Datenverkehr zu schützen. Damit bilden Gateways die Hauptnetzknotten.
- ▶ **Optical Multiplexer (OMUX):** Optische Multiplexer sind Netzwerkkomponenten, mit denen mehrere Kanäle auf einem einzigen Übertragungsmedium oder Übertragungskanal zusammengefasst werden. Man unterscheidet zwischen dem Raummultiplex, wobei die einzelnen

²³ Das OSI-Modell (Open Systems Interconnection Model) ist ein Schichten-Modell zur Beschreibung der Datenübertragung im Netzwerk.

optischen Übertragungstrecken auf jeweils eigene Glasfasern aufgeteilt werden und dem Wellenlängenmultiplex, bei dem die Kanäle unterschiedlichen Übertragungsfrequenzen zugeteilt werden. Dabei werden Lichtsignale verwendet, die jeweils einem zu übertragenden Signal zugeordnet sind und über Glasfaserkabel übertragen werden.

- ▶ **Optical Network Unit (ONU):** Optische Netzwerkeinheiten, wandeln optische Signale, die über Fasern übertragen werden, in elektrische Signale um, welche dann an die Endbenutzer gesendet werden. Darüber hinaus senden sie Kundendaten, die aufbereitet werden an das Optical Line Terminal (OLT).
- ▶ **Optical Line Terminal (OLT):** Optische Leitungsendgeräte bilden den Endpunkt von passiven optischen Netzwerken (PON). Dabei wandeln sie Signale für das PON-Netz um (in Frequenz und Framing) und koordinieren das Multiplexing zwischen den umwandelnden Geräten an den Optical Network Units (ONU).
- ▶ **Inline Amplifier (IA):** Bei Distanzen von typischerweise länger als 80 km wird im Transportnetz das optische Signal durch einen Verstärker (Inline Amplifier, IA) verstärkt.

Die energiebezogenen Parameter für die Modellberechnungen dieser Netzwerktechnik beinhalten folgende Daten:

- elektrische Leistungsaufnahme der Kommunikationsschnittstelle (Port) in Watt
- elektrische Leistungsaufnahme für die digitale Signal- und Datenverarbeitung in Watt
- elektrische Verlustleistung der Gleichstromwandlung (DC/DC) in Watt
- elektrische Leistungsaufnahme für integrierte Lüfter in Watt
- elektrische Verlustleistung des Netzteils in Watt
- elektrische Leistungsaufnahme für Klimatisierung in Watt

3.5.2 Beispielhafte Modellierung des Energiebedarfs einer definierten Datenübertragung

Um verschiedene Technologien des Datentransports im Netz hinsichtlich des Energiebedarfs miteinander vergleichen zu können, wird im Folgenden der Energiebedarf einer definierten Datenübertragung eines einzelnen Datenstroms mit einer Referenz-Datenrate entlang eines Kanals der jeweiligen Technologieoption überschlägig modelliert. Dabei werden folgende Technologieoptionen betrachtet:

- Distanzen (innerhalb Deutschlands (500-1000 km), von Deutschland in die EU (1500-3000 km), sowie in die USA (6000-9000 km))
- Netzbereiche (Zugangs-, Aggregations- und Transportnetze)
- Kabelgebunden (VDSL, FTTH²⁴) oder Mobilfunk (3G, 4G, 5G (Sub-6 GHz))
- Technikgeneration (2016, 2020, 2024)

Für die Beispielrechnung wird ein theoretischer Datenstrom von 1 GByte pro Stunde bzw. 2,2 Mbit pro Sekunde auf einer Wegstrecke von ca. 500 km innerhalb Deutschlands angenommen. Der berechnete Energiebedarf beinhaltet bei den Festnetzvarianten die Wegstrecke vom Netzan-

²⁴ VDSL: Very High Speed Digital Subscriber Line; FTTH: Fibre To The Home (Glasfaser)

schluss beim Kunden, ohne die Netzunterverteilung wie beispielsweise Hubs, kleinere Switche oder WLAN-Router im Haus des Kunden zu berücksichtigen. Bei den Mobilfunkoptionen wurde von der an der Antenne abgegebenen Sendeleistung ausgegangen. Diese orientiert sich an Grenzwerten der isotropen Strahlungsleistung (EIRP) für die typischen Sektor-Konfigurationen. Die umgebungsspezifische Dämpfung in der Funkzelle, der Standort oder auch die Empfangsempfindlichkeit des Endgerätes wurden nicht berücksichtigt und somit auch nicht der energetische Mehraufwand für eine benötigte Anpassung der Modulation und Kodierung während der Datenübertragung.

Ab der ersten Netzaggregationsebene wurde eine identische Wegstrecke angenommen, da zumindest zwei der in Deutschland tätigen Netzbetreiber sowohl über Mobil- als auch Festnetze verfügen. In der Realität kann es hier je nach Ort und Ausbaugrad der Netzinfrastruktur natürlich zu Unterschieden kommen. Daher sei an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, dass hier eine theoretische Berechnung vorliegt, welche sich zwar an der Realität orientiert, aber nicht auf Basis realer Messdaten erstellt wurde. Bezüglich der Transportstrecke wurden optische Netzelemente (Multiplexer, Verstärker) sowie die Signalverarbeitung der Netzvermittlungstechnik (Switche, Router, Gateways) berücksichtigt. Es ist davon auszugehen, dass der Datenverkehr aus Gründen der Sicherheit, des Netz- und des Kundenmanagements einem intensiven Monitoring und Erfassen von Metadaten unterliegt. Da Informationen sowohl zum Umfang als auch zu den konkreten Daten der hierfür verwendeten Technikelemente nicht öffentlich vorliegen, konnte dieser Aspekt im Modell nicht berücksichtigt werden. Auf Seiten des Rechenzentrums, in dem der Datenstrom bereitgestellt wird, wurde ein Gateway, eine Routerebene, sowie eine Aggregations- und Rack-Unterverteilung angenommen.

Ein Ausschnitt des Modells, wie es in Excel implementiert ist, findet sich in Tabelle 45. Die durch den Datenstrom verursachten Leistungsaufnahmen sind in der Tabelle bis zum Rack Switch dargestellt.

Tabelle 45: Ergebnistabelle aus dem Streaming Modell, Technikgeneration 2020

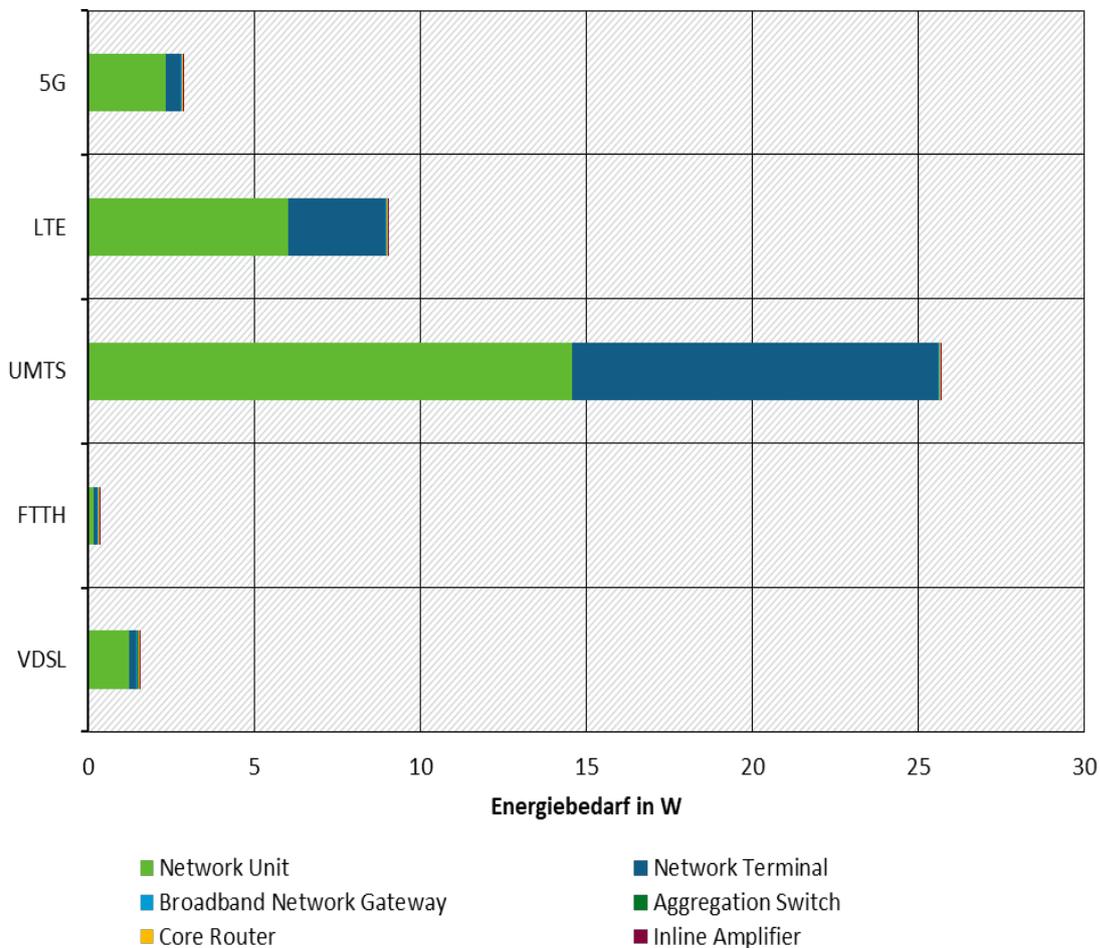
Komponenten der Datenübertragung	Übertragungstechnologie					
	Einheit	VDSL	FTTH	UMTS	LTE	5G
Network Unit	[W]	1,232	0,172	14,575	6,013	2,332
Network Terminal	[W]	0,216	0,089	11,000	2,933	0,440
Broadband Network Gateway	[W]	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033
Aggregation Switch	[W]	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020
Core Router	[W]	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023
Inline Amplifier	[W]	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011
Datacenter Broadband Network Gateway	[W]	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
Datacenter - Aggregation Switch	[W]	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013

Komponenten der Datenübertragung	Übertragungstechnologie					
	Einheit	VDSL	FTTH	UMTS	LTE	5G
Datacenter - Top Of Rack Switch	[W]	0,087	0,087	0,087	0,087	0,087
Gesamt	[W]	1,640	0,452	25,767	9,138	2,964

Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Abbildung 18 zeigt die Ergebnisse der Berechnung eines Datenstroms von 1 GB/h für unterschiedliche Technologien, aufgeschlüsselt nach den Netzebenen/-komponenten für die Technikgeneration 2020. Die durch den Datenstrom verursachten Leistungsaufnahmen sind in der Abbildung nur bis vor das Rechenzentrum (Inline Amplifier) dargestellt, also ohne die Leistungsaufnahmen des Gateways und der Switches im Rechenzentrum selbst.

Abbildung 18: Theoretische Leistungsaufnahme im Telekommunikationsnetzwerk bei 1 GB/h bis vor das Rechenzentrum, innerhalb Deutschlands (2020)



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer IZM, Technikgeneration 2020

Der mit dieser Modellierung berechnete elektrische Energiebedarf eines singulären Datenstroms ist relativ, da er lediglich einen anteiligen Energiebedarf des Netzes zu einem bestimmten Zeitpunkt über einen bestimmten Transportweg abbildet. Somit können diese

Berechnungswerte beispielsweise nicht ohne Weiteres mit dem Gesamtdatenverkehr multipliziert werden, um zu versuchen, den absoluten Energiebedarf der Netze zu bestimmen. Redundante Netztechnik und Standby- sowie Idle-Verbräuche wurden in der Berechnung nicht berücksichtigt. Das zugrundeliegende Modell kann jedoch ebenfalls dazu genutzt werden, um den absoluten Energiebedarf der Telekommunikationsnetze zu modellieren, was in dieser Studie allerdings nicht vorgesehen ist. Dies erfolgt in dem vom Umweltbundesamt geförderten Projekt U-TAMO.

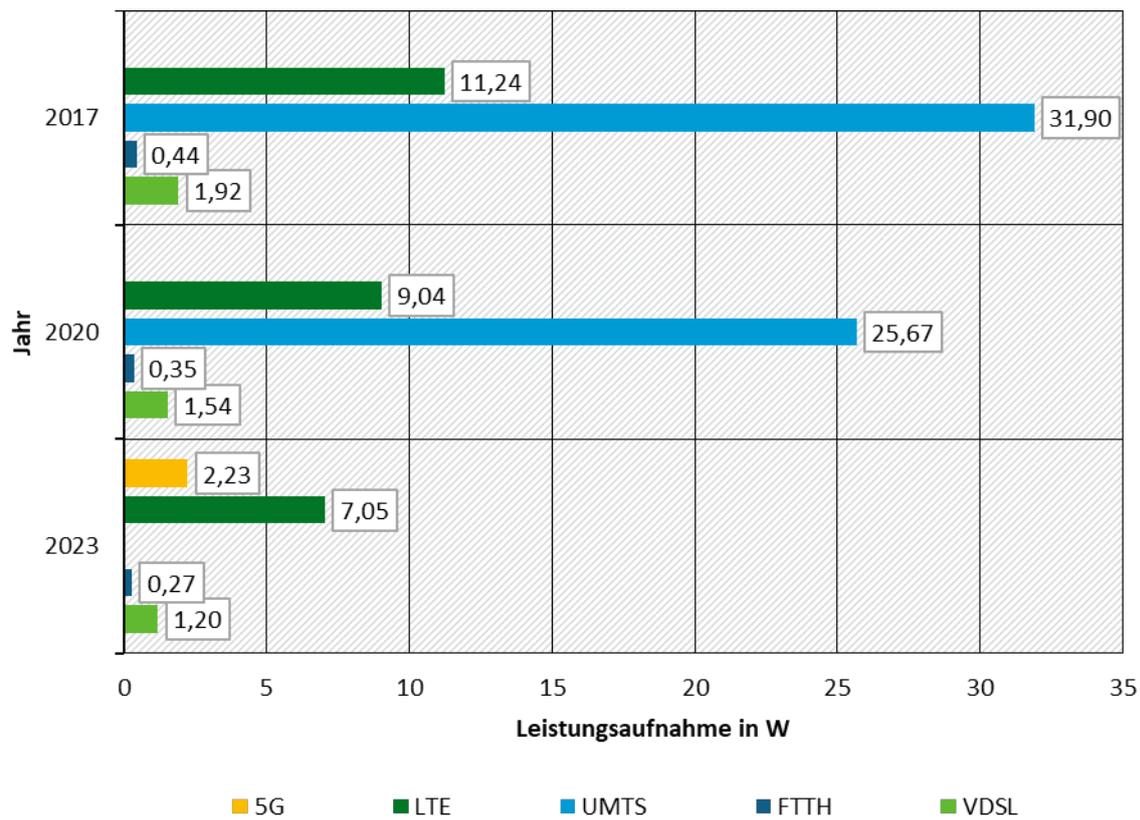
Wie die Berechnungsergebnisse zeigen, haben in diesem theoretischen Szenario die Zugangsnetze den anteilig höchsten Energiebedarf. Im direkten Vergleich benötigen die Festnetzanschlüsse dabei deutlich weniger Energie als die Mobilfunkoptionen. Unter den Mobilfunkoptionen sind die moderner Technologiegenerationen aufgrund der verbesserten spektralen Effizienz auch energieeffizienter. Die dritte Mobilfunkgeneration (UMTS) ist für eine so hochbitratige Datenübertragung völlig ungeeignet.

Bei den Festnetzanschlüssen erscheint der Glasfaseranschluss am energieeffizientesten. In der Realität wird sich diese Energieeffizienz der Glasfaser aber erst bei hoher Auslastung des Netzanschlusses (z.B. bei vielen parallelen Datenströmen) positiv auswirken. Dieses Potential für einen einzelnen Hausanschluss wird derzeit aber kaum ausgeschöpft. In der Realität würde die vollständige elektrische Leistungsaufnahme für den Glasfaseranschluss in Höhe von mehreren Watt anfallen und nicht nur der Bruchteil dessen, was anteilig von der Gesamtkapazität berücksichtigt wurde. Damit fallen derzeit die Festnetzanschlüsse (VDSL und FTTH) real sehr ähnlich aus. Sobald aber die vorhandene Kanalkapazität weiter ausgelastet wird (z.B. bei Datenströmen deutlich über 150Mbps), würde sich die spektrale Effizienz und damit der enorme Vorteil der Glasfasertechnik zeigen. Ein zweiter Aspekt ist in diesem Zusammenhang zu berücksichtigen. Mittels der Glasfasertechnik kann ein Signal verlustarm über weite Strecken übertragen werden. Kupferleiter oder Luftschnittstellen sind in der Reichweite deutlich unterlegen. Damit ergeben sich für die Glasfasertechnik theoretische Vorteile hinsichtlich einer effektiveren Struktur der Aggregationsnetze.

Die Länge der Transportstrecke zum Beispiel innerhalb Europas oder in die USA wirkt sich anteilig am Energiebedarf nur geringfügig aus. Bei Wegstrecken in Europa von bis zu 2500 Kilometern beträgt der zusätzliche Energiebedarf ca. 300 Milliwatt, der Datentransport in die USA benötigt ca. 1 Watt pro GB/h. Dieser relativ geringe Unterschied resultiert aus der Tatsache, dass die Kapazität und Performanz der Transportnetze aufgrund moderner optischer Technikelemente sehr energieeffizient ist.

Die Abbildung 19 vermittelt einen Eindruck des noch bestehenden Energieeffizienzpotentials neuer Technologien. Die dargestellten Leistungsaufnahmen beschreiben die Summe aller beteiligten Netzwerkkomponenten bis vor das Rechenzentrum (Inline Amplifier). Für die Berechnung wurden Annahmen auf Basis vorhandener Datenblätter der einzelnen Technikelemente getroffen. Des Weiteren wurde eine weitere Steigerung der Wirkungsgrade bei der Stromwandlung berücksichtigt. Auch die Technologieentwicklung bei den Modulationsverfahren wirkt sich positiv auf den Energiebedarf aus, da bei gleicher Bandbreite mehr Daten übertragen werden können. Der zusätzliche Energiebedarf für die Datenverarbeitung der neuen Modulationsverfahren ist anteilig gering.

Abbildung 19: Leistungsaufnahme im Telekommunikationsnetzwerk bei 1 GB/h bis vor das Rechenzentrum in Abhängigkeit der Technikgeneration



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Aus den Ergebnissen dieser Berechnung lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten:

- ▶ Der Energiebedarf sinkt mit dem Einsatz moderner Technologien einschließlich besserer Netzteile und Kühlkonzepte. Eine verbesserte spektrale Effizienz (beispielsweise durch neue Modulationsverfahren) reduziert den Energiebedarf pro übertragender Datenmenge.
- ▶ Der Mobilfunk hat aufgrund der komplexeren Dämpfungscharakteristik einen höheren Energiebedarf als kabelgebundene Anschlüsse. Kleinere Sektoren bzw. stärker gerichtete Antennenkeulen können den Energiebedarf einer einzelnen Luftschnittstelle verbessern.
- ▶ Der Energiebedarf steigt mit zunehmender Distanz, allerdings nur in vergleichsweise geringem Maße und nicht unbedingt direkt proportional zur Entfernung. Die optische Transporttechnik ist sehr energieeffizient und verfügt über Entwicklungspotential.
- ▶ Der Energiebedarf der Telekommunikationsnetze wird von der Struktur und Dimensionierung stark beeinflusst, da das Netz heute noch immer kaum lastadaptiv ist. Ein aktiveres Energiemanagement, welches metastabile Lastverläufe über den Tag hinweg berücksichtigt, kann einen Beitrag zur Erhöhung der Energieeffizienz leisten.

Als Fazit sein nochmals darauf hingewiesen, dass die anteilige Berechnung des elektrischen Energiebedarfs der Netzstrecke eines Datenstroms lediglich die Größenordnung und das Energieeffizienzpotential einzelner Zugangstechnologien aufzeigt. Es ist eine rein theoretische Berechnung, die nicht ohne Weiteres für eine Hochrechnung des absoluten Energiebedarfs der

Telekommunikationsnetze genutzt werden kann. Für diesen Zweck müsste das Kanalmodell auf den gesamten Gerätebestand hochskaliert und mit Tageslastprofilen parametrisiert werden.

Die vorliegende Modellierung des Energiebedarfs der einzelnen Netzelemente (Kanalmodell) bildet daher eine wichtige Grundlage. Mit Hilfe dieses ersten Modells können bereits technische und planerische Stellschrauben zur Verbesserung der Energieeffizienz identifiziert werden. Technische Stellschrauben sind hierbei die Technologie und Auswahl von Hardwarekomponenten, die Netzplanung und Standortkonfiguration, sowie die Optimierung der Auslastung einzelner Netzbereiche durch softwarebasiertes Energiemanagement.

4 Anwendung der GCC-Bewertungsmethodik

Mit den nachfolgenden vier Fallbeispielen Online-Storage, Virtuelle Desktop Infrastruktur, Videostreaming und Videokonferenzen wird die GCC-Methodik beispielhaft bei verschiedenen Cloud-Dienstleistungen angewendet.

Die Untersuchungen stellen vor allem eine Überprüfung dar, ob diese Methodik in der Praxis funktioniert und plausible Ergebnisse liefert („proof of concept“). Die hier berechneten Zahlen für die Umwelteffekte von Cloud-Dienstleistungen gelten nur für die jeweiligen Fallbeispiele und sind nicht grundsätzlich auf alle gleichartigen Cloud-Dienstleistungen übertragbar. Damit die Ergebnisse verallgemeinert und für Hochrechnungen verwendet werden können, wäre es erforderlich, die Methodik bei einer Vielzahl von Rechenzentren bzw. Cloud-Dienstleistungen anzuwenden.

Das Fallbeispiel Home-Office stellt eine Ergänzung zur GCC-Methodik dar, indem es zusätzlich noch die Treibhausgasemissionen von Endgeräten als Kennzahlen pro Home-Office-Arbeitstag berechnet.

4.1 Online-Storage

4.1.1 Beschreibung des Cloud-Dienstes Online-Storage

Unter „Online-Storage“ wird eine Cloud-Dienstleistung verstanden, die Speicherplatz zur Verfügung stellt, der über das Netzwerk erreichbar ist. Daten werden nicht lokal beim Nutzenden abgelegt, sondern werden über das Internet zum Online-Storage-Anbieter übertragen, dort gespeichert, organisiert und können von dort wieder über das Netzwerk abgerufen werden. Dadurch unterscheidet sich Online-Storage von der lokalen Datenspeicherung auf der lokal installierten Festplatte oder entnehmbaren Speichermedien. Oft wird Online-Speicher auch als parallele Datenhaltung genutzt, als Backup-Speicherung der lokalen Daten, um die Verfügbarkeit zu erhöhen, beispielsweise bei lokalem Datenverlust.

4.1.2 Untersuchungsgegenstand

Als Anwendungsfall der GCC-Methodik soll ermittelt werden, mit welchem CO₂-Fußabdruck die Nutzung von Online-Speichern verbunden ist.

Im Rahmen des Green-Cloud-Computing-Projektes wurden exemplarisch 4 Rechenzentren untersucht und die KPI4DCE-Methodik anhand der aktualisierten Datenbasis angewendet (siehe Kapitel 2.2). Diese Rechenzentren haben jeweils einen relevanten Anteil an Speichersystemen, der sowohl intern (für die Anwendungen in den Rechenzentren selbst) als auch extern (zur Bereitstellung von Speicherplatz für den Fernzugriff) genutzt werden.

Um einen Überblick über die Bandbreite der CO₂-Fußabdrücke von Online-Storage zu bekommen, werden für diese Auswertung vereinfachend alle 4 Rechenzentren als Online-Storage-Rechenzentren betrachtet. Weiterhin wird vereinfachend davon ausgegangen, dass jeweils 90 % des Speicherplatzes aller 4 Rechenzentren als Online-Storage zur Verfügung gestellt wird. Von den jeweiligen Server-Leistungen werden 5 % für die Online-Speicherung benötigt und von den Netzwerk-Kapazitäten 10 %. Die Treibhausgasemissionen der Gebäude-Infrastruktur werden anteilig dem Energieverbrauch von Server, Speichersystemen und Netzwerktechnik dem Cloud-Service Online-Storage zugeschlagen. Dadurch ergeben sich Allokationsfaktoren auf Hardware-Ebene für den Cloud-Service Online-Storage, die in Tabelle 46 dokumentiert sind.

Tabelle 46: Allokation der Umweltwirkungen GWP auf den Cloud-Service Online-Storage

Teilbereich im Rechenzentrum	Umweltwirkung (GWP)	Anteil Online-Storage [%]	Anteil sonstige Dienste [%]
Server	Server _{GWP}	AoS _{sv} = 5%	Asonst _{sv} = 95%
Speicher	Storage _{GWP}	AoS _{st} = 90%	Asonst _{st} = 10%
Netzwerk	Network _{GWP}	AoS _{nw} = 10%	Asonst _{nw} = 90%
Infrastruktur	Infra _{GWP}	Anteilig am Energieverbrauch von Server, Speicher, Netzwerk	Anteilig am Energieverbrauch von Server, Speicher, Netzwerk

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

4.1.3 GCC-Kennzahlen für Online-Storage

Zur Berechnung von GCC-Kennzahlen für die Treibhausgasemissionen (GCC Online-Storage_{GWP}) wird der Umweltaufwand für die Dienstleistung entsprechend der in Kapitel 2.3 dargestellten Bewertungsmethodik Green Cloud Computing (GCC) auf den Nutzen der Dienstleistung bezogen. Als Nutzen, wird der vom Cloud-Dienst Online-Storage belegte Speicherplatz definiert, von dem angenommen wird, dass er 90 % des gesamten belegten Speicherplatzes der Speicher-Systeme im Rechenzentrum beträgt. Es wird angenommen, dass die restlichen 10 % für andere Service-Aufgaben im Rechenzentrum gebraucht werden. Als Serviceeinheit wird die Belegung von 1 Terabyte Online-Speicherplatz über den Zeitraum eines Jahres festgelegt.

In Tabelle 47 werden die Ergebnisse der Berechnung der GCC-Kennzahlen für die 4 untersuchten Rechenzentren (RZ01 – RZ04) dargestellt. Zunächst werden die Treibhausgasemissionen für Server, Speichersystem, Netzwerk und Infrastruktur über die in Tabelle 46 dargestellten Allokationsfaktoren der Dienstleistung Online-Storage zugeordnet. Die Summe der Treibhausgasemissionen (Aufwand: Summe_{GWP}) wird über alle Teilbereiche des jeweiligen Rechenzentrums gebildet, die zur Dienstleistung Online-Storage für ein Jahr beitragen (Aufwand). Um den CO₂-Fußabdruck für die Bereitstellung von 1 Terabyte Online-Speicherplatz (Nutzen) für ein Jahr zu ermitteln, wird im nächsten Schritt der Aufwand auf die Gesamtmenge der erbrachten Dienstleistung (Nutzen: Summe Online-Storage) des jeweiligen Rechenzentrums bezogen.

Tabelle 47: Berechnung des CO₂-Fußabdrucks für Online-Storage bei 4 Rechenzentren

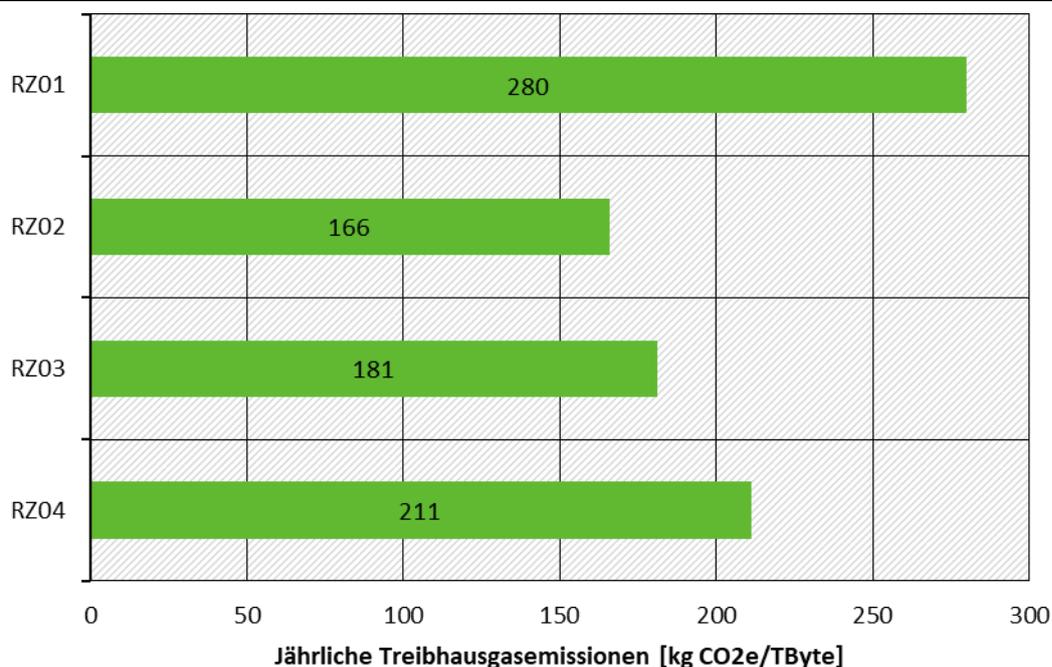
Bezeichnung	Einheit	RZ01	RZ02	RZ03	RZ04
Server _{GWP}	kg CO ₂ eq./a	48.996	4.011	10.003	9.092
Storage _{GWP}	kg CO ₂ eq./a	156.524	33.822	444.161	67.403
Network _{GWP}	kg CO ₂ eq./a	4.327	5.274	28.268	1.121
Infra _{GWP}	kg CO ₂ eq./a	75.756	23.753	198.089	29.996
Aufwand: Summe_{GWP}	kg CO ₂ eq./a	285.603	66.861	680.521	107.611
Nutzen: Summe Online-Storage	TB/a	1.020	403	3.759	509
GCC Online-Storage_{GWP} (Aufwand / Nutzen)	kg CO ₂ eq./TB	280	166	181	211

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Die Bandbreite der GCC-Kennzahlen zum CO₂-Fußabdruck von Online-Storage reicht für die vier Rechenzentren von 166 Kilogramm CO₂-Äquivalente pro Terabyte (RZ02) über 181 kg CO₂ eq./TB (RZ03), 211 kg CO₂ eq./TB (RZ04) bis zu 280 Kilogramm CO₂-Äquivalente pro Terabyte (RZ01). Das bedeutet, pro Terabyte belegtem Online-Speicher werden jährlich CO₂-Emissionen in der entsprechenden Größenordnung freigesetzt.

Die GCC-Kennzahl für den CO₂-Fußabdruck von Online-Speicherplatz in den Rechenzentren 1 bis 4 werden in Abbildung 20 noch einmal grafisch dargestellt. Die Kennzahlen ermöglichen es, sehr schnell festzustellen, welches der Rechenzentren seine Dienstleistung mit einem geringeren Umweltaufwand erbringt. Genau wie die KPI4DCE-Kennzahlen reagieren auch die Green Cloud Computing Aufwandskennzahlen auf eine Veränderung der Rahmenbedingungen und der Betriebsführung im Rechenzentrum. Sowohl Änderungen in der Effizienz der Gebäudetechnik oder bei den IT-Einrichtungen wirken sich auf die Kennzahlen aus als auch eine höhere Auslastung der Speichersysteme (belegter Speicherplatz). Die Kennzahlen sind daher nicht nur zum Vergleich verschiedener Rechenzentren, sondern auch für die eigene Optimierung geeignet.

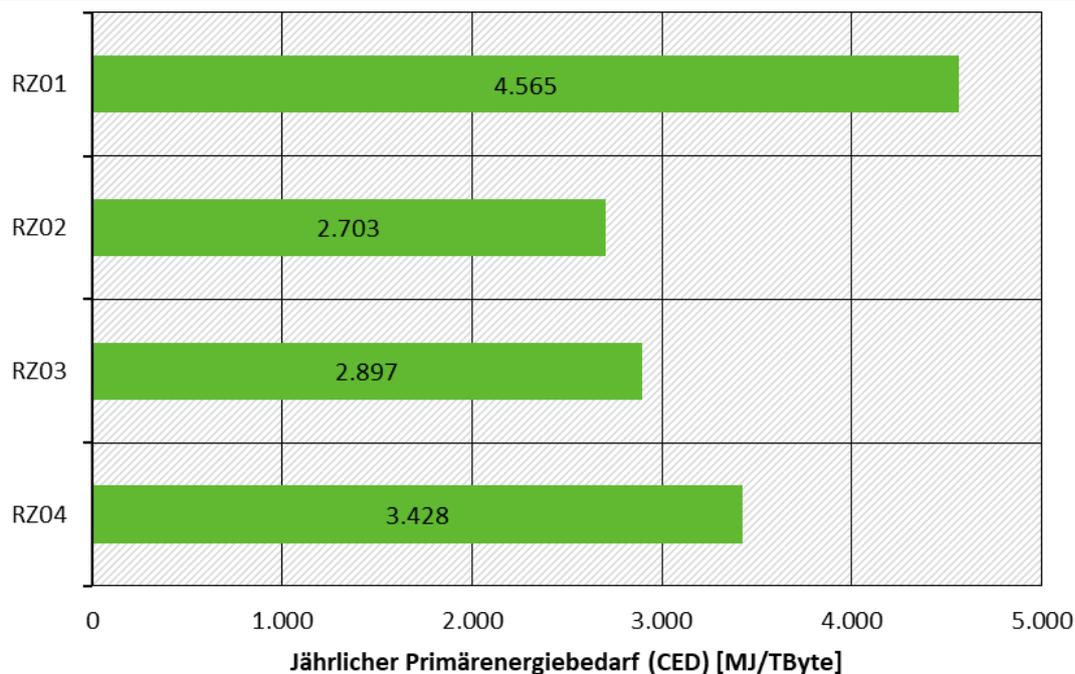
Abbildung 20: CO₂-Fußabdruck für Online-Storage im Vergleich



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Die GWP-Kennzahl reagiert nicht nur auf die Veränderungen der Effizienz der eingesetzten Informationstechnik oder Gebäudetechnik, sondern auch auf die Art der Energieversorgung des Rechenzentrums. Ein Rechenzentrum, das seine Stromversorgung mit einem höheren Anteil an erneuerbarer Energie bezieht, hat in der Gesamtbilanz einen entsprechend geringeren CO₂-Fußabdruck. Um die Energieeffizienz der Cloud-Dienstleistung unabhängig von der Art der Stromversorgung zu ermitteln und zu vergleichen, ist der Kennwert Kumulierter Energieaufwand (CED) besser geeignet. Mit dem CED-Kennwert wird der Verbrauch an energetischen Ressourcen (erneuerbar + nicht-erneuerbar) ermittelt und in der Einheit Megajoule pro Jahr ausgewiesen. In Abbildung 21 wird diese Darstellung für das Beispiel Online-Storage gewählt. Beide Darstellungen (GWP und CED) sind hier sehr ähnlich, weil für alle vier Rechenzentren mit dem gleichen Strommix gerechnet wurde. Der kumulierte Energieaufwand für die Bereitstellung von 1 Terabyte Online-Storage über den Zeitraum eines Jahres liegt gemäß diesen Berechnungen zwischen rund 2.703 (RZ02) und 4.565 Megajoule (RZ01).

Abbildung 21: Kumulierter Energieaufwand (CED) für Online-Storage im Vergleich



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Zur Korrelation des Primärenergiebedarfs mit dem Strombedarf von Online-Storage, können die GCC-Kennzahlen Online-Storage CED überschlägig auf die elektrischen Leistungsaufnahmen des Rechenzentrums pro Serviceeinheit zurück gerechnet werden. Dies stellt eine Vereinfachung dar, da im Primärenergiebedarf auch der Herstellungsaufwand der IT-Komponenten enthalten ist. Für die überschlägige Berechnung wird der Primärenergiefaktor des deutschen Strommixes ($KEA_{Strom} = 10,7 \text{ MJ/kWh}_{el}$, siehe Tabelle 79) als Umrechnungsfaktor zusammen mit einer ganzjährigen Nutzung herangezogen. Für den Cloud-Service ergeben sich damit elektrische Leistungsaufnahmen von zirka 29 Watt pro Terabyte (RZ02), 31 W/TB (RZ03), 37 W/TB (RZ04) bis hin zu 49 W/TB (RZ01), die von den Rechenzentren ganzjährig beansprucht werden.

4.2 Virtuelle Desktop Infrastruktur

4.2.1 Beschreibung des Cloud-Dienstes Virtuelle Desktop Infrastruktur

Unter dem Begriff „Desktop“ versteht man die grafische Benutzeroberfläche eines Betriebssystems, auf der Dateien abgelegt, gelöscht und Programme gestartet und lokal ausgeführt werden können. Der Begriff stellt eine Analogie zu einer physischen Schreibtisch-Oberfläche dar, auf der ebenfalls Papierdokumente und andere Gegenstände abgelegt und angeordnet werden können (Wikipedia 2020a). Der Begriff wird in der Regel für das Microsoft-Betriebssystem Windows genutzt, bei Apple- oder Linux-Betriebssystemen werden auch die Begriffe „Schreibtisch“ oder „Arbeitsfläche“ verwendet.

Eine „Virtuelle Desktop Infrastruktur“ (VDI) stellt eine Desktop-Umgebung durch ein Betriebssystem bereit, das nicht auf dem lokalen Computer installiert ist, sondern über eine Netzwerkverbindung auf einem externen Server ausgeführt wird. Das Endgerät dient nur noch zur Dateneingabe über Tastatur und Maus sowie zur Datenausgabe über einen Monitor und ggf. weiterer Schnittstellen (z.B. Audio, Videokamera). Die Datenverarbeitung, Speicherung und Ausführung von Anwendungssoftware finden dagegen auf dem Server statt. Die Nutzenden können auf die Desktop-Umgebung über das Netzwerk mit verschiedenen Endgeräten (z.B. Thin-Client, Laptop,

Tablet-Computer) zugreifen (vmware.com 2020; citrix.com 2020). Zur Ausführung eines Virtuellen Desktops ist auf den Servern im Rechenzentrum eine Virtualisierungs-Software erforderlich und auf den lokalen Endgeräten ist lediglich ein Basis-Betriebssystem notwendig. Marktführer in diesem Bereich sind die beiden Software-Anbieter VMware und Citrix.

Die Vorteile einer Virtuellen Desktop Infrastruktur sind unter anderem die zentrale Wartbarkeit der Software direkt im Rechenzentrum, die zentrale Datenspeicherung und -sicherung sowie die Möglichkeit zum Einsatz leistungsarmer, energiesparender Endgeräte (z.B. Thin-Clients). Nachteile sind die Notwendigkeit einer zuverlässigen Datenverbindung zwischen Endgerät und Server, ggf. höhere Latenzzeiten, Lizenzgebühren für Virtualisierungs-Software und die Notwendigkeit zur permanenten Bereitstellung von zentralen Server-Kapazitäten.

4.2.2 Untersuchungsgegenstand

Die Green-Cloud-Computing-Methode wird dazu angewendet, den Energieverbrauch und die CO₂-Emissionen, die durch eine Virtuelle Desktop Infrastruktur entstehen, zu bilanzieren. Hierzu werden zwei Rechenzentren untersucht, die für eine Bundesbehörde mit rund 1.000 Beschäftigten an zwei unterschiedlichen Standorten (Berlin und Bonn) betrieben werden. Die Rechenzentren bieten neben öffentlich zugänglichen Diensten, wie Webserver und Datenbanken eine Reihe von Diensten für die Beschäftigten der Behörde an, wie zum Beispiel Mail-Server, Print-Server, File- und Backup-Server, Videokonferenz-Server und Mobile Device Management. Etwas mehr als ein Zehntel der Rechenzentrums-Kapazitäten wird für die Virtuelle Desktop Infrastruktur für 890 Arbeitsplätze genutzt. Die Büroarbeitsplätze der Behörde sind statt mit Desktop-Computern mit energiesparenden Thin-Clients ausgestattet, die nur für die Eingabe über Tastatur und Maus sowie die Ausgabe an einen Bildschirm zuständig sind. Die eigentliche Datenverarbeitung findet in den Rechenzentren der Behörde statt. Die Virtuelle Desktop Infrastruktur bietet den Nutzenden nach dem Login eine grafische Benutzeroberfläche („Windows-Desktop“) mit allen erforderlichen Anwendungsprogrammen. Im Rahmen dieses Anwendungsbeispiels wird untersucht, welche Ressourcen im Rechenzentrum zur Bereitstellung eines einzelnen VDI-Arbeitsplatzes über den Zeitraum eines Jahres aufgewendet werden müssen. Diese Zahl wird mit einem klassischen, dezentralen Computer-Arbeitsplatz verglichen.

Der Energieverbrauch und der Hardwarebestand der beiden Rechenzentren wurden vom 01.05.2019 bis zum 30.04.2020 erfasst. In Tabelle 48 werden die wichtigsten Kenngrößen beider Rechenzentren gemeinsam dargestellt.

Tabelle 48: Mengengerüst Rechenzentren zur Desktop-Virtualisierung

Server	Wert	Einheit
Anzahl	62	[Stck]
Mittlere Nutzungsdauer	7	[a]
Anzahl CPUs	136	[Anzahl]
Anzahl Kerne	2.044	[Anzahl]
Mittlere Leistungsaufnahme pro Server	310	[W/Stck]
Energiebedarf pro Jahr	168.166	[kWh _{el} /a]
Speichersysteme	Wert	Einheit
Anzahl	4	[Stck]

Speichersysteme	Wert	Einheit
Mittlere Nutzungsdauer	7	[a]
Speicherkapazität	213.600	[GByte]
Anzahl HDD	122	[Anzahl]
Anzahl SSD	48	[Anzahl]
Anzahl Netzteile	8	[Anzahl]
Mittlere Leistungsaufnahme pro Speicher	600	[W/Stck]
Energiebedarf pro Jahr	21.024	[kWh _{el} /a]
Netzwerk-Geräte	Wert	Einheit
Mittlere Nutzungsdauer	7	[a]
Energiebedarf pro Jahr	11.000	[kWh _{el} /a]
Gebäudetechnik	Wert	Einheit
Strombedarf RZ gesamt	887.612	[kWh _{el} /a]
Strombedarf IT	755.120	[kWh _{el} /a]
Energiebedarf Fernkälte (Strom-Äquivalente)	25.684	[kWh _{el} /a]
PUE	1,2	[-]
Mittlere elektrische Leistungsaufnahme	76	[kW _{el}]

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

4.2.3 GCC-Kennzahlen für Virtuelle Desktop Infrastruktur

Die beiden untersuchten Rechenzentren sind mit insgesamt 62 Servern ausgestattet, mit 4 Speichersystemen, die eine Speicherkapazität von insgesamt 214 Terabyte aufweisen, verteilt auf 122 rotierenden Festplatten (HDDs) und 48 Solid-State-Disks (SSD). Die IT-Komponenten werden im Durchschnitt 7 Jahre lang eingesetzt. Die beiden Rechenzentren haben PUE-Werte von 1,2 und 1,6 und sind über eine Standleitung datenmäßig miteinander verbunden. In nachfolgender Tabelle 49 wird der jährliche Ressourcenaufwand beider Rechenzentren dargestellt, der sich aus der Anwendung des KPI4DCE-Berechnungswerkzeuges ergibt.

Tabelle 49: Jährlicher Ressourcenaufwand Rechenzentren einer Bundesbehörde

Hardware	ADP [kg Sb eq./a]	GWP [kg CO ₂ eq./a]	CED [MJ/a]
Server	1,28	319.557	5.364.865
Speichersysteme	0,38	40.521	676.218
Netzwerk	0,02	20.485	345.386
Infrastruktur	0,04	66.152	1.115.721
Summe	1,72	446.715	7.502.191

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Von den beiden Rechenzentren ist nur ein Teil der IT-Infrastruktur für den Cloud-Dienst Desktop-Virtualisierung reserviert. Der überwiegende Teil wird für andere Dienste bereitgehalten. Daher ist eine Allokation der Hardware-Ressourcen auf den untersuchten Dienst nötig. Hierzu werden zusätzlich zur physischen Hardware-Ausstattung auch alle virtuellen Ressourcen der Rechenzentren erfasst (vgl. Kapitel 2.6.3), d.h. die den virtuellen Servern zugeordneten CPU-Kerne, RAM, Festplatten-Speicherplatz und Netzwerk-Bandbreite. Die Anteile an den virtuellen Ressourcen können ihrerseits wieder der physischen Hardware-Ausstattung Server, Speichersystem und Netzwerk zugeordnet werden, sowie über deren Energieverbrauch dem Anteil an der Gebäude-Infrastruktur. Tabelle 50 zeigt, dass der jeweilige Anteil an der Hardware und Gebäude-Infrastruktur für den Cloud-Service VDI zwischen 9 % (Speichersystem) und 12 % (Server und Infrastruktur) liegt.

Tabelle 50: Allokation der Hardware-Ausstattung auf die Virtuelle Desktop Infrastruktur

Service-Bezeichnung	Anteil an Server (An _{sv})	Anteil an Speichersystemen (An _{st})	Anteil an Netzwerk (An _{nw})	Anteil an Infrastruktur (An _{infra})
Sonstige Dienste	88%	91%	90%	88%
Virtuelle Desktop Infrastruktur	12%	9%	10%	12%

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Durch die Allokation ist es möglich, den jährlichen Ressourcenaufwand der Rechenzentren dem jeweiligen Cloud-Service zuzuordnen und im zweiten Schritt auf die einzelne Service-Einheit (hier: VDI-Arbeitsplatz) zu beziehen. Dadurch können Green-Cloud-Computing-Kennzahlen (GCC-Kennzahlen) gebildet werden, die den jeweiligen Aufwand der Dienstleistung im Rechenzentrum pro Jahr beschreiben. In Tabelle 51 wird die Zuordnung dargestellt und der jährliche Ressourcenaufwand für jeden einzelnen der insgesamt 890 Arbeitsplätze berechnet.

Tabelle 51: GCC-Kennzahlen für Virtuelle Desktop Infrastruktur (VDI)

Hardware	GCC VDI _{ADP} [kg Sb eq./a/user]	GCC VDI _{GWP} [kg CO2 eq./a/user]	GCC VDI _{CED} [MJ/a/user]
Server	1,8E-04	44	732
Speichersysteme	4,0E-05	4	72
Netzwerk	2,1E-06	2	39
Infrastruktur	4,8E-06	9	152
Summe	2,2E-04	59	995

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Pro Arbeitsplatz Virtuelle Desktop Infrastruktur werden im Rechenzentrum jährlich Rohstoffe in Höhe von 0,22 Gramm Antimon-Äquivalente (GCC VDI_{ADP}), Treibhausgasemissionen von 59 Kilogramm Kohlendioxid-Äquivalente (GCC VDI_{GWP}) und Primärenergie in Höhe von 995 Megajoule (GCC VDI_{CED}) aufgewendet. Von den Hardware-Komponenten ist es jeweils der Server-Anteil, der den größten Beitrag zu diesen drei Kennwerten leistet. Beim Rohstoffbedarf (ADP) macht der Server 79 % aus, beim Treibhausgaspotenzial (GWP) und beim Kumulierten Energieaufwand (CED) sind es jeweils 74 %. Der Ressourcenaufwand für die Bereitstellung des VDI-Arbeitsplatzes wird maßgeblich durch den Umfang der beanspruchten Hardware-Ressourcen für die VDI und die Effizienz der Infrastrukturleistungen beeinflusst. Die Ressourcenaufwände für den VDI-Arbeitsplatz können demnach sehr unterschiedlich hoch ausfallen, je nachdem ob die Rechenzentrumsressourcen bedarfsgerecht oder überdimensioniert für die VDI eingesetzt sind.

4.2.4 Vergleich VDI-Arbeitsplätze mit Desktop-Arbeitsplätzen

Zur Einordnung der Größenordnung der GCC-Kennzahlen wird das Treibhausgaspotenzial (GWP) zweier verschiedener Arbeitsplatzkonzepte miteinander verglichen. Zum einen ein Arbeitsplatz mit einem Thin-Client, der, wie oben dargestellt, mit einer Virtuellen Desktop Infrastruktur ausgestattet ist. Zum zweiten ein Arbeitsplatz, der stattdessen mit einem Desktop-Computer („Fat-Client“) ausgerüstet ist, auf dem ein grafisches Betriebssystem (Windows) und die Anwendungssoftware lokal ausgeführt werden. Beide Arbeitsplätze besitzen Tastatur, Maus und Monitor und sind über ein Datennetzwerk mit einem Server Rechenzentrum oder Serverraum verbunden. Im Rechenzentrum verursachen beide noch einen weiteren Ressourcenbedarf für gemeinsam genutzte Dienste, wie Firewall, Mail- und Print-Server und zentrale Datenspeicherung. Da diese Dienste für beide Arbeitsplatzkonzepte jedoch identisch sind, werden sie bei der Bilanzierung ausgespart, da sie nichts zum Vergleich beider Konzepte beitragen.

In der nachfolgenden Tabelle 52 werden die ressourcen- und energierelevanten Parameter beider Arbeitsplatzkonzepte dargestellt sowie deren Treibhausgaspotenzial berechnet. Für den Herstellungsaufwand der jeweiligen Hardware sowie für deren Energieverbrauch in der Nutzungsphase wurde auf Literaturwerte zurückgegriffen. Der Desktop-PC stellt dabei einen energieeffizienten Computer dar, wie er in Bundesverwaltungen eingesetzt wird (Öko-APC 2016). Beim Einsatz weniger effizienter PCs benötigen diese in der Nutzungsphase entsprechend mehr Energie und führen damit zu einem höheren Treibhausgaspotenzial.

Tabelle 52: Vergleich Treibhausgaspotenzial (GWP) VDI-Arbeitsplatz mit Desktop-PC

	Arbeitsplatz 1: Thin-Client mit VDI	Quelle	Arbeitsplatz 2: Desktop-PC	Quelle
Leistungsaufnahme Idle-Modus (6 h/d)	9,0 W	a)	37,7 W	c)
Leistungsaufnahme Standby-Modus (2 h/d)	5,1 W	b)	1,9 W	c)
Leistungsaufnahme Aus-Modus (16 h/d)	0,7 W	b)	1,6 W	c)
Arbeitstage pro Jahr	220 d	f)	220 d	f)
Energieverbrauch Nutzungsphase	19 kWh/a	f)	62 kWh/a	f)
Emissionsfaktor Strommix Deutschland (vgl. Tabelle 79)	0,635 kg CO ₂ e/kWh	e)	0,635 kg CO ₂ e/kWh	e)
Nutzungsdauer Endgerät	8 a	f)	5 a	c)
GWP Herstellung Endgerät	34 kg CO ₂ e /Stück	d)	347 kg CO ₂ e /Stück	c)
GWP Herstellung Endgerät pro Jahr	4 kg CO ₂ e/a	f)	69 kg CO ₂ e/a	f)
GWP Energieverbrauch Nutzungsphase	12 kg CO ₂ e/a	f)	39 kg CO ₂ e/a	f)
GWP Virtuelle Desktop Infrastruktur	59 kg CO ₂ e/a	f)	-	-
GWP Summe	75 kg CO₂e/a	f)	108 kg CO₂e/a	f)

Quellen: a) Maya-Drysdale et al. 2017, b) Energy Star 2020, c) Prakash et al. 2016, d) Teehan und Kandlikar 2013, e) Ecoinvent V3.5 2018, f) eigene Annahme oder Berechnung, Öko-Institut

Das Arbeitsplatzkonzept 1 mit Thin-Client und Virtueller Desktop-Infrastruktur (VDI) weist einen jährlichen CO₂-Fußabdruck von 75 Kilogramm Kohlendioxid-Äquivalenten auf. Darin enthalten ist der Herstellungsaufwand für die Hardware im Rechenzentrum und für den lokalen Thin-Client-Computer sowie den Energieverbrauch im Rechenzentrum und am Arbeitsplatz. Im Vergleich dazu liegt das Treibhausgaspotenzial des Arbeitsplatzkonzepts 2 mit einem energiesparenden Desktop-Computer bei jährlich 108 Kilogramm Kohlendioxid-Äquivalenten. Die Thin-Client-Lösung weist damit einen um 33 Kilogramm geringeren CO₂-Fußabdruck auf. Obwohl der Aufwand im Rechenzentrum für das Arbeitsplatzkonzept 1 mit 59 kg CO₂e/a vergleichsweise hoch ist, wird er durch den geringeren Aufwand zur Herstellung eines leistungsfähigen Endgerätes überkompensiert.

4.3 Videostreaming

4.3.1 Beschreibung des Cloud-Dienstes Videostreaming

Videostreaming bezeichnet die Übertragung von Videoinhalten (*video*) als kontinuierlicher Datenstrom (*stream*). Auf der Senderseite werden dazu Videoinhalte in einzelne Datenpakete zerlegt und mit einer Datenrate über das Netzwerk ausgespielt, die mindestens so hoch sein muss, damit eine störungsfreie Wiedergabe (ohne Unterbrechungen) auf der Empfängerseite ermöglicht wird. Videostreaming wird als Dienstleistung angeboten, beispielsweise um nutzergenerierte Videoclips auszuspielen (z.B. Youtube), für Live-Übertragung von Fernsehprogrammen (z.B. Live-Streams der öffentlich-rechtlichen Rundfunkanstalten) oder kommerzielle Videoportale (z.B. Netflix, Zattoo, Amazon Prime Video, Maxdome, Vimeo), die gegen Abonnementgebühren Videos ausspielen.

Das Streamen von Videomaterial unterscheidet sich vom Datei-Download. Beim Download wird die komplette (Video-) Datei mit der maximal möglichen Bandbreite über das Netzwerk übertragen und anschließend lokal gespeichert. Nach der Übertragung kann die Internet-Verbindung getrennt werden und die Server-Ressourcen stehen für andere Aufgaben zur Verfügung. Beim Streaming ist dagegen ein sogenannter Streaming-Server für die gesamte Nutzungsdauer erforderlich, der das anfragende Endgerät (z.B. ein Fernsehgerät oder einen Computer) kontinuierlich mit Daten versorgt. Wird die Nutzung unterbrochen, so werden auch keine weiteren Daten übertragen. Die Datenströme werden in der Regel nach dem Betrachten der Videos beim Nutzenden unmittelbar gelöscht, sodass lokal keine Daten abgelegt oder urheberrechtlich geschützte Inhalte auf lokalen Geräten gelagert werden.

4.3.2 Untersuchungsgegenstand

Die Anwendung der GCC-Methodik soll den Ressourcenbedarf für die Bereitstellung einer Serviceeinheit Videostreaming im Rechenzentrum berechnen. Es werden drei GCC-Kennzahlen für Videostreaming über den Zeitraum einer Stunde ermittelt, der CO₂-Fußabdruck (GCC Videostreaming_{GWP}), der Primärenergiebedarf (GCC Videostreaming_{CED}) sowie der Rohstoffverbrauch (GCC Videostreaming_{ADP}).

Hierzu werden die technischen Parameter sowie Energieverbräuche der Server, Speichersysteme und Netzwerkkomponenten eines großen Streaming-Dienstleisters (Zattoo Europa AG) erhoben und mit der Green Cloud Computing Methodik berechnet. Die IT-Komponenten sind auf unterschiedliche Colocation-Rechenzentren in Deutschland und der Schweiz verteilt. Der Energieverbrauch der Gebäudetechnik wurde jeweils über den PUE der jeweiligen Rechenzentren ausgehend vom Energieverbrauch der IT berechnet. Für die Berechnung der Treibhausgasemissionen wurde vereinfachend angenommen, dass die Elektrizität zum Betrieb der Rechenzentren aus dem deutschen Strommix stammt (GWP_{Strom}, siehe Tabelle 79), auch wenn Teile der Hardware-Ressourcen für die Dienstleistung aus der Schweiz heraus angeboten werden.

Der ausgewertete Zeitraum für den Hardwarebestand und den Energieverbrauch der Rechenzentren reicht vom 01.04.2019 bis zum 31.03.2020. In Tabelle 53 werden die wesentlichen technischen und Energie-bezogenen Parameter der Video-Streaming Rechenzentren dargestellt.

Tabelle 53: Mengengerüst Video-Streaming Rechenzentren

Server	Wert	Einheit
Anzahl Server	447	[Stck]
Mittlere Nutzungsdauer	9,0	[a]
Anzahl CPUs	834	[Anzahl]
Anzahl Kerne	23.560	[Anzahl]
RAM	2.680	[GByte]
Anzahl RAM Module	3.380	[Anzahl]
Anzahl HDD	1.190	[Anzahl]
Anzahl SSD	896	[Anzahl]
Anzahl redundante Netzteile	826	[Anzahl]
Mittlere CPU-Auslastung pro Server	33%	[-]
Mittlere Leistungsaufnahme pro Server	253	[W/Stck]
Speichersysteme	Wert	Einheit
Anzahl Speichersysteme	34	[Stck]
Mittlere Nutzungsdauer	9,0	[a]
Speicherkapazität	19.440.000	[GByte]
Anzahl HDD	1.890	[Anzahl]
Anzahl SSD	48	[Anzahl]
Anzahl Netzteile	68	[Anzahl]
Mittlere Leistungsaufnahme pro Speicher	611	[W/Stck]
Netzwerk-Geräte	Wert	Einheit
Anzahl Netzwerk-Geräte	37	[Stck]
Mittlere Nutzungsdauer	9,0	[a]
Mittlere Leistungsaufnahme pro Switch	244	[W/Stck]
Gebäudetechnik	Wert	Einheit
Strombedarf RZ gesamt	1.358.346	[kWh _{el} /a]
Strombedarf IT	1.060.397	[kWh _{el} /a]
Mittlerer PUE	1,28	[-]
Mittlere elektrische Leistungsaufnahme der gebäudetechnischen Anlagen	155	[kW _{el}]

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

4.3.3 GCC-Kennzahlen für Videostreaming

Zur Ermittlung der GCC-Kennzahlen wird als Nutzen des Rechenzentrums die Auslieferung von Videostreaming-Stunden definiert. Der komplette Aufwand im Rechenzentrum wird dieser Dienstleistung zugeordnet. Die Allokation erfolgt auf der Ebene Hardware-Ressourcen mit Allokationsfaktoren für alle Teilbereiche von 100 %. Die Serviceeinheit ist die Bereitstellung eines Videostreams über einen Zeitraum von 1 Stunde.

Nach Auswertung des Netzwerkverkehrs des Videostreaming-Anbieters liefert dieser eine Datenmenge von 2 Gigabyte pro Stunde Videomaterial aus bzw. streamt in einer Bandbreite von 4,44 Mbit/s. Diese Datenmenge korreliert gut mit der typischen Datenmenge auf der Kundenseite zum Empfang eines Full-HD-Videostreams (Bildschirmauflösung 1920 x 1080 Pixel) anderer Streaming-Anbieter (Quelle: tarife.at 2020). Die von den Rechenzentren ausgelieferte Stundenzahl an Videostreaming (Nutzen) beträgt 619 Millionen Stunden über den Zeitraum eines Jahres. Diese Zahl entspricht der durchschnittlichen Bereitstellung von 158 Streams pro Server zu jedem Zeitpunkt. In der Praxis ist davon auszugehen, dass diese Auslastung abhängig von der Tageszeit stark schwankt und die Server zu Stoßzeiten deutlich mehr Streams ausliefern als zu Schwachlastzeiten.

In Tabelle 54 ist die Berechnung der GCC-Kennzahlen für Videostreaming dargestellt. Die Umweltwirkungen setzen sich jeweils zusammen aus den IT-Teilbereichen Server, Speichersystem und Netzwerk sowie den Umweltwirkungen der Gebäude-Infrastruktur. Durch die Quotientenbildung (Aufwand durch Nutzen) ergeben sich die jeweiligen GCC-Aufwandskennzahlen.

Tabelle 54: Berechnung der GCC-Kennzahlen für 1 h Videostreaming für die Umweltwirkungen Rohstoffverbrauch, Treibhausgaspotenzial und Primärenergiebedarf

Bezeichnung	Rohstoffverbrauch (ADP)	Treibhausgaspotenzial (GWP)	Primärenergiebedarf (CED)
Server	5,39 kg Sb eq./a	559 t CO ₂ eq./a	9.295 GJ/a
Storage	2,90 kg Sb eq./a	110 t CO ₂ eq./a	1.777 GJ/a
Network	0,24 kg Sb eq./a	43 t CO ₂ eq./a	727 GJ/a
Infrastruktur	0,10 kg Sb eq./a	189 t CO ₂ eq./a	3.172 GJ/a
Aufwand: Summe	8,63 kg Sb eq./a	901 t CO₂ eq./a	14.972 GJ/a
Nutzen: Summe Videostreaming	619 Mio. h/a	619 Mio. h/a	619 Mio. h/a
GCC Videostreaming	1,39E-08 kg Sb eq./h	0,00146 kg CO₂ eq./h	0,0242 MJ/h

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Der Ressourcenbedarf für die Bereitstellung einer Stunde Videostreaming beträgt in besser lesbaren Einheiten:

- ▶ $\text{GCC Videostreaming}_{\text{ADP}}$: 0,014 µg Sb eq./h
- ▶ $\text{GCC Videostreaming}_{\text{GWP}}$: 1,46 g CO₂ eq./h
- ▶ $\text{GCC Videostreaming}_{\text{CED}}$: 24,2 kJ/h

Zur Einordnung der Größenordnung der Treibhausgasemissionen im Rechenzentrum wird der Wert des CO₂-Fußabdruck von 1,46 Gramm Kohlendioxid-Äquivalenten pro Stunde Videostream, noch in anderen Bezugsgrößen ausgedrückt. Auf eine elektrische Leistungsaufnahme mit dem verwendeten Emissionsfaktor des deutschen Strommixes bezogen, entspricht dieser Wert rund 2,3 Watt pro Videostream. Umgerechnet auf die Personenkilometer mit einem PKW (143 g CO₂ eq./km) entspricht dies einer Autofahrt von 10 Metern. Der CO₂-Fußabdruck der Streaming-Dienstleistung erscheint vor diesem Hintergrund sehr gering. Allerdings ist in dieser Umweltwirkung nicht die Übertragung über das Telekommunikationsnetzwerk vom Rechenzentrum zum Zuschauer enthalten und ebenfalls nicht der Energieverbrauch der Heimvernetzung (Router, WLAN) sowie der Endgeräte (Fernsehgeräte, Computer) der Nutzenden. Um eine vollständige CO₂-Bilanz für Videostreaming zu erhalten, müssen daher auch CO₂-Emissionen in Netzwerken und in Haushalten einbezogen werden.

4.4 Home-Office

4.4.1 Beschreibung des Anwendungsfalls Home-Office

Unter „Home-Office“ wird hier eine Arbeitssituation verstanden, in der Bürotätigkeiten vom privaten Haushalt aus durchgeführt werden. Im Gegensatz zur klassischen Büroarbeit, die in gemeinsam genutzten Geschäftsräumen stattfindet. Hierzu wird eine individuelle IT-Ausstattung genutzt, die über das Internet mit gemeinsam genutzten Cloud-Ressourcen verbunden ist.

4.4.2 Untersuchungsgegenstand

Untersucht werden der Energiebedarf und die Treibhausgasemissionen, die mit der Nutzung von Informationstechnik für einen Home-Office-Arbeitsplatz zusammenhängen. Dabei werden sowohl die Treibhausgasemissionen zur Herstellung der genutzten Technik anhand von Literaturwerten einbezogen als auch die Treibhausgasemissionen, die in der Nutzungsphase durch den Stromverbrauch entstehen.

Bei dieser Teiluntersuchung handelt es sich nicht um einen Anwendungsfall der GCC-Methodik für Cloud-Dienstleistungen sondern um eine Abschätzung der Umweltbelastungen (hier Treibhausgasemissionen) bei der Nutzung privater Informationstechnik. Damit ergänzt diese Untersuchung die Berechnung des Umweltfußabdruckes von Cloud-Dienstleistungen und ermöglicht es, die Treibhausgasemissionen von Rechenzentren und Telekommunikationsnetzen mit denen der Nutzung von Endgeräten zu vergleichen.

Die Informationstechnik für das Home-Office besteht hier aus Desktop-Computer, Monitor (22 Zoll), Drucker und Router. Der Arbeitsplatz wird über den Zeitraum eines Jahres an 220 Arbeitstagen jeweils 8 Stunden genutzt. Als weitere Rahmendaten wird eine Datenübertragung über einen Breitband-Internetanschluss von 4 Gigabyte pro Arbeitstag angenommen sowie ein Emissionsfaktor für den genutzten Strom auf Grundlage des vom Umweltbundesamt (Icha 2020) für das Jahr 2018 berechneten Durchschnittswert für Deutschland in der Höhe von 0,468 kg CO₂ eq./kWh. Dieser Emissionsfaktor weicht in dieser Teiluntersuchung damit von dem Faktor ab, der im KPI4DCE-Berechnungstool auf Grundlage von Ecoinvent V3.5 (2018) verwendet wird.

4.4.3 GWP-Kennzahlen für Homeoffice

Grundlage für die Berechnung von Kennzahlen zu Treibhausgasemissionen (GWP-Kennzahlen) für Home-Office ist die Ermittlung der jeweiligen Beiträge der eingesetzten Informationstechnik. In Tabelle 55 sind die Ausgangswerte und die Berechnungen auf Produktebene dargestellt. Bei den Zahlenwerten handelt sich um Literatur- oder Herstellerangaben.

Tabelle 55: Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen der Home-Office-Informationstechnik

	Desktop-Computer	Monitor	Drucker	Router
Leistungsaufnahme Betriebszustand (Aktiv oder Idle-Modus) (8 h/d)	38 W ^{a)}	19 W ^{a)}	37 W ^{b)}	13 W ^{c)}
Leistungsaufnahme Standby-Modus (2 h/d)	1,9 W ^{a)}	0,5 W ^{a)}	8 W ^{b)}	13 W ^{c)}
Leistungsaufnahme Aus-Modus (14 h/d)	1,6 W ^{a)}	0,3 W ^{a)}	0,3 W ^{b)}	13 W ^{c)}
Energieverbrauch Nutzungsphase	78 kWh/a	36 kWh/a	71 kWh/a	114 kWh/a
Nutzungsdauer Endgerät	5 a ^{d)}	5 a ^{d)}	5 a ^{d)}	7 a ^{d)}
GWP Herstellung Endgerät	347 kg CO ₂ eq. ^{a)}	88 kg CO ₂ eq. ^{a)}	66 kg CO ₂ eq. ^{d)}	77 kg CO ₂ eq. ^{c)}
GWP Herstellung Endgerät pro Jahr	69 kg CO ₂ eq./a	18 kg CO ₂ eq./a	13 kg CO ₂ eq./a	11 kg CO ₂ eq./a
GWP Energieverbrauch Nutzungsphase	36 kg CO ₂ eq./a	17 kg CO ₂ eq./a	33 kg CO ₂ eq./a	53 kg CO ₂ eq./a
GWP Summe	105 kg CO₂ eq./a	35 kg CO₂ eq./a	46 kg CO₂ eq./a	64 kg CO₂ eq./a

Quellen: a) Prakash et al. 2016, b) Herstellerangaben, c) Gröger 2020, d) eigene Annahme oder Berechnung Öko-Institut

Die Treibhausgasemissionen setzen sich jeweils zusammen aus einem anteiligen Herstellungsaufwand (GWP Herstellung Endgerät pro Jahr) und den Treibhausgasemissionen, die mit dem Stromverbrauch in der Nutzungsphase zusammenhängen.

Über den Zeitraum eines Jahres verursacht der Desktop-Computer Treibhausgasemissionen in Höhe von 105 Kilogramm CO₂-Äquivalente, der externe Monitor 35 Kilogramm, der Drucker 46 Kilogramm und der Router, der rund um die Uhr eine relevante Leistungsaufnahme aufweist, Treibhausgasemissionen von 64 Kilogramm CO₂-Äquivalenten. Zusammen verursachen die vier IT-Geräte 250 Kilogramm CO₂-Äquivalente pro Jahr.

Für den Home-Office-Arbeitsplatz wird angenommen, dass er regelmäßig Daten mit dem Rechenzentrum bzw. Serverraum des Arbeitgebers austauscht oder andere Cloud-Dienstleistungen in Anspruch nimmt. Die angenommene übertragene Datenmenge beträgt dabei 4 Gigabyte pro Tag bzw. 0,5 Gigabyte pro Arbeitsstunde. Bei diesem Wert handelt es sich um einen Durchschnittswert auf Grundlage der Auswertung von 16 Heimarbeitsplätzen beim Öko-Institut. Abhängig von der jeweiligen Tätigkeit und der Intensität der Nutzung von datenintensiven Diensten (z.B. Videokonferenzen, Cloud-Speicherung, Software-as-a-Service), kann dieser Wert je nach Home-Office-Arbeitsplatz stark variieren.

Die Treibhausgasemissionen für die Datenübertragung sind in Tabelle 56 dargestellt. Dabei werden zwei verschiedene Berechnungsmethoden dargestellt. Zum einen die Berechnung nach dem Energiemodell für Telekommunikationsnetze gemäß Kapitel 3.5.2 mit einem VDSL-Netzzugang und zweitens nach einer in der bei Schien et al. (2014) dokumentierten Berechnungsmethode.

Tabelle 56: Treibhausgasemissionen für die Datenübertragung Home-Office

	Berechnung nach Schien et al. (2014)	Berechnung nach Kapitel 3.5.2
Datenmenge pro Arbeitstag	4 GB/AT	4 GB/AT
Dauer der Datenübertragung	4 h/AT	4 h/AT
Arbeitstage pro Jahr	220 AT	220 AT
Leistungsaufnahme Netzwerk während der Übertragung	4 W	1,92 W
Zusätzlicher Energieverbrauch pro Übertragungsmenge	52 Wh/GB	-
Energieverbrauch Home-Office pro Jahr	49 kWh/a	2 kWh/a
Emissionsfaktor Strommix Deutschland	0,468 kg CO ₂ eq./kWh	0,468 kg CO ₂ eq./kWh
GWP: Energieverbrauch Nutzungsphase pro Jahr	23 kg CO₂ eq./a	1 kg CO₂ eq./a

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Die Berechnung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen im Zusammenhang mit der Datenübertragung unterscheiden sich deutlich. Während der Datenstrom von täglich 4 Gigabyte bei Schien et al. mit Treibhausgasemissionen von 23 Kilogramm CO₂-Äquivalente pro Jahr verbunden ist, sind es mit dem Energiemodell für Telekommunikationsnetze gemäß Kapitel 3.5.2 nur 1 Kilogramm.

Schien et al. (2014) rechnen für das Zugangsnetzwerk (Access) mit einer Leistungsaufnahme von 4 Watt während der Dauer der Datenübertragung (t) und zusätzlich mit einem Energieverbrauch für die Netzwerkkomponenten (Metro, Long Haul, Undersea) von 52 Wattstunden pro Gigabyte Datenmenge. Daraus ergibt sich folgende Berechnungsformel für den Energieverbrauch der Datenübertragung über das Zugangs- und Kernnetzwerk:

$$W_{Netzwerk}[\text{Wh}] = t [h] * 4 \text{ W} + \text{Datenmenge [GB]} * 52 \text{ Wh/GB}$$

Im Energiemodell für Telekommunikationsnetze gemäß Kapitel 3.5.2 wird dagegen die Leistungsaufnahme aller beteiligten Netzwerkkomponenten vom Netzzugang bis vor das Rechenzentrum bei einem VDSL-Zugangsnetz mit zusammen nur 1,92 Watt für die Technikgeneration 2017 angegeben (siehe Abbildung 19). Diese Leistungsaufnahme beinhaltet die Übertragung einer Datenmenge von 1 GByte pro Stunde (2,2 Mbit/s) und berücksichtigt dabei jeweils Anteile der Leistungsaufnahmen der Netzwerkkomponenten aus dem Jahr 2017 entsprechend ihrer anteiligen Auslastung durch den durchgeleiteten Datenstrom. Diese Leistungsaufnahme beinhaltet damit nicht das komplette Telekommunikationsnetzwerk mit all seinen Standby-Verlusten, niedrig ausgelasteten Komponenten und veralteter Technik, sondern nur die jeweilige Mehrauslastung durch den Datenstrom. Für eine Internetverbindung mit einem VDSL-Zugangsnetz ergibt sich ein Energieverbrauch von:

$$W_{Netzwerk}[\text{Wh}] = \text{Datenmenge [GB]} * 1,92 \text{ Wh/GB}$$

Für die Berechnung eines GWP-Wertes für Home-Office wird der Wert nach dem Energiemodell für Telekommunikationsnetze verwendet. Er beschreibt zwar nicht das komplette Bestandsnetzwerk, jedoch den zusätzlichen Energiebedarf, der durch eine ergänzte Netzwerkbelastung entsteht, was im Fall der Verlagerung von Büro-Arbeitsplätzen auf Heimarbeitsplätze der Fall ist.

Für die GWP-Kennzahl Home-Office wird als Bezugsgröße ein einzelner Arbeitstag (AT) gewählt. Durch Summenbildung der vorgenannten GWP-Werte und Bezug auf die 220 Arbeitstage ergibt sich gemäß Tabelle 57 damit ein Wert von 1,14 Kilogramm CO₂-Äquivalente pro Tag Home-Office.

Tabelle 57: GWP-Kennzahl Home-Office

Desktop-Computer	105 kg CO ₂ eq./a
Monitor	35 kg CO ₂ eq./a
Drucker	46 kg CO ₂ eq./a
Router	64 kg CO ₂ eq./a
Telekommunikationsnetzwerk	1 kg CO ₂ eq./a
Summe	251 kg CO₂ eq./a
Arbeitstage	220 AT/a
GWP-Kennzahl Home-Office	1,14 kg CO₂ eq./AT

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

4.4.4 Energieverbrauch durch Home-Office

Mit der vorangehenden Berechnung einer GWP-Kennzahl für Home-Office wurden die Treibhausgasemissionen der IKT-Nutzung im Home-Office abgeschätzt. Als zusätzliches Ergebnis, können ausgehend von diesen Werten auch die erhöhten Energiekosten durch Home-Office angegeben werden.

Hierzu wird zusätzlich eine Beleuchtung mit einer elektrischen Leistungsaufnahme von 50 Watt während der Arbeitszeit von 8 Stunden angenommen sowie ein erhöhter Heizenergiebedarf für ein 20 Quadratmeter großes Arbeitszimmer. Dieser zusätzliche Heizenergiebedarf liegt während der Arbeitszeiten bei 50 % des durchschnittlichen jährlichen Heizenergiebedarfs dieser Fläche in einem Referenzhaushalt. Die Werte für durchschnittlichen Heizenergiebedarf (105 kWh_{th}/m²/a) und Energiepreise (Strom und Erdgas) wurden aus einer Studie zu Einsparpotenzialen durch Smart Home Geräten aus Quack et al. (2019) entnommen. Naturgemäß wird die Heizung nur in der Übergangsjahreszeit sowie im Winter genutzt. Bei den hier berechneten Werten handelt es sich um einen Durchschnittswert über das gesamte Jahr.

In Tabelle 58 sind die Energieverbräuche und Energiekosten für einen über das Jahr gemittelten Arbeitstag im Home-Office im Überblick dargestellt.

Tabelle 58: Energieverbrauch und Energiekosten eines Arbeitstages im Home-Office

Stromverbrauch durch IKT im Haushalt	1,35 kWh _{el} /AT
Stromverbrauch Beleuchtung (50 Watt)	0,40 kWh _{el} /AT
Strompreis	0,30 €/kWh _{el}
Stromkosten	0,53 €/AT
Erhöhter Heizenergiebedarf (20m ²)	4,77 kWh _{th} /AT
Heizenergiepreis	0,06 €/kWh _{th}
Heizkosten	0,29 €/AT
Gesamtkosten Home-Office	0,81 €/AT

Quelle: Eigene Berechnungen, Energiepreise und Heizenergiebedarf nach Quack et al. 2019, Öko-Institut

Die zusätzlichen Energiekosten für Home-Office betragen 53 Eurocent pro Tag für Elektrizität und 29 Eurocent für zusätzliche Heizenergie. Zusammen belaufen sich die Kosten auf 81 Eurocent pro Arbeitstag im Home-Office.

4.5 Videokonferenzen

4.5.1 Beschreibung des Cloud-Dienstes Videokonferenz

Videokonferenzen sind mittlerweile zum festen Bestandteil des Büro-, Schul- oder Studienalltags geworden. Eine Videokonferenz ist eine Kommunikationsformat mit zwei oder mehr Personen, bei dem die Gesprächsteilnehmenden sowohl Ton als auch Bild übertragen. Hierzu müssen die Nutzenden jeweils mit einem Bildschirm und Lautsprechern für das Wiedergeben sowie mit Videokamera und Mikrofonen für das Aufnehmen von audiovisuellen Signalen ausgestattet sein. Auf Nutzerseite gibt es eine große Bandbreite an möglichen Endgeräten, die eine Teilnahme an einer Videokonferenz ermöglichen. Beginnend bei mobilen Endgeräten (Smartphones, Tablets, Notebooks) über Desktop-Computer mit entsprechenden Zusatzgeräten (USB-Kamera, externe Lautsprecher) bis hin zu professionellen Videokonferenz-Systemen mit Raummikrofonen, automatisch ausrichtender Kamera und großflächigen Videomonitoren.

Allen Systemen gemeinsam ist, dass sie einen Datenstrom (Videostream) erzeugen und empfangen, der über ein definiertes Datenübertragungsformat über das Internet mit einem zentralen Videokonferenzserver kommuniziert. Der Videokonferenzserver dient als Einwahlknotenpunkt, der die Zusammenfassung und Verteilung der Datenströme zu den verschiedenen an der Konferenz Teilnehmenden übernimmt. Weitere Funktionen des Videokonferenzservers sind auch das Neuberechnen der Bildschirmauflösung, das Zwischenspeichern der Daten, um abreißende Datenverbindungen zu überbrücken, die Teilnehmerverwaltung und ggf. das Mitschneiden der Konferenzinhalte oder das Bereitstellen von weiteren Kommunikationsschnittstellen (z.B. über das Telefon).

Es gibt eine wachsende Anzahl an Anbietern von Videokonferenzen-Lösungen als Cloud-Dienstleistung. Die Stiftung Warentest (2020) nennt als typische Vertreter dieser Dienstleistung beispielsweise die Angebote Cisco Webex, Discord, Google Hangouts, GotoMeeting, Jitsi Meet, MS-Teams, Skype, Slack, TeamViewer Blizz oder Zoom.

Videokonferenzen sollen in der Regel physische Zusammenkünfte an einem Ort ersetzen oder um externe Teilnehmende ergänzen. In der nachfolgenden Untersuchung eines beispielhaften Videokonferenz-Dienstes mit der GCC-Methodik werden daher mehrere Aspekte betrachtet:

- ▶ Wie hoch sind die Treibhausgasemissionen im Rechenzentrum durch die Nutzung des Cloud-Dienstes Videokonferenz? (Kapitel 4.5.4)
- ▶ Wie hoch sind die Treibhausgasemissionen eines Teilnehmenden unter Einbeziehung der lokal genutzten Informationstechnik und des Übertragungsnetzwerkes? (Kapitel 4.5.5)
- ▶ Ab welcher Entfernung ist die Teilnahme an einer Videokonferenz unter Berücksichtigung der Treibhausgasemissionen vorteilhafter gegenüber der Anreise zu einem physischen Treffen? (Kapitel 4.5.6)

4.5.2 Untersuchungsgegenstand

Im Rahmen dieses Fallbeispiels wird ein konkreter Videokonferenz-Anbieter untersucht und mithilfe der GCC-Methodik der Umweltaufwand bezogen auf die Treibhausgasemissionen zur Bereitstellung einer Stunde Videokonferenz für einen einzelnen Teilnehmenden ermittelt. Diese Kennzahl lässt sich dazu verwenden, den CO₂-Fußabdruck von Videokonferenzen anhand deren Teilnehmerzahl und deren Dauer für das Rechenzentrum zu berechnen.

- ▶ GCC Videokonferenz_{GWP} mit der Einheit: Gramm CO₂ Äquivalente pro Teilnehmerstunde

Zur Gewinnung von Daten konnte im Rahmen dieses Projektes der Videokonferenz-Anbieter *sichere-videokonferenz.de* als Praxispartner gewonnen werden, der einen kostenlosen und Datenschutz-konformen Videokonferenzdienst anbietet. Der Dienst nutzt die open-source Software *Jitsi*²⁵, die auf 4 dedizierten Servern in einem Hosting-Rechenzentrum installiert ist. Die Server werden ausschließlich für Videokonferenzen genutzt. Es erfolgt deshalb eine direkte Zuordnung des Herstellungsaufwands der Server und der Treibhausgasemissionen aus der Energienutzung zu den angebotenen Cloud-Diensten (Allokation auf Hardwareebene).

Zur Ermittlung der angebotenen Dienstleistung und des Umweltaufwandes wurden die Logfiles der *Jitsi Videobridge* Installationen, in der die Ereignisse des Computersystems aufgezeichnet werden, über einen Zeitraum einer Woche ausgewertet und daraus die Anzahl und Längen der Konferenzen, der Teilnehmenden und der Hardware-Inanspruchnahme ermittelt.

Die ausgewertete Woche, von Montag, den 01.02.2021 bis Sonntag, den 07.02.2021, lag innerhalb des pandemiebedingten Lockdowns in Deutschland, in dem ein Großteil der Schulen, Hochschulen und Gemeinschaftsbüros geschlossen waren. Daher ist davon auszugehen, dass das Videokonferenzsystem im Rahmen seiner technischen Möglichkeiten intensiv genutzt wurde und das System dadurch einen repräsentativen Betriebszustand erreicht hat.

Die Untersuchung eines einzelnen Videokonferenzsystem-Rechenzentrums kann keine Aussage darüber treffen, ob das System besonders effizient oder ineffizient arbeitet. Die Ermittlung der GCC-Kennzahlen stellt lediglich einen Anwendungsfall der GCC-Methodik dar und ist nicht immer auf andere Angebote übertragbar. Zur Einordnung der Größenordnung der ermittelten Kennzahlen gegenüber anderen Energieverbräuchen ist dieses Beispiel jedoch gut anwendbar.

Von den eingesetzten Servern sind die in Tabelle 59 genannten technischen Parameter bekannt, die zur Berechnung des Herstellungsaufwands nach der KPI4DCE-Methodik herangezogen wurden.

²⁵ <https://jitsi.org/jitsi-videobridge/>

Tabelle 59: Server für Videokonferenzen

Server	Wert	Einheit
Anzahl Server	4	[Stck]
Mittlere Nutzungsdauer	4	[a]
Anzahl CPUs	4	[Anzahl]
Anzahl Kerne	24	[Anzahl]
CPU-Typ	AMD Ryzen 5 3600	[-]
RAM	64	[GByte]
Anzahl RAM Module	16	[Anzahl]
Anzahl SSD	8	[Anzahl]
Anzahl redundante Netzteile	8	[Anzahl]
Herstellungsaufwand KPI4DCE (4 Server)		
Server _{ADP}	0,36	[kg Sb. eq.]
Server _{GWP}	1.945	[kg CO ₂ eq.]
Server _{CED}	26.660	[MJ]

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Zur Ermittlung des Energiebedarfs von Servern, Speichersystemen und Netzwerktechnik sowie der Verluste der Gebäudetechnik sieht die GCC-Methodik vor, dass konkrete Messdaten des Rechenzentrumsbetreibers in die Berechnung einbezogen werden. Dies setzt voraus, dass der Rechenzentrumsbetreiber diese Daten erfasst und seinen Kunden zur Verfügung stellt. Dies war im vorliegenden Fall nicht gegeben. Denn obwohl der Videokonferenz-Anbieter die 4 physischen Server bei einem Hosting-Anbieter mietet und deren Energiekosten bezahlt, gab es keine Bereitschaft des Hosting-Anbieters, Auskunft über deren Energieverbrauch zu geben.

Dieses Beispiel zeigt daher auch, worauf in der Praxis geachtet werden sollte, wenn Cloud-Dienste effizient bereitgestellt und Informationen über deren Umweltwirkungen gegeben werden sollen. Der Informationsfluss zwischen RZ-Betreiber (Hosting-Anbieter) und Anbieter der Cloud-Dienstleistung muss gewährleistet sein, bestenfalls durch vertragliche oder gesetzliche Auskunftspflichten.

Im vorliegenden Fall wurde der Energieverbrauch der Server sowie der sonstigen Komponenten bestmöglich abgeschätzt: Der Energieverbrauch der Server auf Grundlage von elektrischen Leistungsaufnahmen vergleichbar Server mit der gleichen CPU (Hagedoorn 2019), der Energieverbrauch von Storage und Netzwerk durch Erfahrungswerte aus anderen Praxisbeispielen und die Verluste der Gebäudetechnik durch den vom RZ-Betreiber genannten PUE-Wert in Höhe von 1,12.

Für die verwendeten Server wird pro Server folgende elektrische Leistungsaufnahme in Abhängigkeit der CPU-Auslastung angenommen:

$$P_{Server} = 100 \text{ W} + \text{Auslastung}_{CPU} * 100 \text{ W}$$

Der Energieverbrauch der Server ergibt sich zu:

$$W_{Server} = \int_{t_1}^{t_2} P_{Server}(t) dt$$

Für den Energieverbrauch des Speichersystems wird angenommen:

$$W_{Storage} = 30\% * W_{Server}$$

Für den Energieverbrauch des Netzwerks wird angenommen:

$$W_{Network} = 10\% * W_{Server}$$

Und schließlich für den Energieverbrauch des Rechenzentrums (genauer: des Anteils des Rechenzentrums, der durch den Videokonferenz-Dienst beansprucht wird):

$$W_{DC} = PUE * (W_{Server} + W_{Storage} + W_{Network})$$

Mit einem PUE-Wert des Hosting-Anbieters von 1,12.

4.5.3 Auswertung der Logfiles

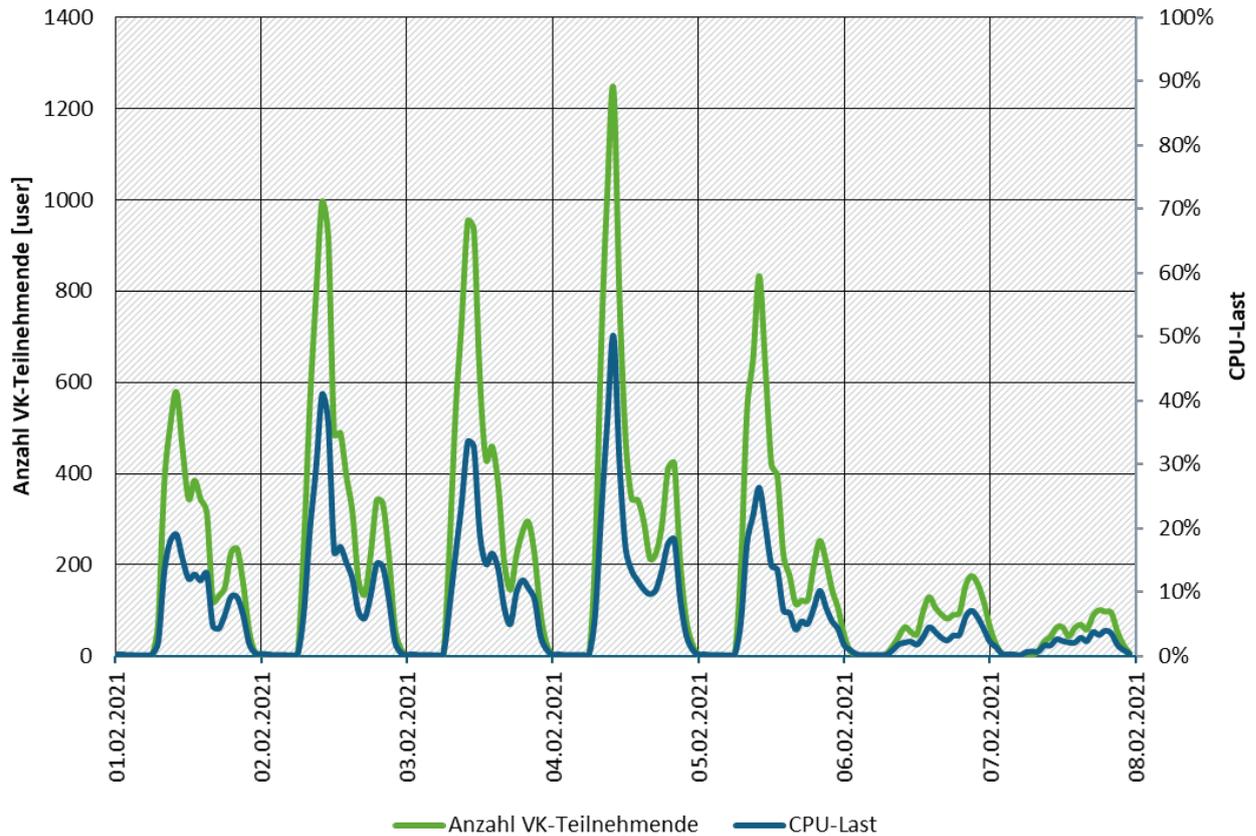
Die Informationen zur Performanz und zur Hardware-Inanspruchnahme durch den Videokonferenz-Dienst können aus den Logfiles der *Jitsi* Software²⁶ ausgelesen werden.

Diese Informationen werden dazu genutzt, die Menge der erbrachten Dienstleistungen des Videokonferenz-Dienstes zu beziffern sowie den Umweltaufwand, insbesondere den Energieverbrauch, zu berechnen.

In Abbildung 22 ist der Wochenverlauf dargestellt, wie viele Teilnehmende (grüne Kurve) das Videokonferenzsystem nutzen und wie sich dabei die CPU-Auslastung (blaue Kurve) der Server ändert.

²⁶ <https://github.com/jitsi/jitsi-videobridge/blob/master/doc/statistics.md>

Abbildung 22: Anzahl Videokonferenz-Teilnehmende (4 Server) und CPU-Last (pro Server) im Wochenverlauf Montag bis Sonntag



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Die 4 Server des Videokonferenzsystems werden über den Tagesverlauf unterschiedlich stark beansprucht. Jeweils ab zirka 7 Uhr an Werktagen steigt die Teilnehmerzahl stark an, um einen Maximalwert gegen 10 Uhr zu erreichen. Die Teilnahme flaut bis 17 Uhr wieder ab, um dann in den Abendstunden, gegen 20 Uhr, wieder ein kleines Zwischenhoch zu erreichen. Ab 24 Uhr wird das System nur noch in seltenen Fällen genutzt. Am Wochenende tritt insgesamt eine deutlich schwächere Nutzung auf, die überwiegend in den Abendstunden stattfindet. Die gemessene maximale Teilnehmerzahl beträgt 1.242 Personen, der Durchschnittswert über die gesamte Woche verteilt, beträgt 161,5 Teilnehmende. Bezogen auf einzelne Server bedient damit ein einzelner Server maximal 390 Teilnehmende und im Durchschnitt 40,4 Teilnehmende zu jedem Zeitpunkt.

Jede Konferenz wird in der Regel von mehreren Teilnehmenden besucht. Der Maximalwert an durchgeführten Videokonferenzen (ohne Abbildung) beträgt pro Server 54 Konferenzen und der Durchschnittswert 7,6 Konferenzen pro Server.

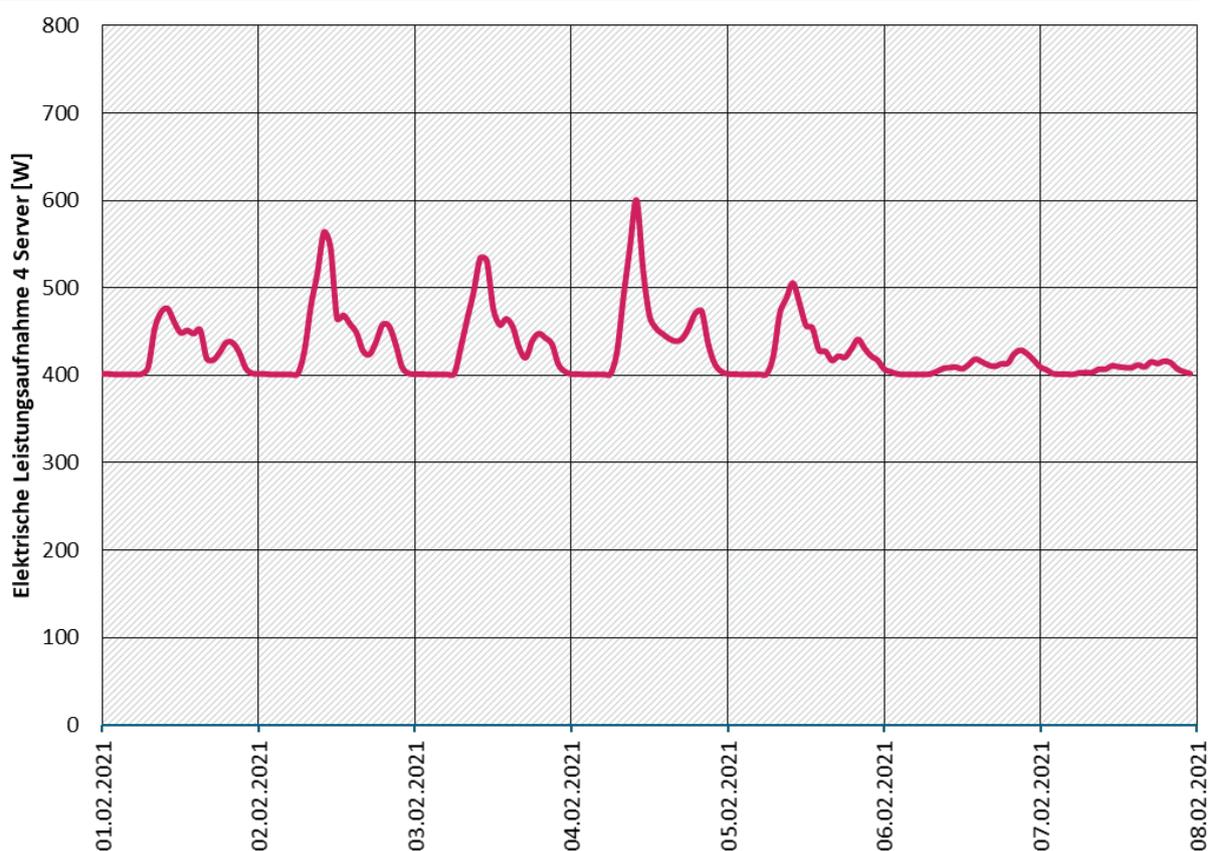
Bildet man das Produkt aus Teilnehmerzahl und Zeitdauer, die die jeweils Teilnehmenden in einer Videokonferenz verweilen, so erhält man über den Zeitraum einer Woche die Zahl der *Teilnehmerstunden* (Einheit: Tln*h/wo). Diese Kenngröße beschreibt die vom Videokonferenzsystem insgesamt erbrachte Dienstleistung. In Abbildung 22 entspricht dies der Fläche unterhalb der Teilnehmerzahl (grüne Kurve). Das untersuchte System weist wöchentliche Teilnehmerstunden in Höhe von 27.133 Tln*h/wo auf. Diese Kennzahl wird im folgenden Kapitel 4.5.4 zur Ermittlung der GCC-Kennzahl dazu verwendet, um den Nutzen der Dienstleistung zu beschreiben.

► Nutzen der Cloud-Dienstleistung: 27.133 Teilnehmerstunden pro Woche.

Die CPU-Auslastung in Abbildung 22 variiert über den Wochenverlauf zwischen nahezu 0 Prozent in den Nachtstunden und maximal 58 Prozent zu Spitzenlastzeiten. Bei den ausgewerteten Einzelwerten handelt es sich um 5 Minuten-Mittelwerte. Bei einer feineren Granularität der Auswertung erreicht die CPU-Auslastung nach Auskunft des Dienste-Anbieters Maximalwerte bis zu 70 Prozent pro Server. Die durchschnittliche CPU-Auslastung über die Woche beträgt 5,8 Prozent. Die CPU-Auslastung folgt in ihrem Verlauf nahezu synchron der Anzahl an Konferenzteilnehmern. Es besteht ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen der Anzahl an Teilnehmenden und der CPU-Auslastung und damit indirekt mit dem Energieverbrauch.

Analog zur CPU-Auslastung verhält sich auch die elektrische Leistungsaufnahme der Server, die in Abbildung 23 dargestellt ist.

Abbildung 23: Elektrische Leistungsaufnahme (4 Server) im Wochenverlauf Montag bis Sonntag



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Anders als die CPU-Auslastung erreicht die elektrische Leistungsaufnahme jedoch nie den Wert von Null, sondern variiert zwischen dem Basiswert von 400 Watt und einem Spitzenwert von rund 600 Watt. Dies resultiert rein mathematisch aus der oben beschriebenen Berechnungsformel für P_{Server} . Wären die Werte gemessen und nicht berechnet, so wäre es denkbar, dass die Server in den Nachtstunden bei 0 Teilnehmenden tatsächlich in einen niedrigeren Energiezustand (Idle-Mode) übergehen würden. Dies hängt vom tatsächlichen Energiemanagement der Server ab, was hier nicht überprüft werden kann. Der hier berechnete Energieverbrauch ist daher eher leicht überschätzt.

Aus den Leistungsaufnahmen ergibt sich durch die Integration über die Zeit ein wöchentlicher Energieverbrauch der Server. Bildlich gesprochen, entspricht dies der Fläche in Abbildung 23 unterhalb der roten Linie. Daraus kann der gesamte Energieverbrauch derjenigen Anteile des Rechenzentrums berechnet werden, die für die Videokonferenz-Dienstleistung eingesetzt werden. Die Berechnung ist in Tabelle 60 dokumentiert.

Tabelle 60: Energiebedarf des Rechenzentrums für 1 Woche Videokonferenz-Dienstleistung

Teilbereich im Rechenzentrum	Berechnung	Energiebedarf	Einheit
Server	Integral P_{el} über den Zeitraum 1 Woche	71	[kWh _{el} /wo]
Speicher	30% des Server-Energiebedarfs	21	[kWh _{el} /wo]
Netzwerk	10% des Server-Energiebedarfs	7	[kWh _{el} /wo]
Infrastruktur	Berechnet mit PUE=1,12	12	[kWh _{el} /wo]
Summe		112	[kWh_{el}/wo]

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Durch die Summenbildung des Energiebedarfs für Server, Speicher, Netzwerk und Infrastruktur im Rechenzentrum, die für die Videokonferenz-Dienstleistung aufgewendet werden, ergibt sich der energetische Aufwand für die Cloud-Dienstleistung zu 112 Kilowattstunden pro Woche.

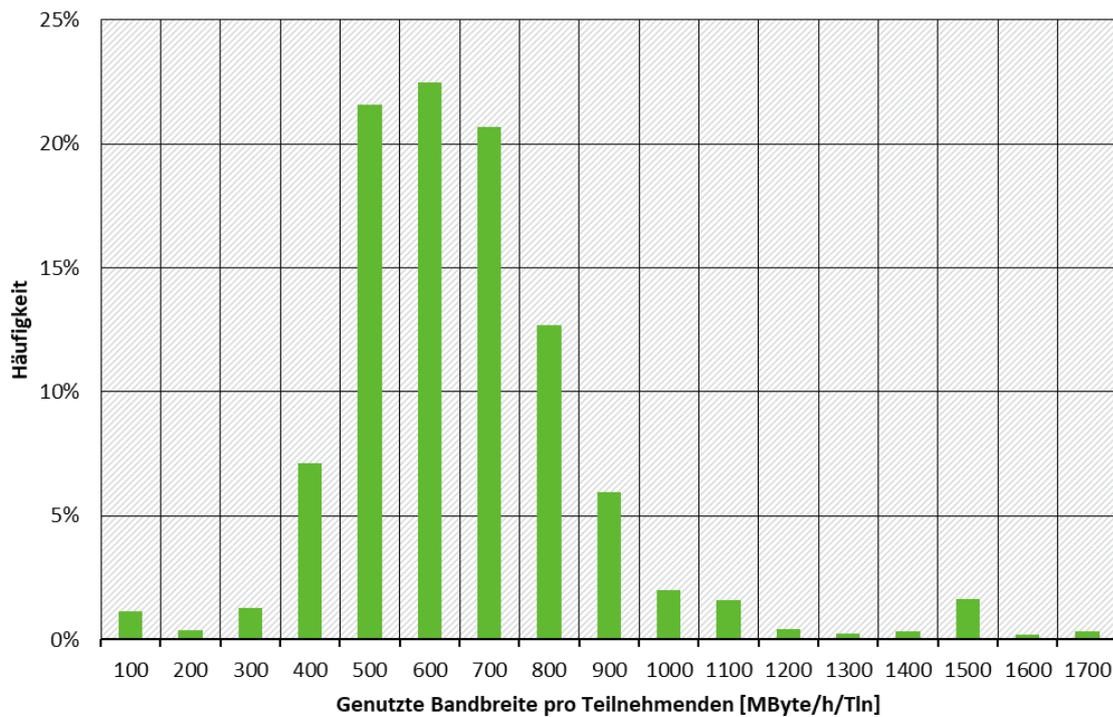
- ▶ Aufwand der Cloud-Dienstleistung (Energiebedarf): 112 Kilowattstunden pro Woche.

Diese Zahl entspricht zugleich einer durchschnittlichen Leistungsaufnahme des für den Videokonferenz-Dienst genutzten Anteils des Rechenzentrums in Höhe von 666 Watt.

Aus den Logfiles lassen sich außerdem die genutzten Netzwerk-Bandbreiten ermitteln. In dem Videokonferenzsystem können Teilnehmende zwischen verschiedenen Übertragungsqualitäten wählen, was die übertragene Datenmenge beeinflusst. In den Logfiles wird festgehalten, wie viele Teilnehmenden aktuell das System nutzen und welche Bandbreite sie dabei belegen. Abbildung 24 zeigt die Verteilung der genutzten Bandbreiten in der Einheit Megabyte pro Stunde pro Teilnehmenden. Die häufigsten Bandbreiten mit zusammen mehr als 65 Prozent liegen zwischen 500 und 700 Megabyte pro Stunde und Teilnehmer.

- ▶ Die durchschnittliche Bandbreite beträgt 612 Megabyte pro Stunde und Teilnehmenden.

Abbildung 24: Für Videokonferenzen genutzte Bandbreiten pro Teilnehmenden



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

4.5.4 GCC-Kennzahlen für Videokonferenzen

Die Ermittlung der GCC-Kennzahlen für Videokonferenzen erfolgt nach der in Kapitel 2.7 beschriebenen Systematik, indem der Quotient aus dem Aufwand zur Bereitstellung der Dienstleistung mit dem Nutzen, d.h. der Menge an erbrachter Dienstleistung gebildet wird:

$$GCC = \frac{\text{Aufwand}}{\text{Nutzen}}$$

In diesem Fallbeispiel wird nur die GCC-Kennzahl für die Treibhausgasemissionen (GWP) ermittelt, also der CO₂-Fußabdruck zur Erbringung der Dienstleistung Videokonferenz. Grundsätzlich kann die Methodik auch für die anderen Wirkungskategorien Rohstoffaufwand (ADP), Kumulierter Energieaufwand (CED) sowie ggf. Wasser verwendet werden, was hier jedoch nicht ausgeführt wird.

Der *Aufwand* setzt sich zusammen aus der Herstellung des Rechenzentrums und dessen Nutzungsphase.

Für die Treibhausgasemissionen der *Herstellung* wird vereinfachend nur die Herstellung der Server betrachtet und der Herstellungsaufwand für Speichersysteme und Netzwerkgeräte ignoriert. Die Herstellung der Netzwerkgeräte macht gemäß den in Kapitel 2.2 untersuchten KPI4DCE-Fallbeispielen ohnehin nur einen geringen Anteil von 1 bis 10 Prozent an den herstellungsbedingten Treibhausgasemissionen des Rechenzentrums aus. Die Speichersysteme werden im vorliegenden Fallbeispiel nicht explizit für den Cloud-Dienst genutzt, da die Videokonferenzen aus Gründen der Datensicherheit nicht aufgezeichnet und nicht abgespeichert werden. Daher ist die Verkürzung der Berechnung auf die Server ohne größeren Genauigkeitsverlust möglich.

Für die *Nutzungsphase des Rechenzentrums* wird der Energieverbrauch von Servern, Speichersystemen, Netzwerk und Infrastruktur berücksichtigt und mit dem Emissionsfaktor des deutschen Strommixes für das Jahr 2018 (Icha 2020) in Treibhausgasemissionen umgerechnet.

Als *Nutzen der Cloud-Dienstleistung* wird die Bereitstellung von Teilnehmerstunden an Videokonferenzen definiert. Die Serviceeinheit ist damit die Bereitstellung einer Videokonferenz für einen einzelnen Teilnehmer über einen Zeitraum von 1 Stunde. Mit dieser Serviceeinheit ist es möglich, den Aufwand für konkrete Konferenzen hochzurechnen, indem die GCC-Kennzahl mit der Anzahl an Teilnehmenden und der Dauer der Konferenz multipliziert werden.

In Tabelle 61 sind die relevanten Ausgangsparameter zusammengefasst und die Berechnung der GCC-Kennzahl für die Treibhausgasemissionen von Videokonferenzen dokumentiert.

Tabelle 61: GCC-Kennzahl „CO₂-Fußabdruck“ für Videokonferenzen

Bezeichnung	Wert	Einheit
Herstellungsaufwand Server _{GWP}	1.945	[kg CO ₂ eq.]
Nutzungsjahre pro Server	4	[a]
Aufwand: Herstellung pro Woche	9,35	[kg CO ₂ eq./wo]
Energiebedarf Rechenzentrum	112	kWh _{el} /wo
Aufwand: Nutzungsphase pro Woche (Energiebedarf)	52	kg CO ₂ eq./wo
Nutzen: Teilnehmerstunden pro Woche	27.133	[Tln*h/wo]
Berechnung der GCC-Kennzahl (= Aufwand / Nutzen)		
GCC Videokonferenz _{GWP} Herstellung	0,34	[g CO ₂ eq./Tln/h]
GCC Videokonferenz _{GWP} Nutzung	1,93	[g CO ₂ eq./Tln/h]
GCC Videokonferenz_{GWP}	2,27	[g CO₂ eq./Tln/h]

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Die Treibhausgasemissionen (GWP) zur Teilnahme an einer Stunde Videokonferenz betragen 2,27 Gramm CO₂-Äquivalente. Diese Zahl setzt sich zusammen aus 0,34 Gramm CO₂-Äquivalente für die Herstellung der Server (15%) und 1,93 Gramm CO₂-Äquivalente für den Energieverbrauch im Rechenzentrum in der Nutzungsphase (85%).

Zur Einordnung der Größenordnung der Treibhausgasemissionen im Rechenzentrum wird der Wert des CO₂-Fußabdruck von 2,27 Gramm Kohlendioxid-Äquivalenten pro Stunde und Teilnehmenden, noch in anderen Bezugsgrößen ausgedrückt. Auf eine elektrische Leistungsaufnahme im Rechenzentrum mit dem verwendeten Emissionsfaktor des deutschen Strommixes bezogen, entspricht dieser Wert rund 5 Watt pro Teilnehmenden. Umgerechnet auf die Personenkilometer mit einem PKW (143 g CO₂ eq./km) entspricht dies einer Autofahrt von 15 Metern.

Die GCC-Kennzahl stellt nur den Anteil des Umweltaufwands im Rechenzentrum dar. Tatsächlich gehört zu einer Videokonferenz auch die Übertragung der Daten in Telekommunikationsnetzwerken und die Nutzung von Endgeräten beim jeweiligen Teilnehmenden. Im folgenden Kapitel werden die weiteren Umweltwirkungen anhand verschiedener Szenarien berechnet.

4.5.5 Nutzungsszenarien für Videokonferenzen

Zur Bereitstellung der Cloud-Dienstleistung Videokonferenz treten Treibhausgasemissionen für die Herstellung und für den Betrieb des Rechenzentrums auf, die dem einzelnen Teilnehmenden in Form eines CO₂-Fußabdrucks zugeordnet werden können. Um die gesamten Treibhausgasemissionen zu bilanzieren, müssen jedoch auch die Treibhausgasemissionen berücksichtigt werden, die in den Übertragungsnetzen (vom Rechenzentrum zum Kunden) auftreten sowie die Umweltaufwendungen durch Heimvernetzung und Endgeräte (z.B. Computer, Bildschirme) beim jeweiligen Teilnehmenden.

In Abbildung 25 werden diese drei Bilanzbereiche für die gesamten Treibhausgasemissionen schematisch dargestellt.

Abbildung 25: Zusammensetzung der Treibhausgasemissionen für Videokonferenzen vom Rechenzentrum bis zum Teilnehmenden



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Die Treibhausgasemissionen (GWP) im Rechenzentrum, die in Abbildung 25 als der erste Block dargestellt sind, wurden im vorangehenden Kapitel mit der Kennzahl GCC Videokonferenz_{GWP} berechnet. Pro Stunde und Teilnehmenden beträgt der CO₂-Fußabdruck 2,27 Gramm CO₂-Äquivalente.

► $GWP_{\text{Rechenzentrum}} = 2,27 \text{ g CO}_2 \text{ eq./Tln/h.}$

Die Treibhausgasemissionen (GWP) im Übertragungsnetzwerk stellen in Abbildung 25 den zweiten Block dar. Der Bilanzraum umfasst die Strecke vom Rechenzentrum zum Haushalt oder Büro des Konferenzteilnehmenden. Um die Treibhausgasemissionen zu ermitteln, wird der Energieverbrauch im Telekommunikationsnetzwerk berechnet. Grundlage hierfür ist die übertragene Datenmenge pro Teilnehmenden für 1 Stunde Videokonferenz aus den Nutzungsdaten des untersuchten Videokonferenzsystems (siehe Kapitel 4.5.3). Sie beträgt im Durchschnitt 612 Megabyte pro Stunde und Teilnehmenden.

Das Energiemodell für Telekommunikationsnetze gemäß Kapitel 3.5.2 berechnet die Leistungsaufnahme für eine Internetverbindung mit VDSL-Zugangsnetz bei einer Datenmenge von 1 GByte pro Stunde (2,2 Mbit/s) und einem Technikstand aus dem Jahr 2017 zu 1,92 Watt. Daraus ergibt sich die in Kapitel 4.4.3 erläuterte Berechnungsformel für den elektrischen Energieverbrauch im Übertragungsnetzwerk mit VDSL-Zugangsnetz:

$$W_{\text{Netzwerk}} [\text{Wh}] = \text{Datenmenge} [\text{GB}] * 1,92 \frac{\text{Wh}}{\text{GB}}$$

Zusammen mit der Datenmenge von 612 Megabyte pro Teilnehmerstunde und dem Emissionsfaktor des deutschen Strommixes für das Jahr 2018 (Icha 2020) in Höhe von 0,468 Kilogramm CO₂-Äquivalenten pro Kilowattstunde Strom berechnet sich der CO₂-Fußabdruck für die Teilnehmerstunde im Netzwerk wie folgt:

$$GWP_{Netzwerk} = 0,468 \frac{\text{g CO}_2\text{eq.}}{\text{Wh}} * 0,612 \frac{\text{GB}}{\text{h}} * 1,92 \frac{\text{Wh}}{\text{GB}} = 0,55 \frac{\text{g CO}_2\text{eq.}}{\text{h}}$$

► $GWP_{\text{Übertragungsnetz}} = 0,55 \text{ g CO}_2 \text{ eq./ h.}$

Der dritte Block in Abbildung 25 beschreibt die IT-Geräte, die beim Teilnehmenden einer Videokonferenz zuhause oder im Büro installiert sind. Dies sind mindestens der Router und eine geeignete Kombination an Endgeräten. Vereinfacht werden diese Treibhausgasemissionen mit $GWP_{\text{Endgeräte}}$ bezeichnet.

In Tabelle 62 wird die Berechnung der Treibhausgasemissionen von Router und Endgeräten dargestellt. Anhand von drei Nutzungsszenarien werden die Endgeräte weiter unten unterschiedlich kombiniert und damit unterschiedliche Anwendungsfälle für die Teilnahme an einer Videokonferenz verglichen.

Tabelle 62: Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen Router und Endgeräte

		Desktop-Computer	Computer-Monitor	Laptop (SSD)	Großer Videomonitor (55 Zoll)	Router
Herstellungsaufwand	[kg CO ₂ eq./unit]	347 ^{a)}	88 ^{a)}	311 ^{a)}	1.000 ^{b)}	77 ^{b)}
Nutzungsjahre pro Gerät	[a/unit]	5	5	5	7	7
Nutzungstage pro Jahr	[d/a]	220	220	220	220	365
Nutzungsstunden pro Tag	[h/d]	8	8	8	4	24
Effektive Nutzungsdauer	[h/unit]	8.800	8.800	8.800	6.160	61.320
Leistungsaufnahme Aus-Modus	[W]	1,6 ^{a)}	0,3 ^{a)}	2,0 ^{a)}	2,0 ^{b)}	13 ^{b)}
Leistungsaufnahme Betriebszustand	[W]	38 ^{a)}	19 ^{a)}	13 ^{a)}	116 ^{b)}	13 ^{b)}
Jahresenergieverbrauch	[kWh/a]	78	36	37	118	114
Energieverbrauch pro Stunde	[Wh/h]	44	20	21	134	13
GWP Nutzungsphase	[g CO ₂ eq./h]	21	9	10	63	6
GWP Herstellungsphase	[g CO ₂ eq./h]	39	10	35	162	1
GWP Endgeräte (Summe)	[g CO₂ eq./h]	60	19	45	225	7

Quellen: a) Prakash et al. 2016, b) Gröger 2020

Die Berechnung in Tabelle 62 umfasst sowohl den Herstellungsaufwand von Router und Endgeräten als auch deren Energieverbrauch in der Nutzungsphase. Die Treibhausgasemissionen der Geräte werden analog zu den GCC-Kennzahlen ebenfalls als Stundenwerte pro Serviceeinheit ausgedrückt [g CO₂ eq./h]. Um den Herstellungsaufwand den Nutzungsstunden der Geräte zuzuordnen, ist es daher zunächst erforderlich, *effektive Nutzungsdauern* zu berechnen. Die Geräte werden unterschiedlich lange (Nutzungsjahre pro Gerät) und unterschiedlich intensiv (Nutzungstage pro Jahr und Nutzungsstunden pro Tag) genutzt. Die effektive Nutzungsdauer pro Gerät berechnet sich aus dem Produkt der Nutzungsjahre [a/unit], Nutzungstage [d/a] und Nutzungsstunden [h/d]. Ihre Einheit beträgt Stunden pro Gerät [h/unit]. Um Stundenwerte für den Herstellungsaufwand zu erhalten muss der einmalige Herstellungsaufwand der jeweiligen Geräte durch die effektive Nutzungsdauer geteilt werden.

Im Ergebnis beträgt der Herstellungsaufwand der betrachteten Geräte bezogen auf die Treibhausgasemissionen zwischen 1 Gramm CO₂-Äquivalenten pro Stunde Nutzungsdauer für den Router bis zu 162 Gramm pro Stunde Nutzungsdauer für den großen Videomonitor.

Die Treibhausgasemissionen in der Nutzungsphase berechnen sich aus dem Energieverbrauch der Geräte. Sie liegen zwischen 6 Gramm CO₂-Äquivalenten pro Stunde Nutzungsdauer für den Router bis zu 63 Gramm pro Stunde Nutzungsdauer für den großen Videomonitor.

In der letzten Zeile von Tabelle 62 sind schließlich die jeweiligen Summen der Treibhausgasemissionen der verschiedenen Geräte pro Stunde dargestellt (GWP Endgeräte).

Folgende Anzeigegeräte-Kombinationen werden als Nutzungsszenario zur Teilnahme an einer Videokonferenz (VK) miteinander verglichen:

- ▶ Laptop + Router + Datennetz (VDSL) + Cloud-Service VK

Das erste Nutzungsszenario „Laptop“ beschreibt die Teilnahme an einer Videokonferenz von einem mobilen Arbeitsplatz aus, beispielsweise im provisorischen Home-Office oder beim Home-Schooling.

- ▶ Desktop-PC + Computer-Monitor + Router+ Datennetz (VDSL) + Cloud-Service VK

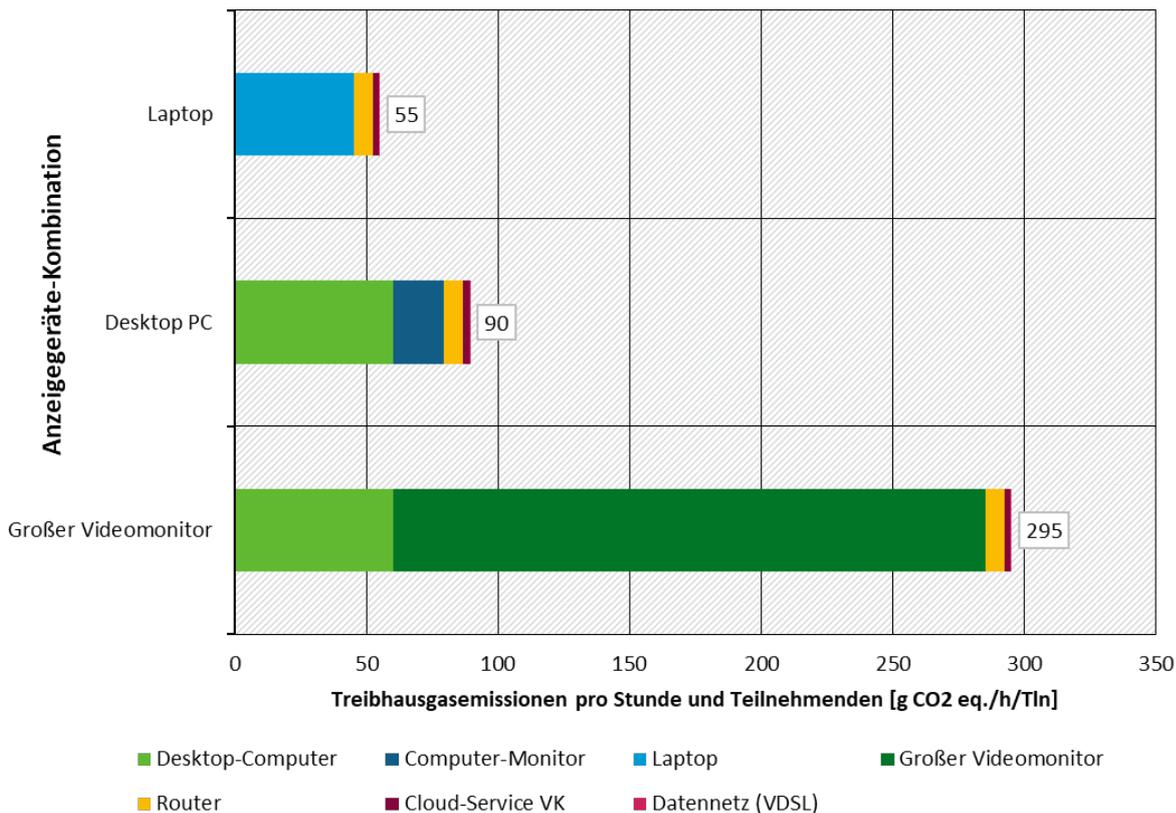
Das zweite Nutzungsszenario „Desktop-PC“ beschreibt die Teilnahme vor einem fest installierten Computer-Monitor mit Desktop-PC, wie er in der Regel in einer professionellen Büroumgebung stattfindet.

- ▶ Großer Videomonitor + Desktop-PC + Router+ Datennetz (VDSL) + Cloud-Service VK

Das dritte Nutzungsszenario „Großer Videomonitor“ findet entweder einem Besprechungsraum in einer Büroumgebung statt oder aber im Privathaushalt mit einem entsprechend großen Fernsehgerät (55 Zoll).

Die Ergebnisse der Treibhausgasemissionen bei Videokonferenz-Teilnahme mit unterschiedlichen Anzeigegeräte-Kombinationen sind in Abbildung 26 dargestellt.

Abbildung 26: Treibhausgasemissionen Videokonferenz-Teilnahme bei verschiedenen Anzeigegeräte-Kombinationen (Herstellungs- und Nutzungsphase)



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Die Teilnahme an einer Videokonferenz mit einem Laptop ist mit Treibhausgasemissionen von 55 Gramm CO₂-Äquivalenten pro Stunde verbunden. Mit einem Desktop-PC mit Monitor sind es 90 Gramm. Findet die Teilnahme vor einem großen Videomonitor statt, ist dies mit Treibhausgasemissionen von 295 Gramm CO₂-Äquivalenten pro Stunde verbunden.

Die vergleichsweise hohen Emissionen durch den großen Videomonitor können dadurch verringert werden, indem dieser, beispielsweise in einem Büro, während der Konferenz von mehreren Personen gleichzeitig genutzt wird. Wenn der große Videomonitor von 6 oder mehr Personen genutzt wird, ist der CO₂-Fußabdruck pro Teilnehmenden geringer als der des Nutzungsszenarios mit Laptop.

Die Ausweitung des Bilanzraums um die Datennetzwerke und die Endgeräte zeigt am Beispiel Videokonferenzen die hohe Bedeutung der IT, die beim Nutzer installiert ist (Router, Computer und Anzeigegeräte). Während die GCC-Kennzahl $GCC_{Videokonferenz_{GWP}}$ nur 2,27 Gramm CO₂-Äquivalenten pro Stunde und Teilnehmenden beträgt, liegen die Treibhausgasemissionen bei der schlankeste Gerätekombination Laptop und Router mit 52,5 Gramm bereits um einen Faktor von 23 höher als die Emissionen im Rechenzentrum. Beim Nutzungsszenario Desktop-PC liegt der Faktor bei 38, beim großen Videomonitor bei 128. Der Anbieter der Cloud-Dienstleistung Videokonferenz hat bei diesen Nutzungsszenarien nur einen sehr geringen Anteil an den Gesamtemissionen. Auch das Netzwerk hat in diesem Fallbeispiel mit nur 0,55 Gramm pro Stunde eine untergeordnete Rolle.

4.5.6 Einsparpotenzial an Treibhausgasemissionen im Personenverkehr

Home-Office und die Teilnahme an Videokonferenzen werden im klimapolitischen Kontext gerne als Paradebeispiel des Klimaschutzpotenzials durch Digitalisierung genannt (z.B. Clausen und Schramm 2021). Anhand der oben gewonnenen Zahlen zu den Treibhausgasemissionen für die Teilnahme an einer Videokonferenz wird nachfolgend überprüft, inwieweit Videokonferenzen tatsächlich zur Emissionsminderung beitragen können. Diese Teiluntersuchung ist sehr verkürzt, da sie nur die Treibhausgasemissionen der verwendeten IT-Geräte mit den CO₂-Emissionen aus den Verkehrsmitteln vergleicht. Eine umfassende Untersuchung müsste dagegen auch die Energieverbräuche der jeweiligen Arbeitsorte (z.B. Heizenergie, Beleuchtung), das veränderte Konsumverhalten (z.B. Küche, Kantine, Bekleidung), die Rebound-Effekte (z.B. zusätzliche Meetings, doppelte Büroausstattung) und ggf. noch weitere Faktoren berücksichtigen. Der hier durchgeführte Vergleich ist daher eher als indikative Hochrechnung zu verstehen.

Zur Berechnung der Treibhausgasemissionen im Personenverkehr werden die Durchschnittszahlen vom Umweltbundesamt (2020) für verschiedene Verkehrsmittel im Personenverkehr in Deutschland im Jahr 2019 herangezogen. Die in Tabelle 63 dargestellten spezifischen Treibhausgasemissionen beschreiben die mit der Nutzung des jeweiligen Verkehrsmittels zusammenhängenden Treibhausgasemissionen pro zurückgelegten Kilometer und Person. Die durchschnittliche Belegung der jeweiligen Fahrzeuge ist dabei berücksichtigt.

Tabelle 63: Treibhausgasemissionen verschiedener Verkehrsmittel pro Personenkilometer

Verkehrsmittel	Spezifische Treibhausgasemissionen
Pkw	143 g CO ₂ eq./Pkm
Linienbus	80 g CO ₂ eq./Pkm
Straßen-, Stadt- und U-Bahn, Nahverkehrszug	55 g CO ₂ eq./Pkm
Fernzug	29 g CO ₂ eq./Pkm

Quelle: Umweltbundesamt (2020)

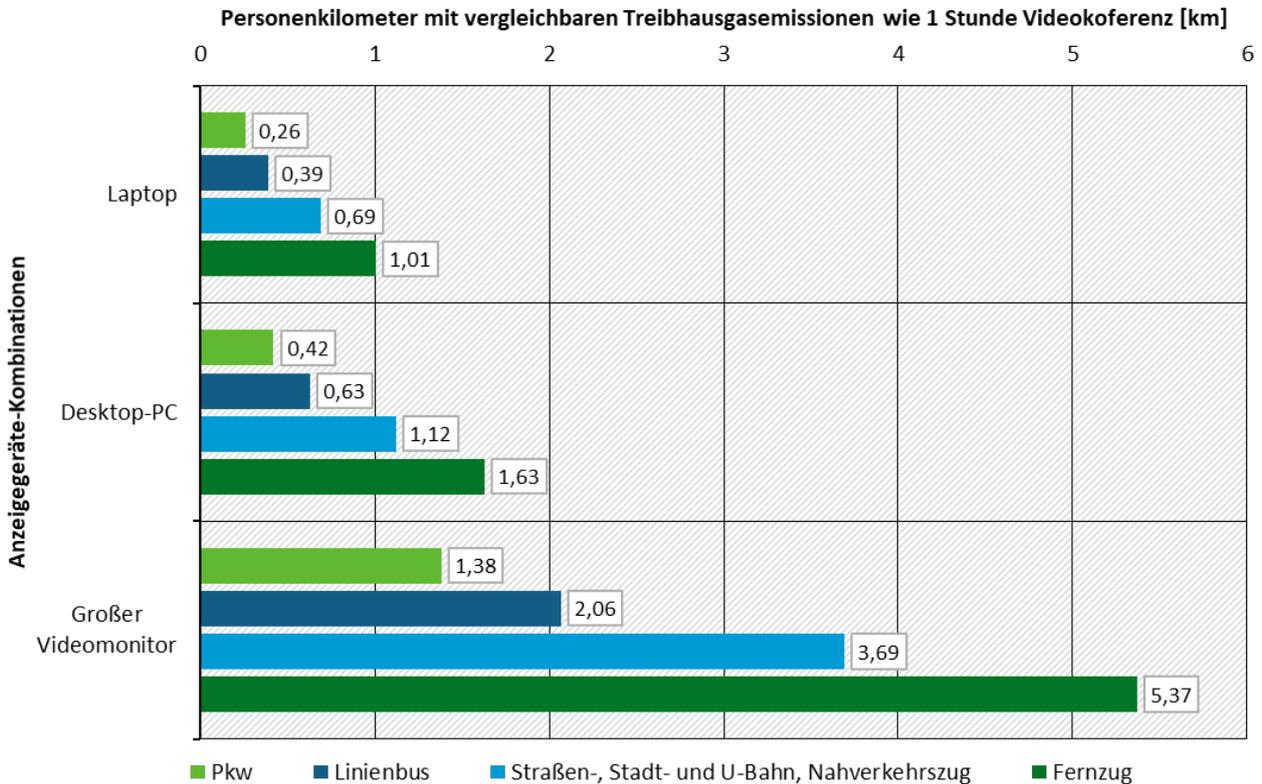
Die Treibhausgasemissionen pro Personenkilometer sind bei den in Tabelle 63 dargestellten Verkehrsmitteln beim PKW mit durchschnittlich 143 Gramm CO₂-Äquivalente am höchsten und fallen dann über den Linienbus mit 80 Gramm, die schienengebundenen Nahverkehrsmittel mit 55 Gramm auf minimal 29 Gramm für den Fernzug. Nicht in der Tabelle enthalten sind die Verkehrsmittel Fahrrad und Fußverkehr, die prinzipiell als emissionsfrei gerechnet werden können.

Die Teilnahme an einer Videokonferenz verursacht ebenfalls Treibhausgasemissionen pro Teilnehmenden, die im vorangehenden Kapitel berechnet wurden. Diese unterscheiden sich nach der Gerätekombination, die zur Anzeige der Videokonferenz eingesetzt wird. Setzt man nun die Treibhausgasemissionen der Videokonferenz mit denen der Verkehrsmittel ins Verhältnis, so erhält man die Distanz, die theoretisch zurückgelegt werden könnte, wenn statt der Videokonferenz ein Verkehrsmittel genutzt würde. Sind die Treibhausgasemissionen zur Hin- und Rückfahrt zu einem physischen Treffen, beispielsweise im Büro, in der Schule oder in der Universität geringer als die zur Teilnahme an einer Videokonferenz, so ist das physische Treffen klimafreundlicher.

In Abbildung 27 werden die Personenkilometer dargestellt, die sich jeweils mit den verschiedenen Verkehrsmitteln zurücklegen lassen. Dabei wird unterschieden in die drei Anzeigeräte-

Kombinationen Laptop (mit den geringsten Emissionen), Desktop-PC und großer Videomonitor (höchste Emissionen).

Abbildung 27: Vergleich der Treibhausgasemissionen von Videokonferenzen mit verschiedenen Anzeigegeräten mit den Personenkilometern verschiedener Verkehrsmittel



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Wird ein Laptop zur Anzeige einer Videokonferenz genutzt, so können pro Stunde Videokonferenz alternativ zwischen 0,26 Personenkilometer mit dem PKW und 1,01 Personenkilometer mit dem Fernzug zurückgelegt werden. Höhere Distanzen ergibt der Vergleich bei einem großen Videomonitor mit 1,38 Personenkilometern mit dem PKW und maximal 5,37 Personenkilometer mit dem Fernzug.

Setzt man nun als Nutzungsszenario die Teilnahme an einer *zweistündigen* Videokonferenz, so verdoppeln sich die zurücklegbaren Personenkilometer und die oben angegebenen Zahlen können jeweils als Hin- und Rückfahrt gerechnet werden. Nimmt eine Person also beispielsweise an einem zweistündigen Businessmeeting teil, an einer zweistündigen Vorlesung in der Universität oder am Schulunterricht, so darf der einfache Anreiseweg mit dem jeweiligen Verkehrsmittel nicht größer sein als die oben genannten Personenkilometer.

Unterstellt man eine Anreise mit den schienengebundenen Nahverkehrsmitteln Straßen-, S- und U-Bahn oder Nahverkehrszug (in Abbildung 27 mit dem hellblauen Balken dargestellt), dann muss der Begegnungsort bei einer alternativen Teilnahme mit dem Laptop mehr als 0,69 Kilometer entfernt sein, damit die Videokonferenz klimafreundlicher gegenüber dem physischen Treffen ist. Bei einer Teilnahme mit dem Desktop-PC muss der Begegnungsort mehr als 1,12 Kilometer entfernt liegen und beim großen Videomonitor mehr als 3,69 Kilometer, damit die Videokonferenz Vorteile hat. Entsprechend mehr oder weniger weit entfernt dürfen die Begegnungsorte mit den übrigen Verkehrsmitteln PKW, Linienbus und Fernzug sein, wobei die Variante Fernzug in diesem Fall aufgrund der geringen Entfernungen ausscheidet.

Nicht in der Abbildung enthalten, sind die Verkehrsmittel Fahrrad und Fußverkehr. Grundsätzlich kann ausgesagt werden, dass die Teilnahme an einem physischen Treffen, wenn es über diese emissionsfreien Verkehrsmittel erreicht werden kann, klimafreundlicher ist als die Videokonferenz. Zumindest für die Nutzungsszenarien Schulunterricht und Universitätsvorlesung kann davon ausgegangen werden, dass ein Großteil der Anreisenden mit dem Fahrrad oder zu Fuß unterwegs ist. In diesen Fällen bietet die Videokonferenz keine Klimavorteile gegenüber der physischen Anwesenheit.

Insgesamt sind die Treibhausgasemissionen, die durch Videokonferenzen entstehen, verglichen mit den hohen Emissionen aus dem motorbetriebenen Verkehr jedoch sehr gering. Findet eine Anreise zu einem Treffen mit der klimaschädlichsten Variante PKW statt, so ist die Videokonferenz bereits ab einer Entfernung von 1,38 Kilometern die klimafreundlichere Alternative. Selbst wenn ein großer Videomonitor verwendet wird, der unter den Anzeigegeräte die höchsten Treibhausgasemissionen aufweist.

Zusammenfassend kann daher festgestellt werden, dass eine Videokonferenz unter Klimaschutz Gesichtspunkten immer dann eine gute Alternative zu einem physischen Treffen ist, wenn eine Anreise nicht per Fuß oder Fahrrad erfolgen kann. Wenn Videokonferenzen tatsächlich motorisierte Verkehrsleistung ersetzen, dann leisten sie einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz.

5 Projektergebnisse und verbleibender Forschungsbedarf

5.1 Projektergebnisse

► **Entwicklung GCC-Methodik**

Im Rahmen des vorliegenden Projektes Green Cloud Computing wurde eine Methodik entwickelt, mit der erstmalig Aufwandskennzahlen für Cloud-Dienstleistungen berechnet werden können. Bei der sogenannten „GCC-Methodik“ wird der Umweltaufwand zur Herstellung von Informationstechnik und zum Betrieb von Rechenzentren in den vier Wirkungskategorien Rohstoffaufwand (ADP), Treibhausgasemissionen (GWP), Kumulierter Energieaufwand (CED) und Wasserverbrauch erfasst und mit Hilfe von Allokationsregeln den einzelnen Cloud-Dienstleistungen zugeordnet (siehe Kapitel 2.3). So werden pro Dienstleistung vier Aufwandskennzahlen berechnet, beispielsweise Treibhausgasemissionen pro Service-Einheit, die unmittelbar Auskunft über die Umweltwirkungen der jeweiligen Dienstleistung geben.

► **Verbesserung der ökobilanziellen Datengrundlage**

Die Datengrundlage zur Bilanzierung der Herstellungsphase von IKT-Komponenten wurde verbessert und in die KPI4DCE-Berechnungsmethodik übernommen. Hierzu wurden Datensätze von Chip-Herstellern ausgewertet und aktuellere Ökobilanzen berücksichtigt. Der Herstellungsaufwand für Server, Storage und Netzwerktechnik können dadurch valider in die Umweltbilanz einbezogen werden und die Relevanz der jeweiligen Umweltwirkungen entlang der Lebenszyklusphasen kann bewertet werden. Die Anwendung der KPI4DCE-Methodik bei vier Rechenzentren zeigt, dass die Herstellungsphase der IKT-Komponenten beim Rohstoffaufwand (ADP) deutlich gegenüber der Nutzungsphase dominiert (siehe Kapitel 2.2 Abbildung 6). Beim Energieverbrauch (CED) und den Treibhausgasemissionen (GWP) dominiert dagegen die Nutzungsphase im Rechenzentrum. Aus den Ergebnissen kann abgeleitet werden, dass eine Rohstoffeinsparung bei IKT-Komponenten dann realisierbar ist, wenn deren Nutzungsdauer verlängert wird. Zur Einsparung von Energie ist es dagegen am wirkungsvollsten, wenn Maßnahmen zur Effizienzsteigerung in Rechenzentren getroffen werden. Da die Treibhausgasemissionen überwiegend aus der Elektrizitätsbereitstellung stammen, sollte sich dem ersten Schritt der Minderung des Energieverbrauchs durch Erhöhung der Energieeffizienz und Auslastung im Rechenzentrum im zweiten Schritt die Optimierung der Energieversorgung auf Grundlage von erneuerbaren Energien (Ökostrom) anschließen.

► **Weiterentwicklung des KPI4DCE-Berechnungstools**

Das KPI4DCE-Berechnungstool wurde um weitere Funktionen erweitert, sodass es zur eigenständigen Datenerfassung durch die Betreiber von Rechenzentren genutzt werden kann. Dazu wurde das Tool auch mit einer XML-Import- und Export-Schnittstelle ausgestattet, die eine Kopplung mit anderer Software, beispielsweise Energie-Monitoring-Software oder Configuration-Management-Database (CMDB), erleichtert. Weiterhin wurde das Tool um die grafische Darstellung der KPI4DCE-Kennzahlen erweitert und um die Erfassung und Allokation von Cloud-Services. Damit kann das Tool sowohl zur Anwendung der Methoden KPI4DCE und GCC als auch für die Datenerhebung bei den Umweltzeichen Blauer Engel für „Energieeffizienten Rechenzentrumsbetrieb (DE-UZ 161)“ und „Klimaschonende Colocation-Rechenzentren (DE-UZ 214)“ genutzt werden. Das EXCEL-Tool wird zusammen mit dem Abschlussbericht frei zur Verfügung gestellt.

► **Untersuchung von Einzelaspekten**

Im Rahmen des Vorhabens wurden Teiluntersuchungen zu den Entwicklungen in der

Halbleiterindustrie, zu kritischen Rohstoffen, zur Entwicklung des Energiebedarfs in Rechenzentren sowie zum Energiebedarf in Telekommunikationsnetzen durchgeführt. Es wurde ein Modell entwickelt, mit dem die ökologischen und ökonomischen Auswirkungen der Standzeit von Servern in einem Rechenzentrum unter Berücksichtigung von technologischen Verbesserungszyklen ermittelt werden kann.

► **Praxistest für KP4DCE-Methodik**

Anhand von Datensätzen aus vier verschiedenen Rechenzentren zu deren IT-Bestand, Energiebedarf und Hardware-Auslastung wurden die aktualisierten KP4DCE-Kennzahlen exemplarisch angewendet (siehe Kapitel 2.2). Mit dem Praxistest wird gezeigt, dass sich das Kennzahlensystem zur Bewertung der Effizienz von Rechenzentren gut eignet. Anhand der unterschiedlichen Umweltwirkungskategorien und adressierten Teilbereiche innerhalb der Rechenzentren können durch die KP4DCE-Kennzahlen unterschiedliche Fragestellungen beantwortet werden (siehe Tabelle 14). Die Kennzahlen können zur Identifizierung von spezifischen Optimierungspotenzialen genutzt werden. Das KP4DCE-Kennzahlensystem zeigt deutliche Vorteile gegenüber dem verbreiteten PUE (Power Usage Effectiveness), der keine Aussagen über die Effizienz der eigentlichen Informationstechnik zulässt. Durch die Einbeziehung von Performance-Kennzahlen und tatsächlicher Auslastung der Informationstechnik als Nutzen des Rechenzentrums spiegeln die KP4DCE-Kennzahlen außerdem auch die Effizienz der Betriebsführung wider.

► **Anwendungsbeispiele für GCC-Methodik**

Die GCC-Methodik wurde exemplarisch für die vier Cloud-Dienstleistungen *Online-Storage*, *Virtuelle Desktop-Infrastruktur*, *Videostreaming* und *Videokonferenzen* angewendet und dabei die verschiedenen Möglichkeiten zur Allokation der Hardwareressourcen auf die Cloud-Dienstleistungen aufgezeigt. Zusätzlich wurde mit dem Fallbeispiel *Home-Office* die Kombination von GCC-Kennzahlen mit lokalem Energie- und Ressourcenverbrauch dargestellt. Die Anwendungsbeispiele zeigen, dass die GCC-Methodik gut dazu geeignet ist, Umweltwirkungen für einzelne Cloud-Services zu benennen. Dies ist insbesondere immer dann möglich, wenn ein Rechenzentrum über ein differenziertes Energiemonitoring verfügt, das die Zuordnung der Energieverbräuche und IT-Leistungen auf die verschiedenen Teilbereiche ermöglicht. Die vorangehende Anwendung des KP4DCE-Kennzahlensystems bzw. des Energiemonitorings nach den Anforderungen des Umweltzeichens Blauer Engel für „Energieeffizienten Rechenzentrumsbetrieb (DE-UZ 161)“ sind dabei gute Voraussetzungen. Durch die Vereinheitlichung der Allokationsregeln kann die GCC-Methodik für eine umweltbezogene Produktdeklaration, beispielsweise für einen CO₂-Fußabdruck oder eine Energieverbrauchskennzeichnung für Cloud-Services genutzt werden.

► **Mehrwert des multidimensionalen Ansatzes von KPI4DCE und GCC**

Die Erfassung mehrerer Umweltwirkungen (ADP, CED, GWP, Wasserverbrauch) durch die beiden Methoden KPI4DCE und GCC bietet einen Mehrwert gegenüber der eindimensionalen Erfassung nur einer einzelnen Umweltwirkung. Dabei führt jede einzelne Umweltwirkung zu Erkenntnissen bezogen auf jeweilige Umweltziele. Diese stehen teilweise im Zielkonflikt zueinander.

- Die Ausweisung der **Treibhausgasemissionen (GWP)** ist in Form eines CO₂-Fußabdrucks pro Dienstleistungseinheit leicht an KonsumentInnen kommunizierbar. Mit dem CO₂-Fußabdruck wird ein wichtiges Schutzziel (Klimaschutz) adressiert. Allerdings wird der CO₂-Fußabdruck stark vom jeweiligen Strommix (z.B. Kohle, Uran, Wasserkraft) dominiert, weshalb er für die Effizienz der jeweiligen Rechenzentrums-Dienstleistung nur bedingt aussagekräftig ist.

- Der **Primärenergiebedarf (CED)** gibt unmittelbar Auskunft über die effiziente Betriebsführung im Rechenzentrum. Er eignet sich daher sowohl zur Identifizierung von Effizienzpotenzialen im Rechenzentrum selbst als auch zum internationalen Vergleich verschiedener Rechenzentren bzw. deren Dienstleistungen. Der Vorteil der Ausweisung des Primärenergiebedarfs ist, dass der jeweilige regionale Strommix nicht das Ergebnis dominiert.
- Der Umweltindikator **Abiotischer Rohstoffverbrauch (ADP)** gibt Auskunft über den Einsatz von Ressourcen. Er zeigt die hohe Relevanz der Herstellungsphase in Bezug auf den Einsatz von nicht nachwachsenden Rohstoffen. Dies ist selbst dann der Fall, wenn, wie bei Rechenzentren, auch im Betrieb viele fossile Rohstoffe aufgewendet werden. Dadurch ist der Rohstoffindikator gut dazu geeignet, Möglichkeiten zur Ressourceneinsparung bei der Herstellung und Nutzung aufzuzeigen und Themen der Kreislaufwirtschaft zu adressieren. Der Indikator ADP befindet sich derzeit noch in der Entwicklung und seine Datenbasis ändert sich derzeit noch dynamisch (siehe Anhang B.1.2.1). Zukünftig ist daher auch denkbar, einen anderen, ausgereifteren Rohstoffindikator einzuführen, der sich weniger stark ändert und dessen Datenbasis leichter zu erheben ist.
- Der vierte Umweltindikator **Wasserverbrauch (Water)** spielt bei den hier untersuchten Beispielen eine untergeordnete Rolle. Für den Fall, dass Rechenzentren mit adiabater Kühlung („Verdunstungskühlung“) ausgestattet sind und sich an Standorten mit akuter Wasserknappheit befinden, kann dieser Indikator jedoch wichtige Informationen für den effizienten Betrieb liefern. Die Anwendung dieses Indikators sollte daher im Einzelfall entschieden werden.

5.2 Beantwortung der Forschungsfragen

Im Rahmen des Forschungsvorhabens sollten verschiedene Forschungsfragen beantwortet werden (siehe Kapitel 1). Die Ausführungen innerhalb dieses Forschungsberichtes geben die jeweiligen differenzierten Antworten auf diese Fragen. Nachfolgend werden die Antworten noch einmal kurz zusammengefasst.

1. Wie wirkt sich die Verlagerung von IT-Leistungen in Cloud-Rechenzentren auf die Inanspruchnahme von natürlichen Ressourcen und Treibhausgasemissionen aus?

- ▶ Anhand eines Anwendungsbeispiels der GCC-Methodik bei der Cloud-Dienstleistung *Virtuelle Desktop Infrastruktur (VDI)* (siehe Kapitel 4.2) konnte aufgezeigt werden, wie sich die Verlagerung von lokaler Rechenleistung in Cloud-Rechenzentren auswirkt. Das Beispiel VDI zeigt, wie hoch der zusätzliche Energie- und Ressourcenbedarf im Rechenzentrum pro Nutzer ist. In diesem Beispiel reduzieren sich jedoch auch die Treibhausgasemissionen bei der lokalen Informationstechnik, weil als Endgeräte statt Desktop-Computern energiesparende Thin-Clients eingesetzt werden können. In der Gesamtbilanz der Arbeitsplätze reduzieren sich dadurch Ressourcen- und Energiebedarf. Da es sich hierbei nur um ein einzelnes untersuchtes Fallbeispiel handelt, ist dieses Ergebnis nicht grundsätzlich auf alle Cloud-Dienstleistungen übertragbar. Die effiziente Betriebsführung im Rechenzentrum trägt wesentlich zur Gesamtbilanz der VDI-Lösung bei. So weisen die GCC-Kennzahlen für Online-Storage (siehe Kapitel 4.1) darauf hin, dass eine lokale Speicherung von Daten auf Datenträgern, die nicht rund um die Uhr in Betrieb sind und nicht klimatisiert werden, energieeffizienter sein kann. Die Beispiele zeigen insbesondere, dass sich mit den GCC-Kennzahlen die Umweltwirkungen einzelnen Arbeitsplätzen bzw. Cloud-Dienstleistungen zuordnen lassen. Erst dadurch ist ein Vergleich von lokal erbrachter IT-Dienstleistung mit der Cloud-Lösung grundsätzlich

möglich. Die Methode eignet sich daher, genau solche Fragen zur Verlagerung der Umweltwirkungen im Einzelfall zu beantworten.

2. Welche Zielkonflikte oder Synergien gibt es zwischen Energie- u. Rohstoffeinsatz?

- ▶ Durch die Anwendung der KPI4DCE-Methodik (siehe Kapitel 2.2) konnte gezeigt werden, dass es einen deutlichen Unterschied zwischen dem Energieeinsatz und dem Rohstoffeinsatz je nach Lebenszyklusphase von Informationstechnik gibt. Bei Rechenzentren wird der Energiebedarf (CED) durch die Nutzungsphase dominiert. Die Umweltwirkung Abiotischer Rohstoffverbrauch (ADP) tritt dagegen ganz überwiegend in der Herstellungsphase der Informationstechnik auf. Zur Reduzierung von Rohstoffverbrauch ist daher eine Verlängerung der Lebensdauer von IT-Produkten sinnvoll. Gleichzeitig stellen neue IT-Geräte jedoch höhere Rechen- oder Speicherleistung bei gleichbleibendem Energiebedarf zur Verfügung und sind damit energieeffizienter. Zur Reduzierung des Energieverbrauchs kann daher der Austausch von veralteter, ineffizienter Technik sinnvoll sein. Daraus ergibt sich ein Zielkonflikt über den optimalen Zeitpunkt zum Austausch von Informationstechnik. Mit der Teiluntersuchung in Kapitel 3.4.4 (Beispielrechnung zur bedarfsgerechten Modernisierung) wird eine Berechnungsmethodik skizziert, wie dieser optimale Zeitpunkt bezogen auf den Energiebedarf identifiziert werden kann.
- ▶ Beim Vergleich von lokaler Datenverarbeitung mit der Datenverarbeitung in Cloud-Rechenzentren treten ebenfalls Zielkonflikte auf. Zur Einsparung von Ressourcen leistet eine hohe Auslastung von arbeitsteiligen Servern und Speichersystemen einen wichtigen Beitrag. Dies kann insbesondere in zentralen Rechenzentren realisiert werden. Bezogen auf den Energieverbrauch können jedoch auch lokale Lösungen vorteilhafter sein (siehe Online-Storage in Kapitel 4.1).

3. Mit welchen Methoden können die Umweltwirkungen von Cloud-Dienstleistungen bilanziert werden?

- ▶ Die im Rahmen dieses Projektes entwickelte GCC-Methodik gibt die Antwort auf die Frage nach den Umweltwirkungen von Cloud-Dienstleistungen.
- ▶ Bei der KPI4DCE-Methodik war es eine Herausforderung, den Nutzen eines Rechenzentrums zu bestimmen. Bei KPI4DCE wurde der Nutzen als geleistete Rechenoperationen der Server, belegter Speicherplatz und externe Datenübertragung festgelegt (siehe Kapitel 2.1). Dadurch ist es möglich, Effizienzkennzahlen zu berechnen, in denen sowohl der Nutzen als auch der Aufwand im Rechenzentrum berücksichtigt werden ($KPI = \text{Nutzen} / \text{Aufwand}$). Die dafür erforderlichen Nutzendaten geben einen detaillierten Einblick in die Größe, Leistungsfähigkeit und Auslastung der Rechenzentren und legen damit möglicherweise Betriebsgeheimnisse offen. Diese Informationen relativieren sich jedoch, sobald aus den Rohdaten tatsächlich KPI4DCE-Kennzahlen gebildet werden.
- ▶ Die meisten Metriken für Rechenzentren (z.B. in den Normenreihen EN 50600-4 und ISO/IEC 30134) beschränken sich daher darauf, Kennzahlen für die Gebäudetechnik, Energieversorgung und Kennzahlen zu speziellen Themen auszuweisen und nicht für die Leistungsfähigkeit des gesamten Rechenzentrums einschließlich der IT. Dadurch können diese Kennzahlen jedoch keine Aussage über die effiziente Betriebsführung und Einsparungen bei der IT machen.
- ▶ Die Nutzung einer Kennzahl, die sich auf die erbrachte IT-Dienstleistung bezieht und nicht auf die Leistungsfähigkeit des Rechenzentrums, stellt einen möglichen Kompromiss dar, mit

dem die Rechenzentrumsbetreiber nicht zu viele technischen Details ihrer Informationstechnik preisgeben müssen. Dies leistet die GCC-Methodik. Dadurch, dass die GCC-Methodik als Nutzen die jeweilige Cloud-Dienstleistung festlegt, die in der Regel auch die Verkaufseinheit des Dienst-Anbieters ist, sind die Informationen soweit aggregiert, dass nicht mehr auf die eingesetzte Informationstechnik geschlossen werden kann. Dennoch sind alle umweltrelevanten Informationen in den GCC-Kennzahlen enthalten und sie eignen sich zum Vergleich der Effizienz verschiedener Dienst-Anbieter und zur Optimierung der Rechenzentren. Außerdem eignen sich die GCC-Kennzahlen aus Kundensicht zur Berechnung der in Anspruch genommenen Umweltwirkungen, beispielsweise für die CO₂-Bilanz oder Nachhaltigkeitsberichterstattung der jeweiligen Kunden.

- ▶ Die Voraussetzung für die Berechnung der GCC-Kennzahlen ist ein transparentes Energiemonitoring auf der Ebene von Server, Storage-Systemen und Netzwerktechnik. Der Rechenzentrumsbetreiber, beispielsweise ein Colocation-Anbieter, muss diese Daten in jedem Fall vorhalten und an seine Colocation-Kunden bzw. die Nutzer seiner Infrastruktur weitergeben. Colocation-Verträge sollten daher eine entsprechende Informationspflicht beinhalten.

4. Eignen sich diese Methoden zur Identifizierung ressourcenschonender Cloud-Dienstleistungen im Sinne eines Umweltzeichens oder Mindestanforderungen für die umweltverträgliche Beschaffung?

- ▶ Die exemplarische Anwendung der GCC-Methodik zeigt, dass sowohl eine richtungssichere Berechnung der Umweltwirkungen einer Cloud-Dienstleistung möglich ist als auch eine Unterscheidung verschiedener Rechenzentren bzw. Cloud-Anbieter. Dadurch kann die Methode auch für Umweltzeichen oder die umweltverträgliche Beschaffung genutzt werden.
- ▶ Einschränkend muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass die GCC-Methodik in diesem Projekt nur beispielhaft angewendet wurde und es bislang nur exemplarische Berechnungen gibt. Damit die Methode breiter angewendet werden kann, ist eine Ausweitung der praktischen Erprobung erforderlich. Zusätzlich sollten für typische Cloud-Dienstleistungen einheitliche Serviceeinheiten und Allokationsregeln festgelegt werden.

5.3 Schlussfolgerungen

- ▶ **Nutzung der KPI4DCE-Methodik für Energie- und Effizienzausweis für Rechenzentren**
 - Die Kennzahlen der KPI4DCE-Methodik beschreiben gut die Effizienz von Rechenzentren insgesamt und ergeben ein gutes Werkzeug zur Optimierung der einzelnen Teilbereiche des Rechenzentrums.
 - Außer beim Abiotischen Rohstoffverbrauch (ADP) dominiert bei allen Umweltindikatoren die Nutzungsphase deutlich. Der vergleichsweise hohe Aufwand zur Erfassung des IKT-Bestandes kann für diesen Zweck (z.B. Energieausweis) daher eingespart werden. Die Ökobilanzdaten veralten schnell, weshalb die überschlägige Erfassung des Bestandes immer auch mit hohen Unsicherheiten verbunden ist. Statt des ADP könnte der Fokus in Zukunft eher auf die Reduzierung der Elektronikschrottmengen oder die bestmögliche Verlängerung der Hardwarenutzungsdauer gelegt werden (optimaler Austauschzeitpunkt).

► GCC-Kennzahlen zur Kommunikation der Umweltperformance von Cloud-Diensten

- GCC-Kennzahlen eignen sich gut zur Kommunikation der Umweltperformance einzelner Cloud-Dienste an Kunden und Auftraggeber und zu deren Vergleich (Außensicht). Sie eignen sich auch gut für den Anbieter der jeweiligen Dienste für das Erkennen von Verbesserungspotenzial der Clouddienstleistung (Innensicht). Es besteht die Möglichkeit zur Weiterentwicklung der GCC-Methodik zur produktbezogenen Kennzeichnung (z.B. Energieeffizienz Kennzeichnung), zur umweltverträglichen Beschaffung von Cloud-Dienstleistungen und zur Auszeichnung besonders effizienter Dienste mit einem Umweltzeichen (z.B. Blauer Engel).
- Zur Vergleichbarkeit von GCC-Kennzahlen sind die Allokationsregeln entscheidend. Es sollten mit den Anbietern gemeinsame Zuordnungsregeln entwickelt und die Methodik breiter angewendet werden. Beispielgebend für das Vereinbaren einheitlicher Berechnungsstandards könnten hier die Methoden zur Entwicklung von Produktkategorie-regeln bei Umweltproduktdeklarationen gemäß nach der Norm ISO 14025 (Umweltkennzeichnungen und -deklarationen – Typ III Umweltdeklarationen) darstellen. Ziel eines solchen Prozesses könnte die Einführung eines CO₂-Fußabdrucks für spezielle Cloud-Dienstleistungen sein.
- Die Datenerfassung für Cloud-Services war dadurch erschwert, dass viele Dienste in Colocation-Rechenzentren ausgeführt werden und Dienste-Anbieter keinen Einblick in den Energieverbrauch der von ihnen genutzten Server haben. Hier besteht ein dringender Handlungsbedarf. Verträge mit Host- und Colocation-Anbietern sollten (allein schon aus Gründen des Verbraucherschutzes und der Nachprüfbarkeit von Abrechnungen) grundsätzlich beinhalten, dass energie- und umweltbezogene Informationen vom Betreiber an die Kunden weitergegeben werden.

5.4 Verbleibender Forschungsbedarf

Die Bewertung von Ressourcenbedarf, Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen von Rechenzentren und Cloud-Dienstleistungen stehen in einem größeren Kontext. Die digitale Transformation, kurz „Digitalisierung“, führt aktuell zu einem sehr schnellen und umfangreichen Ausbau digitaler Infrastrukturen und Dienstleistungen. Der Ausbau ist begleitet von einem Mehrverbrauch an wertvollen und kritischen Rohstoffen, deren Gewinnung zu erheblichen Umweltproblemen führen, hohem Energieverbrauch zur Herstellung und Nutzung von Informationstechnik, die ihrerseits mit erheblichen Treibhausgasemissionen verbunden sind und das Aufkommen von Elektro- und Elektronikschrott durch ausgediente Geräte, deren Entsorgung und sachgerechtes Recycling derzeit nicht gewährleistet werden können.

Die Größenordnung der Umwelteffekte durch die Digitalisierung können derzeit nur abgeschätzt werden. Selbst der Stromverbrauch durch Rechenzentren, beispielsweise in Deutschland, kann derzeit nur auf Grundlage einfacher Abschätzungen quantifiziert werden. Der Stromverbrauch von Telekommunikationsnetzen ist weitgehend unbekannt. Die geringe Kenntnis des Energieverbrauchs und der Umweltwirkungen digitaler Infrastrukturen ist aus mehreren Gründen problematisch. Das Vorhandensein ausreichender und sicher verfügbarer Rohstoffe ist die Voraussetzung für die zukünftige Produktion von Informationstechnik. Ressourcenschonung und die Etablierung einer Kreislaufführung seltener Rohstoffe sind daher essenziell für die Zukunftsfähigkeit in diesem Bereich. Parallel zur digitalen Transformation läuft, zumindest in Deutschland, eine Transformation der Energieversorgung („Energiewende“) hin zu mehr erneuerbaren

Energien, dezentraler Energieerzeugung und einer stärkeren Kopplung von Erzeugung und Verbrauchern, mit dem Ziel, die Energieversorgung bis zum Jahr 2050 klimaneutral zu gestalten. Da Rechenzentren einen hohen Strombedarf haben, der auch in Zukunft stark steigen wird, müssen auch sie in eine sich ändernde Energieversorgung integriert werden. Hierzu muss die Kenntnis über den Energiebedarf von Rechenzentren steigen, Rechenzentren müssen die Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung ausschöpfen und, vergleichbar mit anderen energieintensiven Industrien, müssen sie eine Flexibilität im Lastmanagement gewährleisten.

Vor diesem Hintergrund sind die beiden Methoden KPI4DCE und GCC wichtige Bausteine, die Effizienz und Umweltwirkungen von Rechenzentren und Cloud-Dienstleistungen zu ermitteln, zu bewerten und zu kommunizieren. Grundsätzlich sind die Methoden dazu geeignet, ein besseres Monitoring zu etablieren und erforderliche Informationen für die Betreiber selbst, deren Kunden und die Infrastrukturplanung zugänglich zu machen. Die Methoden befinden sich jedoch noch in einem frühen Entwicklungsstadium. Sie müssen stärker in der Praxis angewendet und die methodischen Grundlagen müssen in einigen Bereichen noch verbessert werden. Um dies zu erreichen wird daher folgender weiterer Forschungsbedarf gesehen:

► **Praktische Erprobung in Reallaboren**

Die Methoden KPI4DCE und GCC sollten stärker in der Praxis erprobt und im Rahmen einer anwendungsorientierten Forschung weiterentwickelt werden. Hierzu sollten Reallabore initiiert und wissenschaftlich begleitet werden. Ziele sind die Schaffung von praxistauglichen Erhebungsmethoden, Gewinnung von Praxisdaten und Schaffung von Kommunikationsformaten für die Effizienz von Rechenzentren und Cloud-Dienstleistungen.

Ansätze zur Implementierung von Reallaboren sind:

- Der Aufbau eines Forschungsrechenzentrums oder die Beteiligung an einem entsprechenden Rechenzentrum, in dem Experimente zur Energieeffizienz von Informationstechnik, Software und Gebäudetechnik durchgeführt werden können.
- Gründung eines Netzwerks an interessierten Rechenzentrumsbetreibern und Dienstleistern, die die Methoden anwenden und deren Weiterentwicklung aktiv unterstützen. Ziel sollte die Sammlung von Kennwerten aus der praktischen Anwendung sein und der Aufbau einer Datenbank an unterschiedlichen Kennwerten bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen (z.B. Sicherheitsklassen, Kühlsysteme, klimatische Verhältnisse). Dadurch ist es möglich, Benchmarks und Best-Practices zu definieren und die Methoden weiter auszudifferenzieren.
- Anwendung von KPI4DCE und GCC bei geförderten und staatlich beschafften Rechenzentrumsdienstleistungen, beispielsweise im Rahmen der europäischen Cloud-Infrastruktur GAIA-X, Dienstleistern für öffentlich-rechtliche Rundfunkanstalten (Video-streaming-Dienstleistungen), Bundes- und Landesrechenzentren und weitere öffentlich finanzierte Cloud-Angebote.

► **Verbesserung der Datenbasis und der methodischen Grundlagen**

Um die Methoden KPI4DCE und GCC auf eine noch solidere Datenbasis zu stellen, sollten Teile der Methodik weiterentwickelt, vereinfacht und mit aktuelleren Ausgangsdaten ausgestattet werden. Hierzu wird ein weiterer Forschungsbedarf in folgenden Bereichen gesehen:

- Zur Erfassung des Ressourcenverbrauchs durch Digitaltechnik, sollten Alternativen zum Indikator Abiotischen Rohstoffverbrauch (ADP) entwickelt werden, die weniger volatil

auf die jeweilige Marktsituation reagieren und die in der Praxis leichter zu erfassen sind. Dies könnte beispielsweise ein Indikator für kritische Rohstoffe, für den Flächenverbrauch zur Rohstoffgewinnung oder ein Elektroschrottindikator sein.

- Nach wie vor gibt es nur sehr wenige Ökobilanzen zu elektronischen Komponenten und Baugruppen der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT). Die Kenntnis, insbesondere der Umweltwirkungen der Herstellung, ist jedoch die Voraussetzung dafür, um Strategien zur optimalen Nutzungsdauer und zur Ressourcenschonung zu entwickeln. Durch den raschen technischen Fortschritt sind existierende Datensätze schnell veraltet und spiegeln nicht mehr die aktuellen Umweltwirkungen wider. Es wird empfohlen, die Methoden der Ökobilanzierung nach ISO 14044 regelmäßig und intensiv bei IKT-Geräten anzuwenden und solche Daten in zentralen, offen zugänglichen Datenbanken abzulegen.
- Die KPI4DCE-Methodik hat einen Mehrwert gegenüber den etablierten Kennzahlen, indem sie die „nützliche Arbeit“ des Rechenzentrums in die Kennwertbildung einbezieht. Erst dadurch ist es möglich, die IT und deren effizienten Betrieb in Rechenzentren zu bewerten und zu vergleichen. Der für die Server verwendete Nutzenindikator basiert in der vorliegenden Untersuchung auf dem Server-Benchmark SPEC CPU 2006. Dieser Benchmark ist nicht für alle Systemarchitekturen verfügbar und er spiegelt nur einen Teil der Leistungsfähigkeit der Server wider. Die weitergehende Forschung sollte praxistauglichere Nutzenindikatoren für die von Servern erbrachte Rechenleistung entwickeln.
- In diesem Vorhaben wurde ein generisches Energiemodell für Telekommunikationsnetze vorgestellt, mit dem die elektrische Leistungsaufnahme von Datenverbindungen berechnet werden kann. Dieses generische Modell sollte methodisch weiterentwickelt werden und in der Praxis weiter erprobt werden. Ziel dieser Forschung sollte sein, zuverlässige Daten zum Energiebedarf der Datenübertragung, abhängig von der eingesetzten Technik, Auslastung, Kompressionsverfahren, Übertragungsstandards und Entfernung zu erhalten und diese zur Optimierung der Telekommunikationsnetze einzusetzen.

► **Umsetzung des europäischen Green Deals**

In seinem aktuellen Entwurf der *Schlussfolgerungen des Rates zum Thema Digitalisierung zum Wohle der Umwelt* unterstützt der Rat der Europäischen Union (2020) das Vorhaben der EU-Kommission, Rechenzentren bis zum Jahr 2030 klimaneutral zu gestalten und fordert die EU-Kommission dazu auf, unverzüglich geeignete Maßnahmen zu ergreifen, „um die standardisierte Dokumentation, die Transparenz und die Reduzierung des Umweltfußabdrucks von Datenzentren und Kommunikationsnetzen zu unterstützen“.

- Damit diese Forderung umgesetzt werden kann, ist es zwingend erforderlich, dass entsprechende Standards entwickelt werden, um die Umweltwirkungen von Rechenzentren einheitlich zu erfassen. Als Forschungsbedarf wird daher gesehen, solche Methoden rasch zu entwickeln, damit die absoluten Umweltwirkungen von Rechenzentren (insbesondere Energiebedarf, Treibhausgasemissionen, Rohstoffbedarf und Elektroschrottaufkommen) bilanziert und berichtet werden können.
- Ein Einstieg in diese Standardisierung könnte die Entwicklung eines „Energieausweises für Rechenzentren“ darstellen, zusammen mit einer zentralen Datenbank („Rechenzentrumskataster“) in dem solche umweltbezogenen Daten abgelegt werden. Solch ein Energieausweis könnte zunächst pilothaft und freiwillig innerhalb des oben genannten Netzwerks an interessierten Rechenzentrumsbetreibern entwickelt werden und anschließend der EU-Kommission zur breiteren Einführung als freiwillige Selbstverpflichtung oder obligatorisches Monitoring-Instrument angeboten werden.

Die genannten Forschungsbedarfe beziehen sich nur auf die eingeschränkten Fragestellungen dieser Studie zum Energie- und Ressourcenbedarf von Rechenzentren und Cloud-Diensten und der Gewinnung geeigneter Monitoring-Instrumente und Kennzahlen.

Im Zusammenhang mit der digitalen Transformation gibt es darüber hinaus noch eine sehr große Anzahl an weiteren Forschungs- und Entwicklungsaufgaben, um digitale Infrastrukturen nachhaltig zukunftsfähig zu gestalten. Beispielsweise zu Versorgungssicherheit und Beitrag von Rechenzentren zur Stromnetzstabilisierung, effizienter Breitband- und Mobilfunkausbau, Umweltfolgen der Künstlichen Intelligenz, effiziente Klimatisierungsverfahren und Abwärmenutzung, Entwicklung von Recyclingverfahren für Elektronikschrott, energie- und ressourceneffiziente Software sowie das weite Feld der „Effekte dritter Ordnung“, die die positiven und negativen Umweltwirkungen der Nutzung von Informationstechnik auf die Gesellschaft insgesamt beschreiben.

Diese Forschung muss nicht als explizite Umweltforschung stattfinden. Stattdessen sollten Fragen zum Klimaschutz und zur Reduzierung weiterer Umweltbelastungen selbstverständlich in alle sonstigen Forschungsaktivitäten integriert werden und die Folgenabschätzung zum selbstverständlichen Bestandteil der Entwicklung neuer Produkte und Dienstleistungen werden.

6 Quellen

Alibaba (2019a): Best selling Profesional AITC ddr4 16gb 2133mhz server ram memoria module. Alibaba (Hg.). Online verfügbar unter https://aitcmemory.en.alibaba.com/product/60530926377-803765947/Best_selling_Profesional_AITC_ddr4_16gb_2133mhz_server_ram_memoria_module.html?spm=a2700.icbuShop.41413.7.4cba735c1U19W3, zuletzt aktualisiert am 14.06.2019.

Alibaba (2019b): CPU-Esd-Verpackungsfach für skalierbare Intel Xeon-Prozessoren MPKCPUT-01 mit 4 Zählern. Alibaba (Hg.). Online verfügbar unter https://german.alibaba.com/product-detail/cpu-packaging-tray-for-4-count-intel-xeon-scalable-processors-mpkcp-01-50046302936.html?spm=a2700.md_de_DE.mayli-kehoz.19.1216507frxCHwc, zuletzt aktualisiert am 04.06.2019.

ARK | Intel (2018): ARK | Intel® Produkte. Online verfügbar unter <https://ark.intel.com/#@ServerBoards>, zuletzt geprüft am 16.18.2018.

AVX (Hg.) (2012): Capacitors, fixed, chips, ceramic dielectric, Type II, based on Type o603,0805,1206,1210 and 1812 Termination Type: copper and silver loaded epoxy Nickel barrier with Tin-Lead coating, near eutectic, minimum, COL/ESA/PI-03, 2012.

Bio by Deloitte (2015a): Preparatory study for implementing measures of the Ecodesign Directive 2009/125/EC DG ENTR Lot 9, Enterprise servers and data equipment, 2015.

Bio by Deloitte (2015b): Preparatory study for implementing measures of the Ecodesign Directive 2009/125/EC DG ENTR Lot 9. Enterprise servers and data equipment, 2015.

Boyd, S. B. (2012): Life-Cycle Assessment of Semiconductors. New York: Springer,

British Geological Survey (2017): World Mineral Production 2011-2015. Online verfügbar unter <https://www.bgs.ac.uk/data/publications/pubs.cfc?method=viewRecord&publnId=20093043&topic=OV&series=MO&subseries=OG>.

BSI (2020): Cloud Computing Grundlagen. Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (Hg.). Online verfügbar unter https://www.bsi.bund.de/DE/Themen/DigitaleGesellschaft/CloudComputing/Grundlagen/Grundlagen_node.html, zuletzt geprüft am 25.11.2020.

Catlin, J. (2018): Edgecore AS7326-56X, Switch Specification, Revision 1.0. Open Compute Projekt© (Hg.), 2018.

Chang, D. (2016): Open-Source Leveraged Telco Infrastructure. Open Compute Projekt© (Hg.), 2016. Online verfügbar unter http://files.opencompute.org/oc/public.php?service=files&t=f7e2e0050fc261b60fe54ec8408f54aa&download&path=/160810_OCP_Telco_WS_UNH_%5B%EB%B3%B5%ED%98%B8%ED%99%94%EB%AC%B8%EC%84%9C%5D.pdf.

Choe, J. (2017): Samsung 18 nm DRAM cell integration: QPT and higher uniformed capacitor high-k dielectrics. TechInsights (Hg.). Online verfügbar unter <http://techinsights.com/about-techinsights/overview/blog/samsung-18-nm-dram-cell-integration-qpt-and-higher-uniformed-capacitor-high-k-dielectrics/>, zuletzt geprüft am 01.11.2018.

Cisco (2019): Cisco Visual Networking Index, Forecast and Trends, 2017-2022 White Paper. Online verfügbar unter <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-741490.html>, zuletzt aktualisiert am 14.08.2019.

citrix.com (2020): Was ist Desktop-Virtualisierung? Online verfügbar unter <https://www.citrix.com/de-de/glossary/what-is-desktop-virtualization.html>, zuletzt geprüft am 14.10.2020.

Clausen, J.; Schramm, S. (2021): Klimaschutzpotenziale der Nutzung von Videokonferenzen und Homeoffice, Ergebnisse einer repräsentativen Befragung von Geschäftsreisenden. CliDiTrans Werkstattbericht. Borderstep Institut. Berlin, 2021. Online verfügbar unter https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2021/02/AP3-5_Repraesentativbefragung-11-02-2021.pdf, zuletzt geprüft am 05.03.2021.

Deutsche Rohstoffagentur (2017): Vorkommen und Produktion mineralischer Rohstoffe – ein Ländervergleich (2017). Online verfügbar unter https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/studie_Laendervergleich_2017.pdf?__blob=publicationFile&v=7, zuletzt aktualisiert am 14.08.2019.

DIN EN ISO 14044 (2018-05): Umweltmanagement - Ökobilanz, Beuth Verlag.

Ecoinvent V3.5 (2018): Ecoinvent life cycle inventory database, current Version 3.5 (released on the 23rd August, 2018), 2018. Online verfügbar unter <http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-32/ecoinvent-32.html>.

Energy Star (2020): Energy Star Certified Computers. U.S. Environmental Protection Agency (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.energystar.gov/productfinder/product/certified-computers/results>, zuletzt aktualisiert am 14.08.2020.

Entegris (2019): SB300 FIMS Compatible Full Pitch FOSB, Secure 300 mm wafer shipment in an automated full pitch FOSB. Entegris (Hg.). Online verfügbar unter <http://www.wafercare.com/page.aspx?id=103>, zuletzt aktualisiert am 14.06.2019.

EU (Hg.) (2017): Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen über die Liste kritischer Rohstoffe für die EU 2017, 2017, zuletzt geprüft am 06.06.2019.

Fazio, S.; Biganzioli, F.; De Laurentiis, V.; Zampori, L.; Sala, S.; Diaconu, E. (2018): Supporting information to the characterisation factors of recommended EF Life Cycle Impact Assessment methods, Version 2, from ILCD to EF 3.0. the Joint Research Centre (JRC), European Commission, 2018. Online verfügbar unter https://eplca.jrc.ec.europa.eu/permalink/TR_SupportingCF_FINAL.pdf, zuletzt geprüft am 21.06.2019.

Günsch, M. (2018): Toshiba & Western Digital: 96-Layer-3D-NAND geht mit Fab-6-Eröffnung in Serie. Computer Base (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.computerbase.de/2018-09/toshiba-memory-western-digital-fab-6-96-layer-massenproduktion/>, zuletzt geprüft am 02.11.2018.

Hagedoorn, H. (2019): AMD Ryzen 5 3600 review - Power Consumption and temperatures. Online verfügbar unter <https://www.guru3d.com/articles-pages/amd-ryzen-5-3600-review,7.html>, zuletzt aktualisiert am 22.07.2019, zuletzt geprüft am 03.03.2021.

Handy, J. (2017): 64-Layer 3D NAND Chips Revealed at ISSCC. Online verfügbar unter <https://thememo-ryguy.com/64-layer-3d-nand-chips-revealed-at-isscc/>.

ibm.com: What is Containers as a service (CaaS)? Online verfügbar unter <https://www.ibm.com/services/cloud/containers-as-a-service>, zuletzt geprüft am 27.11.2020.

IC Insights (2018): Global Wafer Capacity 2018-2022 report. Online verfügbar unter <http://www.icinsights.com/services/global-wafer-capacity/report-contents/>, zuletzt geprüft am 13.11.2018.

Infineon Technologies AG (2016): XMC1400 Data Sheet, Microcontroller Series for Industrial Applications. ARM® Cortex®-M0 32-bit processor core, 2016.

Infineon Technologies AG (2018a): General description 1600W Titanium server power supply with 600V CoolMOS™ G7 in DPAK and digital control by XMC™, 2018.

Infineon Technologies AG (2018b): XMC4100/XMC4200 Data Sheet, Microcontroller Series for Industrial Applications. ARM® Cortex®-M4 32-bit processor core, 2018.

Intel (2018): Intel's 2018 Data-Centric Innovation Summit, 2018. Online verfügbar unter <https://www.intc.com/investor-relations/events-and-presentations/events-calendar/event-details/2018/Intels-Data-Centric-Innovation-Summit/default.aspx>.

Intel Ireland (2017): Intel Ireland Ltd. Annual Environmental Report 2016, 2017. Online verfügbar unter <https://exploreintel.com/ireland/documents>, zuletzt geprüft am 13.11.2018.

IRDS Roadmap (2017): International Roadmap for Devices and Systems (IRDS™) 2017 Edition, 2017. Online verfügbar unter <https://irds.ieee.org/roadmap-2017>.

Kim, J.; Chang, D. (2016): SK Telecom All-Flash Storage Server SCube AF-Media. Open Compute Projekt© (Hg.), 2016.

Kutschak, M.-A.; Herrera, D. M. (2018): Infineon Engineering Report EVAL_1K6W_PSU_G7_DD - 600V CoolMOS™ DPAK G7 and digital control by XMC™. Infineon (Hg.), 2018.

Maya-Drysdale, L.; Peled, M.; Wood, J.; Rames, M.; Viegand, J. (2017): Preparatory study on the Review of Regulation 617/2013 (Lot 3) Computers and Computer Servers, Simplified tasks 5 & 6 report, Base cases and Design options. Final version for consultation, Viegand Maagøe and VITO. Online verfügbar unter <https://computerregulationreview.eu/sites/computerregulationreview.eu/files/Preparatory%20study%20on%20review%20computer%20regulation%20-%20simplified%20Tasks%205-6%20VM%2002022017.pdf>, zuletzt geprüft am 08.12.2020.

Merchant, B. (2017): 911 Metallurgist: Material Profile of an iPhone 6, 16 GB model. Online verfügbar unter https://www.vice.com/en_us/article/433wyq/everything-thats-inside-your-iphone, zuletzt aktualisiert am 22.08.2019.

Micron (2017): 16GB (x72, ECC, SR) 288-Pin DDR4 Nonvolatile RDIMM, DDR4 SDRAM NVRDIMM. MTA18ASF2G72PF1Z – 16GB, 2017. Online verfügbar unter <https://www.micron.com/parts/modules/ddr4-sdram/mta18asf2g72xf1z-2g6?pc=%7b0c496964-B399-4F6C-8440-47AB296E981D%7d>, zuletzt geprüft am 02.11.2018.

Micron (Hg.) (2018): 2018 Sustainability Report, 2018, zuletzt geprüft am 13.06.2019.

Montevecchi, F.; Stickler, T.; Hintemann, R.; Hinterholzer, S. (2020): Energy-efficient Cloud Computing Technologies and Policies for an Eco-friendly Cloud Market, Final Study Report. European Commission, Directorate-General for Communications Networks, Content and Technology (Hg.). Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/newsroom/dae/document.cfm?doc_id=71330.

Myhre, G.; Shindell, D.; Bréon, F.-M.; Collins, W.; Fuglestedt, J.; Huang, J.; Koch, D.; Lamarque, J.-F.; Lee, D.; Mendoza, B.; Nakajima, T.; Robock, A.; Stephens, G. et al. (2013): Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (Hg.), 2013.

Open Compute Projekt© (Hg.) (2017): QCT Rackgo X Tioga Pass, 2017.

Peiró, L. T.; Ardente, F. (2015): Environmental Footprint and Material Efficiency Support for product policy. Analysis of material efficiency requirements of enterprise servers. European Commission Joint Research Centre Institute for Environment and Sustainability (Hg.), 2015. Online verfügbar unter <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC96944/lb-na-27467-en-n%20.pdf>, zuletzt geprüft am 29.10.2018.

Prakash, S.; Antony, F.; Köhler, A.; Liu, R.; Schlösser, A.; Proske, M. (2016): Ökologische und ökonomische Aspekte beim Vergleich von Arbeitsplatzcomputern für den Einsatz in Behörden unter Einbeziehung des Nutzerverhaltens (Öko-APC) (FKZ 3712 95 301). Umweltbundesamt (Hg.), 2016. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/oekologische-oekonomische-aspekte-beim-vergleich>.

Prakash, S.; Liu, R.; Schischke, K.; Stobbe, L. (2012): Zeitlich optimierter Ersatz eines Notebooks unter ökologischen Gesichtspunkten (Forschungskennzahl 363 01 322). Umweltbundesamt (Hg.), 2012. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4316.pdf>.

Prakash, S.; Liu, R.; Schischke, K.; Stobbe, L. (2013): Schaffung einer Datenbasis zur Ermittlung ökologischer Wirkungen der Produkte der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) (UBA TEXTE 82/2013). Umweltbundesamt (Hg.), 2013.

Proske, M.; Clemm, C.; Richter, N. (2016): Life Cycle Assessment of the Fairphone 2. Fraunhofer IZM. Berlin, 11/2016. Online verfügbar unter https://www.fairphone.com/wp-content/uploads/2016/11/Fairphone_2_LCA_Final_20161122.pdf, zuletzt geprüft am 22.08.2019.

Rat der Europäischen Union (2020): Entwurf von Schlussfolgerungen des Rates zum Thema Digitalisierung zum Wohle der Umwelt. Brüssel, 11.12.2020. Online verfügbar unter <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-13957-2020-INIT/de/pdf>, zuletzt geprüft am 27.01.2021.

Samsung (2016): Solid State Drive, Samsung SSD 850 EVO. Solid State Drive mit starker Alltags-Performance, hoher Effizienz und herausragender Garantie. Samsung (Hg.). Online verfügbar unter http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/1300000-1399999/001300599-da-01-de-SAMSUNG_SSD_250GB_850_EVO_SERIES.pdf, zuletzt aktualisiert am 24.06.2019.

Schien, D.; Coroama, V. C.; Hilty, L. M.; Preist, C. (2014): The Energy Intensity of the Internet: Edge and Core Networks. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/266968255_The_Energy_Intensity_of_the_Internet_Edge_and_Core_Networks/, zuletzt geprüft am 09.05.2020.

Schmidt, M.; Hottenroth, H.; Schottler, M.; Fetzer, G.; Schlüter, B. (2011): Life cycle assessment of silicon wafer processing for microelectronic chips and solar cells. In: *International Journal of Life Cycle Assessment*.

Schödwel, B.; Zarnekow, R.; Liu, R.; Gröger, J.; Wilkens, M. (2018): Kennzahlen und Indikatoren für die Beurteilung der Ressourceneffizienz von Rechenzentren und Prüfung der praktischen Anwendbarkeit (Forschungskennzahl 3715 31 601 0). Umweltbundesamt (Hg.), 2018, zuletzt geprüft am 29.10.2018.

Shaw, M. A. (2017): Project Olympus Intel® Xeon® Scalable Processor Motherboard Specification (Version 1.1), 2017, zuletzt geprüft am 30.10.2018.

Siltronic - Fact Book (2017): Siltronic – a leading producer of silicon wafers, 2017. Online verfügbar unter https://www.siltronic.com/fileadmin/investorrelations/Pr%C3%A4sentation/Siltronic_Fact_Book_2017.pdf, zuletzt geprüft am 26.10.2018.

Siltronic - Geschäftsbericht: Wachstum mit Wafern. Online verfügbar unter https://www.siltronic.com/fileadmin/investorrelations/2017/Quartal4_Jahresabschluss/Siltronic_Geschäftsbericht_2017.pdf, zuletzt geprüft am 26.10.2018.

Siltronic - Nichtfinanzieller Bericht (2017): Nichtfinanzieller Bericht, 2017. Online verfügbar unter https://www.siltronic.com/fileadmin/investorrelations/2017/Quartal4_Jahresabschluss/05.03.Siltronic_Nichtfinanzieller_Bericht_2017_safe.pdf, zuletzt geprüft am 26.10.2018.

SK hynix (Hg.) (2017): Sustainability Report 2017, 2017.

Statista (2018): Marktanteile der Hersteller am weltweiten Absatz von SSD-Laufwerken im 1. Quartal 2018. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/308664/umfrage/weltweite-marktanteile-bei-ssd-speicherplatten/>, zuletzt geprüft am 02.11.2018.

Stiftung Warentest (2020): Videochat-Programme im Test. Die besten Tools für Video-Telefonie, Stiftung Warentest. Online verfügbar unter <https://www.test.de/Videochat-Programme-im-Test-Die-besten-Tools-fuer-Video-Telefonie-5605104-0/>, zuletzt geprüft am 01.03.2021.

storage-insider.de: Was ist eine Virtuelle Maschine (VM)? Online verfügbar unter <https://www.storage-insider.de/was-ist-eine-virtuelle-maschine-vm-a-842096/>, zuletzt geprüft am 27.11.2020.

Sumco CSR Report (2017): SUMCO Corporation CSR Report, 2017. Online verfügbar unter https://www.sumcosi.com/english/corporate/pdf/csr_rep17en.pdf, zuletzt geprüft am 26.10.2018.

tarife.at (2020): Ratgeber Datenverbrauch und Datengeschwindigkeit. Online verfügbar unter <https://www.tarife.at/ratgeber/datenverbrauch-datengeschwindigkeit>, zuletzt geprüft am 03.12.2020.

TechInsights (2014): TECHNOLOGY ROADMAP of DRAM for Three Major manufacturers: Samsung, SK-Hynix and Micron, 2014.

Teehan, P.; Kandlikar, M. (2013): Comparing Embodied Greenhouse Gas Emissions of Modern Computing and Electronics Products. In: *Environmental Science and Technology* (47), S. 3997–4003.

UMC CSR (2018): UMC Corporate Social Responsibility Report, 2018, zuletzt geprüft am 31.10.2018.

Umweltbundesamt (2020): Vergleich der durchschnittlichen Treibhausgas-Emissionen einzelner Verkehrsmittel im Personenverkehr, Bezugsjahr 2019. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/366/bilder/dateien/grafik_vergleich-verkehrsmittel-personenverkehr_2019_uba.pdf, zuletzt geprüft am 05.03.2021.

United States Geological Survey (2019): Mineral Commodity Summaries 2019. Online verfügbar unter https://prd-wret.s3-us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/mcs2019_all.pdf.

vmware.com (2020): Glossar: Virtual Desktop. Online verfügbar unter <https://www.vmware.com/topics/glossary/content/virtual-desktops>, zuletzt geprüft am 14.10.2020.

Wikipedia (2020a): Desktop (grafische Benutzeroberfläche). Online verfügbar unter [https://de.wikipedia.org/wiki/Desktop_\(grafische_Benutzeroberfl%C3%A4che\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Desktop_(grafische_Benutzeroberfl%C3%A4che)), zuletzt geprüft am 14.10.2020.

Wikipedia (2020b): Function as a service. Online verfügbar unter https://en.wikipedia.org/wiki/Function_as_a_service, zuletzt geprüft am 27.11.2020.

Williams, E. D.; Ayres, R. U.; Heller, M. (2002): The 1.7 Kilogram Microchip: Energy and Material Use in the Production of Semiconductor Devices. In: *Environmental Science and Technology* (36(24)), S. 5504–5510.

Zhao, W.; Ning, J. (2017): Facebook Server Intel Motherboard V4.0, Project Tioga Pass. Rev 0.30.

A Anhang: KPI4DCE-Berechnungstool

Abbildung 28: Screenshot 1 aus der Ergebnisdarstellung beim KPI4DCE-Berechnungstool v2.4

Berechnung Herstellungsaufwand, Aufwand Nutzungsphase, Nutzen des RZ (Performance) und Effizienzkennzahlen für Rechenzentren (KPI4DCE)

Auswahl des Berichtszeitraums

Start des Berichtszeitraums
Ende des Berichtszeitraums
(inklusive dieser Tage)

Bitte eingeben!
01.01.2018
31.12.2018

Berechnen!

Abkürzung	Erläuterung und Diagrammbeschriftung
ADP	Abiotischer Rohstoffverbrauch (ADP)
GWP	Treibhauseffekt (GWP: Global Warming Potential)
KEA	Kumulierter Energieaufwand (KEA)
Wasser	Wasserverbrauch

Herstellungsaufwand

Hardware	Herstellungsphase (gesamt)				Herstellungsphase (bezogen auf Berichtszeitraum)				Herstellungsphase bez. auf 1 Jahr			
	ADP [kg Sb eq.]	GWP [kg CO2 eq.]	KEA [MJ]	Wasser [m³]	ADP [kg Sb eq./BZ]	GWP [kg CO2 eq./BZ]	KEA [MJ/BZ]	Wasser [m³/BZ]	ADP [kg Sb eq./a]	GWP [kg CO2 eq./a]	KEA [MJ/a]	Wasser [m³]
Server	15,21	98.118	1.282.922	0	3,80	24.513	320.511	0	3,80	24.529	320.730	0
Speichersysteme	8,94	36.508	436.261	0	1,49	6.081	72.660	0	1,49	6.085	72.710	0
Netzwerk	1,07	4.918	66.561	0	0,15	702	9.502	0	0,15	703	9.509	0
Summe	25,22	139.544	1.785.744	0	5,44	31.295	402.674	0	5,44	31.317	402.949	0

Aufwand Nutzungsphase

Medium	Nutzungsphase (gesamte Nutzungsdauer)				Nutzungsphase (nur Berichtszeitraum)				Nutzungsphase bez. auf 1 Jahr			
	ADP [kg Sb eq./ND]	GWP [kg CO2 eq./M]	KEA [MJ/ND]	Wasser [m³/ND]	ADP [kg Sb eq./BZ]	GWP [kg CO2 eq./BZ]	KEA [MJ]	Wasser [m³]	ADP [kg Sb eq./a]	GWP [kg CO2 eq./a]	KEA [MJ/a]	Wasser [m³]
Strom	0,18	330.696	5.554.193	-	0,18	330.696	5.554.193	-	0,18	330.923	5.557.997	-
Brennstoff	0,00	0	0	-	0,00	0	0	-	0,00	0	0	-
Wasser für Kühlung	-	-	-	14,19	-	-	-	4,00	-	-	-	4,00
Kältemittel	0,00	20.518	1.708	-	0,00	5.779	481	-	0,00	5.783	481	-
Summe	0,18	351.214	5.555.901	14,19	0,18	336.475	5.554.674	4,00	0,18	336.705	5.558.478	4,00

Gebäudetechnik	PUE	Hinweis
Monitoringzeitraum	1,30	gesamter im Monitoring erfasster Zeitraum
Berichtszeitraum	1,30	nur Berichtszeitraum = korrigiert um RatioMzuBZ

Allokation Nutzungsphase auf Hardware

Allokation im Berichtszeitraum	Nennleistung im Berichtszeitraum [W]	Allokation nach Nennleistung [%]	Energiebedarf pro Jahr im BZ Geräteangaben [kWh/a]	Allokation nach Energiebedarf Geräteangaben [%]	Energiebedarf im Berichtszeitraum (Monitoring) [kWh/a]	Allokation nach Energiebedarf im Berichtszeitraum (Monitoring) [%]	Default Nennleistung im Berichtszeitraum [W]	Allokation nach Defaultwerten [%]	Auswahl Allokation
									Monitoring
Server	30.000	41%	192.720	37%	157.680	30%	40.000	50%	30%
Storage	25.000	34%	187.026	36%	190.800	37%	17.500	22%	37%
Netzwerk	2.000	3%	19.973	4%	52.560	10%	4.000	5%	10%
Infrastruktur	16.987	23%	119.126	23%	119.520	23%	18.329	23%	23%
Summe	73.987	100%	518.845	100%	520.560	100%	79.829	100%	100%

Aufwand (Herstellung + Nutzung)

Hardware	Aufwand (gesamt)				Aufwand (bezogen auf Berichtszeitraum)				Aufwand bez. auf 1 Jahr			
	ADP [kg Sb eq.]	GWP [kg CO2 eq.]	KEA [MJ]	Wasser [m³]	ADP [kg Sb eq./BZ]	GWP [kg CO2 eq./BZ]	KEA [MJ/BZ]	Wasser [m³/BZ]	ADP [kg Sb eq./a]	GWP [kg CO2 eq./a]	KEA [MJ/a]	Wasser [m³/a]
Server	15,26	204.502	2.965.829	4	3,85	126.432	2.003.047	1	3,86	126.519	2.004.419	1
Speichersysteme	9,00	165.238	2.472.657	5	1,55	129.408	2.108.606	1	1,56	129.497	2.110.050	1
Netzwerk	1,09	40.379	627.530	1	0,17	34.675	570.348	0	0,17	34.699	570.738	0
Infrastruktur	0,04	80.638	1.275.629	3	0,04	77.254	1.275.347	1	0,04	77.307	1.276.221	1
Summe	25,40	490.758	7.341.645	14	5,62	367.770	5.957.347	4	5,63	368.022	5.961.428	4

Nutzen des Rechenzentrums

Hardware	Performance Bezeichnung	Gesamte Nutzungsdauer	Im Berichtszeitraum	Bezogen auf 1 Jahr
Server	Server: Rechenleistung	9,52E+11 [ops/ND]	2,38E+11 [ops/BZ]	2,38E+11 [ops/a]
Speichersysteme	Speicher: Belegte Speicherkapazität	6,66E+04 [GByte/ND]	6,66E+04 [GByte/BZ]	6,66E+04 [GByte/a]
Netzwerk	Netzwerk: Externer Datenverkehr	1,04E+10 [Gbit/ND]	1,51E+09 [Gbit/BZ]	1,51E+09 [Gbit/a]
Infrastruktur	Infrastruktur: Bereitstellung IT-Strom und Klimatisierung	4,01E+05 [kWh/MZ]	4,01E+05 [kWh/BZ]	4,01E+05 [kWh/a]

KPIs = Nutzen / Aufwand

Bezeichnungen	ADP [kg Sb eq.]	GWP [kg CO2 eq.]	KEA [MJ]	Wasser [m³]
Server	[ops] KPI Server ADP	KPI Server GWP	KPI Server CED	KPI Server Water
Speicher	[GByte] KPI Storage ADP	KPI Storage GWP	KPI Storage CED	KPI Storage Water
Netzwerk	[Mbit/s] KPI Network ADP	KPI Network GWP	KPI Network CED	KPI Network Water
Infrastruktur	KPI Infra ADP	KPI Infra GWP	KPI Infra CED	KPI Infra Water

Bezogen auf Berichtszeitraum *	ADP [kg Sb eq.]	GWP [kg CO2 eq.]	KEA [MJ]	Wasser [m³]
Server	[ops] 6,17E+10 [ops/kg Sb eq.]	1,88E+06 [ops/kg CO2 eq.]	1,19E+05 [ops/MJ]	1,97E+11 [ops/m³]
Speicher	[GByte] 42,811 [GByte/kg Sb eq.]	0,514 [GByte/kg CO2 eq.]	0,0316 [GByte/MJ]	45,426 [GByte/m³]
Netzwerk	[Gbit] 8,85E+09 [Gbit/kg Sb eq.]	4,37E+04 [Gbit/kg CO2 eq.]	2,65E+03 [Gbit/MJ]	3,75E+09 [Gbit/m³]
Infrastruktur	99% [kg Sb eq./kg Sb eq.]	79% [kg CO2 eq./kg CO2 eq.]	79% [MJ/MJ]	77% [m³/m³]

* KPIs "Bezogen auf Berichtszeitraum" und "Bezogen auf 1 Jahr" sind identisch, da sich "Faktorjahre" rauskürzen

Quelle: KPI4DCE-Berechnungstool v2.4 (2020), eigene Darstellung, Öko-Institut

Abbildung 29: Screenshot 2 aus der Ergebnisdarstellung beim KPI4DCE-Berechnungstool v2.4

Services des Rechenzentrums (Green Cloud Computing)

Allokation Services auf Hardware

Service	Service-Bezeichnung	Anteil an Hardware (Allokationsfaktoren Services)				Aufwand (bezogen auf Berichtszeitraum)			
		Server	Storage	Netzwerk	Infrastruktur	ADP [kg Sb eq./a]	GWP [kg CO2 eq./a]	KEA [MJ/a]	Wasser [m³/a]
Service 1	Virtuelle Server	80%	80%	90%	80%	4,52	297.888	4.826.216	3,24
Service 2	Lohnabrechnung	20%	20%	10%	20%	1,11	70.134	1.135.212	0,76
Service 3		0%	0%	0%	0%	0,00	0	0	0,00
Service 4		0%	0%	0%	0%	0,00	0	0	0,00
Summe		100%	100%	100%	100%	5,63	368.022	5.961.428	4

Services (Nutzen des Rechenzentrum)

Hardware	Service-Bezeichnung	Anzahl Service Einheiten (SU)	Einheit Service Einheit	Anzahl Services gesamte Nutzungsdauer	Anzahl Services im Berichtszeitraum
Service 1	Virtuelle Server	1.000	Stück	1.000 Stück/ND	1.000 Stück/BZ
Service 2	Lohnabrechnung	100.000	Konten	100.000 Konten/ND	100.000 Konten/BZ
Service 3		0	1	0 1/ND	0 1/BZ
Service 4		0	1	0 1/ND	0 1/BZ

Green Cloud Computing (GCC) Aufwandskennzahlen

= Aufwand / Nutzen

Bezeichnungen	GCC ADP [kg Sb eq./SU]	GCC GWP [kg CO2 eq./SU]	GCC KEA [MJ/SU]	GCC Wasser [m³/SU]
Virtuelle Server	0,00452	298	4.826	0,003239
Lohnabrechnung	0,00001	0,70	11,35	0,000008

Mengengerüst Rechenzentrum

Server	
Anzahl	100 [Stck]
Mittlere Nutzungsdauer	4,0 [a]
Nennleistung ohne Redundanz	30.000 [W]
Server Benchmark	50.300 [Ops/s]
Anzahl CPUs	200 [Anzahl]
Anzahl Kerne	800 [Anzahl]
RAM	1.600 [GByte]
Anzahl RAM Module	2.400 [Anzahl]
Anzahl HDD	200 [Anzahl]
Anzahl SSD	0 [Anzahl]
Anzahl redundante Netzteile	200 [Anzahl]
Mittlere CPU-Auslastung pro Server	15% [-]
Mittlere Leistungsaufnahme pro Server	220 [W/Stck]
Energiebedarf pro Jahr	192.720 [kWh]

Speichersysteme	
Anzahl	50 [Stck]
Mittlere Nutzungsdauer	6,0 [a]
Nennleistung ohne Redundanz	25.000 [W]
Speicherkapazität	222.000 [GByte]
Anzahl HDD	400 [Anzahl]
Anzahl SSD	200 [Anzahl]
Anzahl Netzteile	100 [Anzahl]
Mittlere Belegung Speicherplatz	30% [-]
Mittlere Anzahl Speicherzugriffe pro Sekunde	4.000 [IO/s]
Mittlere Datenmenge Lesen Schreiben pro Seku	150 [GByte/s]
Mittlere Leistungsaufnahme pro Speicher	427 [W/Stck]
Energiebedarf pro Jahr	187.026 [kWh]

Netzwerk-Geräte	
Anzahl	20 [Stck]
Mittlere Nutzungsdauer	7,0 [a]
Nennleistung ohne Redundanz	2.000 [W]
Anzahl Ports	960 [Anzahl]
Maximale Bandbreite	960.000 [Mbit/s]
Anzahl Netzteile	40 [Anzahl]
Mittlere genutzte Bandbreite interner Datenver	0 [Mbit/s]
Mittlere genutzte Bandbreite externer Datenver	48.000 [Mbit/s]
Mittlere Leistungsaufnahme pro Switch	114 [W/Stck]
Energiebedarf pro Jahr	19.973 [kWh]

Gebäudetechnik	
Strombedarf RZ gesamt	520.560 [kWh]
Strombedarf IT	401.040 [kWh]
PUE	1,30 [-]
Mittlere elektrische Leistungsaufnahme	65 [kW _{el}]
Strombedarf Kühlsystem	119.520 [kWh _{el}]
Kältearbeit Kühlsystem (thermisch)	401.040 [kWh _{th}]
Jahresarbeitszahl Kühlsystem (JAZ)	3,36 [-]

Quelle: KPI4DCE-Berechnungstool v2.4 (2020), eigene Darstellung, Öko-Institut

B Anhang: KPI4DCE-Berechnungsmethodik

B.1 Bilanzierung der Umweltwirkungen von Rechenzentren

B.1.1 Bilanzgrenzen

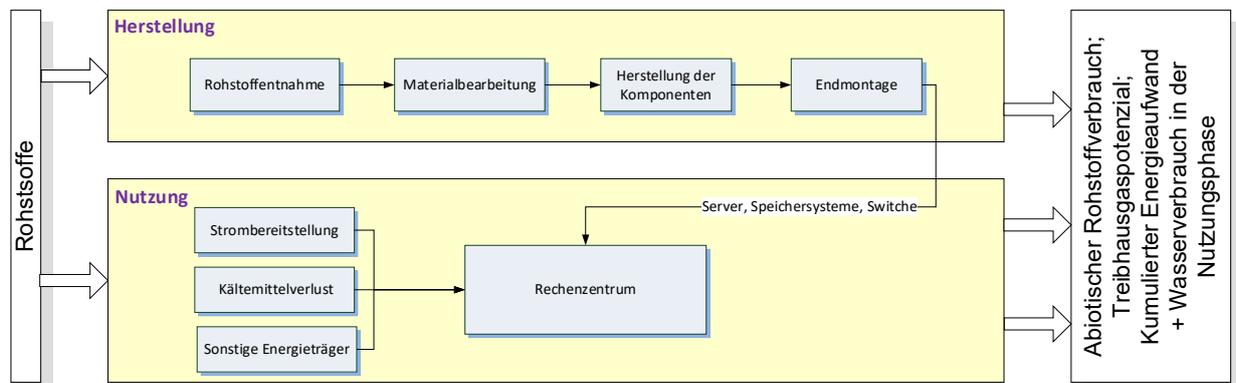
In der vorliegenden Studie wird nicht die ganze Lebensphase eines Rechenzentrums betrachtet, sondern nur die Herstellungs- und Nutzungsphase. Dies lässt sich dadurch begründen, dass die Distributions- und Entsorgungsphase im Vergleich zur Herstellungs- und Nutzungsphase eine untergeordnete Rolle für das Gesamtergebnis spielt. Angesichts der Komplexität der Ermittlung der Umweltwirkungen von Cloud-Services im Rahmen des Projektes wird sich diese Untersuchung lediglich auf das Wesentliche konzentrieren.

Die zu untersuchenden Lebensphasen sind:

- ▶ Produktionsphase: IT-Geräte Server, Datenspeichersysteme und Switches
- ▶ Nutzungsphase: Energie-, Kältemittel- und Wasserverbrauch des RZ

In Abbildung 30 ist dargestellt, welche Prozesse entlang des RZ-Lebensweges in dieser Studie berücksichtigt werden.

Abbildung 30: Schematische Darstellung der Systemgrenzen



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

B.1.2 Wirkungskategorien ADP, CED, GWP und Wasserverbrauch

Im Rahmen der Wirkungsabschätzung dieser Studie werden, die in den folgenden Kapiteln beschriebenen Wirkungskategorien betrachtet.

B.1.2.1 Abiotischer Rohstoffverbrauch (ADP)

Zur Bewertung des Rohstoffverbrauchs wird in dieser Studie die Wirkungskategorie *Abiotischer Rohstoffverbrauch*, englisch *Abiotic Depletion Potential (ADP)* verwendet. Die Einheit des ADP ist Kilogramm Antimon-Äquivalente (kg Sb eq.)

Im vorangegangenen Forschungsprojekt KPI4DCE (Schödwell et al. 2018) wurden verschiedene Methoden zur Bewertung des Rohstoffverbrauchs im Rahmen von Ökobilanzen detailliert

beschrieben und die Wirkungskategorie ADP als geeignet ausgewählt. Die Berechnung des ADP erfolgte nach der vom *Joint Research Centre* (JRC) der Europäischen Kommission entwickelten ILCD-Methode²⁷ mit sogenannten Charakterisierungsfaktoren (CF) in der Version vom August 2016 (CF-v1.0.10)²⁸. Der methodische Ansatz zur Umrechnung von Rohstoffmengen auf die Bezugsgröße Kilogramm Antimon-Äquivalente (kg Sb eq.) beruht auf der vom niederländischen *Centrum voor Milieukunde* (CML) am *Institute of Environmental Sciences, Leiden University* entwickelten *CML-Methode*.

Bei der Charakterisierung von Mineralien unterscheidet die CML-Methode zwischen Gesamtreserven (engl.: ultimate reserves), förderbaren Reserven (engl.: reserve base) und wirtschaftlich nutzbaren Reserven (engl.: economic reserves). Die Bewertung unterschiedlicher Mineralien durch die ILCD-Methode hat sich zwischenzeitlich geändert (Fazio et al. 2018). Mit der aktuellen Änderung beruhen die Charakterisierungsfaktoren nicht mehr auf *förderbaren Reserven*, sondern auf *Gesamtreserven*. Außerdem wurde bei der aktualisierten Methode die Bewertung von *Seltenen Erden* aus der Bewertung herausgenommen. Die aktualisierte Methode vom März 2019 wird auf der *European Platform on Life Cycle Assessment*²⁹ mit der Bezeichnung EF-LCIA Method CF (EF-v2.0) bereitgestellt, wobei die Abkürzungen jeweils bedeuten: EF: Environmental Footprint, LCIA: Life Cycle Impact Assessment, CF: Characterisation Factors, v: Version.

Im Ergebnis hat diese methodische Änderung zur Folge, dass sich alle ADP-Kennzahlen im aktuellen Green Cloud Computing Projekt gegenüber dem KPI4DCE Projekt ändern, trotz gleichbleibender Eingangsgrößen (z.B. Hardwarebestand und Energiebedarf). Die ADP-bezogenen KPIs sind daher nicht zwischen den beiden Studien vergleichbar.

Die neuen Charakterisierungsfaktoren (ILCD CF EF-v2.0) im Vergleich zu den alten (ILCD CF-v1.0.10), die in der KPI4DCE-Studie (Schödwell et al. 2018) verwendet wurden, sind im Anhang in Tabelle 102 aufgeführt.

Um einen Eindruck über die Auswirkung der Änderung der verschiedenen methodischen Ansätze zu geben, werden in der folgenden Tabelle 64 die ADP-Werte für die Bereitstellung von elektrischer Energie im „Strommix Deutschland“ dargestellt. Während die Bereitstellung einer Kilowattstunde Elektrizität mit der alten Methode („*förderbaren Reserven*“) mit 54,9 Milligramm Antimon-Äquivalenten verbunden war, sind es mit der neuen Methode („*Gesamtreserven*“) nur noch 0,346 Milligramm Antimon-Äquivalente und damit gerade mal 6 Promille des alten Wertes.

Tabelle 64: Vergleich der ADP-Werte für die Bereitstellung von elektrischer Energie im „Strommix Deutschland“ nach verschiedenen CML-Methoden

	ADP KPI4DCE	ADP Green Cloud Computing
CML-Methode	Charakterisierung auf Grundlage der CML-Methode „ <i>förderbaren Reserven</i> “ zusammen mit Faktoren für Seltene Erden	Charakterisierung auf Grundlage der CML-Methode „ <i>Gesamtreserven</i> “
Zeitpunkt der Veröffentlichung	August 2016	März 2019
Charakterisierungsfaktoren	ILCD CF v1.0.10	ILCD CF EF-v2.0
Datensatz aus	Ecoinvent v 3.2	Ecoinvent v 3.5

²⁷ International Reference Life Cycle Data System; <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/ilcd.html>; letzter Zugriff am 20.11.2020

²⁸ <http://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/CFs%20package%20August%202016.zip>; letzter Zugriff am 20.11.2020

²⁹ European Platform on Life Cycle Assessment; <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/developerEF.xhtml>; letzter Zugriff am 20.11.2020

	ADP KPI4DCE	ADP Green Cloud Computing
ADP: market for electricity, medium voltage, DE	5,49E-05 kg Sb eq./kWh	3,46E-07 kg Sb eq./kWh

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Um dem Umstand sich ändernder Bewertungsmethoden und damit der unterschiedlichen Interpretation der KPI4DCE-Kennzahlen für den Rohstoffverbrauch (ADP) gerecht zu werden, muss bei der Angabe von KPI4DCE-Kennzahlen jeweils die Version des KPI4DCE-Berechnungswerkzeuges genannt werden. Im Berechnungswerkzeug selbst erfolgt dann der Verweis auf die zugrunde liegenden Charakterisierungsfaktoren (hier: EF-LCIA Method CF (EF-v2.0)). Im Rahmen der vorliegenden Studie handelt es sich um das KPI4DCE-Berechnungswerkzeug Version 2.4 („KPI4DCE-Berechnungstool-v2.4“).

B.1.2.2 Treibhausgaspotenzial (GWP)

Für die Berechnung des Treibhausgaspotenzials wird die international anerkannte Methode des *Intergovernmental Panel on Climate Change* IPCC 2013 (Myhre et al. 2013) herangezogen. Mit Blick auf die internationale Nutzung des KPI4DCE-Berechnungswerkzeuges wird bei der Bezeichnung der KPIs die englische Bezeichnung *Global Warming Potential* (GWP) verwendet. Die Einheit des GWP ist Kilogramm Kohlendioxid-Äquivalente (kg CO₂ eq.).

B.1.2.3 Kumulierter Energieaufwand (KEA)

Der KEA stellt den gesamten Verbrauch an energetischen Ressourcen dar, der alle nicht-erneuerbaren (fossil und nuklear) und erneuerbaren Energieverbräuche (Sonne, Wind, Wasserkraft und Biomasse) als Primärenergiewerte ausweist. Für die KPIs wird die englische Bezeichnung *Cumulated Energy Demand* (CED) verwendet. Die Einheit des KEA bzw. CED ist Megajoule (MJ).

B.1.2.4 Wasserverbrauch (Water Usage)

Der Wasserverbrauch des Rechenzentrums wird als direkter Wasserverbrauch bilanziert, der für den Betrieb des Rechenzentrums erforderlich ist, in die Rechenzentrumsfläche geliefert und dort „verbraucht“ (z.B. verdunstet oder verunreinigt) wird. Die Einheit des Wasserverbrauchs ist Kubikmeter [m³].

In der Regel handelt es sich beim hier bilanzierten Wasserverbrauch um Wasser zum Betrieb von Kälteanlagen (z.B. Verdunstungskühlung, Wasserkühlung). Im Fall, dass das Wasser in Form von Nahwärme oder Nahkälte das Rechenzentrum (bzw. einen Wärmetauscher) durchströmt und seine Energie an das Rechenzentrum abgibt oder aufnimmt, so wird das Wasser statt als Wasserverbrauch als Energieverbrauch bilanziert.

Mit der ausschließlichen Bilanzierung von *direktem* Wasserverbrauch unterscheidet sich die im Forschungsprojekt Green Cloud Computing aktualisierte Berechnungsmethode von der Methodik im KPI4DCE-Projekt. Dort wurde zusätzlich der Wasserverbrauch zur Produktion der Hardware und zur externen Stromerzeugung berechnet. Dies hatte zur Folge, dass die wasserbezogenen KPIs stark mit Vorketten und dem Energieverbrauch des Rechenzentrums zusammenhingen und dass Wassersparmaßnahmen nicht so deutlich an den KPIs ablesbar waren. Der direkte

Wasserverbrauch im Rechenzentrum selbst ist jedoch ein Unterscheidungsmerkmal, das sich als Effizienzindikator eignet.

B.1.3 Modellierungs-Software und Datenbank

Die Erstellung der Ökobilanz erfolgt mit der Software OpenLCA (Version 1.10.3), die vom Berliner Unternehmen *GreenDelta* entwickelt wurde. Alle wesentlichen Eingabe- und Ausgabeströme innerhalb des Untersuchungsrahmens und der Systemgrenzen werden in OpenLCA modelliert. Auf dieser Basis werden anschließend die Sachbilanz und die Wirkungsabschätzung erstellt.

Neben Literatur (s. Abschnitt 3.2.3) und ProBas-Datensätzen wird die Ecoinvent V3.5 (2018)-Datenbank für die Modellierung verwendet.

B.2 Berechnung auf der Umweltwirkungen auf IKT-Komponentenebene

Die für die Modellierung zugrunde gelegte Datengrundlage, soweit sie in der vorliegenden Studie geändert wurden, ist in Abschnitt 3.2.3 dokumentiert. Ziel der folgenden Kapitel ist eine Dokumentation der Berechnungsmethode für die Verknüpfung von den aus der Modellierung resultierenden Umweltwirkungen (CED, ADP, GWP) mit den von RZ-Betreibern angegebenen Parametern. Somit wird die Umweltwirkungsabschätzung eines bestimmten Cloud-Computing-Services eines Rechenzentrums ermöglicht.

B.2.1 CPUs

B.2.1.1 Skalierungsfaktor zur Ermittlung der „Die“-Fläche

Die Umweltwirkungen sind auf „Die“-Fläche bezogen. Allerdings ist die „Die“-Fläche der CPUs für RZ-Betreiber ein unbekannter Parameter. Der methodische Ansatz für die Umrechnung der „Die“-Fläche der CPUs erfolgt anhand der Anzahl der Kerne, die den RZ-Betreibern bekannt ist. Tabelle 65 dokumentiert das Verhältnis zwischen „Die“-Fläche und Anzahl der Kerne der CPUs, das aus der „Die“-Abmessung berechnet wird. Die ersten zwei Spalten beziehen sich auf Computer, die weiteren auf Server.

Tabelle 65: „Die“-Fläche und Anzahl der Kerne der CPUs

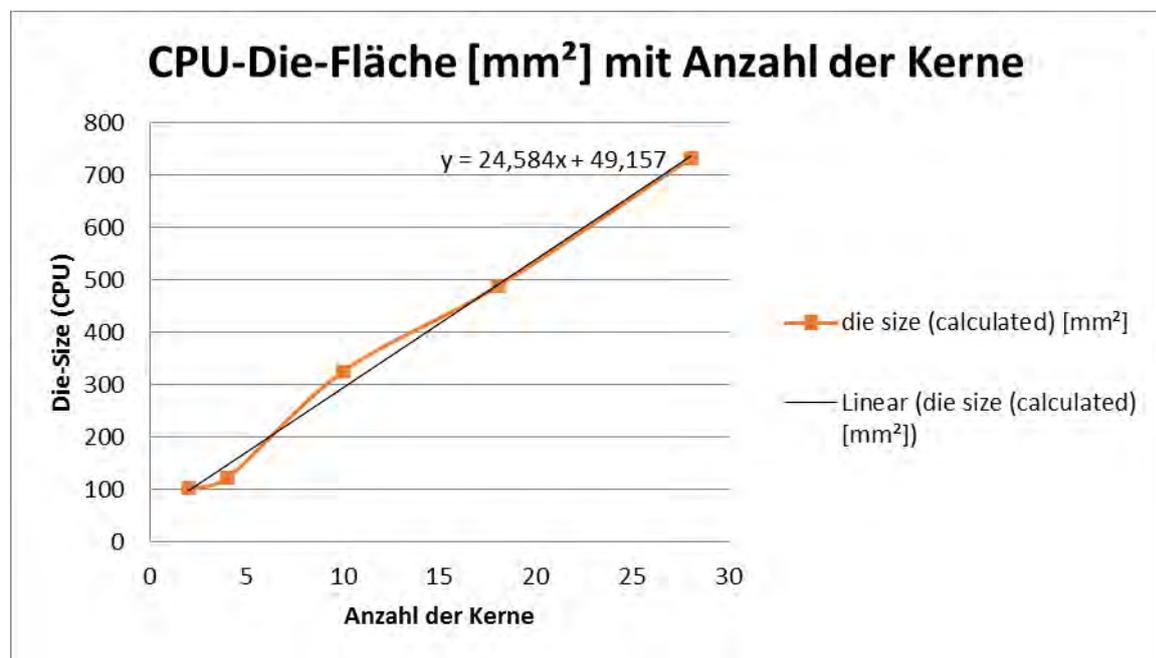
	Core family		Xeon Scalable Processor family			Durchschnitt Xeon
	Dual-core	Quad-core	Low Core Count (LCC)	High Core Count (HCC)	Extreme Core Count (XCC)	
application	mobile, entry-level	desktop	server	server	server	server
node [nm]	14	14	14	14	14	14
layers	11	11	12	13	13	11-13
die length [mm]	9,19	9,19	14,62	21,93	21,93	19,49
die width [mm]	11,08	13,31	22,26	22,26	33,39	25,97

	Core family		Xeon Scalable Processor family			Durchschnitt Xeon
ratio	0,83	0,69	0,66	0,99	0,66	0,77
die size (calculated) [mm ²]	101,83	122,33	325,44	488,16	732,24	515,28
CPU cores	2	4	10	18	28	18,67
die size per core [mm ²]	50,91	30,58	32,54	27,12	26,15	28,61
dies per 300 mm wafer	588	485	175	114	73	121

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Aus der Anzahl der Kerne und der errechneten „Die“-Fläche ergibt sich die in Abbildung 31 dargestellte Trendlinie. Die CPUs für Computer wurden nicht ausgenommen, da es zurzeit noch Server mit 2 oder 4 Kernen in Rechenzentren gibt. Auch wenn 5 CPUs als Ableitungsgrundlage sehr wenig sind, kann größenordnungsmäßig eine Berechnungsformel dargestellt werden, so dass die spezifische „Die“-Fläche der CPUs durch die einzelnen Rechenzentren mittels der Anzahl der Kerne abgebildet werden kann.

Abbildung 31: Verhältnis der Die-Fläche mit Anzahl der Kerne der CPUs



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

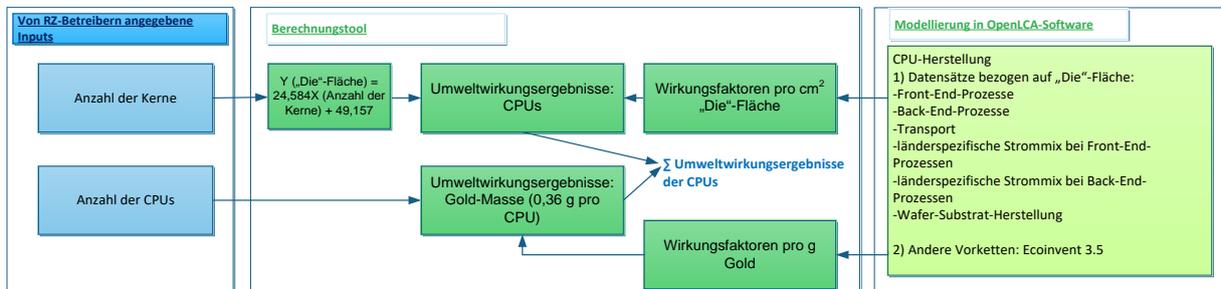
Für die Berechnung innerhalb des entwickelten Werkzeugs wird eine „Die“-Fläche, gemäß der Interpolation des Kurvenverlaufs aus Abbildung 31, wie folgt berechnet:

$$\text{DieSizeProCPU [cm}^2\text{]} = 0,24584 * \text{AnzahlKerneProCPU} + 0,49157$$

B.2.1.2 Berechnungsablauf des Cloud-Computing-Tools: Herstellung der CPUs

Abbildung 32 illustriert den Berechnungsablauf des Cloud-Computing-Tools. Die von RZ-Betreibern angegebene Anzahl der Kerne und die Anzahl der CPUs werden im Tool mit den Wirkungsfaktoren verknüpft, so dass die Umweltauswirkungen der Herstellung der CPUs des RZ berechnet werden können. Um die Ergebnisse pro Jahr zu berechnen, muss noch das Anschaffungsdatum der Server eingegeben werden.

Abbildung 32: Berechnungsablauf des Cloud-Computing-Tools: Herstellung der CPUs



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Berechnungsformeln:

- ▶ $\text{DieSizeProCPU} [\text{cm}^2] = 0,24584 * \text{AnzahlKerneProCPU} + 0,49157$
- ▶ $\text{ADP_CPUs} = \text{AnzahlCPU} * (\text{DieSizeProCPU} * \text{ADP_CPU_DieSize} + \text{ADP_CPU_Gold} + \text{ADP_CPU_T})$
- ▶ $\text{GWP_CPUs} = \text{AnzahlCPU} * (\text{DieSizeProCPU} * \text{GWP_CPU_DieSize} + \text{GWP_CPU_Gold} + \text{GWP_CPU_T})$
- ▶ $\text{KEA_CPUs} = \text{AnzahlCPU} * (\text{DieSizeProCPU} * \text{KEA_CPU_DieSize} + \text{KEA_CPU_Gold} + \text{KEA_CPU_T})$

B.2.2 Kühlkörper (KK) für CPU

Die Anzahl der CPU-Kühlkörper steht mit der Anzahl der CPUs in einem proportionalen Verhältnis. Normalerweise hat jedes CPU einen eigenen passiven Kühlkörper. Daher wird für die Berechnung angenommen, dass die Anzahl der CPU-Kühlkörper gleich der Anzahl der CPUs ist.

Die Materialzusammensetzung von CPU-Kühlkörpern basiert auf demselben durchschnittlichen Server, der ebenfalls im KPI4DCE-Projekt der Ökodesign-Vorstudie zu Lot 9 betrachtet wurde. In der Lot9-Studie besteht ein Kühlkörper aus 76 % Kupfer und 24 % Stahl und wiegt ca. 291 Gramm.

Berechnungsformeln:

- ▶ $\text{GWP_KKs} = \text{AnzahlCPU} * \text{GWP_KK}$
- ▶ ADP und CED analog zur GWP-Berechnung

B.2.3 Arbeitsspeicher (RAM)

B.2.3.1 Skalierungsfaktor zur Ermittlung der „Die“-Fläche beim RAM-Modul

Die Anzahl der Speicherchips auf einem Speicherriegel (RAM-Modul) variiert. Eine Erfassung der Anzahl der Speicherchips, die in einem einzelnen RAM-Modul enthalten sind, ist für RZ-Betreiber sehr aufwendig. Ansonsten würde die Anzahl der Speicherchips für die Einschätzung der Fläche der Leiterplatte einen relativ guten Skalierungsparameter darstellen.

Die RZ-Betreiber können allerdings die Anzahl der RAM-Module und die Speicherkapazität des Moduls erfassen. Anhand der ermittelten Speicherdichte wird die „Die“-Fläche der RAM-Module hochskaliert. Tabelle 66 (s. Anhang C.3.2) stellt die Rechercheergebnisse der Speicherdichte nach Technikgenerationen im Überblick dar.

Tabelle 66: Zusammenfassung der Speicherdichte nach Technikgenerationen

Zeitliche Repräsentativität	Generation	durchschnittliche Speicherdichte
Bis ca. 2014	35 nm	0,028 Gbit/mm ²
Bis ca. 2014	31 nm	0,040 Gbit/mm ²
Bis ca. 2014	30 nm	0,060 Gbit/mm ²
2014-2016	26 nm	0,092 Gbit/mm ²
2014-2016	25 nm	0,103 Gbit/mm ²
2015-2017	21 nm	0,128 Gbit/mm ²
2015-2017	20 nm	0,111 Gbit/mm ²
Ab 2017	18 nm	0,189 Gbit/mm ²
Mittelwert	alle	0,0938 Gbit/mm²
Mittelwert (in der vorliegenden Studie)	Ab Generation 20 nm	0,1501 Gbit/mm²

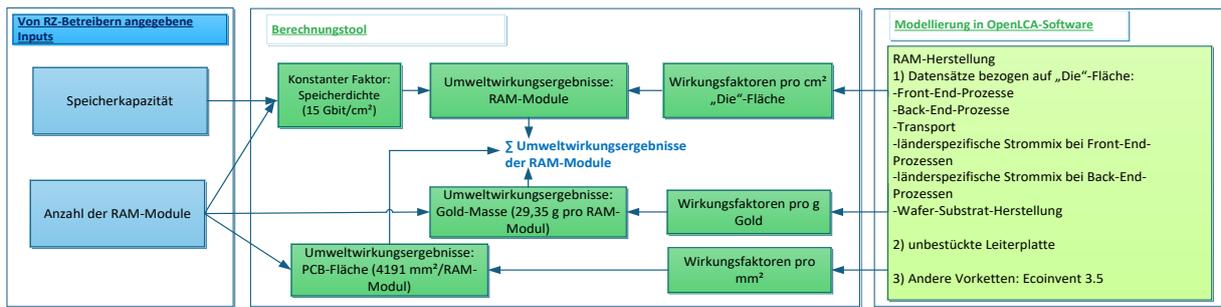
Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

In der vorliegenden Studie wird für die Speicherchips eine Speicherdichte von 15,01 Gbit /cm² angenommen.

B.2.3.2 Berechnungsablauf des Cloud-Computing-Tools: Herstellung der RAM-Module

Abbildung 33 illustriert den Berechnungsablauf des im Rahmen dieses Forschungsvorhabens erstellten Cloud-Computing-Tools. Im Cloud-Computing-Tool geben die RZ-Betreiber die Anzahl der RAM-Module und Speicherkapazität an. Die konstanten Faktoren sind Speicherdichte, Gold-Masse und Fläche der Leiterplatte. Die konstanten Faktoren werden mit den Wirkungsfaktoren der „Die“-Fläche, der Gold-Masse und der Fläche der Leiterplatte verknüpft und die Umweltwirkungen automatisch berechnet.

Abbildung 33: Berechnungsablauf des Cloud-Computing-Tools: Herstellung der RAM-Module



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Berechnungsformeln:

- ▶ $GWP_RAMs = AnzahlRAMModule * (GByteRAM / RAMproDie * GWP_RAM_DieSize + GWP_RAM_Gold + GWP_RAM_PCB + GWP_RAM_T)$
- ▶ $RAMproDie = 15,01 \text{ Gbit} / \text{cm}^2 = 1,875 \text{ GByte} / \text{cm}^2$
- ▶ GWP_RAM_Gold , GWP_RAM_PCB und GWP_RAM_T sind auf Anzahl der RAM-Module bezogen (s. Abschnitten 3.2.3.4.2.2, 3.2.3.4.2.3 und 3.2.3.7)
- ▶ AnzahlRAMModule und GByteRAM werden von den RZ-Betreibern angegeben.
- ▶ Die Berechnung der Indikatoren ADP und CED erfolgt analog zur GWP-Berechnung.

B.2.4 SSDs (Solid State Drives)

B.2.4.1 Skalierungsfaktor zur Ermittlung der „Die“-Fläche

Marktführender Hersteller für SSD-Flashspeicher ist im 1. Quartal 2018 laut Statista (2018) Samsung mit einem Marktanteil am weltweiten Absatz von ca. 32 %, gefolgt von Western Digital (15 %), Micron und Toshiba (jeweils 10 %), Intel (9 %) und SK Hynix (8 %).

Die Speicherdichte ist bei SSD-Flashspeichern höher als bei RAM-Speichern. (Handy 2017) hat NAND-Flashspeicher von drei Herstellern miteinander verglichen (Tabelle 67). In der vorliegenden Studie wird ein nach Marktanteil gewichteter Durchschnittswert für die Speicherdichte gebildet, wobei letztere als Skalierungsparameter für die Berechnung des Herstellungsaufwands im Rechenzentrum verwendet wird.

Tabelle 67: Spezifikation der SSD-Flashspeicher

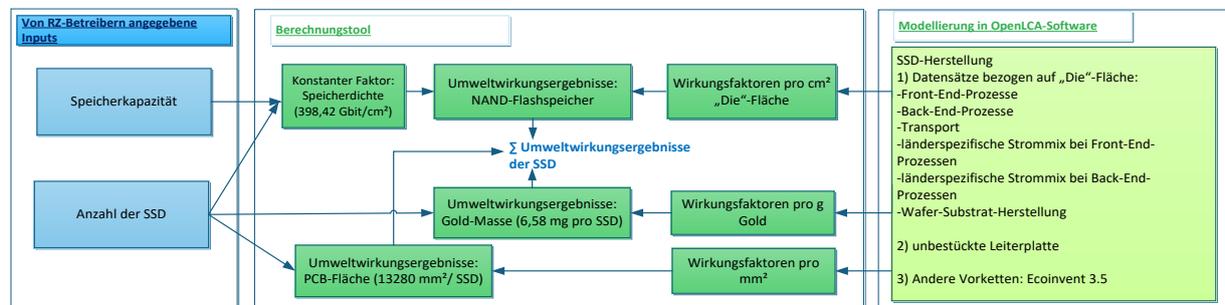
Spezifikation	Micron ISSCC 2016	Toshiba/WD ISSCC 2017	Samsung ISSCC 2017	In der vorliegenden Studie
Speicherkapazität [Gbit]	768	512	512	-
Die-Fläche [mm ²]	179	132	129	-
Speicherdichte [Gbit/mm ²]	4,29	3,88	3,97	3,98*
Anzahl der Lagen	64	64	64	64

Quelle: (Handy 2017). * nach Marktanteil gewichteter Durchschnittswert

B.2.4.2 Berechnungsablauf des Cloud-Computing-Tools: Herstellung der SSD

Abbildung 34 illustriert den Berechnungsablauf des im Rahmen dieses Forschungsvorhabens erstellten Cloud-Computing-Tools. Bei der Erfassung des Inventars im Cloud-Computing-Tool geben die RZ-Betreiber die Anzahl der SSDs und die Speicherkapazität an. Die konstanten Faktoren sind NAND-Speicherdichte, Gold-Masse und Fläche der Leiterplatte. Die konstanten Faktoren werden mit den Wirkungsfaktoren der „Die“-Fläche, der Gold-Masse und der Fläche der Leiterplatte verknüpft und die Umweltwirkungen automatisch berechnet.

Abbildung 34: Berechnungsablauf des Cloud-Computing-Tools: Herstellung der 2,5“ SSD



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Berechnungsformeln:

- ▶ $GWP_SSDs = AnzahlSSD * (GByteSSD / NANDproDie * GWP_NAND + GWP_SSD_PCB + GWP_SSD_T)$
- ▶ $NANDproDie = 398 \text{ Gbit/cm}^2 = 49,8 \text{ GByte/cm}^2$
- ▶ GWP_SSD_PCB und GWP_SSD_T sind auf die Anzahl der SSDs bezogen (s. Abschnitten 3.2.3.4.2.2, 3.2.3.4.2.3 und 3.2.3.7). Anzumerken ist, dass hier SSD_T für den Transport der NAND-Chips steht. Die Wirkungsfaktoren für Gold sind ebenfalls, wie die Leiterplatte einer SSD, auf die Anzahl der SSDs bezogen und wurden hier aufsummiert d.h. GWP_SSD_PCB beinhaltet sowohl die Leiterplatte als auch die Gold-Masse.
- ▶ AnzahlSSD und GByteSSD werden von den RZ-Betreibern angegeben.
- ▶ ADP und CED analog zur GWP-Berechnung.

B.2.5 HDD (Hard Disk Drives)

Abgesehen von der aktualisierten Hintergrunddatenbank Ecoinvent v3.5, wird die Herstellung einer HDD genau wie im KPI4DCE-Projekt (mit Ecoinvent v 3.2) modelliert. Die Berechnung des KPI4DCE-Projektes führt bei einer 3,5“ HDD zu höheren Wirkungsfaktoren als bei einer 2,5“ HDD. Eine Vereinfachung in der vorliegenden Studie besteht darin, dass nur 3,5“ HDDs betrachtet werden. Für 2.5“ HDDs werden die gleichen Wirkungsfaktoren wie für 3,5“ HDDs angenommen. Die Wirkungsfaktoren für die Herstellung einer HDD sind auf ein Stück bezogen.

Berechnungsformeln:

- ▶ $GWP_HDDs = AnzahlHDD * GWP_HDD$
- ▶ ADP und CED analog zur GWP-Berechnung.

B.2.6 Bestückte Hauptleiterplatte der Server

B.2.6.1 Skalierungsfaktor zur Ermittlung der Anzahl der Motherboards der Server

In der KPI4DCE-Studie wurde angenommen, dass die Anzahl der Leiterplatten eines Rack-Servers von der HE des Rack-Servers abhängt. Rack-Server weisen eine sehr hohe Variabilität in Bezug auf die mögliche Ausstattung auf. Sowohl Rack-Server mit nur einer Höheneinheit (HE) als auch Rack-Server mit zwei oder vier HEs können nur eine Mainboard-Leiterplatte enthalten. Die Annahme, dass die Anzahl der Leiterplatten eines Rack-Servers entsprechend der HE zunimmt, bedeutet, dass die Umweltauswirkungen der Leiterplatten für Rack-Server mit mehr als einer HE überschätzt sein könnten (Schödwell et al. 2018). Im Gegensatz dazu wurde in der KPI4DCE-Studie aufgrund mangelnder Daten die Anzahl der Leiterplatten eines Blade-Systems auf vereinfachte Weise entsprechend der Anzahl der Blade Server-Module skaliert.

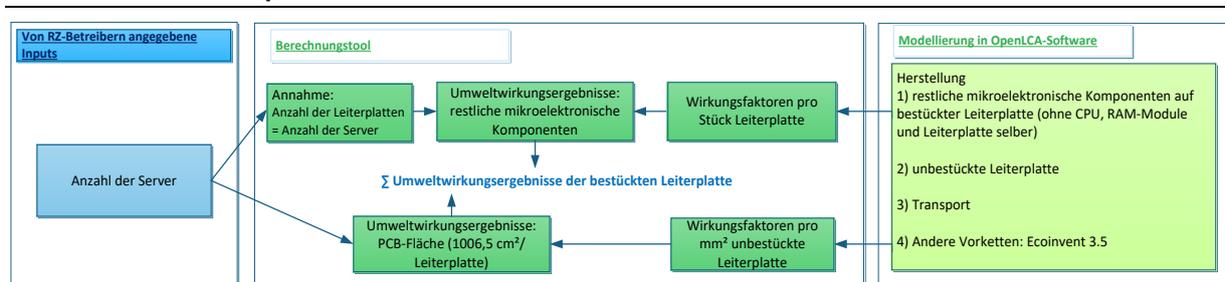
In der vorliegenden Studie wird die Anzahl der Hauptleiterplatten unabhängig vom Servertyp mit der Anzahl der Server gleichgesetzt.

Für beide Servertypen (Rack und Blade) wird die Fläche einer Hauptplatine mit 1.006,5 cm² (entsprechend der Fläche in der KPI4DCE-Studie) angenommen. Ausgenommen von dieser Annahme sind Mikroserver-Systeme, da diese viele kleinere Mainboard-Module enthalten und daher anders modelliert werden müssten.

B.2.6.2 Berechnungsablauf des Cloud-Computing-Tools: Herstellung der Motherboards der Server

Abbildung 35 illustriert den Berechnungsablauf des im Rahmen dieses Forschungsvorhabens erstellten Cloud-Computing-Tools. Im Tool geben die RZ-Betreiber die Anzahl der Server an. Es wurde angenommen, dass die Anzahl der Server gleich der Anzahl der Motherboards ist. Die Wirkungsfaktoren der restlichen mikroelektronischen Komponenten ergeben sich auf Basis der Datengrundlage (s. 3.2.3.8) aus der Modellierung. Darüber hinaus wurden die Wirkungsfaktoren für die Herstellung der unbestückten Leiterplatten addiert.

Abbildung 35: Berechnungsablauf des Cloud-Computing-Tools: Herstellung der bestückten Hauptleiterplatte der Server



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Insgesamt beziehen sich die Wirkungsfaktoren auf eine einzelne Hauptleiterplatte (1 Stück). Berechnungsformeln:

- ▶ $GWP_{MB} = GWP_{MB}$
- ▶ ADP und CED analog zur GWP-Berechnung.

B.2.7 PSU (Power Supply Unit)

Die Anzahl der Netzteile wird von RZ-Betreiber angegeben. Die Wirkungsfaktoren sind auf 1 Stück bezogen. Die Datengrundlage für die Modellierung der Herstellung eines Netzteiles ist in Abschnitt 3.2.3.12 dokumentiert. Es wird pauschal angenommen, dass ein Netzteil zwei Kilogramm wiegt.

Berechnungsformeln:

- ▶ $GWP_{PSU} = GWP_{PSU}$
- ▶ ADP und CED analog zur GWP-Berechnung.

B.3 Berechnung auf der Umweltwirkungen auf Produktebene

B.3.1 Server

Die Berechnung der Umweltwirkungen im Berechnungstool basiert auf verschiedenen Parametern und Annahmen. Tabelle 68 fasst die konstanten Faktoren für die Berechnung zusammen. Die daran anschließende Tabelle 69 gibt an, welche Parameter von Rechenzentrumsbetreibern angegeben werden sollen.

Tabelle 68: Zusammenfassung der konstanten Faktoren für Server

Komponente	Parameter	Wert	Einheit
CPU	„Die“-Fläche	DieSizeProCPU [cm ²] = 0,24584 * AnzahlKerneProCPU + 0,49157	„Die“-Fläche pro CPU (cm ²)
CPU	Goldmenge	0,359	g Gold / Stück CPU
CPU	Kühlkörper	1 : 1	Anzahl der CPU = Anzahl der Kühlkörper
RAM:	Speicherdichte (Speicherkapazität im Verhältnis zur „Die“-Fläche)	1,875	GByte/cm ²
RAM	Goldmenge	29,35	mg/RAM-Riegel
RAM	Fläche der Leiterplatte	4.191	mm ² / RAM-Riegel
2,5" SSD	NAND-Speicherdichte	49,8	GByte/cm ²
2,5" SSD	Fläche der Leiterplatte	13.280	mm ² / 2.5" SSD
2,5" SSD	Goldmenge	6,58	mg Gold /SSD
2,5" SSD	Gewicht	0,068	kg / SSD
3,5" HDD	Gewicht	0,437	kg / HDD
Motherboard der Server	Fläche der Leiterplatte	1.006,5	cm ² / Server

Komponente	Parameter	Wert	Einheit
restliche Komponenten eines Rack-Servers (Rack-Rest)	Gewicht	15,451	kg / Rack-Server
Bladeservergehäuse (BladeRest)	Gewicht	4,2	kg / Blade-Server
Standard Blade Server Schrank	Anzahl der Einschübe für Bladeserver	16	Stück Einschübe / Blade-Server-Schrank
restliche Komponenten der Blade-Server-Schrank: (Gehäuse; Belüfter; eine Mittelplatine und eine Rückplatine) (BladeSystemGeh)	Gewicht	94,7	kg / Blade-Server-Schrank für 16 Einbauplätzen
Netzteile	Gewicht	2	kg / PSU

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Tabelle 69: Erhobene Daten Server

Name	Einheit	Datenbezeichnung (XML-Schema)
Anzahl baugleicher Geräte	[Stck]	Anzahl
Bezeichnung Server Benchmark (z.B SPEC CPU 2006)	z.B. [opSPECint_rate]	ServerBenchmarkBezeichnung
Server Benchmark	[Zahlenwert]	ServerBenchmarkWert
Geplante Nutzungsdauer	[Jahre]	GeplanteNutzungsdauer
Servertyp	[Rack Blade]	ServertypRack_Blade
Anzahl Server pro Gehäuse	(bei Blade-Server > 1)	AnzServerProBladeGehaeuse
Anschaffungskosten	[Zahlenwert/Stck]	AnschaffungskostenProStück
Währung Anschaffungskosten	[z.B. EUR USD]	WaehrungAnschaffungskosten
Anzahl CPUs	[Anzahl/Stck]	AnzahlCPU
Anzahl Kerne pro CPU	[Anzahl]	AnzahlKerneProCPU
RAM	[GByte/Stck]	GByteRAM
Anzahl RAM Module	[Anzahl/Stck]	AnzahlRAMModule
Anzahl HDD	[Anzahl/Stck]	AnzahlHDD
Anzahl SSD	[Anzahl/Stck]	AnzahlSSD
Anzahl redundante Netzteile	[Anzahl/Stck]	AnzahlNetzteile

Name	Einheit	Datenbezeichnung (XML-Schema)
Gewicht [kg]	[kg/Stck]	Gewicht
Mittlere CPU-Auslastung	[%]	MittlereCPUAuslastung

Quelle: Eigene Darstellung

Die in den vorherigen Abschnitten beschriebenen Berechnungsformeln sind in Tabelle 70 (für Rack-Server) und Tabelle 71 (für Bladeserversystem) zur Übersicht noch einmal zusammengefasst. Die Komponenten, die sowohl im Rackserver als auch im Bladeserversystem vorhanden sind, sind CPU, Kühlkörper für CPU, RAM-Module, SSD, HDD, Motherboards und PSU. Die restlichen Komponenten für Rack-Server und Bladeserversysteme sind jeweils nach den Referenzprodukten modelliert. Anzumerken ist, dass der Referenz-Bladeserverschrank 16 Einbauplätze hat. Daher wurde der Bladeserverschrank durch 16 geteilt, um den Anteil pro Server zu berechnen (s. Tabelle 71). Es wird angenommen, dass die Bladeserverschränke im RZ zu 100% mit Blade-Servern befüllt wurden.

Tabelle 70: Zusammenfassung der Berechnungsformeln für Rack-Server

Komponenten	Formel	Erklärung
CPU	$GWP_CPUs = AnzahlCPU * (DieSizeProCPU * GWP_CPU_DieSize + GWP_CPU_Gold + GWP_CPU_T)$	B.2.1
Kühlkörper für CPU	$GWP_KKs = AnzahlCPU * GWP_KK$	B.2.2
RAM-Module	$GWP_RAMs = AnzahlRAMModule * (GByteRAM / RAMproDie * GWP_RAM_DieSize + GWP_RAM_Gold + GWP_RAM_PCB + GWP_RAM_T)$	B.2.3
SSD	$GWP_SSDs = AnzahlSSD * (GByteSSD / NANDproDie * GWP_NAND + GWP_SSD_PCB + GWP_SSD_T)$	B.2.4
HDD	$GWP_HDDs = AnzahlHDD * GWP_HDD$	B.2.5
Motherboard	$GWP_MB = GWP_MB$	B.2.6
Restliche Komponenten in Rack	$GWP_RackRest = GWP_RackRest$	3.2.3.9
Stromverbrauch bei der Endmontage eines Servers	$GWP_AssemblyTest = GWP_AssemblyTest$	3.2.3.9
Netzteile	$GWP_PSUs = AnzahlNetzteile * GewichtPSU * GWP_PSU$	B.2.7
Aufsummierung: $\sum GWP = AnzahlServer * (GWP_CPUs + GWP_KKs + GWP_RAMs + GWP_SSDs + GWP_HDDs + GWP_MB + GWP_RackRest + GWP_AssemblyTest + GWP_PSUs)$		

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Tabelle 71: Zusammenfassung der Berechnungsformeln für Blade-Server-System

Komponenten	Formel	Erklärung im Abschnitt
CPU	$GWP_CPUs = AnzahlCPU * (DieSizeProCPU * GWP_CPU_DieSize + GWP_CPU_Gold + GWP_CPU_T)$	B.2.1
Kühlkörper für CPU	$GWP_KKs = AnzahlCPU * GWP_KK$	B.2.2
RAM-Module	$GWP_RAMs = AnzahlRAMModule * (GByteRAM / RAMproDie * GWP_RAM_DieSize + GWP_RAM_Gold + GWP_RAM_PCB + GWP_RAM_T)$	B.2.3
SSD	$GWP_SSDs = AnzahlSSD * (GByteSSD / NANDproDie * GWP_NAND + GWP_SSD_PCB + GWP_SSD_T)$	B.2.4
HDD	$GWP_HDDs = AnzahlHDD * GWP_HDD$	B.2.5
Motherboard	$GWP_MB = GWP_MB$	B.2.6
Restliche Komponenten in Bladeserversystem: BladeRest: Gehäuse eines Servers BladeSystemGeh: Bladeserverschrank	$GWP_BladeRest = GWP_BladeRest$ $GWP_BladeSG = GWP_BladeSystemGeh / 16$	3.2.3.9
Stromverbrauch bei der Endmontage eines Servers	$GWP_AssemblyTest = GWP_AssemblyTest$	3.2.3.9
Netzteile	$GWP_PSUs = AnzahlNetzteile * GewichtPSU * GWP_PSU / 16$	B.2.7
Aufsummierung: $\sum GWP = AnzahlServer * (GWP_CPUs + GWP_RAMs + GWP_SSDs + GWP_HDDs + GWP_KKs + GWP_MB + GWP_BladeRest + GWP_BladeSG + GWP_AssemblyTest + GWP_PSUs)$		

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

B.3.2 Speichersysteme

Die für das Berechnungstool integrierte Berechnung basiert auf verschiedenen Parametern und Annahmen. Tabelle 72 fasst die konstanten Faktoren für die Berechnung zusammen. Tabelle 73 zeigt, welche Parameter von den RZ-Betreibern angegeben werden sollen.

Tabelle 72: Zusammenfassung der konstanten Faktoren für Speichersysteme

Komponente	Parameter	Wert	Einheit
2,5" SSD	NAND-Speicherdichte	49,8	GByte / cm ²
2,5" SSD	Fläche der Leiterplatte	13.280	mm ² / 2,5" SSD
2,5" SSD	Goldmenge	6,58	mg Gold / SSD
2,5" SSD	Gewicht	0,068	kg / SSD

Komponente	Parameter	Wert	Einheit
3,5" HDD	Gewicht	0,437	kg / HDD
Anzahl der Speichermedium in einem Speichersystem	Anzahl der HDD oder SSD	32	Stück HDD oder SSD pro Speichersystem. (d.h. jede HDD oder SSD erhält 1/32 des Storage-Systems)
Netzteile	Gewicht	2	kg / PSU

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Tabelle 73: Erhobene Daten Speichersysteme

Name	Einheit	Datenbezeichnung (XML-Schema)
Anzahl baugleicher Geräte	[Stck]	Anzahl
Speicherkapazität pro Gerät	[GByte/Stck]	SpeicherkapazitaetGByte
Anzahl HDD	[Anzahl/Stck]	AnzahlHDD
Anzahl SSD	[Anzahl/Stck]	AnzahlSSD
Geplante Nutzungsdauer	[Jahre]	GeplanteNutzungsdauer
Anschaffungskosten	[Zahlenwert]	AnschaffungskostenProStueck
Währung Anschaffungskosten	[z.B. EUR USD]	WaehrungAnschaffungskosten
Anzahl Netzteile	[Anzahl/Stck]	AnzahlNetzteile
Gewicht	[kg/Stck]	Gewicht
Mittlere Belegung Speicherplatz	[%]	MittlereBelegungSpeicherplatz
Mittlere Anzahl Speicherzugriffe pro Sekunde	[IO/s]	MittlereAnzahlSpeicherzugriffeProSekundeIOPS
Mittlere Datenmenge Lesen Schreiben pro Sekunde	[GByte/s]	MittlereDatenmengeLesenSchreibenProSekunde

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Die in den vorherigen Abschnitten beschriebenen Berechnungsformeln sind zur Übersicht noch einmal in Tabelle 74 zusammengefasst. HDD, SSD und Netzteile werden wie angegeben separat modelliert. Die restlichen Komponenten eines Speichersystems orientieren sich nach einem Referenzspeichersystem (s. Kapitel 3.2.3.10), das durch 32 SSDs repräsentiert wird. Dafür wurden die Wirkungsfaktoren der restlichen Komponenten eines Speichersystems zunächst durch 32 geteilt, um den Anteil pro Stück Speichermedium zu berechnen. Danach wird der Anteil pro Stück mit der von RZ-Betreibern angegebenen Anzahl des Mediums multipliziert. Auf diese Weise werden die restlichen Komponenten auf die Anzahl des Speichermediums hochskaliert.

Tabelle 74: Zusammenfassung der Berechnungsformeln für Speichersystem

Komponente	Formel	Erklärung im Abschnitt
HDD	$GWP_HDDs = AnzahlHDD * GWP_HDD$	B.2.4
SSD	$GWP_SSDs = AnzahlSSD * (GByteSSD / NANDproDie * GWP_NAND + GWP_SSD_PCB + GWP_SSD_T)$	B.2.5
Restliche Komponente für Speichersystem	$GWP_StorageRest = GWP_StorageRest / 32 * (AnzahlHDD + AnzahlSSD)$	3.2.3.10
Netzteile für Speichersystem	$GWP_PSUs = AnzahlNetzteile * GewichtPSU * GWP_PSU / 32 * (AnzahlHDD + AnzahlSSD)$	

Aufsummierung: $\sum GWP = AnzahlStorage * (GWP_HDDs + GWP_SSDs + GWP_PSUs + GWP_StorageRest)$

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut, Öko-Institut

B.3.2.1 Netzwerkkomponenten: Netzwerk-Switches

Die Modellierung eines Switches ist auf ein Stück bezogen. Der Referenzswitch wurde im Abschnitt 3.2.3.11 beschrieben.

Tabelle 75: Zusammenfassung der konstanten Faktoren für Netzwerk-Switches

Komponente	Parameter	Wert	Einheit
Switch	Gewicht	10	kg / Switch
Netzteile	Anzahl	2	Stück PSU/Switch / PSU

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Tabelle 76: Erhobene Daten Netzwerkkomponenten

Name	Einheit	Datenbezeichnung (XML-Schema)
Anzahl baugleicher Geräte	[Stck]	Anzahl
Geplante Nutzungsdauer	[Jahre]	GeplanteNutzungsdauer
Anschaffungskosten	[Zahlenwert]	AnschaffungskostenProStueck
Währung Anschaffungskosten	[z.B. EUR USD]	WaehrungAnschaffungskosten
Anzahl Ports pro Gerät	[Anzahl/Stck]	AnzahlPorts
Maximale Bandbreite pro Port	[Mbit/s]	MaximaleBandbreiteProPort
Netzwerkebene	[intern, extern]	Netzwerkebene
Anzahl Netzteile	[Anzahl/Stck]	AnzahlNetzteile
Gewicht	[kg/Stck]	Gewicht

Name	Einheit	Datenbezeichnung (XML-Schema)
Mittlere genutzte Bandbreite interner Datenverkehr	[Mbit/s/Stck]	MittlereGenutzteBandbreiteInternerDatenverkehr
Mittlere genutzte Bandbreite externer Datenverkehr	[Mbit/s/Stck]	MittlereGenutzteBandbreiteExternerDatenverkehr
Mittlere Leistungsaufnahme	[W/Stck]	MittlereLeistungsaufnahme
Energiebedarf pro Jahr	[kWh/a/Stck]	EnergiebedarfProJahr

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Berechnungsformeln:

- ▶ $GWP_{Switch} = Anzahl_{Netzwerk} * GWP_{Switch}$
- ▶ ADP und CED analog zur GWP-Berechnung.

B.3.2.2 Kühlsystem

Insgesamt sind Wirkungsfaktoren für 10 Arten von Kältemitteln in das Tool integriert (s. Tabelle 77), unter der gleichen Annahme wie in der KPI4DCE-Studie (Schödwel et al. 2018). Die Wirkungsfaktoren beziehen sich auf die Summe der Herstellungs- und Nutzungsphasen des jeweiligen Kältemittels. In Bezug auf die Modellierung gibt es keine Änderungen i.V. z. der KPI4DCE-Studie mit der Ausnahme, dass die Hintergrunddatensätze von Ecoinvent Version 3.2 auf Ecoinvent Version 3.5 aktualisiert wurden. Das „Default“-Kältemittel wurde als R134a definiert.

Tabelle 77: Erhobene Daten Kühlsystem

Name	Einheit	Datenbezeichnung (XML-Schema)
Anzahl baugleicher Geräte	[Stck]	Anzahl
Anschaffungskosten	[Zahlenwert]	AnschaffungskostenProStueck
Währung Anschaffungskosten	[z.B. EUR USD]	WaehringAnschaffungskosten
Art des Kältemittels	[R134a R290 (Propan) R32 R404A R407A R407C R410A R717 R718 R744 (CO2)]	KältemittelArt
Kältemittel Füllmenge	[Liter]	KältemittelFuellmenge
Nachgefüllte Menge pro Jahr	[Liter]	KaeltemittelNachfuellmengeProJahr
Verdampfungsart	[Direktverdampfer Flüssigkeitskuehler]	Verdampfungsart
Leckagerate pro Jahr	[%]	LeckagerateProJahr
Wasserverbrauch pro Jahr	[Liter]	WasserverbrauchProJahr
Wasserqualität	[Trinkwasser ...]	Wasserqualität

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Die Berechnung im Tool hängt von der Eingabe ab. Die RZ-Betreiber haben 4 Möglichkeiten, um die Menge des verwendeten Kältemittels zu bestimmen:

1. Die Nachfüllmenge der Kältemittel pro Jahr ist bekannt:
 $\text{Kaeltemittlemissionen} = \text{KaeltemittelNachfuellmengeProjahr}$
 d.h. die emittierte Menge entspricht der Nachfüllmenge
2. Die Leckagerate pro Jahr und die gesamte Kältemittelfüllmenge sind bekannt: $\text{Kaeltemittlemissionen} = \text{LeckagerateProjahr} * \text{KaeltemittelFuellmenge}$
 Auf diese Weise wird die Menge des ausgestoßenen Kältemittels mit Hilfe von der Leckagerate berechnet.
3. Die gesamte Menge des Kältemittels ist bekannt und die RZ-Betreiber wissen, ob ihre Kältemittelanlage mit Direktverdampfern (Abkürzung: DV) oder Flüssigkeitskühlern (Abkürzung: FK) betrieben wird. Die „Default“-Leckagerate ist zu diesem Zweck in das Tool integriert:
 Flüssigkeitskühler: jährliche Leckage-Rate 3 %
 Direktverdampfer: jährliche Leckage-Rate 5 %
 Die Menge des emittierten Kältemittels wird mit dem Default-Wert wie folgt berechnet:
 $\text{Kaeltemittlemissionen} = \text{KMLeck_DV} (5\%) * \text{KaeltemittelFuellmenge}$
 $\text{Kaeltemittlemissionen} = \text{KMLeck_FK} (3\%) * \text{KaeltemittelFuellmenge}$
4. Nur die Gesamtmenge des Kältemittels ist bekannt und die RZ-Betreiber können nicht zwischen DV und FK unterscheiden. In diesem Fall wird eine jährliche Leckage-Rate von 5 % angenommen. Die emittierte Menge des Kältemittels wird mit dem Default-Wert berechnet:
 $\text{Kaeltemittlemissionen} = \text{KMLeck_DV} (5\%) * \text{KaeltemittelFuellmenge}$

Zusätzlich wird die emittierte Menge des Kältemittels direkt mit den Wirkungsfaktoren und der Anzahl baugleicher Geräte multipliziert.

Berechnungsformeln:

- ▶ $\text{GWP_KMges} = \text{Anzahl} * \text{Kaeltemittlemissionen} * \text{GWP_KM}$
- ▶ ADP und CED analog zur GWP-Berechnung.

B.3.3 Energieversorgung in der Nutzungsphase

In der Praxis beziehen die meisten RZ-Betreiber ihren Strom aus dem öffentlichen Stromnetz. In diesem Fall wird für die Modellierung der Mittelspannungsstrommix Deutschlands angenommen. Es gibt aber auch RZ-Betreiber, die ihre Rechenzentren mit selbst erzeugtem Strom betreiben, beispielsweise in einem Blockheizkraftwerk. Für die Eigenstromerzeugung enthält das Tool die entsprechenden Wirkungsfaktoren für die Verbrennung von 5 Brennstoffarten (Diesel, Erdgas, Flüssiggas, Holz-Pellets und Holz-Hackschnitzel) einschließlich der Vorketten. Die RZ-Betreiber müssen die Art und die Verbrauchsmenge des Brennstoffs in dem Tool angeben. Falls der RZ-Betreiber einen anderen Brennstoff als die beschriebenen verwendet, muss der Betreiber die Wirkungsfaktoren selbst angeben.

Tabelle 78: Erhobene Daten Energieversorgung

Name	Einheit	Datenbezeichnung (XML-Schema)
Monatszahl	[MM]	Monatszahl

Name	Einheit	Datenbezeichnung (XML-Schema)
Jahr	[JJJJ]	Jahr
Strombedarf RZ gesamt	[kWhel]	StrombedarfRZgesamt
Strombedarf Server	[kWhel]	StrombedarfServer
Strombedarf Storage	[kWhel]	StrombedarfStorage
Strombedarf Netzwerk	[kWhel]	StrombedarfNetzwerk
Strombedarf Kühlsystem	[kWhel]	StrombedarfKS
Kältarbeit Kühlsystem (thermisch)	[kWhth]	KältarbeitKStH
Brennstoffbedarf	[kWh]	Brennstoffbedarf
Brennstoffart	[Text]	Brennstoffart

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

B.4 Ergebnisdarstellung der Wirkungsfaktoren

In Tabelle 79 sind die im Tool integrierten Wirkungsfaktoren der drei betrachteten Wirkungskategorien (ADP, GWP und CED) mit ihren entsprechenden Bezugsgrößen aufgeführt.

Tabelle 79: Die im Tool verwendeten Wirkungsfaktoren der drei betrachteten Wirkungskategorien

Faktoren	Wert	Unit
ADP_CPU_DieSize	5,87E-07	kg Sb eq. / (cm ² CPU Die-Fläche / Stück CPU)
ADP_CPU_Gold	1,99E-02	kg Sb eq. / Stück CPU
ADP_CPU_T	4,33E-08	kg Sb eq. / Stück CPU
GWP_CPU_DieSize	1,97E+00	kg CO ₂ eq. / (cm ² CPU Die-Fläche / Stück CPU)
GWP_CPU_Gold	5,67E+00	kg CO ₂ eq./ Stück CPU
GWP_CPU_T	3,45E-01	kg CO ₂ eq. / Stück CPU
KEA_CPU_DieSize	2,65E+01	MJ / (cm ² CPU Die-Fläche / Stück CPU)
KEA_CPU_Gold	8,78E+01	MJ / Stück CPU
KEA_CPU_T	5,33E+00	MJ / Stück CPU
ADP_KK	5,10E-04	kg Sb eq. / Stück CPU
GWP_KK	3,12E+00	kg CO ₂ eq. / Stück CPU
KEA_KK	6,33E+01	MJ / Stück CPU

Faktoren	Wert	Unit
ADP_RAM_DieSize	6,30E-05	kg Sb eq. / (cm ² Die-Fläche / RAM-Riegel)
ADP_RAM_PCB	6,23E-05	kg Sb eq. / RAM-Riegel
ADP_RAM_Gold	1,63E-03	kg Sb eq. / RAM-Riegel
ADP_RAM_T	3,75E-07	kg Sb eq. / RAM-Riegel
GWP_RAM_DieSize	2,20E+00	kg CO ₂ eq. / (cm ² Die-Fläche / RAM-Riegel)
GWP_RAM_PCB	1,77E+00	kg CO ₂ eq. / RAM-Riegel
GWP_RAM_Gold	4,64E-01	kg CO ₂ eq. / RAM-Riegel
GWP_RAM_T	2,99E+00	kg CO ₂ eq. / RAM-Riegel
KEA_RAM_DieSize	2,73E+01	MJ / (cm ² Die-Fläche / RAM-Riegel)
KEA_RAM_PCB	2,07E+01	MJ / RAM-Riegel
KEA_RAM_Gold	7,18E+00	MJ / RAM-Riegel
KEA_RAM_T	4,61E+01	MJ / RAM-Riegel
ADP_NAND	6,30E-05	kg Sb eq. / (cm ² Die-Fläche / Stück SSD)
GWP_NAND	2,20E+00	kg CO ₂ eq. / (cm ² Die-Fläche / Stück SSD)
KEA_NAND	2,73E+01	MJ / (cm ² Die-Fläche / Stück SSD)
ADP_SSD_PCB	5,63E-04	kg Sb eq. / Stück SSD
ADP_SSD_T	7,86E-08	kg Sb eq. / Stück SSD
GWP_SSD_PCB	5,71E+00	kg CO ₂ eq. / Stück SSD
GWP_SSD_T	6,27E-01	kg CO ₂ eq. / Stück SSD
KEA_SSD_PCB	6,72E+01	MJ / Stück SSD
KEA_SSD_T	9,68E+00	MJ / Stück SSD
ADP_HDD	2,50E-04	kg Sb eq. / Stück HDD
GWP_HDD	3,11E+01	kg CO ₂ eq. / Stück HDD
KEA_HDD	2,76E+02	MJ / Stück HDD
ADP_MB	3,69E-03	kg Sb eq. / (Stück Motherboard / Stück Server)
GWP_MB	6,61E+01	kg CO ₂ eq. / (Stück Motherboard / Stück Server)
KEA_MB	8,36E+02	MJ / (Stück Motherboard / Stück Server)
ADP_RackRest	2,02E-02	kg Sb eq. / (Stück Rackserver mit Restgewicht: 15,45kg)

Faktoren	Wert	Unit
GWP_RackRest	1,50E+02	kg CO ₂ eq. / (Stück Rackserver mit Restgewicht: 15,45kg)
KEA_RackRest	2,20E+03	MJ / (Stück Rackserver mit Restgewicht: 15,45kg)
ADP_BladeSystemGeh	4,32E-01	kg Sb eq. / (pro Bladeserversystem mit 16 Servern)
GWP_BladeSystemGeh	8,80E+02	kg CO ₂ eq. / (pro Bladeserversystem mit 16 Servern)
KEA_BladeSystemGeh	1,27E+04	MJ / (pro Bladeserversystem mit 16 Servern)
ADP_BladeRest	6,72E-04	kg Sb eq. / (Stück Server mit Gehäuse: 4.2 kg)
GWP_BladeRest	3,09E+01	kg CO ₂ eq. / (Stück Server mit Gehäuse: 4.2 kg)
KEA_BladeRest	4,35E+02	MJ / (Stück Server mit Gehäuse: 4.2 kg)
ADP_AssemblyTest	1,41E-06	kg Sb eq. / Stück Server
GWP_AssemblyTest	6,68E+00	kg CO ₂ eq. / Stück Server
KEA_AssemblyTest	6,86E+01	MJ/ Stück Server
ADP_StorageRest	4,25E-01	kg Sb eq. / Stück Storage-System (32 HDD/SSD)
GWP_StorageRest	8,83E+02	kg CO ₂ eq./ Stück Storage-System (32 HDD/SSD)
KEA_StorageRest	1,22E+04	MJ/ Stück Storage-System (32 HDD/SSD)
ADP_Switch	5,35E-02	kg Sb eq. / Stück Switch
GWP_Switch	2,46E+02	kg CO ₂ eq. / Stück Switch
KEA_Switch	3,33E+03	MJ / Stück Switch
ADP_PSU	8,30E-03	kg Sb eq. / kg PSU
GWP_PSU	2,43E+01	kg CO ₂ eq. / kg PSU
KEA_PSU	3,52E+02	MJ / kg PSU
ADP_Strom	3,46E-07	kg Sb eq. / kWh
GWP_Strom	6,35E-01	kg CO ₂ eq. / kWh
KEA_Strom	1,07E+01	MJ / kWh
ADP_R134A	8,70E-05	kg Sb eq. / kg
ADP_R290	4,77E-07	kg Sb eq. / kg
ADP_R32	8,73E-05	kg Sb eq. / kg
ADP_R404A	9,95E-05	kg Sb eq. / kg
ADP_R407A	9,92E-05	kg Sb eq. / kg
ADP_R407C	9,47E-05	kg Sb eq. / kg

Faktoren	Wert	Unit
ADP_R410A	1,00E-04	kg Sb eq. / kg
ADP_R717	5,13E-06	kg Sb eq. / kg
ADP_R718	1,13E-09	kg Sb eq. / kg
ADP_R744	4,93E-06	kg Sb eq. / kg
ADP_KMsonst	Nutzereingabe	kg Sb eq. / kg
ADP_KMdefault	8,70E-05	kg Sb eq. / kg
GWP_R134A	1,45E+03	kg CO ₂ eq. / kg
GWP_R290	3,83E+00	kg CO ₂ eq. / kg
GWP_R32	9,83E+02	kg CO ₂ eq. / kg
GWP_R404A	3,93E+03	kg CO ₂ eq. / kg
GWP_R407A	2,12E+03	kg CO ₂ eq. / kg
GWP_R407C	1,79E+03	kg CO ₂ eq. / kg
GWP_R410A	2,10E+03	kg CO ₂ eq. / kg
GWP_R717	2,03E+00	kg CO ₂ eq. / kg
GWP_R718	3,60E-04	kg CO ₂ eq. / kg
GWP_R744	1,78E+00	kg CO ₂ eq. / kg
GWP_KMsonst	Nutzereingabe	kg CO ₂ eq. / kg
GWP_KMdefault	1,45E+03	kg CO ₂ eq. / kg
KEA_R134A	1,20E+02	MJ / kg
KEA_R290	5,20E+01	MJ / kg
KEA_R32	1,03E+02	MJ / kg
KEA_R404A	1,49E+02	MJ / kg
KEA_R407A	1,40E+02	MJ / kg
KEA_R407C	1,31E+02	MJ / kg
KEA_R410A	1,40E+02	MJ / kg
KEA_R717	4,23E+01	MJ / kg
KEA_R718	7,16E-03	MJ / kg
KEA_R744	9,84E+00	MJ / kg

Faktoren	Wert	Unit
KEA_KMsonst	Nutzereingabe	MJ / kg
KEA_KMdefault	1,20E+02	MJ / kg
KMLeck_DV	5,00E-02	100%
KMLeck_FK	3,00E-02	100%
KMLeck_std	5,00E-02	100%
KM_Art1	Direktverdampfer	
KM_Art2	Fluessigkeitskuehler	
KM_std	Nutzereingabe	
ADP_Heizoel	5,61E-08	kg Sb eq. / kWh (Heizwert des Brennstoffs)
ADP_Erdgas	1,73E-08	kg Sb eq. / kWh (Heizwert des Brennstoffs)
ADP_Fluessiggas	3,22E-08	kg Sb eq. / kWh (Heizwert des Brennstoffs)
ADP_HolzPellets	1,09E-07	kg Sb eq. / kWh (Heizwert des Brennstoffs)
ADP_HolzHackschnitzel	1,88E-07	kg Sb eq. / kWh (Heizwert des Brennstoffs)
ADP_BS_sonst	Nutzereingabe	kg Sb eq. / kWh (Heizwert des Brennstoffs)
GWP_Heizoel	3,13E-01	kg CO2 eq. / kWh (Heizwert des Brennstoffs)
GWP_Erdgas	2,48E-01	kg CO2 eq. / kWh (Heizwert des Brennstoffs)
GWP_Fluessiggas	2,83E-01	kg CO2 eq. / kWh (Heizwert des Brennstoffs)
GWP_HolzPellets	3,41E-02	kg CO2 eq. / kWh (Heizwert des Brennstoffs)
GWP_HolzHackschnitzel	4,31E-02	kg CO2 eq. / kWh (Heizwert des Brennstoffs)
GWP_BS_sonst	Nutzereingabe	kg CO2 eq. / kWh (Heizwert des Brennstoffs)
KEA_Heizoel	4,81E+00	MJ / kWh (Heizwert des Brennstoffs)
KEA_Erdgas	4,79E+00	MJ / kWh (Heizwert des Brennstoffs)
KEA_Fluessiggas	4,52E+00	MJ / kWh (Heizwert des Brennstoffs)
KEA_HolzPellets	3,31E+00	MJ / kWh (Heizwert des Brennstoffs)
KEA_HolzHackschnitzel	3,24E+00	MJ / kWh (Heizwert des Brennstoffs)
KEA_BS_sonst	Nutzereingabe	MJ / kWh (Heizwert des Brennstoffs)

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

C Anhang: Datensätze

C.1 Herstellung des Silizium-Wafers

C.1.1 Produktionsprozesse

Nachfolgend sind die grundlegenden Prozessschritte der Wafer-Substrat-Herstellung aufgeführt. Die Rohstoffgewinnung und Aufbereitung der Silikate werden nicht berücksichtigt. Bei der Wafer-Substrat-Herstellung werden teilweise unterschiedliche Technologien eingesetzt, z.B. für das Einkristall-Ingots-Ziehen, aber auch für abschließende Veredelungsprozesse. Zu beachten ist auch, dass Wafer-Substrate in verschiedenen Endzuständen geliefert werden, z.B. gereinigt, geätzt, poliert oder mit einer Epitaxie-Schicht. Da die verfügbaren Daten diese Unterscheidung nicht unterstützen, wird von einer Mischung ausgegangen.

- ▶ Herstellung des polykristallinen Siliziums durch Schmelzen und Veredeln (Dotieren bspw. mit Bor, Phosphor, Antimon oder Arsen) der Rohmaterialien
- ▶ Herstellung des Einkristall-Ingots durch:
 - Option: Tiegel-Ziehen / Czochralski Pulling
 - Option: Zonen-Ziehen / Float-Zone Pulling
- ▶ Herstellung der Wafer-Substrate durch
 - Draht Sägen / Wire Slicing
 - Feinschleifen / Lapping
 - Reiningen / RCA-Cleaning
- ▶ Wertere Veredlung der Wafer-Substrate durch:
 - Äzten
 - Polieren
 - Einseitig
 - Beidseitig
 - Epitaxie

Hinweis: Die zur Verfügung stehenden Informationen lassen die Erstellung eines Datensatzes für alle Arten von Wafern zu. Das betrifft sowohl die Größe als auch die weitere Verarbeitung der Wafer-Substrate.

C.1.2 Basisdaten zur Wafer-Substrat-Produktion

Im Kontext der spezifischen Datennutzung war es nötig, die im Jahr 2016 produzierte Wafer-Fläche zu ermitteln. Das Volumen der jährlichen globalen Wafer-Substrat-Herstellung wird durch keine spezifische Marktstatistik bereitgestellt. Daher wird die Wafer-Kapazität der IC-Hersteller,

d.h. die verarbeitete Anzahl an Wafern pro Monat, als Referenzwert herangezogen. Diese Marktdaten werden jährlich insbesondere von dem auf die Halbleiterindustrie spezialisierten Marktforschungsunternehmen IC Insights ermittelt und im Global Wafer Capacity Report veröffentlicht. Für die vorliegende Studie werden zwei im Internet veröffentlichte Statistiken verwendet.^{30,31}

Diesen Quellen zufolge betrug die Wafer-Kapazität, angegeben in 200mm-Wafer-Äquivalenten, im Referenzmonat Dezember 2016 etwa 17 Millionen Stück. Hochgerechnet für das gesamte Jahr 2016 ergibt dies eine Stückzahl von 204 Millionen Wafer-Äquivalenten. Etwa 65 % der Wafer-Produktion entfielen auf 300mm-Wafer, 30 % auf 200mm-Wafer und die restlichen 5 % auf Wafer kleiner oder gleich 150mm. Basierend auf diesen Marktdaten lässt sich eine produzierte Wafer-Fläche von 64 Mrd. cm² für das Jahr 2016 errechnen.

Da nicht davon ausgegangen werden kann, dass nur so viele Wafer-Substrate hergestellt werden, wie die IC-Hersteller verarbeiten können, sondern dass es Verluste und Verschnitte gibt, wird die Annahme getroffen, dass das Volumen der Wafer-Substrat-Herstellung etwa um den Faktor 1,1 größer ist. Unter dieser Annahme ergibt sich rechnerisch ein Produktionsvolumen von etwa 70 Mrd. cm² Wafer-Fläche im Jahr 2016.

Dieser Wert wird durch spezifische Marktangaben einzelner Hersteller bestätigt. Die Firma Siltronic beispielsweise veröffentlichte im Unternehmensbericht (Siltronic Fact Book 2017)³² die Marktanteile der fünf marktführenden Unternehmen, die über 90 % dieser Branche repräsentieren (vgl. Tabelle 80). Des Weiteren gibt Siltronic in dem Bericht an, in jeder Minute rund 2 m² Wafer-Substrat herzustellen. Daraus ergibt sich eine jährliche Wafer-Substrat-Produktion von 10,5 Mrd. cm². Berechnet man nun anhand dieses Wertes und Marktanteils das Gesamtjahresvolumen, bestätigt sich die Annahme von 70 Mrd. cm² Wafer-Fläche für die Wafer-Substrat-Produktion im Jahr 2016.

Tabelle 80: Berechnung der in 2016 produzierten Wafer-Substrate (in cm²)

Unternehmen	Land	Marktanteil (Prozent) (Siltronic - Fact Book 2017)	Waferfläche (Mrd. cm ²)
Shin-Etsu	Japan	31%	21,7
Sumco Corp.	Japan	28%	19,6
GlobalWafers	Singapur	16%	11,2
Siltronic	Deutschland	15%	10,5
LG Siltron (SK Siltron)	Südkorea	10%	7,0
Summe		100%	70,0

Quelle: (Siltronic - Fact Book 2017); Eigene Berechnung

³⁰ <http://www.icinsights.com/services/global-wafer-capacity/report-contents/> (Stand: 09.11.2018)

³¹ <https://epsnews.com/2018/02/22/component-shortages-will-ease-wafer-capacity-grows/> (Stand:09.11.2018)

³² https://www.siltronic.com/fileadmin/investorrelations/Pr%C3%A4sentation/Siltronic_Fact_Book_2017.pdf (Stand: 09.11.2018)

C.1.3 Spezifische Daten zweier Hersteller

Der Datensatz basiert auf zwei unternehmensbezogene Umweltbilanzen nach ISO 14001. Diese Umweltbilanzen wurden 2017 in CSR Berichten der Unternehmen Siltronic und Sumco veröffentlicht und haben das Bezugsjahr 2016.

► Siltronic

Die Siltronic AG ist ein Hersteller von Wafern aus Reinst-Silizium mit Firmensitz in München, Deutschland. Unter den fünf marktführenden Unternehmen steht Siltronic mit 15 % Marktanteil an vierter Stelle. Das Produktportfolio umfasst gesägte, geätzte, geläppte und polierte Siliziumwafer sowie polierte Wafer mit epitaktisch abgeschiedenen Schichten (Epi-Wafer).

Die wirtschafts- und umweltbezogene Daten sind aus einer Reihe von Siltronic-Berichten (Siltronic - Geschäftsbericht; Siltronic - Fact Book 2017; Siltronic - Nichtfinanzieller Bericht 2017) entnommen.

Zum Produktionsvolumen vermerkt Siltronic, dass sie 2m² Waferfläche pro Minute herstellen (Siltronic - Geschäftsbericht). Auf dieser Basis konnte die theoretische Jahresproduktion berechnet werden. Diese beträgt demnach 10,5 Mrd. cm². Dieser Wert entspricht durchaus genau dem über den Marktanteil berechneten Wert von 10,1 Mrd. cm². Auf Basis dieser Flächenangabe wurden die unternehmensbezogenen Ökobilanzdaten umgerechnet (Tabelle 81).

Tabelle 81: Siltronic Produktionsdaten und Umweltdaten

Kategorie	Gegenstand	Wert (Gesamt)	Einheit	pro cm ² Wafer	Einheit
Quelle	(Siltronic - Geschäftsbericht; Siltronic - Nichtfinanzieller Bericht 2017)			Eigene Berechnung	
Produktion	Waferfläche pro Minute	2	m ² /min		
	Waferfläche pro Jahr	10.512.000.000	cm ² /a	1	cm ² /a
Energie	Energieverbrauch	721	GWh/a	6,86E-02	kWh/cm ²
	davon Strom	601	GWh/a	5,72E-02	kWh/cm ²
	davon Dampf, Wärme	75	GWh/a	2,57E-02	MJ/cm ²
	davon Erdgas	39	GWh/a	1,34E-02	MJ/cm ²
	davon Heizöl	6	GWh/a	2,05E-03	MJ/cm ²
Wasser	Kühlwasser	17.900.000	m ³ /a	1,70E-03	m ³ /cm ²
	Produktion	6.300.000	m ³ /a	5,99E-04	m ³ /cm ²
	Abwasser direkt eingeleitet	1.800.000	m ³ /a	1,71E-04	m ³ /cm ²
	Abwasser indirekt eingeleitet	5.500.000	m ³ /a	5,23E-04	m ³ /cm ²
CO _{2e} gemäß Carbon Disclosure Project	Scope 1 (direkte Emissionen)	11.891.000	kg CO _{2e} /a	1,13E-03	kg CO _{2e} /cm ²
	Scope 2 (indirekte Emissionen)	277.331.000	kg CO _{2e} /a	2,64E-02	kg CO _{2e} /cm ²

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut (Siltronic - Geschäftsbericht; Siltronic - Nichtfinanzieller Bericht 2017)

► Sumco

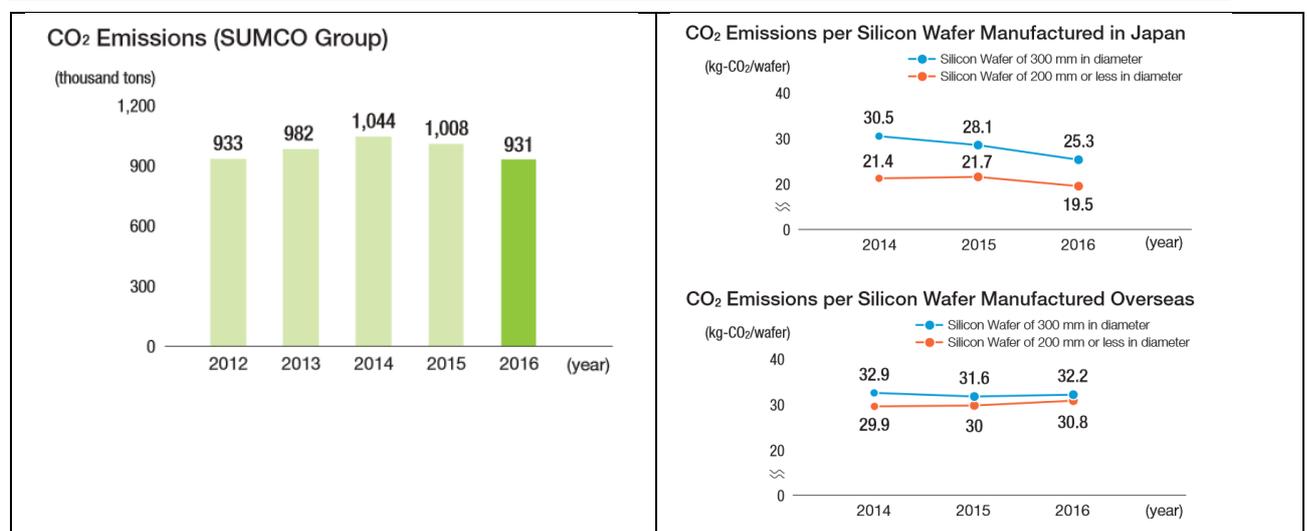
Die Sumco Corporation ist ein japanisches Unternehmen, das insbesondere 300mm Wafer herstellt. Zum Produktportfolio gehören Einkristall-Ingots sowie polierte Wafer, Epitaxie-Wafer, Annealed-Wafer und Silicon-on-Insulator Wafer.

Die Wirtschafts- und Umweltdaten sind dem Sumco CSR Report (2017) entnommen. Zur Bestimmung der produzierten Waferfläche und damit zur Skalierung des Datensatzes, stehen zwei Optionen zur Verfügung. Erstens ist die von Sumco im Jahr 2016 produzierte Waferfläche bereits über den Marktanteil berechnet worden (vgl. Tabelle 80). Dieser Wert beträgt 19,6 Mrd. cm².

Eine zweite Möglichkeit zur Flächenberechnung bieten die Angaben im Umweltbericht. Sumco veröffentlicht darin Werte für die CO₂-Emissionen pro Wafer, wobei zwischen der Produktion in Japan und in Übersee unterschieden wird. Die Zahlen für die gesamten CO₂-Emissionen von Sumco sind ebenfalls angegeben, aufgeschlüsselt auf die Waferproduktion in Japan und Übersee.

- CO₂ Emission der Wafer-Substrat-Herstellung in Japan (2016): 717.000 Tonnen
- CO₂ Emission der Wafer-Substrat-Herstellung in Übersee (2016): 214.000 Tonnen

**Abbildung 36: CO₂ Emissionen von Sumco Group und aufgeschlüsselt für Japan und der Übersee-
produktion**



Quelle: (Sumco CSR Report 2017)

Zur Berechnung der gesamten produzierten Wafer-Fläche wurden die Gesamtemissionen mit den Wafer-spezifischen Angaben verrechnet (Tabelle 82).

Tabelle 82 zeigt die Berechnung des Produktionsvolumens, ausgedrückt als Anzahl der hergestellten Wafer-Substrate. Die Summe beträgt rund 35 Millionen produzierter Wafer im Jahr 2016.

Tabelle 82: Produktionsvolumen der Wafer-Substrat-Herstellung von Sumco in 2016

	Sumco Japan	Sumco Übersee	Sumco Gesamt
CO ₂ Emission (t)	717.000	214.000	931.000
CO ₂ pro Wafer (t)	0,025	0,032	-
Anzahl Wafer (Stk)	28.680.000	6.687.500	35.367.500

Quelle: (Sumco CSR Report 2017)

Um nun die produzierte Wafer-Fläche zu ermitteln, muss die Wafer-Größe berücksichtigt werden. Anhand der Tatsache, dass ca. 60 % aller Wafer 300mm Wafer sind, wird dieses Verhältnis für die Flächenberechnung angenommen (vgl. Tabelle 83). Das Berechnungsergebnis von rund 19,4 Mrd. cm² stimmt sehr genau mit dem in Tabelle 80 berechneten Marktanteil (19,6 Mrd. cm²) überein. Für die weiteren Berechnungen wird der gerundete Wert von 19,5 Mrd. cm² verwendet.

Tabelle 83: Produzierte Waferfläche von Sumco in 2016

	Anzahl Wafer gesamt (100%)	Anzahl 300mm Wafer (Produktionsanteil 60%)	Anzahl 200mm-Wafer (Produktionsanteil 40%)
Anzahl Wafer (Stk.)	35.367.500	21.220.500	14.147.000
Waferfläche (cm ²)	19.444.298.681	14.199.887.554	4.444.411.127

Quelle: (Sumco CSR Report 2017)

Auf Basis der Flächenangabe von 19,5 Mrd. cm² wurden die unternehmensbezogenen Ökobilanzdaten für Sumco Japan umgerechnet (Tabelle 84).

Tabelle 84: Umweltdaten für Sumco Japan

SUMCO Group in Japan 2016	Gegenstand	Wert (Gesamt)	Einheit	pro cm ² Wafer	Einheit
Bezugsgröße	Produzierte Waferfläche	19.500.000.000	cm ² /a		
Input					
energy	electricity	1.338,00	GWh/a	6,86E-08	GWh/cm ²
	fuel crude oil equ.	5.859.000,00	l/a	3,00E-04	l/cm ²
water	industrial water	9.400.000,00	m ³ /a	4,82E-04	m ³ /cm ²
	tap water	200.000,00	m ³ /a	1,03E-05	m ³ /cm ²
	groundwater	3.200.000,00	m ³ /a	1,64E-04	m ³ /cm ²
PRTR-regulated substances ³³	2-aminoethanol	13,80	t/a	7,08E-10	t/cm ²
	linear alkylbenzene sulfonate (LAS)	1,60	t/a	8,21E-11	t/cm ²

³³ PRTR-Gesetz: Pollutant Release and Transfer Register (PRTR-Law)

SUMCO Group in Japan 2016	Gegenstand	Wert (Gesamt)	Einheit	pro cm ² Wafer	Einheit
(amount handled = input)	ferric chloride	6,20	t/a	3,18E-10	t/cm ²
	xylene	70,90	t/a	3,64E-09	t/cm ²
	hexavalent chromium compound	0,70	t/a	3,59E-11	t/cm ²
	1,2,4-trimethylbenzene	80,00	t/a	4,10E-09	t/cm ²
	toluene	7,10	t/a	3,64E-10	t/cm ²
	hydrogen fluoride and its water-soluble salts	642,30	t/a	3,29E-08	t/cm ²
	poly (oxyethylene) alkyl ether	1,80	t/a	9,23E-11	t/cm ²
	poly (oxyethylene) nonylphenyl ether	57,00	t/a	2,92E-09	t/cm ²
Output					
CO ₂ emissions	total	717.000,00	t CO ₂ e/a	3,68E-05	t CO ₂ e/cm ²
	electricity	699.000,00	t CO ₂ e/a	3,58E-05	t CO ₂ e/cm ²
	fuel	18.000,00	t CO ₂ e/a	9,23E-07	t CO ₂ e/cm ²
	transport	4.000,00	t CO ₂ e/a	2,05E-07	t CO ₂ e/cm ²
discharged wastewater	ocean	5.200.000,00	m ³ /a	2,67E-04	m ³ /cm ²
	rivers	3.200.000,00	m ³ /a	1,64E-04	m ³ /cm ²
	sewerage	3.100.000,00	m ³ /a	1,59E-04	m ³ /cm ²
waste	ordinary business waste	175,00	t/a	8,97E-09	t/cm ²
	industrial waste	19.519,00	t/a	1,00E-06	t/cm ²
	specially controlled industrial waste	2.998,00	t/a	1,54E-07	t/cm ²
PRTR-regulated substances (amount released to atmosphere)	2-aminoethanol	0,00	t/a	0,00E+00	t/cm ²
	linear alkylbenzene sulfonate (LAS)	0,00	t/a	0,00E+00	t/cm ²
	ferric chloride	0,00	t/a	0,00E+00	t/cm ²
	xylene	1,20	t/a	6,15E-11	t/cm ²
	hexavalent chromium compound	0,00	t/a	0,00E+00	t/cm ²
	1,2,4-trimethylbenzene	0,00	t/a	0,00E+00	t/cm ²

SUMCO Group in Japan 2016	Gegenstand	Wert (Gesamt)	Einheit	pro cm ² Wafer	Einheit
	toluene	1,00	t/a	5,13E-11	t/cm ²
	hydrogen fluoride and its water-soluble salts	0,40	t/a	2,05E-11	t/cm ²
	poly (oxyethylene) alkyl ether	0,00	t/a	0,00E+00	t/cm ²
	poly (oxyethylene) nonylphenyl ether	0,00	t/a	0,00E+00	t/cm ²

Quelle: (Sumco CSR Report 2017); eigene Berechnung

► Zusammenfassung der Umweltwirkungsdaten aus zwei Quellen

Die nachstehende Tabelle 85 fasst die resultierenden Daten zusammen. Die individuellen Werte beider Unternehmen für CED für GWP zeigen eine gute Übereinstimmung. Der Wasserverbrauch unterscheidet sich substantiell um Faktor 3 bis 4. Es gibt keinen ADP-Wert in ihrer Berechnung.

Tabelle 85: Umweltwirkung der Herstellung von 1 cm² Wafer-Substrat

	Siltronic	SUMCO	Abweichung $\left(\frac{\text{Siltronic}}{\text{SUMCO}} - 1\right)$	gewichteter Mittelwert	Einheit
Marktanteil	15%	28%			
zeitlicher Bezug	2016	2016			
geograf. Bezug	Deutschland, Singapur	Japan (bei GWP auch USA, Taiwan, Indonesien)			
CED	2,47E-01	2,58E-01	-4%	2,54E-01	MJ/cm ²
GWP	2,64E-02	3,68E-02	-28%	3,32E-02	kg CO _{2e} /cm ²
Wasserverbrauch	2,30E-03	6,56E-04	251%	1,23E-03	m ³ /cm ²

Quelle: (Siltronic - Geschäftsbericht; Siltronic - Nichtfinanzieller Bericht 2017; Sumco CSR Report 2017); eigene Berechnung

Eine Zusammenfassung der Produktionsdaten für die Modellierung der Wafer-Substrat-Herstellung ist in Tabelle 20 dargestellt.

C.2 Herstellung des Prozessors (CPU)

C.2.1 Intel Irland Front-End-Prozesse

- Schritt 1: Ermittlung der CPU Wafer Kapazität von Intel Fabs auf Basis von der globalen Wafer-Produktion

Für die Nutzung der verfügbaren Umweltdaten von Intel ist es erforderlich, so genau wie möglich das Fertigungsvolumen bzw. die Wafer-Kapazität von Intel (global) und der von Intel in

Leixlip (Irland) zu ermitteln. Zu diesem Zweck wurden Publikationen des Marktforschungsunternehmens IC Insight recherchiert und ausgewertet.

Eine erste Quelle ist IC Insights (2018), welche die globale monatliche Wafer-Kapazität für 2016 und 2017 nach Produktgruppen (Micro, Logic, Memory, etc.) ausweist. Eine Zusammenfassung ist in der Tabelle 86 dargestellt. Da dort allerdings auch andere Prozessoren hergestellt werden und die Daten nur aggregiert auf Werksebene vorliegen, lässt sich eine Allokation aufgrund des unbekanntem Produktionsvolumens lediglich grob abschätzen.

Tabelle 86: Die globale monatliche Wafer-Kapazität für 2016

Anteil an der weltweiten Produktion	Wafer Kapazität	2016 (pro Monat) 200mm Wafer eq (in Millionen Stück)	2016 (pro Monat) 300mm Wafer eq (in Millionen Stück)
Global (100%)	Globale Wafer Kapazität (gesamt)	16,86	7,49
	Globale Wafer Kapazität (Mircoprocessor)	1,01	0,45
	Globale Wafer Kapazität (Logic)	1,17	0,52
	Globale Wafer Kapazität (Memory)	6,49	2,88
Intel (7%)	Intel Wafer Kapazität		
	Gesamte Kapazität	1,18	0,52
	Anteil Kapazität (CPU)	0,89	0,39
	Anteil Kapazität NAND (Memory)	0,30	0,13

Quelle: Eigene Darstellung aus IC Insights (2018)

Über den Marktanteil abgeleitete Wafer-Kapazitäten von Intel (globale Produktion) sind:

- *Gesamt-Kapazität:* 524.533 (300-mm-Wafer-Äquivalente)
- *NAND Wafer Kapazität:* 130.000 (300-mm-Wafer-Äquivalente)
- *CPU Wafer Kapazität:* 394.533 (300-mm-Wafer-Äquivalente)

► Schritt 2: Ermittlung der „Good-Die-Out“ von Intel Irland Fabs auf Basis von der globalen Intel Produktion und der Umweltwirkungsergebnisse

Die Umweltwirkungen vom Intel Irland Fabs für Front-End sind zusammen mit den anderen Intel Fabs in Tabelle 87 aufgelistet. Intel Ireland (2017) führt ein Inventar für die Produktion (Energieverbrauch, Wasserverbrauch und direkte Emissionen) und Umweltwirkungen (CED, Wasserverbrauch, GWP) der Irland Fabs. Leider wurde die Bezugsgröße im Intel Ireland Report (2017) nicht angegeben und leitet sich daher aus der globalen Intel CPU-Produktion (s. Schritt 1 ermittelte 394.533 Stück pro Monat) und den Umweltdaten der Intel Fabs (Tabelle 87) ab.

Um die Wafer-Kapazität pro Fab zu berechnen, wurde der Energiebedarf als Referenzwert genommen, da dieser am zuverlässigsten mit dem Produktionsvolumen skaliert. Die Berechnung erfolgt mittels folgender Formel:

$$Waferkapazität_i = Waferkapazität_{gesamt} * \frac{KEA_i}{KEA_{gesamt}}$$

Tabelle 87: Ermittlung der Wafer-Kapazität der Irland-Fabs anhand der CED-Werte für Front-End-Prozesse (Intel)

Standort	Wasserverbrauch [m³/a]	CED [MJ/a]	GWP [t CO2e/a]	monatl. Wafer-Kapazität [300mm-eq./m]
Oregon	10.461.740	7.146.001.454	270.807	140.146
Arizona	13.329.200	5.027.855.702	649.138	98.605
New Mexiko	2.740.340	1.536.908.789	196.699	30.142
Israel	2.746.412	2.872.260.202	411.741	56.330
Irland	5.817.560	3.534.094.786	504.712	69.310
Intel Front-End gesamt	35.095.252	20.117.120.933	2.033.097	394.533

Quelle: (Intel 2018), eigene Berechnung

Die monatliche Wafer-Kapazität der Leixlip-Fab beträgt 69.310 300mm Wafer-Äquivalente.

► Schritt 3: Einschätzung der Ausbeute des Front-End-Prozesses

Die Annahme für die Ausbeute (Yield) von 75 % berücksichtigt vergleichsweise große CPU-ICs. Geht man beispielsweise von einer typischen CPU mit 22 mm Kantenlänge (IC Fläche 484 mm²) aus, so passen auf einen 300mm-Wafer genau 114 ICs. Hieraus resultiert eine Flächennutzung von 78 %. Der Verlust durch schadhafte Wafer oder ICs kann aufgrund des hohen Reifegrades der Fertigungsprozesse als eher gering angenommen werden. Genaue Werte dazu sind nicht verfügbar, weshalb der Gesamtverlust auf 75 % geschätzt wird, was sich ungefähr mit den Annahmen aus den in C.2.4 genannten Literaturquellen deckt.

► Schritt 4: Ermittlung der „good-die-out“-Fläche der Prozessoren pro Jahr im Irland Fabs

Tabelle 88: Ermittlung der „good-die-out“-Fläche der Prozessoren pro Jahr in Irland Fabs

Parameter (Irland)	Wert	Kommentar
wafer starts per month	69.310	siehe Berechnungen zur Wafer-Kapazität in Tabelle 87 Schritt 2
Ausbeute	75%	Anteil "good die out" an Waferfläche inkl. Randverlust und Schäden; orientiert an Literaturwerten (Schmidt et al. 2011; Prakash et al. 2016; Boyd 2012), nach unten abgeschätzt
Fläche 300 mm-Wafer [cm²/wafer]	706,86	
"good die out" pro Wafer [cm²/wafer]	530,14	
"good die out" pro Jahr [cm²/a]	440.931.340	$\frac{69.310 \text{ Stück}}{\text{Monat}} \times 12 \times \frac{706,86 \text{ cm}^2}{\text{Stück}} \times 75\%$

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

► Schritt 5: Ermittlung der Produktionsdaten auf pro cm² „Good-Die-Out“

Die jährlich verfügbaren Produktionsdaten der Irland Front-End Fabs werden durch die jährlich produzierte Fläche der „Good-die-out“ geteilt. So ergibt sich die Datengrundlage für die Produktion des CPU-Front-End-Prozesses pro „Die“-Fläche für diese Studie. Die für die Modellierung benötigte Datengrundlage, basierend auf good-die-out in cm², ist in Tabelle 23 dokumentiert.

C.2.2 Intel: Back-End-Prozesse des Prozessors

► Schritt 1: Ermittlung der gesamten Wafer-Kapazität der Back-End-Prozesse Intel

Neben den Front-End Fertigungen dokumentiert Intel auch die „Assembly & Testing“ Fabriken. Diese Standorte befinden sich ausschließlich in Asien, dennoch finden einige Tests auch in den Fertigungsstätten statt.

Tabelle 89: Gesamte monatliche Wafer-Kapazität alle Back-End-Standorten Intel

Prozess	Parameter	Werte	Quelle
Intel Front-End gesamt	monatl. Wafer-Kapazität [300mm-eq./m]	394.533	Tabelle 87
Intel Front-End gesamt	Ausbeute [%]	75%	Tabelle 88
Intel Back-End gesamt	monatl. Wafer-Kapazität [300mm-eq./m]	295.900	394.533 × 75%

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

► Schritt 2: Ermittlung der Wafer-Kapazität der jeweiligen Back-End-Standorten Intel

Die Umweltdaten (Wasserverbrauch, CED und GWP) der Back-End-Standorte wurden differenziert nach Back-End-Standorten veröffentlicht (Tabelle 90). Leider ist die Bezugsgröße unbekannt. Hier wurde der gleiche methodische Ansatz wie im Front-End-Prozess (s. C.2.1 Schritt 2) verwendet, um die Wafer-Kapazität der jeweiligen Back-End-Standorte zu ermitteln.

Tabelle 90: Ermittlung der Wafer-Kapazität der Back-End-Standorte anhand der CED-Werte für Back-End (Intel)

Standort	Wasserverbrauch [m ³ /a]	CED [MJ/a]	GWP [t CO _{2e} /a]	monatl. Wafer-Kapazität [300mm-eq./m]
Chengdu	1.514.000	804.775.435	95.403	96.993
Vietnam	282.388	475.569.202	54.359	57.316
Kulim	675.700	536.625.979	89.552	64.675
Penang	732.164	638.193.758	109.254	76.916
Intel Back-End gesamt	3.204.252	2.455.164.374	348.568	295.900

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von <https://exploreintel.com/>

► Schritt 3: Einschätzung der Ausbeute des Back-End-Prozesses

Die Ausbeute der Back-End-Prozesse wird aufgrund des potentiell sehr hohen Wertverlustes mit 90 % angenommen.

- Schritt 4: Ermittlung der „good-die-out“-Fläche der Prozessoren pro Jahr aus dem Back-End-Prozess

Tabelle 91: Ermittlung der „good-die-out“-Fläche der Prozessoren pro Jahr aus dem Back-End-Prozess Intel

Standort	China (Chengdu)	Vietnam	Malaysia (Kulim, Penang)	Quelle
monatl. Wafer-Kapazität [300mm-eq./m]	95.682	56.541	141.591	Tabelle 90
jährliche Wafer-Kapazität [300mm-eq./m]	1.163.913	687.796	1.699.092	monatl.Wafer-Kapazität x 12
Fläche pro 300 mm Wafer [cm ²]	706,86			gerechnet
Jährliche Wafer-Kapazität [cm ² /a]	822.721.298	486.174.023	1.201.017.298	Jährl.Wafer-Kapazität x Fläche
Back-End: Ausbeute [%]	90%			
jährl. "good die out" [cm ² /a]	740.449.168	437.556.620	1.080.915.569	Jährl.Wafer-Fläche x 90%
Summe [cm ² /a]	2.258.921.357			gerechnet
Anteil nach Standort	33%	19%	48%	gerechnet

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

- Schritt 4: Ermittlung des Stromverbrauchs der Back-End-Prozesse nach Standorten

Tabelle 92: Ermittlung der „good-die-out“-Fläche der Prozessoren pro Jahr aus dem Back-End-Prozess Intel

Standort	China (Chengdu)	Vietnam	Malaysia (Kulim, Penang)	Quelle
GWP (kg CO ₂ e / a)	95.403.000	54.359.000	198.806.000	Tabelle 90
GWP Emissionsfaktor der Strommische nach IPCC 2013 (kg CO ₂ e / kWh)	1,027	0,421	0,831	Ecoinvent v3.5
Jährlicher Stromverbrauch (kWh /a)	92.882.178	129.060.519	239.268.736	GWP / Emissionsfaktor
Summe (kWh /a)	461.211.433			gerechnet

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

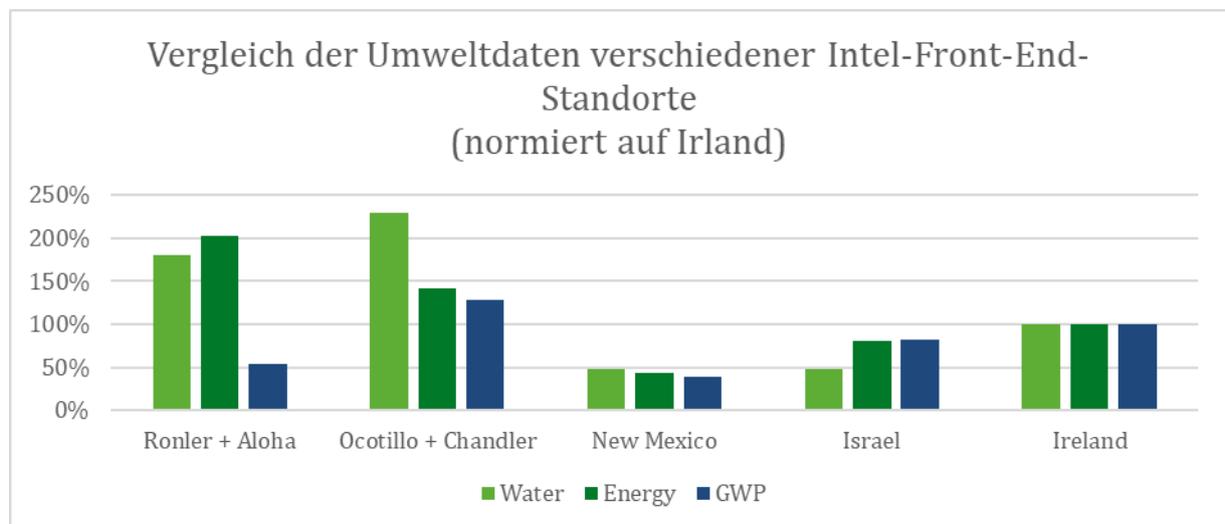
► Schritt 5: Ermittlung der Produktionsdaten auf pro cm² „Good-Die-Out“

Mit den Inputdaten der Back-End-Prozesse konnte nur der Strom- und Wasserverbrauch ermittelt werden. Die Back-End-Prozesse verbrauchen hauptsächlich Energie, jedoch werden keine signifikanten Chemikalien verbraucht. Der jährliche zur Verfügung stehende Wasserverbrauch und der ermittelte Stromverbrauch der Back-End-Prozesse werden durch die jährlich produzierte Fläche der „Good-die-out“ dividiert. So ergibt sich die Datengrundlage der Produktion des CPU-Back-End-Prozesses pro „Die“-Fläche für diese Studie. Die für die Modellierung benötigte Datengrundlage, bezogen auf good-die-out in cm², ist in Tabelle 25 dokumentiert.

C.2.3 Intel-Umweltauswirkung: Zusammenfassung der Umweltdaten der Front-End-Prozesse und Back-End-Prozesse des Prozessors

Abbildung 37 zeigt einen Vergleich der Umweltdaten aller Front-End-Fabs von Intel (Stand: Q2/2018) normiert auf den Wasserbedarf, Energiebedarf und CO₂-Emission der Leixlip-Fabs in Irland.

Abbildung 37: Vergleich der Umweltdaten verschiedener Intel-Front-End-Standorte



Quelle: Eigene Darstellung

Zu betonen ist, dass diese Produktionsstätte nach Ireland Fabs ISO 14001 zertifiziert und dementsprechend besonders umweltfreundlich ist, so dass die Daten möglicherweise nicht repräsentativ für die Produktion an anderen Standorten sind.

Tabelle 93: Produktionsdaten der Irland Fab

	2017 Q1	2017 Q2	2017 Q3	2017 Q4	2017 gesamt	pro cm ² „good die out“	Kommentar
Wasser- ver- brauch [m ³]	1.345.075	1.443.599	1.511.388	1.447.498	5.747.560	1,32E-02	Frischwasser- entnahme
Energie- bedarf [kWh]	236.698.625	233.776.875	235.428.770	240.504.817	946.409.087	7,83E+00	inkl. Elektrizi- tät, Erdgas, Heizöl
GHG Emissio- nen [kg CO ₂ eq.]	127.251.750	127.251.750	127.251.750	127.251.750	509.007.000	1,17E+00	Kohlenstoffdi- oxidäquiva- lente aus Elektrizität, Erdgas, Heizöl, PFCs
VOC Emissio- nen [kg]	36.000	35.000	34.000	35.000	140.000	3,22E-04	flüchtige orga- nische Verbind- ungen
HAP Emissio- nen [kg]	2.120	1.830	1.910	1.960	7.820	1,80E-05	gefährliche Luftschad- stoffe
NOx Emissio- nen [kg]	6.940	6.100	5.520	6.210	24.770	5,69E-05	Stickstoffoxide
CO Emissio- nen [kg]	11.000	11.000	11.000	9.880	42.880	9,86E-05	Kohlenstoff- monoxid

Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 94: Übersicht der Umweltwirkung von Front- und Back-End (Intel)

	Wasserverbrauch [m ³ /cm ²]	CED [MJ/cm ²]	GWP [kg CO ₂ eq. /cm ²]
Front-End (Durchschnitt)	0,014	8,125	0,821
Back-End (Durchschnitt)	0,001	1,102	0,156
Verhältnis BE/FE	10%	14%	19%

Quelle: Eigene Darstellung

C.2.4 Vergleich der Umweltwirkungen der Intel-Daten mit anderen Literaturquellen

Tabelle 95: Zusammenstellung der zu vergleichenden Datenquelle

	zeitl. Bezug	veröffentlicht	geogr. Bezug
Schmidt	2005	2011	Europa
Boyd	2000 - 2010	2012	international
Öko-APC	2005, 2015	2016	international
neuer Datensatz	2016 - 2018	2018	Irland, international

Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 96: Vergleich der Daten für CED, GWP und Wasserverbrauch für CPU-Herstellung

		Rohstoff-gewinnung	Wafer-Herstellung	Chemika-lien	Fab Infra-struktur	Front-End	Testen	Back-End	Trans-Port	Gesamt
ADP in kg Sb-eq./cm ² die	Schmidt	n.b. ³⁴	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
	Boyd	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
	Öko-APC	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
	neuer Da-tensatz									1,15E-05
CED in MJ/cm ² die	Schmidt				4,10	6,98				11,08
	Boyd		5,90		17,90	28,60			1,00	53,40
	Öko-APC					10,89		1,03		11,92
	neuer Da-tensatz	in Wafer-Herst. enth.	0,25	???	in Front-End enth.	7,83	in Back-End enth.	1,10	12,00	11,14
GWP in kg CO ₂ -eq./cm ² die	Schmidt									2,10
	Boyd		0,50	0,40 ³⁵	1,50	0,90 ³⁶			0,10	3,40
	Öko-APC									2,13
	neuer Da-tensatz	in Wafer-Herst. enth.	0,07	???	in Front-End enth.	1,74	in Back-End enth.	0,16	0,78	2,75
Wasserverbrauch in l/cm ² die	Schmidt									0,00
	Boyd									0,00
	Öko-APC					26,00		0,90		26,90
	neuer Da-tensatz	in Wafer-Herst. enth.	1,61	nicht ver-fügbär	in Front-End enth.	13,21	in Back-End enth.	1,44	zu be-rechnen	16,27

Quelle: Eigene Darstellung

³⁴ n.b.: nicht berücksichtigt

³⁵ Annahme nach Boyd aufgrund fehlender Daten: Herstellung hochreiner Chemikalien ca. 23-28 % des gesamten GWP

³⁶ nach damaligem Stand der Technik optimale Reduktion der PFC-Emissionen angenommen (Boyd 2012)

In Bezug auf die obige Tabelle 96 ist anzumerken, dass die Umweltwirkung der Goldkontaktierung für die Pins an der Unterseite der CPU nicht einberechnet ist, da sich die Werte nur auf einen cm^2 beziehen und die Goldmenge aber pro Stück CPU ermittelt wird.

C.3 Herstellung der RAM-Module

C.3.1 Beispielberechnung der gesamten „Die“-Fläche pro RAM-Modul

Ein Micron-DDR4-RAM Modul wurde als Referenz für die Einschätzung der zusätzlichen eingebauten ICs herangezogen. Die Spezifikation des Moduls ist in Tabelle 97 dargestellt. Das RAM-Modul ist doppelseitig bestückt. Es wurde geschätzt, dass weitere 6 Chips als Paritätsbits und Controllerchips eingebaut sind. Wenn eine Speicherdichte von $0,1501 \text{ Gbit/mm}^2$ angenommen wird, beträgt die „Die“-Fläche des Moduls 1153 mm^2 (s. Tabelle 97).

Tabelle 97: Referenz-RAM-Modul und Ermittlung der gesamten „Die“-Fläche der Chips

Hersteller	Micron	Quelle
Name des Moduls	DDR4 SDRAM NVR-DIMM	(Micron 2017)
Gewicht des Moduls	ca. 25 g	
Speicherkapazität des Moduls	16 GB	
Höhe des Moduls	31,25 mm	
Anzahl der Pins	288	
PCB-Länge	133,48 mm	
PCB-Breite	31,40 mm	
PCB-Fläche	4.191 mm^2	Berechnet; Länge x Breite
PCB-Fläche	42 cm^2	Umrechnung der Einheit
Volumen des Moduls	131 cm^3	Berechnet; Länge x Breite x Höhe
Anzahl der weiterer ICs (Paritätsbit und Controller)	6	Eigene Einschätzung
durchschn. Die-Fläche weiterer ICs	$50 \text{ mm}^2/\text{IC}$	Eigene Annahme
Speicherdichte	$0,150 \text{ Gbit/mm}^2$	s. C.3.2 Tabelle 98
Die-Fläche des Modules	1.153 mm^2	$= \frac{16 \text{ GB} \times 8 \frac{\text{Gbit}}{\text{GB}}}{0,151 \frac{\text{Gbit}}{\text{mm}^2}} + 6 \times 50 \text{ mm}^2$

Quelle: (Micron 2017); eigene Berechnung

C.3.2 Die Speicherdichte im Verhältnis zur Die-Fläche

Tabelle 98: Vergleich der Die-Fläche mit den entsprechenden technologischen Generationen und der Speicherdichte

Hersteller	Generation [nm]	35	31	30 (1st)	30 (2nd)	26	25	21 (1st)	21 (2nd)	20 (GDRAM)	20 (LPDDR 4)	18
Samsung	Die-Fläche[mm ²]		36	36		40	39			56		42,33
	Speicherkapazität [Gbit]		2	2		4	4			8		8
	Speicherdichte [Gbit/mm ²]		0,056	0,056		0,1	0,103			0,143		0,189
SK-Hynix	Die-Fläche[mm ²]		35	35		48		76	53			
	Speicherkapazität [Gbit]		2	2		4		8	8			
	Speicherdichte [Gbit/mm ²]		0,057	0,057		0,083		0,105	0,151			
Micron	Die-Fläche[mm ²]	72	68	68	116					85	62	
	Speicherkapazität [Gbit]	2	0,512	4	8					8	6	
	Speicherdichte [Gbit/mm ²]	0,028	0,0075	0,059	0,069					0,094	0,097	
Durchschnitt	Speicherdichte [Gbit/mm²]	0,028	0,040	0,060		0,092	0,103	0,128		0,111		0,189

Quelle: Eigene Darstellung aus (Choe 2017; TechInsights 2014),

C.4 Herstellung des Netzteils (PSU: Power Supply Unit)

Tabelle 99: BOM-Liste des Mainboards eines Netzteils

Komponente auf Mainboard	SMD/THT	Anzahl	Gewicht / Fläche pro Stück	Summe
Leiterplatte (PCB)	-	1	13.065 mm ²	13.065 mm ²
NTC resistor	THT	1	0,48 g	0,48 g
Resistor	SMD	46	0,0098 g	0,4508 g
ICs	SMD	11	0,08039 g	0,88429 g
RELAY	THT	1	9 g	9 g
MOSFET	SMD	14	0,00933 g	0,1306 g
Diode / Schottky Diode	SMD	17	0,032 g	0,544 g

Komponente auf Mainboard	SMD/THT	Anzahl	Gewicht / Fläche pro Stück	Summe
Fuse	THT	1	1,82 g	1,82 g
Bridge diode	THT	1	0,596 g	0,596 g
Connector	THT	3	29,3 g	87,9 g
Polarized capacitor (450V)	THT	1	81 g	81 g
Polarized capacitor	SMD	5	1,29 g	6,45 g
Polarized capacitor (16V)	THT	5	9 g	45 g
Foil capacitor	THT	6	0,7 g	4,2 g
Ceramic capacitor	SMD	53	0,002 g	0,106 g
Ceramic capacitor	THT	3	1,2 g	3,6 g
Transformer, Magnetic	THT	2	45 g	90 g
Transistor, Magnetic	THT	2	6,34 g	12,68 g
inductor, Magnetic	SMD	4	0,0021 g	0,0084 g
inductor, Magnetic	THT	3	45 g	135 g

Quelle: Vereinfachte BOM-Liste auf Basis von Kutschak und Herrera (2018); Fläche der Leiterplatte berechnet auf Basis von Infineon Technologies AG (2018a); die Einschätzung der Gewichtsangabe stammen aus Ecoinvent, Infineon Datenblätter und eigenen Recherchen.

Tabelle 100: BOM-Liste des Powerboards eines Netzteils

Komponente auf Powerboard	SMD/THT	Anzahl	Gewicht / Fläche pro Stück	Summe
Leiterplatte (PCB)	-	1	1703 mm ²	1703 mm ²
power transistor	SMD	6	0,112 g	0,672 g
Schottky diode	SMD	2	0,032 g	0,064 g
Resistor	SMD	4	0,0098 g	0,0392 g
Ceramic capacitor	SMD	3	0,002 g	0,006 g
Connector	SMD	6	10 g	60 g

Quelle: Vereinfachte BOM-Liste auf Basis von Kutschak und Herrera (2018); Fläche der Leiterplatte berechnet auf Basis von Infineon Technologies AG (2018a); die Einschätzung der Gewichtsangabe stammen aus Ecoinvent und eigenen Recherchen.

Tabelle 101: BOM-Liste des Controllerboards eines Netzteils

Komponente auf Controllerboard	SMD/TH T	An- zahl	Gewicht / Fläche pro Stück	Summe
Leiterplatte (PCB)	-	1	2570mm ²	2570mm ²
Controllerchip: IC2 (XMC1402- Q040X0128AA- XUMA)	SMD	1	13,69 mm ²	13,69 mm ²

Komponente auf Controllerboard	SMD/TH T	Anzahl	Gewicht / Fläche pro Stück	Summe
Controllerchip: IC5 XMC4200-F64K256AB	SMD	1	33,64 mm ²	33,64 mm ²
Ceramic capacitor	SMD	51	0,002 g	0,102 g
LED diode	SMD	4	0,35 g	1,4 g
diode	SMD	11	0,032 g	0,352 g
Ics	SMD	7	0,08039 g	0,56273 g
Magnetic	SMD	1	0,002 g	0,002 g
Resistor	SMD	79	0,0098 g	0,7742 g
Connector	SMD	6	10 g	60 g
Crystal oscillator	SMD	1	10 g	10 g

Vereinfachte BOM-Liste auf Basis von Kutschak und Herrera (2018); Fläche der Leiterplatte selbst eingeschätzt; Die „Die-Fläche“ der 2 Controller-Chips stammten aus Infineon Technologies AG (2018b) und (Infineon Technologies AG 2016) Infineon Technologies AG (2018a); die Einschätzung der Gewichtsangaben stammen aus Ecoinvent und eigenen Recherchen.

C.5 Charakterisierungsfaktoren für ADP

Tabelle 102: Gegenüberstellung der Charakterisierungsfaktoren für ADP nach den CML-Methoden „förderbaren Reserven“ und „Gesamtreserven“

Mineral	ADP [kg Sb eq.] (nach ILCD CF v1.0.10, August 2016)	ADP [kg Sb eq.] (nach ILCD CF EF-v2.0, März 2019)
	Charakterisierung auf Grundlage der CML-Methode „förderbaren Reserven“ zusammen mit Faktoren für Seltene Erden	Charakterisierung auf Grundlage der CML-Methode „Gesamtreserven“
aluminium	2,53E-05	1,09E-09
antimony	1,00E+00	1,00E+00
arsenic	3,17E+00	2,97E-03
barium	3,37E-03	6,04E-06
beryllium	k.A.	1,26E-05
bismuth	4,49E+00	4,11E-02
boron	5,28E-03	4,27E-03
bromine	k.A.	4,39E-03
cadmium	1,11E+00	1,57E-01
chlorine	k.A.	2,71E-05

Mineral	ADP [kg Sb eq.] (nach ILCD CF v1.0.10, August 2016)	ADP [kg Sb eq.] (nach ILCD CF EF-v2.0, März 2019)
chromium	1,96E-05	4,43E-04
cobalt	2,56E-02	1,57E-05
copper	2,50E-03	1,37E-03
gallium	k.A.	1,46E-07
germanium	1,95E+04	6,52E-07
gold	3,60E+01	5,20E+01
helium	9,42E-02	k.A.
indium	5,55E+02	6,89E-03
iodine	2,22E-03	2,50E-02
iron	1,66E-06	5,24E-08
kalium (potassium)	9,00E-06	k.A.
lead	1,50E-02	6,34E-03
lithium	1,33E-02	1,15E-05
magnesium	k.A.	2,02E-09
manganese	2,35E-05	2,54E-06
mercury	2,62E+00	9,22E-02
molybdenum	7,11E-02	1,78E-02
nickel	4,18E-03	6,53E-05
niobium	6,55E-02	1,93E-05
palladium	9,36E+00	5,71E-01
phosphorus	6,21E-05	5,52E-06
platinum	9,09E+00	2,22E+00
potassium	k.A.	1,60E-08
rhenium	3,19E+01	6,03E-01
selenium	7,35E+00	1,94E-01
silicon	k.A.	1,40E-11
silver	8,42E+00	1,18E+00
sodium	k.A.	5,50E-08

Mineral	ADP [kg Sb eq.] (nach ILCD CF v1.0.10, August 2016)	ADP [kg Sb eq.] (nach ILCD CF EF-v2.0, März 2019)
strontium	1,77E-01	7,07E-07
sulfur	3,91E-04	1,93E-04
tantalum	1,15E+01	4,06E-05
tellurium	7,21E+00	4,07E+01
thallium	2,98E+03	2,43E-05
tin	1,15E-01	1,62E-02
titanium	1,52E-03	2,79E-08
tungsten	2,54E-01	4,52E-03
uranium	6,56E-02	k.A.
vanadium	4,93E-03	7,70E-07
yttrium	8,16E-01	5,69E-07
zinc	3,65E-03	5,38E-04
zirconium	1,64E-02	5,44E-06
16 Seltene Erden	5,69E-04	k.A.

D Anhang: Bewertung der Relevanz kritischer Rohstoffe

Folgende Rohstoffe wurden qualitativ sowohl bezüglich der Verknappung durch und Relevanz für Cloud-Computing (siehe 3.3.2) auf einer Skala von 0-3 bewertet, wobei

- ▶ 0 – nicht relevant
- ▶ 1 – wenig relevant
- ▶ 2 – relevant
- ▶ 3 – sehr relevant

Tabelle 103: Anwendungen und Relevanz kritischer Rohstoffe (USGS, 2020; EC, 2020)

Material	Anwendungsgebiete	Relevanz für Cloud-Computing	Verknappung durch Cloud-Computing
<i>Antimon</i>	Flammschutzmittel (43%)	2	1
	Zusatz zu Bleilegierungen und in Blei-Säure-Batterien (46%)		
	Herstellung von Farben und Lacken		
	Herstellung von Plasmabildschirmen und LCD-Displays sowie wieder beschreibbaren DVDs und Blue-Ray-Discs		
	Chemotherapie von Tropenkrankheiten		
<i>Baryt</i>	Bohrspülung	0	0
	Füllstoff (für Papier, Farben etc.)		
	Herstellung von Barium-Chemikalien		
	Zuschlagstoff bei der Glasherstellung		
	Schwerbetonzuschlag		
	Röntgenkontrastmittel		
<i>Bauxit</i>	Herstellung von Aluminium-Metall (95%)	1	0
	Schleifmittel, feuerresistente Steine und aluminiumreiche Chemikalien (5%)		

Material	Anwendungsgebiete	Relevanz für Cloud-Computing	Verknappung durch Cloud-Computing
<i>Beryllium</i>	Beryllium-Kupfer-Legierungen	2	1
	elektrische Ausrüstungen (Steckverbindungen, Kontakte, Anschlüsse, Schalter, Relais etc.)		
<i>Bismut</i>	Herstellung von Medikamenten gegen Magenkrankheiten sowie antiseptischen und blutstillenden Pudern und Salben	2	1
	Zusatz zu Legierungen, die Stahl leichter bearbeitbar machen		
	Auslösersysteme von Sprinkleranlagen		
	Herstellung von Loten und Legierungen, die bereits bei niedrigen Temperaturen schmelzen		
<i>Borat</i>	Holzschutzmittel	0	0
<i>Flussspat</i>	Produktion von Aluminium und Stahl	1	0
	Kühlmittel		
	Keramik, Glas		
	Kunststoffe, Baumaterialien		
	Elektronik		
<i>Gallium</i>	Herstellung von Halbleitern und halbisolierenden Substraten	3	3
	LEDs und Laserdioden		
	Solarzellen		
	Herstellung von Hochtemperaturthermometern und Hochleistungsmagneten		
<i>Germanium</i>	Infraroptik (30%)	3	2
	Glasfaserleiter (20%)		
	Polymerisations-Katalysator (20%)		
	Elektronik und Photovoltaik (15%)		

Material	Anwendungsgebiete	Relevanz für Cloud-Computing	Verknappung durch Cloud-Computing
<i>Hafnium</i>	Computerchips	3	1
	Laser		
	Nuklearindustrie		
	Halbleiter		
	Katalysatoren		
<i>Helium</i>	Kühlmittel für alle kryogenen Anwendungen	1	1
	Zusatz zu Raketentreibstoffen und der Atemluft in Taucherflaschen		
	Halbleiterfertigung		
	Gaschromatografie sowie Dichtheitsprüfungen von Bauteilen		
	Trägerstoff für Wetterballone und Zepeline		
	Medium, in dem additive Fertigungsprozesse effizienter ablaufen		
<i>Indium</i>	Herstellung von Flüssigkristallanzeigen, Touchscreens und Flachbildschirmen	2	1
	Dünnschichtphotovoltaikzellen		
	LED und Laserdioden		
	Herstellung karbidhaltiger Werkzeug und Schneidstähle		
	Halbleiterlegierung		
	Verwendung in Niedrigtemperaturlegierungen sowie als Weichlot		
<i>Kobalt</i>	Batterien (41%)	1	1
	Superlegierungen und Hartmetalle (33%)		
	Färbemittel (6%)		

Material	Anwendungsgebiete	Relevanz für Cloud-Computing	Verknappung durch Cloud-Computing
	Magnete (5%)		
	Katalysatoren (5%)		
<i>Kokskohle</i>	Reduktionsmittel und Energieträger bei der Eisen- und Stahlproduktion	0	0
<i>Lithium</i>	Herstellung von Batterien (31%)	1	0
	Produktion von Schmierfetten (12%)		
	Keramik- und Glasindustrie (10%)		
	Herstellung von Polymeren (9%)		
	Aluminiumherstellung (6%)		
	Pharmazeutische Industrie (5%)		
<i>Magnesium</i>	Aluminium-Magnesium-Legierungen (35%)	0	0
	Druckguss (33%)		
	Entschwefelungs-, Desoxidations- und Zusatzstoff in der Stahl- und Gusseisen-erzeugung (10%)		
	Produktion von Feuerfestmaterialien (10%)		
<i>Naturkautschuk</i>	Reifenindustrie	0	0
	Dichtungen, Dämpfungen		
	Gummi-Metall-Verbindungen		
<i>Natürlicher Grafit</i>	Schmelztiegelherstellung	1	1
	Schmier- und Trennmittel		
	Bremsbeläge		
	Katalysatoren		
<i>Niob</i>	Stahlveredler (Edelstähle)	1	0
	Legierungen		
	Superlegierungen (Flugzeugturbinen)		
	Elektrolytkondensatoren		

Material	Anwendungsgebiete	Relevanz für Cloud-Computing	Verknappung durch Cloud-Computing
	Katalysator		
<i>Phosphor</i>	Dünge-, Nahrungs- und Futtermittel in der Landwirtschaft	1	0
	Reinigungs-, Korrosionsschutz- und Flammschutzmittel		
<i>Scandium</i>	Hochleistungs-Hochdruck-Quecksilberdampflampen	2	0
	Laserkristalle		
	Legierungszusatz		
	Halbleitermaterial für leistungselektronische Bauteile (Aluminiumscandiumnitrid)		
<i>Silizium</i>	Herstellung von Halbleitern, Mikrochips und Solarzellen	3	2
	Veredlung von Aluminium und Stahl		
	Herstellung von Dichtungsmaterialien, Lacken und Farben sowie Silikon		
<i>Strontium</i>	Kathodenstrahlröhren	0	0
	Dauermagnete		
	Pyrotechnik		
<i>Tantal</i>	Kondensatoren (40%)	1	1
	Superlegierungen (21%)		
	Walzprodukte (11%)		
	Herstellung karbidhaltiger Werkzeuge und Schneidstähle (10%)		
	chemische Industrie (6%)		
<i>Titan</i>	Stahl, Legierungen, Superlegierungen in Luft- und Raumfahrt	1	0
	medizinische Implantate		
	miniaturisierte Kondensatoren		
	Superlegierungen		

Material	Anwendungsgebiete	Relevanz für Cloud-Computing	Verknappung durch Cloud-Computing
<i>Vanadium</i>	Legierung von Stählen (91%)	0	0
	Nichteisenlegierungen sowie Herstellung von Batterien (9%)		
<i>Wolfram</i>	Herstellung von Hartmetallen (61%)	0	0
	Herstellung von Superlegierungen und Stählen (21%)		
	Halbzeuge für die elektronische und Beleuchtungsindustrie (11%)		
	chemische Industrie (7%)		
<i>Metalle der Platingruppe</i>	Elektrotechnik, Elektronik	2	1
	Katalysatoren		
	Medizintechnik		
<i>Leichte und Schwere Seltene Erden</i>	Katalysatoren für Automobile (25%)	1	0
	Katalysatoren für Erdölraffinerien (22%)		
	Legierungen und Additive für die Stahlindustrie (20%)		
	Poliermittel für Glas und Keramik (11%)		
	Leuchtstoffe (10%)		
	Permanentmagnete (3%)		
	Laser (3%)		